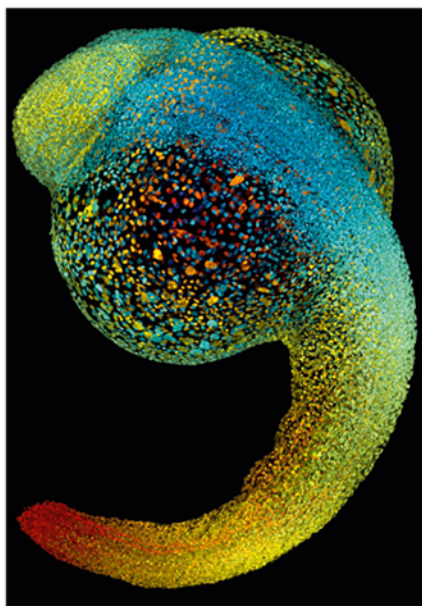


Bettina Papenburg
Vitalitätseffekte
Erkenntnis und
Affekt in der
Medienkultur der
Zellbiologie



campus

Vitalitätseffekte

Bettina Papenburg, PD Dr. phil. habil., ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Medienkulturwissenschaft der Universität Freiburg.

Orcid-ID: 0009-0009-0854-3484 (<https://orcid.org/0009-0009-0854-3484>)

Bettina Papenburg

Vitalitätseffekte

Erkenntnis und Affekt in der Medienkultur
der Zellbiologie

Campus Verlag
Frankfurt/New York

Die Open-Access-Publikation wurde aus dem Publikationsfonds der Universität Freiburg gefördert.

Die Druckfassung entstand mit freundlicher Unterstützung der Wissenschaftlichen Gesellschaft Freiburg im Breisgau.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Der Text dieser Publikation wird unter der Lizenz »Creative Commons Namensnennung 4.0 International« (CC BY 4.0) veröffentlicht. Den vollständigen Lizenztext finden Sie unter:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>



Verwertung, die den Rahmen der CC BY 4.0 Lizenz überschreitet, ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig.

Die in diesem Werk enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Quellenangabe/Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

ISBN 978-3-593-51731-5 Print

ISBN 978-3-593-45435-1 E-Book (PDF)

DOI 10.12907/978-3-593-45435-1

Copyright © 2023 Campus Verlag GmbH, Frankfurt am Main.

Umschlaggestaltung: Campus Verlag GmbH, Frankfurt am Main

Umschlagmotiv: © Philipp Keller/HHMI Janelia Research Campus

Satz: le-tex xerif

Gesetzt aus der Alegreya

Druck und Bindung: Beltz Grafische Betriebe GmbH, Bad Langensalza

Beltz Grafische Betriebe ist ein klimaneutrales Unternehmen (ID 15985–2104-1001).

Printed in Germany

www.campus.de

Inhalt

| | |
|---|----|
| Einleitung | 7 |
| Zur Molekularisierung und Informatisierung zellbiologischen Wissens | 11 |
| Das epistemische Bild als Kristallisationspunkt des Dialogs zwischen Geistes-, Sozial- und Naturwissenschaften | 17 |
| Vorgehensweise und Forschungsgegenstand | 26 |
| Aufbau des Buches | 30 |
| | |
| Datenpraktiken: Lebendzellmikroskopie als Medientechnik | |
| 1. Mikroskopie unter Computerbedingungen | 37 |
| 1.1 Die Analog/Digital-Umwandlung in der computergestützten Mikroskopie | 41 |
| 1.2 Die Selbstaufzeichnung der Natur am Computer | 56 |
| 2. Der Weltbezug des digitalen Datenbildes | 69 |
| 2.1 Das Referenzproblem aus medienwissenschaftlicher und bioinformatischer Perspektive | 72 |
| 2.2 Darstellungskonventionen, Bildgestaltung, Datensätze | 83 |
| 2.3 Zum Weltbezug des computergenerierten Bildmodells | 95 |

Medienästhetik der Mikroskopie: Theorie und Geschichte der mikroskopischen Wahrnehmung

| | |
|--|-----|
| Perspektivwechsel | 125 |
| 3. Daten-Sehen: Mikroskopisches Sehen als Anschauung und Interpretation | 137 |
| 3.1 Modelle des Sehens | 143 |
| 3.2 Modalitäten des mikroskopischen Sehens | 156 |
| 3.3 Daten-Sehen | 165 |
| 3.4 Komparative Betrachtung der Modalitäten des mikroskopischen Sehens | 181 |
| 4. Der affektive Surplus mikroskopischer Bildwelten | 185 |
| 4.1 Affektrhetorik: Akzentuierung der affektiven Wirkung mikroskopischer Bildwelten in verbalen und visuellen Darstellungsformen | 186 |
| 4.2 Affizierungstechniken: Mikrokinematografie als Forschungsmedium und »Cinema of Attractions« | 212 |
| 5. Die ästhetische Erfahrung des Lebendzellfilms | 231 |
| 5.1 Zur Wirkungsästhetik des Bewegtbildes | 233 |
| 5.2 Belebung und Betäubung in Affekttheorie und Einfühlungsästhetik | 236 |
| 5.3 Reflexivität der Beobachtung | 252 |
| Schlussbemerkungen | 269 |
| Dank | 273 |
| Abbildungen | 277 |
| Literatur und Medien | 279 |

Einleitung

Digitale Bilder werden heutzutage nicht nur zu Unterhaltungs-, Werbe- und Erbauungszwecken hergestellt und nicht allein in Kontexten, die als unterhaltend, kommerziell oder ästhetisch gerahmt sind, verbreitet und rezipiert. Im Kontext naturwissenschaftlicher Forschung kommt digitalen Bildern eine bedeutsame Rolle als Erkenntnismedien zu. Disziplinen wie Medizin, Physiologie, Biologie, Astrophysik oder Klimaforschung sind für die Erkenntnisgewinnung auf Bilder angewiesen. Bereits in der Vergangenheit nahmen bildliche Darstellungen in naturwissenschaftlichen Fächern eine ungleich wichtigere Rolle ein als in den Geistes- und Sozialwissenschaften. Seit ungefähr drei Jahrzehnten haben zusätzlich bildgebende Verfahren¹ in vielen naturwissenschaftlichen Anwendungsgebieten eminente Bedeutung erlangt und verleihen bildbasiertem Wissen nochmals wachsende Relevanz.

Diese dezidiert bildliche Orientierung der naturwissenschaftlichen Wissenspraxis verlangt nach einer medienästhetischen Analyse, um die naturwissenschaftlichen Bildgebungspraktiken in einen übergreifenden theoretischen und diskursiven Zusammenhang stellen zu können, die erzeugten Bilder in einer umfassenderen Bildkultur zu verankern und sie auf ihre ästhetische Spezifik hin zu befragen. Die Reflexion der Bildgestaltung und Bildwahrnehmung, die von ästhetischen Theorien geleitet wird, die Reflexion

¹ Mit dem Begriff der digitalen Bildgebung wird im Kontext dieses Buches sowohl jener Prozess bezeichnet, in dem Messdaten automatisch von einer Software in visuelle und diagrammatische Darstellungsformen umgewandelt werden, als auch die algorithmische Weiterverarbeitung der Messdaten gefasst, die darauf abzielt, relevante Muster herauszuheben. Der Prozess der Datenerhebung und Datenauswertung wird im ersten und zweiten Kapitel beschrieben und diskutiert. Insbesondere die algorithmische Weiterverarbeitung von Messdaten in Form von digitalen Bildmodellen, ein Prozess, der »digitale Rekonstruktion« genannt wird, ist Thema des zweiten Kapitels.

des Verhältnisses zwischen Darstellung und Dargestelltem, die von der Semiotik angeführt wird, und die hermeneutische Interpretation² der kulturellen Bedeutung von Bildern basierend auf der Analyse von Bild-Text-Verhältnissen zählen diesbezüglich zu den Kernkompetenzen der kulturwissenschaftlich ausgerichteten Medienwissenschaft³.

Die unter dem Begriff der bildgebenden Verfahren zusammengefassten Techniken umgreifen zum Beispiel Methoden aus der angewandten Medizin wie die Röntgentechnik, die Magnetresonanztomografie, die Positronenemissionstomografie und die virtuelle Endoskopie oder auch weniger bekannte Methoden wie die Röntgenkristallografie oder die Photogrammetrie. Zwei Techniken greift dieses Buch beispielgebend auf: die konfokale Fluoreszenzmikroskopie, wie sie gegenwärtig zur Vermessung und Visualisierung der innerzellulären molekularen Dynamik angewendet wird, und die Lichtblattfluoreszenzmikroskopie, wie sie aktuell zur Erforschung embryonaler Entwicklungsprozesse eingesetzt wird. Diese beiden bildgebenden Verfahren sollen im Folgenden als Medientechniken analysiert werden.⁴

2 Die Hermeneutik reflektiert das Verhältnis zwischen den Geistes- und Naturwissenschaften eingehend. Siehe etwa Wilhelm Dilthey, »Die Geisteswissenschaften ein selbständiges Ganze [sic], neben den Naturwissenschaften« und »Das Verhältnis dieses Ganzen zu dem der Naturwissenschaften«, in *Einleitung in die Geisteswissenschaften: Versuch einer Grundlegung für das Studium der Gesellschaft und Geschichte* [1883], *Gesammelte Schriften*, erster Band, 5. unveränderte Auflage, 4–14 und 14–21 (Stuttgart: Teubner, 1962). Zur Kunsterfahrung und zur hermeneutischen Methode des Verstehens siehe Hans-Georg Gadamer, *Wahrheit und Methode: Grundzüge einer philosophischen Hermeneutik*, *Gesammelte Werke*, Band 1: *Hermeneutik*, 7. durchgesehene Auflage (Tübingen: Mohr Siebeck, 2010), insbesondere den ersten Teil, »Freilegung der Wahrheitsfrage an der Kunst«, 8–174, und den zweiten Teil, »Ausweitung der Wahrheitsfrage auf das Verstehen in den Geisteswissenschaften«, 175–384.

3 Ich arbeite mit einem mehrdimensionalen Medienbegriff, der sich dezidiert von ontologischen und ahistorischen Definitionen abgrenzt und historische Einzelfallstudien einfordert, die sowohl technische als auch ästhetische Aspekte miteinbeziehen. Einen solchen Medienbegriff formulierten der Literatur-, Kultur- und Medienwissenschaftler Joseph Vogl und der Medienwissenschaftler und -philosoph Lorenz Engell im Jahr 1999, als sie die These aufstellten, »dass es keine Medien gibt, keine Medien jedenfalls in einem substantziellen und historisch stabilen Sinn. Medien sind nicht auf Repräsentationsformen wie Theater und Film, nicht auf Techniken wie Buchdruck oder Fernmeldewesen, nicht auf Symboliken wie Schrift, Bild oder Zahl reduzierbar und doch in all dem virulent.« Lorenz Engell und Joseph Vogl, »Vorwort«, in *Kursbuch Medienkultur: Die maßgeblichen Theorien von Brecht bis Baudrillard*, Hg. Claus Pias et al. (Stuttgart: DVA, 1999), 10.

4 Das vorliegende Buch konzentriert sich auf diese zwei Bildtechniken, da die zentrale These anhand der Analyse der Herstellungsweisen und Rezeptionsmodalitäten der daraus resultierenden Bildsorten stichhaltig untermauert werden kann.

Die vorgenommene Betrachtung hinterfragt dabei die medientheoretische Leitdifferenz zwischen ›analog‹ und ›digital‹ und interveniert in den existierenden medientheoretischen Diskurs um diese Kardinalunterscheidung. Ein Ziel der Analyse von Mikroskopietechniken als Medientechniken besteht darin, eine Antwort auf die Frage nach dem Weltbezug des digitalen Bildes zu formulieren, die dessen indexikalische Referenz aus einem kleinschrittigen Umwandlungsprozess und einer streng kontrollierten Kontextualisierung herleitet. Auf diese Weise leistet das vorliegende Buch nebenbei einen impliziten Beitrag zur Indexikalitätsdebatte, die in der Medienwissenschaft, der Filmwissenschaft und der Kunstgeschichte seit den frühen 1990er-Jahren geführt wird und die um die Frage kreist, ob digitale Bilder einen physischen Bezug zur Wirklichkeit aufweisen, und wenn ja, welche Kriterien dafür entscheidend sind.

Die beiden oben genannten bildgebenden Verfahren, die dieses Buch behandeln wird und die unter dem Begriff der Lebendzellmikroskopie (*live-cell imaging*) zusammengefasst werden, erlauben es, Zellen, Organellen und Proteine, deren Strukturen bis in die 1980er-Jahre überwiegend mittels statischer bildgebender Verfahren wie etwa der Elektronenmikroskopie erforscht wurden, im Ausgang vom lebenden Objekt als dynamische Formationen in drei und vier Dimensionen zu erkunden, das heißt anhand zeitlich verdichteter filmischer Visualisierungen, die bisweilen mithilfe computergestützter Prozessierungsverfahren zu bewegten räumlichen Modellen umgestaltet werden. Für die medienästhetische Betrachtung erweist sich dabei als ausschlaggebend, dass von den mithilfe der Lebendzellmikroskopie erzeugten Visualisierungen ein affektiver Überschuss ausgeht, der sich unter anderem daraus ergibt, dass diese Bewegung vermitteln, wodurch die Lebendigkeit der untersuchten Zellen anschaulich wird. Dieser Eindruck darf allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, dass die anschaulichen bildlichen Darstellungsformen ihren Ausgang in Messdaten nehmen, welche ihrerseits die objektivierbare Grundlage der Bildinterpretation bilden, und dass die Visualisierungen einen fachlich geschulten Wahrnehmungsmodus einfordern, der nicht allein die Bilder zu deuten, sondern darüber hinaus auch die Messdaten auszuwerten vermag.

Daraus folgt die für das vorliegende Buch forschungsleitende Fragestellung: Welche epistemologischen und ästhetischen Konsequenzen ergeben sich aus der spezifischen technischen Verfasstheit der bildgebenden Verfahren der gegenwärtigen Zellbiologie? Zugespitzt als leitende Hypothese des vorliegenden Buches formuliert, lautet meine Antwort auf diese Frage: Die

fachlich geschulte, auf die Erkenntnisgewinnung ausgerichtete Wahrnehmung und die affektive Beteiligung an den Filmen, die den Gegenstand der Wahrnehmung bilden, verhalten sich nicht konträr zueinander, sondern bereichern und erweitern einander gegenseitig und erzeugen so eine Wechselwirkung, die Beobachtende dazu veranlasst, ihre Einbindung in die mediale Gesamtanordnung zu reflektieren und die Sensibilitäten der lebenden Systeme, die sie erforschen, auf ihre eigene Lebendigkeit und Sterblichkeit reflexiv zurückzubeziehen. Diesen Reflexionsprozess leiten die »Vitalitätseffekte«, die von dem Bewegtbild ausgehen und die der Titel des vorliegenden Buch andeutet, ein. Damit ist die formale Eigenschaft des Bewegtbildes gemeint, die, unabhängig vom dargestellten Phänomen, darin besteht, die Betrachtenden innerlich zu ergreifen und vermöge dieser affektiven Beteiligung einen Reflexionsprozess über Lebendigkeit und Endlichkeit anzuregen.

Wie dieses Buch zeigen wird, liegen Affekt und Kognition nicht so weit auseinander wie manche Affektforscher*innen⁵ behaupten.⁶ Hier soll aber auch die mit einem mechanistischen Objektivitätsideal verknüpfte Annahme überprüft werden, die naturwissenschaftliche Praxis vollziehe sich in einem subjektivitätslosen und affektfreien Raum. Das umfassendere Ziel dabei ist es zu demonstrieren, wie eine differenzierte Betrachtungsweise der Medienkultur der Zellbiologie jene Momente eines naturwissenschaftlichen Selbst- und Weltverständnisses herauszuheben vermag, die sich im Technikdiskurs des Fachs eher im Hintergrund halten. Den affektiven Überschuss, der von den Visualisierungen von Zellen und Molekülen ausgeht, zu erkun-

5 Aus den vielen derzeit in der Verhandlung und im Gebrauch befindlichen Schreibweisen, die auf die Etablierung einer geschlechtersensiblen und geschlechtergerechten Sprache abzielen, wähle ich die Verwendung des Asterisk aus, da diese Schreibweise die maximale sprachliche Inklusion aller Geschlechter zum Ausdruck bringt. An denjenigen Textstellen, an denen auf Originaltexte Bezug genommen wird, die das generische Maskulinum verwenden, wurde diese grammatikalische Form beibehalten, um nicht darüber hinwegzutäuschen, dass den Autoren dieser Texte eine geschlechtersensible Sprache nicht geläufig war. Die männliche Form wird ebenfalls an denjenigen Textstellen verwendet, an denen zum Ausdruck gebracht werden soll, dass es sich um ausschließende soziale Formationen handelt.

6 Siehe die Kritik der US-amerikanischen Wissenschaftshistorikerin Ruth Leys zur Trennung von Kognition und Affekt in der psychologischen und neurowissenschaftlichen Diskussion im Anschluss an Silvan Tomkins und in der prozessphilosophischen Tradition nach Gilles Deleuze und Brian Massumi: Ruth Leys, »The Turn to Affect: A Critique«, *Critical Inquiry* 37, Nr. 3 (Frühling 2011). Siehe ausführlicher Ruth Leys, *The Ascent of Affect: Genealogy and Critique* (Chicago: University of Chicago Press, 2017).

den, kann der Komplexität naturwissenschaftlicher Praxis mithin eine weitere Dimension hinzuzufügen.

Zur Molekularisierung und Informatisierung zellbiologischen Wissens

Die Wissenschaftsgeschichte der Zellbiologie und angrenzender Disziplinen erforscht die Herstellungsweisen von Wissen und Wissensobjekten in ihren jeweiligen experimentellen und historischen Kontexten und semantischen Bezugsrahmen.⁷ Die Zellbiologie wird bereits seit den 1930er-Jahren als eine Molekularbiologie der Zelle betrieben, die bei der Genetik und der Biochemie maßgebliche theoretische Anleihen nimmt und für ihre experimentelle Praxis auf Techniken angewiesen ist, die sie der Biophysik und der Bioinformatik entlehnt.⁸ Diese Ausrichtung des Fachs, in dem sich bereits die Idee einer Informatik lebender Systeme andeutet, bringt der französische Molekularbiologe und Nobelpreisträger François Jacob⁹ (1920–2013) im Jahr 1970 in seiner Darstellung der Geschichte der Biologie wie folgt auf den Punkt: »Heute interessiert sich die Biologie für die Algorithmen der lebenden Welt.«¹⁰

7 Zur Geschichte der Zellbiologie siehe Hannah Landecker, *Culturing Life: How Cells Became Technologies* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 2007).

8 Zur Geschichte der Molekularbiologie siehe Lily E. Kay, *The Molecular Vision of Life: Caltech, the Rockefeller Foundation, and the Rise of the New Biology* (Oxford: Oxford University Press, 1993) und Hans-Jörg Rheinberger, *Experimentalsysteme und epistemische Dinge: Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas* [i.O. 1997], aus dem Englischen übersetzt von Gerhard Herrgott (Göttingen: Wallstein-Verlag, 2001); zur Geschichte der Genetik und Embryologie siehe Evelyn Fox Keller, *Refiguring Life: Metaphors of Twentieth-Century Biology* (New York: Columbia University Press, 1995); zur Geschichte mathematischer Ansätze in der Entwicklungsbiologie siehe Evelyn Fox Keller, *Making Sense of Life: Explaining Biological Development with Models, Metaphors, and Machines* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 2002).

9 Jacob war in der molekularbiologischen Arbeitsgruppe am Institut Pasteur in Paris gemeinsam mit dem Mikrobiologen und Biochemiker Jacques Monod (1910–1976) tätig. Jacob und Monod erhielten zusammen mit dem französischen Molekularbiologen und Virologen André Lwoff (1902–1994) im Jahr 1965 den Nobelpreis für Medizin für ihre Arbeiten zur Genregulation bei der Synthese von Enzymen und Viren. Siehe »The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1965«, The Nobel Prize, zuletzt geprüft: 8. Oktober 2021, <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1965/summary/>.

10 François Jacob, *Die Logik des Lebenden: Von der Urzeugung zum genetischen Code* [i.O. 1970], aus dem Französischen übersetzt von Jutta und Klaus Scherrer (Frankfurt am Main: Fischer, 1972), 319.

Die daraus folgende Molekularisierung und Informatisierung zellbiologischen Wissens lässt sich ablesen an Rahmen, Umfang und Gewichtung zellbiologischer Hand- und Lehrbücher. Seit den frühen 1980er-Jahren treten Standardwerke, die die Zellbiologie ausgehend von molekularbiologischen Grundsätzen erklären, zu jenen Hand- und Lehrbüchern hinzu, die sich auf die Strukturen und Funktionen einzelner Organellen konzentrieren. Das auf die Initiative des US-amerikanischen Molekularbiologen James Watson¹¹ zurückgehende¹² internationale Standardwerk der Zellbiologie, *Molecular Biology of the Cell* erscheint seit 1983 und ging im Jahr 2015 in die sechste Auflage¹³. Zwei von fünf Teilabschnitte des Lehrbuchs widmen sich der Genetik und der Biochemie; ein weiterer Teilabschnitt behandelt Visualisierungs- und Analyseverfahren. Ein weiteres internationales Standardwerk, das Lehrbuch *Karp's Cell and Molecular Biology: Concepts and Experiments*, erstmals aufgelegt im Jahr 1996, in achter Auflage im Jahr 2016 erschienen, befasst sich neben den Gebieten der Energiegewinnung, des Zellstoffwechsels, der Immunantwort und der Signalübertragung zwischen Zellen ausführlich mit den chemischen Grundlagen des Lebens und der Genexpression.¹⁴ Im Unterschied dazu adressiert etwa das Lehrbuch *Zellbiologie* die molekulare Dynamik innerhalb der Zelle lediglich als einen unter vielen anderen Punkten.¹⁵

Die Formulierung der Zellentheorie datiert auf die späten 1830er-Jahre. Damit liegt sie historisch vor der Fokussierung auf die Chromosomen und Gene, auf die sich das Interesse der Biologie ab dem Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts richtete und zu der ab Mitte des zwanzigsten Jahrhun-

Siehe dazu auch ebd., 17. Dort heißt es: »Das Programm [der modernen Biologie – B.P.] ist ein den elektronischen Rechenmaschinen entlehntes Modell. Es stellt das genetische Material im Ei dem magnetischen Band eines Computers gleich.«

11 James Watson veröffentlichte im Jahr 1953 zusammen mit dem britischen Molekularbiologen und Biophysiker Francis Crick in der Zeitschrift *Nature* einen Fachartikel, in dem sie die Doppelhelixstruktur des Desoxyribonukleinsäuremoleküls darlegten. Siehe James D. Watson und Francis H.C. Crick, »Molecular Structure of Nucleic Acids«, *Nature* 171 (1953).

12 Siehe Bruce Alberts, »Molecular Biology of the Cell«, zuletzt geändert am 12. September 2016, <https://brucealberts.ucsf.edu/current-projects/molecular-biology-of-the-cell/>.

13 Siehe Bruce Alberts et al., *Molecular Biology of the Cell*, 6. Auflage (New York: Garland Science, 2015).

14 Siehe Gerald Karp, Janet Iwasa und Wallace Marshall, *Karp's Cell and Molecular Biology: Concepts and Experiments*, 8. Auflage (New York: Wiley, 2016).

15 Siehe Helmut Plattner und Joachim Hentschel (Hg.), *Zellbiologie* [1997], 5. überarbeitete Auflage (Stuttgart: Thieme, 2017). Als eines der ersten zellbiologischen Lehrbücher gilt Edmund Vincent Cowdry (Hg.), *General Cytology: A Textbook of Cellular Structure and Function for Students of Biology and Medicine* [1924] (Chicago: The University of Chicago Press, 2014).

derts die Konzentration auf das Ribonukleinsäuremolekül hinzutrat.¹⁶ Die entscheidende konzeptuelle Neuerung, die die Zellentheorie herbeiführte – Jacob bezieht sich hier auf die wegweisenden Arbeiten des Botanikers Matthias Schleiden¹⁷ (1804–1881) und des Anatomen und Physiologen Theodor Schwann¹⁸ (1810–1882) aus den Jahren 1838 und 1839 –, besteht in der Ausweitung der Perspektive auf »die Analyse der Organisation« der »Feinstruktur der Lebewesen«¹⁹. Ging es der Zoologie im achtzehnten Jahrhundert noch darum, die »Makroorganisation« von Lebewesen zu erforschen und die hinter den verschiedenen Bauplänen der Organe liegenden Strukturen zu erkennen, so zielten Zoologie und Botanik im neunzehnten Jahrhundert auf die »Mikroorganisation«,

»die unabhängig von der Verschiedenartigkeit der Formen der Substanz eines jeden Wesens einen besonderen Charakter zukommen läßt, ein Gefüge, eine Vielzahl von Eigenschaften, die den anorganischen Körpern abgehen«²⁰.

Bemerkenswert an dieser Formulierung ist, dass Jacob hier den Vergleich zwischen organischen Körpern und anorganischen Körpern anstellt. In seiner Darstellung der Zellentheorie taucht dieser Vergleich zwischen dem Belebten und dem Unbelebten wiederholt auf, vor allem im Rahmen der Abgrenzung zum Vitalismus, die Jacob in seinen Ausführungen verschiedentlich vornimmt.²¹ Die Einsicht der Zellentheorie, »daß in jeder Zelle die Moleküle so angeordnet sind, daß diese dadurch befähigt wird, andere Moleküle aufzunehmen und aus eigener Kraft zu wachsen«, laufe der vitalistischen Annahme zuwider, dass »das Leben auf dem Gesamtorganismus beruhe[...] und nicht auf diesem oder jenem Organ, Teil oder Molekül«²². Jacob leitet folglich seine Absage an den Vitalismus aus der Erkenntnis der molekularen Bestandteile der Zelle her. Im Schlusskapitel verleiht er der Absage Nachdruck, wenn er schreibt: »Im Augenblick, wo die Einheit der physikalisch-chemischen Prozesse auf molekularer Ebene anerkannt wird, verliert

16 Siehe Jacob, *Die Logik des Lebenden*, 25.

17 Siehe Matthias Schleiden, »Beiträge zur Phytogenesis«, in *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin* (1838).

18 Siehe Theodor Schwann, *Mikroskopische Untersuchungen über die Übereinstimmung in der Struktur und dem Wachsthum der Thiere und Pflanzen* (Berlin: Verlag der Sander'schen Buchhandlung, 1839).

19 Jacob, *Die Logik des Lebenden*, 123.

20 Ebd.

21 Siehe ebd., 129–130 und 140.

22 Ebd., 130.

der Vitalismus jede Bedeutung.«²³ Es ginge in der Biologie im Jahr 1970 mit- hin auch nicht mehr darum, das Leben zu erforschen²⁴: »Man bemüht sich lediglich Struktur, Funktion und Geschichte der *lebenden Systeme* zu analy- sieren.«²⁵

Dass der Vitalismus im achtzehnten Jahrhundert und erneut zu Be- ginn des zwanzigsten Jahrhunderts zum antithetischen Gegenüber einer mechanistisch ausgerichteten Biologie stilisiert wurde, von dem sich diese dezidiert abgrenzte, ist vielfach aufgewiesen worden.²⁶ Dass der Streit zwischen Vitalismus und Mechanismus im zwanzigsten Jahrhundert kei- neswegs abebbte, zeigt sich an den Ausführungen Jacobs sowie an der Formulierung des deutschen Physikers und Philosophen Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007), der in seinem Vorwort zur deutschen Erstausgabe von *Logik des Lebenden* in dieser Dichotomie die »am stärksten affektbesetzte Streitfrage« sieht, die sich aus den Erkenntnissen der Molekularbiologie in den 1960er-Jahren ergab. Weizsäcker fragt weiter:

»Gibt es Leben als ein besonderes Phänomen oberhalb der bloßen Materie? Verschmilzt die Biologie heute mit Physik und Chemie, und wenn ja, beweist dies, daß das Leben ›nichts anderes‹ ist als ein Zufallsprodukt im Spiel der Moleküle?«²⁷

23 Ebd., 318. Siehe dazu auch ebd., 14–15.

24 Ebd.

25 Ebd., Hervorhebung B.P.

26 Siehe etwa Georges Canguilhem, »Aspekte des Vitalismus« [1946], in *Die Erkenntnis des Lebenden* [i.O. 1965], aus dem Französischen übersetzt von Till Bardoux, Maria Muhle und Francesca Rai- mondi, 149–181 (Berlin: August Verlag, 2009). Canguilhem befasste sich im genannten Vortrag mit der Frage nach der anhaltenden Vitalität des Vitalismus. Siehe dazu auch den neueren Kom- mentar von Monica Greco, »On the Vitality of Vitalism«, in *Inventive Life: Approaches to the New Vi- talism*, Hg. Mariam Fraser, Sarah Kember und Celia Lury (London: Sage, 2006). Zur Geschichte des Vitalismus siehe auch Robert Mitchell, *Experimental Life: Vitalism in Romantic Science and Liter- ature* (Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2013), 2. Für eine kritische Neubewertung von Canguilhems historischer Epistemologie und seinen Überlegungen zum Verhältnis von Biologie und Technologie im Lichte der feministischen Wissenschafts- und Technikforschung und mit Blick auf die Relevanz für die Medien- und Kulturwissenschaft siehe Astrid Deuber-Mankowsky, »Kritik des Anthropozentrismus und die Politik des Lebens bei Canguilhem und Haraway«, in *Situiertes Wissen und Regionale Epistemologie: Zur Aktualität Georges Canguilhems und Donna J. Hara- ways*, Hg. dies. und Christoph F.E. Holzhey (Wien und Berlin: Turia und Kant, 2013), und Marie- Luise Angerer, »Die ›Biomediale Schwelle‹: Medientechnologien und Affekt«, in *Situiertes Wissen und Regionale Epistemologie*.

27 Carl Friedrich von Weizsäcker, »Vorwort« zu *Die Logik des Lebenden* von François Jacob, 5.

Damit spricht Weizsäcker die Schlüsselfrage an, an der sich die Debatte zu Vitalismus und Mechanismus in der Vergangenheit entzündete und die heutzutage noch immer als eine offene Frage zur Diskussion steht.

Der seit der Etablierung der Molekularbiologie erneut erstarkten und mit der Bündelung von Forschungsaktivitäten im Humangenomprojekt im ausgehenden zwanzigsten Jahrhundert noch immer sehr prominenten mechanistischen Programmatik und der damit einhergehenden Zurückweisung des vitalistischen Ansatzes setzten der US-amerikanische Zellbiologe Marc Kirschner und seine Ko-Autoren im Jahr 2000, dem Jahr der Entschlüsselung des menschlichen Genoms, eine Position entgegen, die den Vitalismus wiederbelebt. Ausgehend von der Diskussion damals aktueller Beispiele aus der Molekularbiologie, der Zellbiologie und der Embryologie befragten die Autoren die Maschinenanalogie, der die Fokussierung auf das Genom und die chemischen Prozesse in der Zelle in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts erneut zur Vorherrschaft verhalf, und postulierten in Abgrenzung von diesem mechanistischen Modell einen »molekularen Vitalismus« (»molecular vitalism«)²⁸, den sie aus der Belastbarkeit – die Autoren sprechen von »robustness«²⁹ – von selbstorganisierenden lebenden Systemen herleiten³⁰.

Die US-amerikanische Wissenschaftshistorikerin Hannah Landecker hat diesen Hinweis aufgegriffen und bindet die Idee eines »molekularen Vitalismus« an die Visualisierungstechnik der Lebendzellmikroskopie (*live-cell imaging*), die es erlaubt, die Bewegungen von Molekülen im Zellinneren als einen kontinuierlichen Ablauf aufzuzeichnen und auf diese Weise Lebensprozesse anschaulich zu machen. Landecker argumentiert, »live-cell imaging was at its origins an animation of a theory of life dominated by the gene«³¹.

Der auf die Säuglingsforschung spezialisierte US-amerikanische Psychiater und Psychoanalytiker Daniel N. Stern (1934–2012) hat den Begriff der

28 Marc Kirschner, John Gerhart und Tim Mitchison, »Molecular ›Vitalism‹«, *Cell* 100 (7. Januar 2000): 79.

29 Ebd., 87.

30 Siehe ebd.

31 Hannah Landecker, »The Life of Movement: From Microcinematography to Live-Cell Imaging«, *Journal of Visual Culture* 11, Nr. 3 (2012): 378, <https://doi.org/10.1177/1470412912455622>. Der Aufsatz erwuchs aus Landeckers umfassender Forschung zur Laborkultur, die technische Formen zellulären Lebens hervorgebracht und den Begriff des »Biologischen« grundlegend verändert hat. Siehe Landecker, *Culturing Life*.

»Vitalitätsaffekte« (»vitality affects«)³² geprägt, um jene Erfahrungsqualitäten zu bezeichnen, die alle vitalen Prozesse begleiten³³. Damit meint Stern das Empfinden der eigenen Lebendigkeit, das aus der amodalen Wahrnehmung der Form, Bewegung und Anzahl, des Timings und der Intensität eines Gegenstands oder des Verhaltens eines Gegenübers hervorgehe³⁴ und das sich auch als Aktivierungs- oder Erregungslevel beschreiben ließe³⁵. Die Vitalitätsaffekte unterscheidet Stern von den »kategorischen Affekten« (»categorical affects«)³⁶ wie Wut, Freude oder Trauer. Vitalitätsaffekte definiert Stern als »those dynamic, kinetic qualities of feeling that distinguish animate from inanimate and that correspond to the momentary changes in feeling states involved in the organic processes of being alive«³⁷. Die Vitalitätsaffekte sind für ihn ein elementares Kennzeichen und somit Definitionsmerkmal lebendiger Strukturen. Sie verbürgten Stern zufolge in der kindlichen Entwicklung einen grundlegenden Einklang (»attunement«)³⁸ mit dem Gegenüber, eine affektive Bindung³⁹. Vitalitätsaffekte seien allerdings nicht an die Präsenz eines menschlichen Gegenübers gebunden, sondern gingen im Erwachsenenleben etwa auch aus der Kunsterfahrung hervor, vor allem aus der Begegnung mit den zeitbasierten Künsten wie der Musik und den Bewegungskünsten wie dem Tanz.⁴⁰ Zur adäquaten Beschreibung dieser Erfahrungsqualität schlägt Stern kinetische Begriffe vor, die Flüchtigkeit und Dynamik betonen, wie »surging«, »fading away«, »fleeting«, »explosive«, »cre-

32 Daniel N. Stern, *The Interpersonal World of the Infant: A View from Psychoanalysis and Developmental Psychology* [1985] (London: Karnac Books, 1998), 53–61.

33 Sterns Arbeiten wurden in der neurowissenschaftlichen Forschung zu den Spiegelneuronen und in der medienkulturwissenschaftlichen Forschung zur Einfühlungsästhetik rezipiert. Für die neurowissenschaftliche Rezeption siehe etwa Vittorio Gallese, »The Roots of Empathy: The Shared Manifold Hypothesis and the Neural Basis of Intersubjectivity«, *Psychopathology* 36 (2003): 175; für die medienkulturwissenschaftliche Rezeption siehe etwa Robin Curtis, »Einführung in die Einfühlung«, in *Einführung: Zu Geschichte und Gegenwart eines ästhetischen Konzepts*, Hg. dies. und Gertrud Koch, 11–30 (München: Fink, 2008), 15–17.

34 Siehe ebd., 53 und 159.

35 Siehe ebd., 57.

36 Ebd., 55–57. Stern führt die Identifikation der kategorischen Affekte auf den englischen Naturforscher und Biologen Charles Darwin (1809–1882) zurück. Er bezieht sich auf Charles Darwin, *The Expression of Emotions in Man and Animals* [1872] (Chicago: University of Chicago Press, 1965).

37 Ebd., 156.

38 Ebd., 156–157.

39 Siehe ebd., 157.

40 Siehe ebd., 56–57.

scendo«, »decrecendo«, »bursting« und »drawn out«⁴¹. Mit dem Hinweis auf die affektive Grundgestimmtheit, die im Erwachsenenalter als ein Effekt der ästhetischen Erfahrung der Dynamik sich bewegender – nicht allein menschlicher – Körper erlebt werde, gibt Stern einen ersten Anhaltspunkt dafür, wie die Ästhetik des Lebendzellularfilms bestimmt werden kann.

Das epistemische Bild als Kristallisationspunkt des Dialogs zwischen Geistes-, Sozial- und Naturwissenschaften

»The clashing point of two subjects, two disciplines, two cultures – of two galaxies, so far as that goes – ought to produce creative chances. In the history of mental activity that has been where some of the breakthroughs came. The chances are there now. But they are there, as it were, in a vacuum, because those in the two cultures can't talk to each other.«⁴²

In diesen Worten schilderte der Romanautor und Physiker Charles Percy Snow (1905–1980) in seinem damals vielbeachteten und bis heute vieldiskutierten *Rede Lecture*, den er am 7. Mai 1959 an der Universität Cambridge hielt, ein seines Erachtens grundlegendes gesellschaftliches Dilemma: Geisteswissenschaftler und Naturwissenschaftler tauschten sich nicht miteinander aus und versäumten dementsprechend die Gelegenheit, einige der gravierendsten Probleme der Menschheit zu lösen.⁴³ Snow zielte in seinem Vortrag darauf ab, zwingende Argumente für eine Reform des britischen

41 Ebd., 54.

42 C. P. Snow, *The Two Cultures* [1959], mit einer Einleitung von Stefan Collini, 15. Auflage (Cambridge, England: Cambridge University Press, 2012), 16.

43 Der Diskurs zu den zwei Kulturen differenzierte sich bereits Ende der 1980er-Jahre in die Rede von den »drei Kulturen« aus, womit die Geistes-, Sozial- und Naturwissenschaften gemeint sind. Siehe etwa Godfried van Benthum van den Berg, Maarten Cornelis Brands und Ernst Mulder (Hg.), *Three Cultures: Fifteen Lectures on the Confrontation of Academic Cultures* (Den Haag und Rotterdam: Universitaire Pers Rotterdam, 1989). Der Band enthält unter anderem Beiträge von dem Kunsthistoriker und Wahrnehmungspsychologen Ernst Gombrich, dem Historiker und Psychoanalytiker Peter Gay sowie der Physikerin und Wissenschaftshistorikerin Evelyn Fox Keller, das heißt von renommierten Forschenden, die in mehr als einer Wissenschaftssparte ausgewiesen waren oder es noch immer sind.

Bildungssystems darzulegen. Nachdruck verlieh er seiner Argumentation, indem er sie vor dem Hintergrund der Diagnose einer »Kluft gegenseitigen Nichtverstehens«⁴⁴ aufspannte, die sich zwischen den Wissenschaftssparten aufte. Verantwortlich für diesen Mangel an Kommunikation macht Snow tiefsitzende Vorurteile, die Angehörige der beiden »Kulturen« der jeweils anderen Gruppe gegenüber hegten⁴⁵, sowie das fehlende Verständnis für die Weltsicht und emotionale Grundhaltung der anderen Seite⁴⁶. Während Snow in seinem Vortrag zwar vornehmlich das Fehlen einer gemeinsamen Sprache beklagte, so formulierte er doch ebenfalls emphatisch das Desiderat eines schöpferischen Dialogs zwischen den Angehörigen der beiden Wissenschaftssparten.

Seit Snow vor mehr als 60 Jahren für den disziplinübergreifenden wissenschaftlichen Austausch und einen stärker auf interdisziplinäres Denken angelegten Zuschnitt der universitären Ausbildung plädierte, hat das dort von ihm angesprochene englische Bildungssystem mehrere Reformen durchlaufen. Doch nicht nur in England, sondern auch im deutschen Hochschulsystem hat sich seit den 1950er-Jahren Grundlegendes geändert.⁴⁷ Neben einer zunehmend internationalen Orientierung der Forschung und Lehre im deutschsprachigen Raum ist dabei besonders die deutliche Akzentuierung der interdisziplinären und bisweilen sogar spartenübergreifenden Verbundforschung⁴⁸ zu nennen. Auf der Ebene der Studierendenausbildung wurden zudem Studiengänge etabliert, die bereits im Kern interdisziplinär

44 C. P. Snow, *Die zwei Kulturen: Literarische und naturwissenschaftliche Intelligenz*, aus dem Englischen übersetzt von Grete und Karl-Eberhard Felten (Stuttgart: Klett, 1967), 12.

45 Ebd., 13 und 21.

46 Ebd., 18.

47 Mit Blick auf das intellektuelle Klima und die Konzeption der Studiengänge in der Bundesrepublik Deutschland in den 1960er- und 1970er-Jahren merkt der Wissenschaftshistoriker Michael Hagner an, »daß die dichotome Aufteilung des Feldes in Geistes- und Naturwissenschaften eher lähmend gewirkt hat«. Michael Hagner, »Ansichten der Wissenschaftsgeschichte«, in *Ansichten der Wissenschaftsgeschichte*, Hg. ders., (Frankfurt am Main: Fischer, 2001), 15.

48 Für das Themenfeld dieses Buches besonders relevant erweist sich etwa das seit 2019 geförderte DFG-Schwerpunktprogramm »Das digitale Bild« unter gemeinsamer Federführung der Ludwig-Maximilians-Universität München und der Philipps-Universität Marburg. Einige der unter diesem Schirm versammelten Projekte, etwa das Projekt »Browserkunst: Navigieren mit Stil« und das Projekt »Bildsynthese als Methode des kunsthistorischen Erkenntnisgewinns« bündeln Expertise aus der Kunstgeschichte und der Computerwissenschaft. Der Sonderforschungsbereich »Medien der Kooperation« an der Universität Siegen versammelt Forschende aus Gebieten wie Computergrafik, Wirtschaftsinformatik und Ethnologie unter der Federführung der Medienwissenschaft. Der Exzellenzcluster »Languages of Emotion« (Freie Universität Berlin, 2007–2014)

angelegt sind, wie etwa die kulturwissenschaftlich ausgerichtete Medienwissenschaft, die Gender Studies und die am angelsächsischen College-system orientierten Studiengänge in den Liberal Arts and Sciences, die Grundlagen in verschiedenen geistes-, sozial- und naturwissenschaftlichen Disziplinen vermitteln und die Fähigkeit befördern, verschiedene Zugänge zum Wissen kritisch zu reflektieren und zu bewerten.

In denjenigen geistes- und sozialwissenschaftlichen Disziplinen, die die Arbeitsweisen der Naturwissenschaften aus kulturwissenschaftlicher Perspektive reflektieren, existiert mittlerweile ein umfassendes Forschungskorpus zu den Bildkulturen der Naturwissenschaften. Die Kunstgeschichte befasst sich seit den frühen 1990er-Jahren verstärkt mit den Darstellungs- und Wahrnehmungstraditionen naturwissenschaftlicher Bilder und deren ästhetischem Gehalt⁴⁹ und untersucht das Verhältnis zwischen den Bildern der Kunst und den Bildern der Wissenschaft⁵⁰. Im deutschsprachigen Raum wurde diese Forschung besonders im Umfeld der an der Humboldt-Universität zu Berlin angesiedelten Forschungsstelle »Das Technische Bild« am Hermann von Helmholtz-Zentrum für Kulturtechnik seit 2000 vorangetrieben und zwischen 2012 und 2018 am dortigen Exzellenzcluster

fürte Kompetenzen aus Psychiatrie, affektiven Neurowissenschaften, Zoologie und digitaler Bildgebung mit geistes- und sozialwissenschaftlichem Fachwissen zusammen.

49 Siehe etwa Barbara Maria Stafford, *Body Criticism: Imagining the Unseen in Enlightenment Art and Medicine* [1991] (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1993); Martin Kemp, *The Nature Book of Art and Science* (Oxford: Oxford University Press, 2000); Elizabeth Kessler, *Picturing the Cosmos: Hubble Space Telescope Images and the Astronomical Sublime* (Minneapolis: The University of Minnesota Press, 2012).

50 Beispielhaft für den Diskurs, der die ästhetischen Dimensionen naturwissenschaftlicher Bilder hervorhebt und die Implikationen des ästhetischen Gehalts naturwissenschaftlicher Bilder beleuchtet, seien hier genannt: Caroline A. Jones und Peter Galison (Hg.), *Picturing Science, Producing Art* (New York: Routledge, 1998); Gottfried Boehm, »Zwischen Auge und Hand: Bilder als Instrumente der Erkenntnis«, in *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, Hg. Bettina Heinz und Jörg Huber (Zürich: Edition Voldemeyer, 2001); Gabriele Werner, »Bilddiskurse: Kritische Überlegungen zur Frage, ob es eine allgemeine Bildtheorie des naturwissenschaftlichen Bildes geben kann«, in *Das Technische Bild: Kompendium zu einer Stilgeschichte wissenschaftlicher Bilder*, Hg. Horst Bredekamp, Birgit Schneider und Vera Dünkel (Berlin: Akademie Verlag, 2008). Während Jones und Galison auf der kulturellen Einbettung wissenschaftlicher und künstlerischer Bilder beharren, sprechen sich Boehm und Werner deutlich für eine Unterscheidung zwischen diesen beiden Bildtypen aus. Siehe Caroline A. Jones und Peter Galison, »Introduction: Picturing Science, Producing Art«, in *Picturing Science, Producing Art*, 2. Als indikativ für das Interesse an den Wechselwirkungen zwischen Kunst und Wissenschaft kann die Gründung der Zeitschrift *Leonardo* (MIT Press) im Jahr 1999 gelten, deren Beiträge sich mit dieser Schnittstelle befassen.

»Interdisziplinäres Labor: Bild, Wissen, Gestaltung« vertieft.⁵¹ Die Verbindung interdisziplinärer Forschungsperspektiven, wie sie am Helmholtz-Zentrum erprobt wurde, gab auch den Impuls für

»Gründungen wie das einflussreiche Internationale Kolleg für Kulturtechnikforschung und Medienphilosophie (IKKM) an der Bauhaus-Universität Weimar (2008–2020) oder auch das Zentrum für digitale Kulturen (2012) an der Leuphana Universität.«⁵²

Die Kooperation der Kunstgeschichte und weiterer geisteswissenschaftlicher Fächer mit naturwissenschaftlich-technischen Disziplinen wird gegenwärtig im nachfolgenden Exzellenzcluster »Matters of Activity« (Laufzeit: 2019–2025) vertieft und um die designtheoretischen und künstlerischen Fächer ausgeweitet.

Das Interesse der Wissenschaftsgeschichte richtet sich auf das sich über die Jahrhunderte verändernde Selbstverständnis der Naturwissenschaften und den Wandel ihrer Begriffe und Erkenntnisideale, die beide eng mit der Herstellung wissenschaftlicher Bilder und der Bewertung von deren epistemischem Gehalt verbunden sind. Als wegweisend für das vorliegende Buch kann hier die Studie der US-amerikanischen Wissenschaftshistorikerin Lorraine Daston und des US-amerikanischen Wissenschaftshistorikers und Physikers Peter Galison zum Wandel des Objektivitätsbegriffs gelten.⁵³

51 Publikationen zu dem Forschungsschwerpunkt erscheinen seit 2003 in *Bildwelten des Wissens*, dem *Kunsthistorischen Jahrbuch für Bildkritik*. Für eine Skizze der Eckpunkte des Forschungsprogramms siehe *Bildwelten des Wissens*, »Interview: Bildunterschätzung – Bildüberschätzung. Ein Gespräch der ›Bildwelten des Wissens‹ mit Michael Hagner«, in *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 1, 1: *Bilder in Prozessen* (Berlin: Akademie Verlag, 2003) und Horst Bredekamp et al., »Bildbeschreibungen: Eine Stilgeschichte technischer Bilder? Ein Interview mit Horst Bredekamp«, in *Das Technische Bild*. Genauere Konturierungen der Position von Horst Bredekamp und der in der vorigen Fußnote referenzierten Positionen von Boehm und Werner, ihre Stellung zueinander und ihre Haltung gegenüber dem Diskurs, der in der US-amerikanischen Kunstgeschichte zum wissenschaftlichen Sehen geführt wird, sowie ein Hinweis zur Unterscheidung einer medienästhetischen Betrachtungsweise von den Diskursen der Kunstgeschichte im deutschsprachigen Raum finden sich in der Einleitung zum dritten Kapitel und in Kapitel 5.1.

52 Astrid Deuber-Mankowsky, »Gutachten über die Habilitationsschrift von Dr. Bettina Papenburg zum Thema Vitalitätseffekte: Erkenntnis und Affekt in der Medienkultur der Zellbiologie«, Ruhr-Universität Bochum, 17.03.2022, 2.

53 Siehe Lorraine Daston und Peter Galison, *Objectivity* (New York: Zone Books, 2007). Für weitere wegweisende Forschung zu naturwissenschaftlichen Visualisierungen aus der Perspektive der Wissenschaftsgeschichte und angrenzender Fächer siehe etwa Hans-Jörg Rheinberger, Michael Hagner und Bettina Wahrig-Schmidt (Hg.), *Räume des Wissens: Repräsentation, Codierung, Spur* (Berlin: Akademie Verlag, 1997); Martina Heßler (Hg.), *Konstruierte Sichtbarkeiten: Wissenschafts-*

Entscheidend für die im Folgenden geführte Diskussion zur Rolle, die bildlichen Darstellungsformen und technischen Instrumenten bei der Erkenntnisgewinnung zukommt, sind die Überlegungen, die der Liechtensteiner Philosoph, Wissenschaftshistoriker und Molekularbiologe Hans-Jörg Rheinberger zum Begriff der ›epistemischen Dinge‹ angestellt hat. Rheinberger, der die französische Tradition der Ideengeschichte, die historische Epistemologie, im Anschluss an Gaston Bachelard (1884–1962) und Georges Canguilhem (1904–1995) weiterführt, hat den Begriff der ›epistemischen Dinge‹ in den Diskurs eingeführt, womit er »das in der wissenschaftlichen Aktivität hervorgebrachte ›Wissenschaftswirkliche‹«⁵⁴ meint, das sich aus der Zusammenschau vielfältiger Darstellungsformen ergebe, jenem »Bündel von Spuren«⁵⁵ oder, wie Rheinberger an anderer Stelle sagt, jenen »formale[n] Sequenzen von Dingen, graphematische[n] Ketten von Ereignissen«⁵⁶, die im Labor erzeugt werden und unvermittelt unzugängliche Phänomene auf diese Weise der menschlichen Wahrnehmung zugänglich machen. Rheinberger bezeichnet das Labor daher auch als »privilegierte Schmiede epistemischer Dinge«⁵⁷.

Zu einer ähnlichen Einsicht gelangten die Wissenschaftsphilosophie und die Wissenschafts- und Technikforschung, ein sich seit den 1970er-Jahren formierendes Gebiet, das auch als Soziologie und Anthropologie der Wissenschaft und Technik bezeichnet wird und im angelsächsischen Sprachraum und vermehrt auch im deutschsprachigen Raum unter der Bezeichnung *Science and Technology Studies* firmiert. Zur Frage, wie sich auf diesem Gebiet tätige Wissenschaftler*innen selbst bezeichnen sollten, führte der französische Wissenschaftsanthropologe und -soziologe Bruno Latour im Jahr 1991 aus:

»Seit ungefähr 20 Jahren untersuchen meine Freunde und ich diese seltsamen Situationen, die von der intellektuellen Kultur, in der wir leben, nicht eingeordnet werden kön-

und Technikbilder seit der Frühen Neuzeit (München: Fink, 2006); Klaus Hentschel, *Visual Cultures in Science and Technology: A Comparative History* (Oxford: Oxford University Press, 2014).

54 Hans-Jörg Rheinberger, *Experiment, Schrift, Differenz: Zur Geschichte epistemischer Dinge* (Marburg: Basiliken-Presse, 1992), 69.

55 Hans-Jörg Rheinberger, »Von der Zelle zum Gen: Repräsentationen der Molekularbiologie«, in *Räume des Wissens: Repräsentation, Codierung, Spur*, Hg. ders., Michael Hagner und Bettina Wahrig-Schmidt (Berlin: Akademie Verlag, 1997), 274.

56 Hans-Jörg Rheinberger, »Alles, was überhaupt zu einer Inskription führen kann«, in *Iterationen* (Berlin: Merve Verlag, 2005), 19.

57 Ebd., 20.

nen. In Ermangelung eines Besseren nennen wir uns Soziologen, Historiker, Ökonomen, Politologen, Philosophen, Anthropologen. Aber diese ehrwürdigen Disziplinen ergänzen wir jedes Mal um den Genitiv: der Wissenschaften und Techniken.«⁵⁸

Die Wissenschaftsphilosophie und die Science and Technology Studies betonen, dass Repräsentation und Intervention, Darstellen und Eingreifen als unauflöslich miteinander verflochten zu betrachten sind, wenn es um die Herstellung wissenschaftlicher Bilder geht.⁵⁹ Wissenschaftliche Vorstellungskraft, so argumentierte Latour, sei ein Denken mit Augen und Händen, ein »thinking with eyes and hands«⁶⁰. Neuere Arbeiten heben die Herstellung neben der Verbreitung und dem Gebrauch als eine der drei Schlüsseldimensionen wissenschaftlicher Bilder hervor.⁶¹

Mit der Wissenschaftsgeschichte verbindet die Science and Technology Studies ein dezidiertes Interesse an den Praktiken der Wissenserzeugung. Die Verfahrensweisen und Herstellungstechniken in ihren jeweiligen historischen und kulturellen Kontexten erörtern beide Disziplinen, wobei die Wissenschaftsgeschichte vor allem übergreifende Entwicklungen längerer Zeitperioden und maßgebliche Zäsuren in den Blick nimmt, wohingegen die Science and Technology Studies lokal spezifische, detaillierte Einzelfall-

58 Bruno Latour, *Wir sind nie modern gewesen: Versuch einer symmetrischen Anthropologie* [i.O. 1991], aus dem Französischen von Gustav Roßler (Berlin: Akademie Verlag, 1995), 9.

59 Für die Wissenschaftsphilosophie siehe Ian Hacking, *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science* (Cambridge, England: Cambridge University Press, 1983); für die Science and Technology Studies siehe Bruno Latour, »Drawing Things Together« [1986], in *Representation in Scientific Practice*, Hg. Michael Lynch und Steve Woolgar (Cambridge, Massachusetts: MIT Press 1990); Michael Lynch und Steve Woolgar, »Introduction: Sociological Orientations to Representational Practice in Science«, in *Representation in Scientific Practice*; Michael Lynch, »Representation is Overrated: Some Critical Remarks about the Use of the Concept of Representation in Science Studies«, *Configurations* 2, Nr. 1 (1994).

60 Bruno Latour, »Visualization and Cognition: Drawing Things Together«, in *Knowledge and Society: Studies in the Sociology of Culture Past and Present*, Band 6, Hg. Elizabeth Long und Henrika Kuklick (Greenwich, Connecticut: JAI Press, 1986), 1.

61 Siehe Regula Valérie Burri und Joseph Dumit, »Social Studies of Scientific Imaging and Visualization«, in *Handbook of Science and Technology Studies*, 3. Auflage, Hg. Edward J. Hackett et al. (Cambridge, Massachusetts und London, England: MIT Press, 2008).

studien vorlegen, die aus teilnehmenden Beobachtungen in ausgewählten Laboren resultieren.⁶²

Die Filmwissenschaft und die Medien- und Kulturwissenschaft befassen sich bereits seit ungefähr fünfundzwanzig und verstärkt seit fünfzehn Jahren mit den Bildwelten der Naturwissenschaften. Sie untersuchen die Übersprünge zwischen den Bildwelten der Wissenschaft und der populären Kultur⁶³ und erforschen die breitere kulturelle Relevanz des wissenschaftlichen

62 Hier sei lediglich eine begrenzte Auswahl empirischer Arbeiten aus dem Gebiet der Science and Technology Studies genannt, die sich mit den Praktiken der Bilderzeugung in den Naturwissenschaften befassen: Für die Astrophysik siehe Michael Lynch und Samuel Y. Edgerton Jr., »Aesthetics and Digital Image Processing: Representational Craft in Contemporary Astronomy«, in *Picturing Power: Visual Depiction and Social Relations*, Hg. Gordon Fyfe und John Law (London: Routledge, 1988); für die Teilchenphysik siehe Karin Knorr-Cetina, »Viskurse« der Physik: Konsensbildung und visuelle Darstellungen«, in *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, Hg. Bettina Heintz und Jörg Huber (Zürich: Edition Voldemeer 2001); für die Medizin siehe Regula Valérie Burri, »Doing Images: Zur soziotechnischen Fabrikation visueller Erkenntnis in der Medizin«, in *Mit dem Auge denken. Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, Hg. Bettina Heintz und Jörg Huber (Zürich: Edition Voldemeer, 2001); für viele weitere Einzelfallstudien und eine Reflexion des breiteren Diskursrahmens siehe Michael Lynch und Steve Woolgar (Hg.), *Representation in Scientific Practice* (Cambridge, Massachusetts und London England: MIT Press, 1990), und Catelijne Coopmans, Janet Vertesi, Michael E. Lynch und Steve Woolgar (Hg.), *Representation in Scientific Practice Revisited* (Cambridge, Massachusetts und London England: MIT Press, 2014). Dass sich die Zugangsweisen der historischen Epistemologie und der Science and Technology Studies bisweilen überschneiden, zeigt etwa die breit rezipierte Laborstudie von Hans-Jörg Rheinberger, *Experimentalsysteme und epistemische Dinge*.

63 Siehe etwa Yuri Tsvian, »Media Fantasies and Penetrating Vision: Some Links between X-Rays, the Microscope, and Film«, in *Laboratory of Dreams: The Russian Avant-Garde and Cultural Experiment*, Hg. John E. Bowlt und Olga Matich (Stanford: Stanford University Press, 1996); José van Dijck, *The Transparent Body: A Cultural Analysis of Medical Imaging* (Seattle und London: University of Washington Press, 2005); dies. »Picturizing Science: The Science Documentary as Multimedia Spectacle«, *International Journal of Cultural Studies* 9, Nr. 1 (2006); Kirsten Osther, *Cinematic Prophylaxis: Globalization and Contagion in the Discourse of World Health* (Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2007); Anneke Smelik, »Tunnel Vision: Inner, Outer, and Virtual Space in Science Fiction Films and Medical Documentaries«, in *Feminism at the Intersections of Media, Bioscience, and Technology*, Hg. dies. und Nina Lykke (Seattle und London: University of Washington Press, 2008); Jackie Stacey, *The Cinematic Life of the Gene* (Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2010); Sven Stollfuß, *Digitale Körperinnenwelten: Endoskopische 3D-Animationen zwischen Medizin und Populärkultur* (Marburg: Schüren, 2014); Scott Curtis, *The Shape of Spectatorship: Art, Science and Early Cinema* (New York: Columbia University Press, 2015); Oliver Gaycken, *Devices of Curiosity: Early Cinema and Popular Science* (New York: Oxford University Press, 2015).

Forschungs-⁶⁴ und Lehrfilms⁶⁵ und seine Bezüge zum Experimental-⁶⁶ und Animationsfilm⁶⁷. Seit mehr als zehn Jahren setzt sich die deutschsprachige Medienwissenschaft explizit mit Begriffen der Science and Technology Studies⁶⁸ und der Wissenschaftsgeschichte auseinander, bringt sie mit medienwissenschaftlichen Schlüsselbegriffen wie etwa dem Dispositivbegriff in Verbindung⁶⁹, koppelt sie an die Analyse von naturwissenschaftlichen Medi-

64 Siehe etwa Lisa Cartwright, *Screening the Body: Tracing Medicine's Visual Culture* (Minneapolis: University of Minnesota Press, 1995); Mary Ann Doane, *The Emergence of Cinematic Time: Modernity, Contingency, The Archive* (Cambridge, Massachusetts und London: Harvard University Press, 2002); Tom Gunning, »In Your Face: Physiognomy, Photography, and the Gnostic Mission of Early Film«, in *The Mind of Modernism: Medicine, Psychology, and the Cultural Arts in Europe and America, 1880–1940*, Hg. Mark S. Micale (Stanford: Stanford University Press, 2004); Scott Curtis, »Science Lessons«, *Film History* 25, Nr. 1–2 (2013), <https://doi.org/10.2979/filmhistory.25.1-2.45>.

65 Siehe etwa Scott Curtis, »Dissecting the Medical Training Film«, in *Beyond the Screen: Institutions, Networks and Publics of Early Cinema*, Hg. Marta Braun et al. (Bloomington, Indiana: Indiana University Press, 2008); Oliver Gaycken, »The Swarming of Life: Moving Images, Education, and Views through the Microscope«, *Science in Context* 24, Nr. 3 (2011), <https://doi.org/10.1017/S0269889711000159>; Nancy Anderson und Michael Dietrich (Hg.), *The Educated Eye: Visual Culture and Pedagogy in the Life Sciences* (Lebanon, New Hampshire: Dartmouth College Press, 2012); Devin Orgeron, Marsha Orgeron und Dan Streible (Hg.), *Learning with the Lights Off: Educational Film in the United States* (Oxford: Oxford University Press, 2012); Kirsten Ostherr, »Operative Bodies: Live Action and Animation in Medical Films of the 1920s«, *Journal of Visual Culture* 11, Nr. 3 (2012); Scott Curtis, »Grob und glatt: Über eine relationale Theorie des wissenschaftlichen Animationsfilms«, in *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 14: *Scientific Fiction: Inszenierungen der Wissenschaft zwischen Film, Fakt und Fiktion*, Hg. Luisa Feiersinger (Berlin: De Gruyter, 2018); Bettina Papenburg, »Inszenierungen des mikroskopischen Dispositivs im animierten molekularbiologischen Lehrfilm«, in *Bildwelten des Wissens*, Band 14: *Scientific Fiction*.

66 Siehe Malin Wahlberg, »Wonders of Cinematic Abstraction: J.C. Mol and the Aesthetic Experience of Science Film«, *Screen* 47, Nr. 3 (Herbst 2006), <https://doi.org/10.1093/screen/hj1022>, und Oliver Gaycken, »Beauty of Chance: Film ist.« *Journal of Visual Culture* 11, Nr. 3 (2012), <https://doi.org/10.1177/1470412912455618>.

67 Siehe Bettina Papenburg, »Bewegende Modelle des Lebendigen: Zu epistemischem Vermögen und affektiver Kraft (populär-)wissenschaftlicher Animationsfilme«, in *Im Wandel ... – Metamorphosen der Animation*, Hg. Julia Eckel, Erwin Feyersinger und Meike Uhrig (Heidelberg: Springer, 2017), und dies., »Das Dokumentarische als Autorisierungsstrategie und als Lektüremodus für bildgebende Verfahren und digitale Animationen in den Lebenswissenschaften«, in *Zur Ästhetik des Gemachten in Animation und Comic*, Hg. Hans-Joachim Backe et al. (Berlin: De Gruyter, 2018).

68 Siehe Tristan Thielmann und Erhard Schüttelpelz (Hg.), *Akteur-Medien-Theorie* (Bielefeld: Transcript, 2013).

69 Siehe Angela Krewani, »Überlegungen zum Dispositiv medialer Bildgestaltung in Naturwissenschaft und Medizin«, in »Blickwechsel: Bildpraxis zwischen Wissenschafts- und Populärkultur«, Hg. Kathrin Friedrich und Sven Stollfuß, Themenheft, *Augen-Blick: Marburger Hefte zur Medienwissenschaft* 50 (2011).

entechniken an⁷⁰, verbindet sie mit bildwissenschaftlichen und designtheoretischen Zugängen⁷¹ und kombiniert sie mit einer »negativen Medientheorie«⁷².

Der medienwissenschaftliche Beitrag, wie ihn das vorliegende Buch zu leisten beabsichtigt, besteht darin, ausgewählte Diskurse aus den genannten Disziplinen über die Erforschung der kulturellen und wahrnehmungsgeschichtlichen Kontextualisierungen der Medientechniken der Zellbiologie zusammenzuführen und für medienästhetische Fragestellungen fruchtbar zu machen. Damit ist das übergreifende Ziel abgesteckt: Es gilt einen Forschungsansatz zu entwickeln, der es ermöglicht, die Bildgebungstechniken der Naturwissenschaften als Medientechniken zu beschreiben, die Bedeutung der resultierenden Bilder unter semiotischen Gesichtspunkten zu analysieren und im Lichte medienästhetischer Konzepte zu interpretieren. Dabei gilt es die Frage zu berücksichtigen, wie eine medientechnische und eine medienästhetische Perspektive aufeinander bezogen werden können, und einen Vorschlag zu entwickeln, der aufzeigt, wie diese beiden Perspektiven miteinander kombiniert werden sollten, um medienepistemologisch maßgebliche Einsichten zu ermöglichen.

Der im Hinblick auf dieses Ziel entwickelte Forschungsansatz erörtert in einem ersten Schritt die Medientechniken der computergestützten Mikroskopie vor dem Hintergrund der Debatten zur Analog-Digital-Umwandlung und zum Weltbezug des digitalen Bildes und kombiniert in einem zweiten Schritt die wahrnehmungstheoretisch ausgerichteten medienepistemologischen Überlegungen des deutschen Literatur-, Kultur- und Medienwissenschaftlers Joseph Vogl zum »Medien-Werden«⁷³ eines technischen Instruments mit der kunst-, wissenschafts- und medienhistorisch angelegten Forschung des US-amerikanischen Kunsthistorikers Jonathan

70 Siehe Sebastian Vehlken, *Zootechnologien: Eine Mediengeschichte der Schwarmforschung* (Zürich: Diaphanes, 2012).

71 Siehe Stollfuß, *Digitale Körperinnenwelten*.

72 Siehe Lina Maria Stahl, *Isolieren – Zerlegen – Stillstellen: Zum Verhältnis von Bios und Biologie am Beispiel mikroskopischer Bildgebung* (Paderborn: Fink, 2018). Zum Konzept der negativen Medientheorie siehe Dieter Mersch, »Medialität und Undarstellbarkeit: Einleitung in eine ›negative‹ Medientheorie«, in *Performativität und Medialität*, Hg. Sybille Krämer (München: Fink, 2004).

73 Siehe Joseph Vogl, »Medien-Werden: Galileis Fernrohr«, in *Mediale Historiographien*, Hg. Lorenz Engell und ders. (Weimar: Universitäts-Verlag, 2001), 121–123.

Crary zu den »skopischen Regimen«⁷⁴ der Moderne. Dabei erlauben es die Bezüge zu den Mikroskopiepraktiken voriger Jahrhunderte und die mit ihnen verbundenen Wahrnehmungsmodalitäten gegenwärtige Modalitäten mikroskopischer Wahrnehmung über die Kontrastierung schärfer zu konturieren. Schließlich verbindet der Ansatz diese Perspektiven in einem letzten Schritt mit Theorien zur Wirkungsästhetik des Bewegtbildes und dem Begriff des »anschaulichen Denkens« sowie den Theorien der Einfühlung und des Affekts.

Vorgehensweise und Forschungsgegenstand

Das vorliegende Buch erhebt den Anspruch, eine Übersetzungsleistung zu erbringen. Ich beabsichtige, Themengebiete, die in einer anderen Fachsprache verhandelt werden, für Leser*innen aus der Medienkulturwissenschaft und angrenzenden Fächern zugänglich zu machen und zu zeigen, wie die Auseinandersetzung mit den Medientechniken und Darstellungsformen, den Wahrnehmungsweisen und Denkansätzen, die das naturwissenschaftliche Feld bestimmen, neue Einsichten in medienkulturwissenschaftliche Fragestellungen eröffnen kann.

Die Einsichten in die Medienkultur der gegenwärtigen Zellbiologie konnte ich aus eigener Anschauung gewinnen. Von Oktober 2015 bis Februar 2016 führte ich eine teilnehmende Beobachtung (»participant observation«)⁷⁵ in zwei Bildgebungszentren durch, und zwar dem Center for Advanced Imaging (CAi) an der Mathematisch-Naturwissenschaftli-

74 Siehe Jonathan Crary, *Techniques of the Observer: On Vision and Modernity in the Nineteenth Century* (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1990), 57. Crary bezieht sich auf Martin Jay, »Scopic Regimes of Modernity«, in *Vision and Visuality*, Hg. Hal Foster (Seattle: Bay Press, 1988), dort: 3–4.

75 Siehe Bruno Latour und Steve Woolgar, *Laboratory Life: The Social Construction of Scientific Facts* [1979], Einleitung von Jonas Salk, mit einem neuen Postskript und Index der Autoren (Princeton: Princeton University Press, 1986), 28–31, 277–279, 282. Die Methode geht auf den polnischen Ethnologen Bronislaw Malinowski zurück. Malinowski zufolge besteht die teilnehmende Beobachtung darin, dass die beobachtende Person in die zu erforschende Kultur eintaucht und sich selbst zum Forschungsinstrument macht. Siehe Bronislaw Malinowski, *Argonauts of the Western Pacific: An Account of Native Enterprises and Adventure in the Archipelagoes of Melanesian New Guinea* [1922] (New York: Dutton, 1961).

chen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf⁷⁶ und dem IBG-1 Systemische Mikrobiologie⁷⁷ am Forschungszentrum Jülich. Diese sozialwissenschaftliche Zugangsweise, die naturwissenschaftliche Praktiken in spezifischen Settings mittels detaillierter empirischer Beobachtung erforscht, die Beobachtungen in Feldnotizen festhält und aus analytischer Distanz reflektiert, kann seit den wegweisenden Forschungen von Bruno Latour und Steve Woolgar⁷⁸, Karin Knorr-Cetina⁷⁹ und Michael Lynch⁸⁰ in den späten 1970er- und 1980er-Jahren als etablierte Methode gelten.⁸¹ Latour und Woolgar bezeichnen diese Zugangsweise auch als Wissenschaftsan-

76 Mein besonderer Dank gilt der Geschäftsführerin des CAi, Dr. Stefanie Weidtkamp-Peters, und Professorin Dr. Yvonne Stahl vom Institut für Entwicklungsgenetik für die Offenheit gegenüber fachfremden Fragestellungen, die Möglichkeit zur Hospitation im praktisch ausgerichteten Masterkurs zur Fluoreszenzmikroskopie und den intensiven Austausch. Zudem gilt mein Dank Professor Dr. Rüdiger Simon vom Institut für Entwicklungsgenetik für das Gespräch zur Bildauswahl in der naturwissenschaftlichen Veröffentlichungspraxis, Professor Dr. Hermann Aberle aus der Funktionellen Zellmorphologie für das Gespräch zur Relevanz von Mikroskopieverfahren in der Erforschung des Nervensystems der schwarzzügigen Taufleie und Dr. Andreas Barbian aus der Sektion für Klinische Anatomie der Medizinischen Fakultät und vom Institut für Informatik für die Einführung in die Interactive Augmented Microscopy.

77 Ich danke Professorin Dr. Julia Frunzke und Professor Dr.-Ing. Alexander Grünberger aus der Arbeitsgruppe Populationsheterogenität und Signaltransduktion für die praktischen Einblicke in die Lichtmikroskopie.

78 Siehe Latour und Woolgar, *Laboratory Life*.

79 Siehe Karin Knorr-Cetina, *The Manufacture of Knowledge: An Essay on the Constructivist and Contextual Nature of Science*. Vorwort von Rom Harré (Oxford: Pergamon Press, 1981).

80 Siehe Michael Lynch, *Art and Artifact in Laboratory Science: A Study of Shop Work and Shop Talk in a Research Laboratory* (London: Routledge, 1985). Im angelsächsischen Raum existierte bereits Mitte der 1980er-Jahre eine große Anzahl von Arbeiten, die die Methode der »laboratory studies« erprobten und entwickelten. Für eine Liste einschlägiger Arbeiten siehe Latour und Woolgar, *Laboratory Life*, 285, Fußnote 4.

81 Unter der Bezeichnung »Social Studies of Science« hat sich die Methode mittlerweile über das gleichnamige Fachjournal, *Social Studies of Science*, und die gleichnamige Fachgesellschaft, die »Society for Social Studies of Science«, im angelsächsischen Wissenschaftsraum etabliert. Die Fachgesellschaft gibt zwei Zeitschriften, *Science, Technology & Human Values* und *Engaging Science, Technology and Society*, sowie ein Handbuch, *The Handbook of Science and Technology Studies*, Hg. Ulrike Felt, Rayvon Fouché, Clark A. Miller und Laurel Smith-Doerr, 4. Auflage (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2016), heraus.

Als beispielhaft unter den neueren Monographien mit Bezug zum Thema des vorliegenden Buches wären hier etwa zu nennen: Stefan Helmreich, *Silicon Second Nature: Culturing Artificial Life in a Digital World* (Berkeley: University of California Press, 1998); Joseph Dumit, *Picturing Personhood: Brain Scans and Biomedical Identity* (Princeton: Princeton University Press, 2004); Natasha Myers, *Rendering Life Molecular: Models, Modelers, and Excitable Matter* (Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2015).

thropologie (»anthropology of science«) und als Laborstudien (»laboratory studies«)⁸². Ihnen beiden zufolge besteht die Herausforderung, vor der sich teilnehmende Beobachtende in der Laborforschung sehen, darin einen Mittelweg zwischen der Rolle des Neulings und der Rolle des Teilnehmenden zu finden:

»His problem is to select a principle of organisation which will enable him to provide an account of the laboratory sufficiently distinct from those given by scientists themselves and yet of sufficient interest to both scientists and readers not familiar with biology.«⁸³

Die in der teilnehmenden Beobachtung im Labor gewonnenen Einsichten ermöglichten es mir, die Praktiken der Bildherstellung am Fluoreszenzmikroskop grundlegend zu verstehen. Dieses Verständnis konnte ich über die multimediale Auseinandersetzung mit Theorie und Praxis der Mikroskopie weiterentwickeln und auf medientheoretische Fragestellungen hin ausrichten.

Grundlagen- und Spezialwissen in der Zell- und Molekularbiologie und technisches Wissen im Bereich der mikroskopischen Verfahrenstechnik wird heutzutage nicht mehr allein über Lehr- und Handbücher und Präsenzlehrveranstaltungen in Hörsaal und Labor vermittelt. Videovorträge über avancierte hochauflösende Mikroskopieverfahren, die auf digitalen Lernplattformen zirkulieren, sowie auf frei zugänglichen Internetseiten und in den Intranets renommierter Universitäten verfügbare asynchron rezipierbare Kurse erweitern das papiergebundene Lernangebot seit ungefähr fünfzehn Jahren. Vermittels eines Schnitts können Videovorträge augenblicklich zwischen so verschiedenen Lernsituationen wie dem Hörsaal und dem Labor wechseln. Ein Phänomen, das zunächst in der Theorie anhand von Schaubildern, Diagrammen und Schemazeichnungen erklärt wurde, kann in der darauffolgenden Einstellung anhand eines Laborversuchs demonstriert werden. Diese Präsentationsform erlaubt es, die relevanten biologischen Prozesse, optischen Gesetze und technischen Verfahrensweisen zu erklären und sodann das Mikroskop-System im Gebrauch vorzuführen, das auf diesen Grundlagen operiert. Anders gesagt zeigt das Format des Videovortrags die Darstellungsformen und veranschaulicht das Dispositiv, das sie herstellt, in ihrer wechselseitigen Bezogenheit aufeinander.

82 Latour und Woolgar, *Laboratory Life*, 277.

83 Ebd., 44.

Im Unterschied zu Lehr- und Handbüchern und Fachartikeln in gedruckten Zeitschriften, die auf statische Darstellungsformen wie Fotografien, Zeichnungen und Diagramme angewiesen sind, veranschaulichen Online-Formate durch Bewegtbilder sowohl zeitbasierte Phänomene als auch solche Prozesse, die sich erst in der Zusammenschau von Darstellungen auf unterschiedlichen Skalen verstehen lassen. In der Zellforschung wird in Fachpublikationen in digital verfügbaren Zeitschriften bereits seit ungefähr 1995 auf Lebendzellfilme verlinkt, die im Forschungsprozess hergestellt wurden und auf den Webseiten der Forschungsteams zur Verfügung gestellt werden. Forschende auf den Gebieten der Zellbiologie, Biophysik und Bioinformatik verwenden Filme als Dokumente und Anschauungsmaterial. Online veröffentlichte Fassungen zellbiologischer und biophysikalischer Fachartikel werden von filmischen Visualisierungen und am Computer synthetisierten Bildmodellen ergänzt. Beide Dimensionen – das zeitbasierte Bild und die synthetisierende Schau verschiedener Darstellungsformen – sind wichtige Bezugspunkte des vorliegenden Buches.

Die Videovorträge und die Fachartikel fungieren in der hier dargelegten Forschung sowohl als Primärquellen wie auch als Sekundärquellen. Im Folgenden werden ausgewählte Sequenzen aus Videovorträgen von Fachleuten aus den Bereichen der Zellbiologie, der Molekularbiologie und der Mikroskopietechnik sowie Fachartikel aus den genannten Bereichen im Hinblick auf ausgewählte medienkulturwissenschaftliche Fragestellungen analysiert.

Die Einblicke in die Mikroskopiepraktiken voriger Jahrhunderte verdanke ich vornehmlich der kunsthistorischen Forschung. Ganz besonders hervorgehoben seien hier drei Einzelfallstudien, von denen die ersten beiden aus dem Umfeld der Forschung zum technischen Bild an der Humboldt-Universität zu Berlin hervorgegangen sind: erstens die Forschung von Franziska Brons zur Mikrofotografie Robert Kochs in den 1860er- und 1880er-Jahren⁸⁴, zweitens die Arbeiten von Angela Fischel zu den mikroskopischen Bildwelten Robert Hookees und zur Amateurmikroskopie im siebzehnten und achtzehnten Jahrhundert⁸⁵ sowie drittens die Forschung von Karin Leonhard zum Af-

84 Siehe Franziska Brons, »Das Versprechen der Retina: Zur Mikrofotografie Robert Kochs«, in *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 2,2: *Instrumente des Sehens*, Hg. Angela Fischel (Berlin: Akademie Verlag, 2004).

85 Siehe Angela Fischel, »Bildtechniken: Mikroskopie in populärwissenschaftlichen Büchern des 17. und 18. Jahrhunderts«, in *Sichtbarkeit und Medium: Austausch, Verknüpfung und Differenz naturwissenschaftlicher und ästhetischer Bildstrategien*, Hg. Anja Zimmermann (Hamburg: Hamburg University Press, 2005), und dies., »Optik und Utopie: Mikroskopische Bilder als Argument im 18. Jahrhun-

fektdiskurs in den Briefen von Antoni van Leeuwenhoek in den 1690er-Jahren⁸⁶.

Aufbau des Buches

Das vorliegende Buch gliedert sich in zwei Teilabschnitte, wobei sich der erste Teilabschnitt, »Datenpraktiken: Lebendzellmikroskopie als Medientechnik«, auf die *Medientechnik* und die Prozesse der *Bildherstellung* konzentriert, während sich der zweite Teilabschnitt, »Medienästhetik der Mikroskopie: Theorie und Geschichte der mikroskopischen Wahrnehmung«, der *Medienästhetik* und der Frage nach der *Bildwahrnehmung* widmet.

Der erste Teilabschnitt zielt darauf ab, die Lebendzellmikroskopie als eine Medientechnik zu beschreiben und die mithilfe dieser Technik erzeugten Bilder als Datenbilder zu fassen. Er schafft damit die Grundlage für die Diskussion der Wahrnehmungsmodalitäten, mittels derer die Bilder rezipiert werden. Dazu werde ich zunächst im ersten Teilabschnitt die Praktiken der Datenerhebung und Visualisierung beschreiben und in einem breiteren medienkulturwissenschaftlichen Diskursrahmen verankern, der die Frage nach dem Weltbezug des digitalen Bildes verhandelt. Diese Frage diskutiere ich anhand von Beiträgen zu vier Diskurssträngen, und zwar zum Ersten über eine kritische Neubewertung der medienwissenschaftlichen Debatte zur Analog/Digital-Umwandlung, zum Zweiten über eine Einordnung der Lebendzellmikroskopie in den Diskurs zur Selbstaufzeichnung der Natur, zum Dritten vermöge der Bestimmung von Kriterien der indexikalischen Referenz von Lebendzellfilmen und zum Vierten über die Reflexion der Begriffe des ›Datenbildes‹ und des ›digitalen Bildmodells‹.

Über den Begriff der Datenpraktiken nimmt der erste Teilabschnitt explizit Bezug auf die praktische Wende (»practice turn«)⁸⁷ in den *Science and Technology Studies* und das mit dieser Neuorientierung in Verbindung ste-

dert«, in *Visuelle Argumentationen, die Mysterien der Repräsentation und die Berechenbarkeit der Welt*, Hg. Horst Bredekamp und Pablo Schneider (München: Fink, 2006).

86 Siehe Karin Leonhard, »Blut sehen«, in *Transfusionen: Blutbilder und Biopolitik in der Neuzeit*, Hg. Anja Lauper (Zürich: Diaphanes, 2005).

87 Siehe etwa Andrew Pickering, *The Mangle of Practice: Time, Agency and Science* (Chicago und London: University of Chicago Press, 1995), 1–4. Die in den Fußnoten 59, 62 und 79–81 genannten Quellen sind ebenfalls der praktischen Wende zuzurechnen.

hende Vokabular. Seit der praktischen Wende richtet sich das Bestreben auf eine Erforschung der Laborpraktiken, kurzum auf das, was Wissenschaftler*innen im Labor *tun*. In den Fokus rücken die Methoden der Datenerzeugung und Bildherstellung und die Praktiken der Datenverwendung und des Bildgebrauchs.

Der zweite Teilabschnitt zielt auf die Erkundung der Wahrnehmung und der *Effekte* jener Bewegtbilder, die die gegenwärtige Zellbiologie in ihrer Laborpraxis erzeugt. Diese Effekte bestehen darin, so die These, eine spezifische Form des Sehens zu begünstigen, die ich ›Daten-Sehen‹ nenne, und Betrachtende zur Reflexion ihrer eigenen Lebendigkeit und Endlichkeit anzuregen. Der zweite Teilabschnitt untersucht den epistemischen Gehalt lebenswissenschaftlicher Bilder in Bezug auf ihren ästhetischen Gehalt und richtet sich auf die Frage, wie naturwissenschaftliche Bilder als ästhetische Objekte rezipiert werden können und welche Konsequenzen aus diesem Rezeptionsmodus für das Selbstverständnis der Beobachtenden erwachsen.

Um eine fundierte Beschreibung der ästhetischen Erfahrung des Lebendzellfilms in seinen technischen und epistemologischen Kontexten zu leisten, werde ich eine Argumentation entwickeln, die meine Hypothese vermöge fünf aufeinander aufbauender Einzelthesen untermauert, die sukzessive von der Analyse des medientechnischen Dispositivs der Lebendzellmikroskopie zu der Beschreibung der Wahrnehmung jener Bildwelten führt, die mithilfe dieses Verfahrens hervorgebracht werden. Diese fünf Einzelthesen entsprechen den fünf Kapiteln dieses Buches: Ich argumentiere, dass Lebendzellmikroskopie, *erstens*, eine Variante eines technischen Dispositivs darstellt, einer automatisierten Form der Datenerhebung, die ein apparatives Gefüge voraussetzt, im Diskurs der Selbstaufzeichnung der Natur verankert und damit einem bereits im neunzehnten Jahrhundert etablierten mechanistischen Objektivitätsideal verpflichtet ist, das auf dem Ausschluss menschlicher Subjektivität gründet. Während die gegenwärtigen computergestützten Mikroskopiepraktiken dieses Dispositiv und das mit ihm verbundene subjektivitätsfreie Objektivitätsideal auf den ersten Blick zu aktualisieren scheinen, so gehen sie doch weder vollständig in diesem technischen Dispositiv auf, noch lassen sie sich gänzlich vermöge dessen durchdringen. Die automatisierte Aufzeichnung in der gegenwärtigen Lebendzellmikroskopie erfordert vielmehr vielfache Formen menschlichen Eingreifens, und die resultierenden Bilder erweisen sich als auf die fachkundige Interpretation durch die Betrachtenden angewiesen.

Die Bilder beziehen, *zweitens*, ihre Aussagekraft vermöge ihres Status als ›Datenbilder‹, die zelluläre Prozesse in visueller Form zur Anschauung bringen, sich dabei aber keinesfalls von dem zugrundeliegenden numerischen Datensatz ablösen lassen. Als ästhetische Oberflächenerscheinung bietet sich das Datenbild der menschlichen Wahrnehmung dar. Doch erst die hinter dem Bild verborgenen Messdaten stellen den Bezug zum realweltlichen Gegenstand her und konstituieren eine Form der indexikalischen Referenz, die auf vielfältige Schritte der Umwandlung und Vermittlung angewiesen ist. Folglich erzeugt die Untersuchung lebender Zellen am Fluoreszenzmikroskop das Maß eines Gegenstands *und* bringt sein bildliches Zeichen hervor.

Um die bildlichen Zeichen zu lesen ist, *drittens*, eine fachkundige Art der Bildinterpretation erforderlich, die ich als ›Daten-Sehen‹ bezeichne. Der Begriff des Daten-Sehens umfasst das menschliche Vermögen, Seheindrücke mit Bedeutung zu belegen, ein Vermögen, das kulturelle Teilhabe, einen Leib und ein multimodales Wahrnehmungsvermögen voraussetzt. Er bezieht zugleich die Vermittlungsleistung der Instrumente in die Reflexion des Erkenntnisprozesses mit ein. Diese besteht darin, Phänomene, die sich der unvermittelten menschlichen Wahrnehmung entziehen, als Ergebnis einer Folge von Umwandlungsschritten der Sinneswahrnehmung zugänglich zu machen. Das Daten-Sehen indiziert, dass die computergestützte Bilderzeugung eine spezifische neue Form der Subjektivität freisetzt, die ihre Bestimmung in der fachkundigen Dateninterpretation findet, einer Sinnes- *und* Geistesschau, die somatische und hermeneutische Aktivitäten miteinander kombiniert und die am besten als ein denkendes Sehen beschrieben werden kann, das Datenbilder fachkundig rezipiert.

Den auf die Interpretation angewiesenen Datenbildern haftet, *viertens*, ein affektiver Surplus an. Jene Filme, die gegenwärtig mithilfe der Lebendzellmikroskopie hergestellt werden, rufen, darin ähnlich den mikrokinematografischen Aufnahmen, wie sie vor rund hundertzwanzig Jahren zur Aufzeichnung der Bewegung von Körperzellen und Bakterien angefertigt wurden, durch Techniken wie Vergrößerung und Zeitraffer eine Schockwirkung hervor, die von der ersten Begegnung mit Phänomenen in Größenordnungen ausgeht, die sich vom menschlichen Maß grundlegend unterscheiden. Die Anbindung dieser Erfahrung an einen jahrhundertealten Affektdiskurs erlaubt es, diese Schockwirkung auf den wissenschaftlichen Erkenntnisprozess zu beziehen, die Begegnung mit dem Mikrokosmos auch als ästhetische Erfahrung zu beschreiben und auf diese Weise die Strahlkraft der naturwis-

senschaftlichen Forschungspraxis zu betonen. Die affektive Beteiligung an den Visualisierungen der Mikrobewegungen lebender Systeme lenkt, *fünftens*, die Aufmerksamkeit der Forschenden reflexiv auf ihre eigene Leiblichkeit zurück und macht das Phänomen der endlichen Lebendigkeit reflexiv bewusst.

Wissenschaftliche Bilder, so soll die hier vorgebrachte Argumentation verdeutlichen, wirken nicht allein erkenntnisleitend, sondern auch affektiv. Den ästhetischen Gehalt naturwissenschaftlicher Bilder und den affektiven Überschuss, der ihnen innewohnt, gilt es gerade deshalb genauer zu bestimmen und zu reflektieren, damit diese zwangsläufig subjektiven Dimensionen nicht als Verunreinigung oder Kontamination eines objektiven Wissens bewertet werden und hierdurch Zweifel an der Erkenntnisleistung bildgebender Verfahren aufkommen lassen, sondern vielmehr als ebenso rechtmäßige wie formal immanente Bestandteile der Medienkultur der gegenwärtigen Zellbiologie diskutiert werden können. Erst die explizite Rahmung der Rezeption von Bewegtbildern des Mikrokosmos als ästhetische und affektiv wirksame Erfahrung ermöglicht es, die epistemische Leistung, die naturwissenschaftliche Bilder befördern, vollumfänglich – das heißt in all ihren Facetten – anzuerkennen.

Über die Beschreibung des affektiven Repertoires, mit dem wissenschaftliche Bilder belegt sind, und die differenzierte Auseinandersetzung mit dem offenkundigen ästhetischen Reiz, der von ihnen ausgeht, setzen die folgenden Ausführungen der gegenwärtigen Wissenschaftsskepsis ein Beispiel für spartenübergreifendes Forschen entgegen, das Bezüge zu älteren Affektdiskursen der Mikroskopie und die Erörterung formalästhetischer Fragen, die sich aus dem Sujet Bewegtbild ergeben, aufgreift. Damit ist das umfassendere Ziel des vorliegenden Buches angesprochen, das namentlich darin besteht, den Dialog zwischen den Geistes-, Sozial- und Naturwissenschaften über die Auseinandersetzung mit den Herstellungs- und Gebrauchsweisen epistemischer Bilder und die Erörterung von Fragen des Weltbezugs und der Rezeption derselben zu befördern.

Dabei wird zu zeigen sein, dass eine Analyse, die auf Medientechniken beschränkt bleibt, zu kurz greift, und lediglich einen ersten Schritt auf dem Weg zu einem umfassenderen Verständnis gegenwärtiger Bild- und Datenpraktiken darstellen kann. Um zu verstehen, wie epistemische Bilder auf die Wirklichkeit verweisen, müssen neben den Verfahren ihrer Produktion auch die Modalitäten ihrer Rezeption mitberücksichtigt werden. Erst die Analyse der Wechselwirkungen zwischen Produktion und Rezeption, zwischen Me-

dientechnik und Medienästhetik ermöglicht ein umfassendes Verständnis der Formen der Welterzeugung, wie sie epistemische Bilder leisten.

Datenpraktiken:
Lebendzellmikroskopie als Medientechnik

1. Mikroskopie unter Computerbedingungen

In der Kunstgeschichte, der Filmwissenschaft und der Medienwissenschaft wird seit dem Beginn der 1990er-Jahre eine intensive Debatte zum digitalen Bild geführt. Die Debatte entzündete sich an dem angeblich fehlenden Wirklichkeitsbezug des digitalen Bildes und kreiste für mehr als fünfzehn Jahre um den semiotischen Begriff der Indexikalität, der die physische Verbindung zwischen der Darstellung und dem Dargestellten hervorhebt. Angestoßen haben diese Diskussion der Einzug digitaler Technologien in den Alltag, die Umstellung fotografischer und filmischer Aufnahme-, Verbreitungs- und Wiedergabeverfahren auf digitale Formate sowie die massenhafte Distribution digitaler Bilder und Texte über das Internet. Über den Vergleich mit dem fotografischen und filmischen Analogbild wurde die indexikalische Form des Verweises auf ›die Realität‹ für das digitale Bild bereits ab dem Jahr 1992 vielfach in Frage gestellt.¹ Innerhalb der Filmwissenschaft beanspruchten beispielsweise Mary Ann Doane und Laura Mulvey noch im Jahr 2007 für den Film – gemeint ist der Zelluloidfilm – ein besonderes Verhältnis zum Realen, und zwar aufgrund der Indexikalität des fotografischen Bildes, das als eine Spur des Realen fungiere.²

1 Siehe etwa W.J.T. Mitchell, *The Reconfigured Eye: Visual Truth in the Post-Photographic Era* (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1992); Geoffrey Batchen, »On Post-Photography«, *Afterimage* 20, Nr. 3 (1992); ders., »Phantasms: Digital Imaging and the Death of Photography«, *Aperture* 136 (1994); Peter Lunenfeld, »Digital Photography: Dubitative Images«, in *Snap to Grid: A User's Guide to Digital Arts, Media, and Cultures* (Cambridge, Massachusetts und London, England: MIT Press, 2000); Beat Wyss, »Das indexikalische Bild: Hors-texte«, *Fotogeschichte* 20, Nr. 76 (2000).

2 Siehe Mary Ann Doane, »The Indexical and the Concept of Medium Specificity«, *Differences: A Journal of Feminist Cultural Studies* 18, Nr. 1 (2007), <https://doi.org/10.1215/10407391-2006-025>: 132, und Laura Mulvey, *Death 24x a Second: Stillness and the Moving Image* (London: Reaktion Books, 2007), 10. Doane und Mulvey grenzen das Verständnis des Index als Spur des Realen vom Realismus als einer ästhetischen Strategie ab.

Die Debatte zur Frage nach der Indexikalität des digitalen Bildes und die Diskussion um die behauptete Ermangelung seiner intimen physischen Verbindung mit der Welt kann und soll im Folgenden nicht vollumfänglich wiedergegeben werden.³ Ich konzentriere mich vielmehr auf jene Debattenbeiträge, die sich für die Erhellung der Frage nach dem Weltbezug der hier behandelten digitalen Lebendzellfilme als zielführend erweisen, namentlich Beiträge zur medienwissenschaftlichen Diskussion der Analog/Digital-Umwandlung (im Folgenden: A/D-Umwandlung), und argumentiere, dass diese in den Techniken der Bilderzeugung in der computergestützten Mikroskopie lediglich einen von mehreren Umwandelungsschritten in einer langen Transformationskette darstellt. Damit verbunden diskutiere ich die Frage, ob der sich seit den späten 1980er-Jahren verbreitende Gebrauch des Computers in der Lebendzellmikroskopie als Zäsur anzusehen ist, und zwar dahingehend, dass erst die computergestützte Bilderzeugung und Bildverarbeitung ganz eigene Bildwelten hervorbringen, die sich von einem schlichten Abbildungsverhältnis lösen. Zur Beantwortung dieser Frage wird ein Vergleich mit älteren Techniken der mikroskopischen Bilderzeugung und mit Verfahren der Bewegungsaufzeichnung angestellt, der es erlaubt, die Techniken der computergestützten Mikroskopie genauer zu beschrei-

Für weitere filmwissenschaftliche Schlüsselpositionen in der Debatte zum digitalen Bild siehe etwa David Norman Rodowick, *The Virtual Life of Film* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 2007); Francesco Casetti, *The Lumiere Galaxy: 7 Key Words for a Cinema to Come* (New York: Columbia University Press, 2015); André Gaudreault und Philippe Marion, »A Brief Phenomenology of ›Digitalized‹ Cinema« und »›Animage‹ and the New Visual Culture«, in *The End of Cinema? A Medium in Crisis in the Digital Age* [i.O. 2013], aus dem Französischen übersetzt von Timothy Barnard, 63–83 und 152–176 (New York: Columbia University Press, 2015).

³ Für eine präzise Darstellung der Problematik siehe Mary Ann Doane, »Indexicality: Trace and Sign: Introduction«, *Differences: A Journal of Feminist Cultural Studies* 18, Nr. 1 (2007), <https://doi.org/10.1215/10407391-2006-020>. Für eine Aufarbeitung und kritische Neu-Bewertung der Anfänge der Debatte aus medienwissenschaftlicher Perspektive siehe Jens Schröter, »Das Ende der Welt. Analoge vs. digitale Bilder – mehr oder weniger ›Realität‹?«, in *Analog/Digital – Opposition oder Kontinuum? Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung*, Hg. Alexander Böhnke und ders. (Bielefeld: Transcript, 2004), und Vinzenz Hediger, »Illusion und Indexikalität. Filmische Illusion im Zeitalter der postphotographischen Photographie«, *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* 54, Nr. 1 (2006), <https://doi.org/10.1524/dzph.2006.54.1.101>. Zu den Konsequenzen digitaler Technologien für die Filmwissenschaft siehe Gertrud Koch, »Zwischen Raubtier und Chamäleon: Das Schicksal der Filmwissenschaft«, in »Motive«, Themenheft, *Zeitschrift für Medienwissenschaft* 1 (2009), <http://doi.org/10.25969/mediarep/2621>. Für eine jüngere, ebenso kompakte wie detaillierte Darstellung der »Indexikalitätsdebatte« in den genannten Fachrichtungen siehe Dominik Schrey, *Analoge Nostalgie in der digitalen Medienkultur*, 196–211 (Berlin: Kulturverlag Kadmos, 2017).

ben, und zwar als eine an ein apparatives Gefüge gebundene, automatisierte Form der Datenerhebung in der naturwissenschaftlichen Praxis, die mit einem spezifischen mechanischen Objektivitätsideal einhergeht, das sich bereits im neunzehnten Jahrhundert herausgebildet hat.

In den frühen 2000er-Jahren fokussierte sich die medienwissenschaftliche Diskussion auf die Frage, in welchem Verhältnis zueinander ›das Analoge‹ und ›das Digitale‹ stehen. Neben den Verhandlungen darüber, was genau unter diesen beiden Begriffen zu verstehen sei, richtete sich die Diskussion ganz besonders auf hybride Techniken und Formate sowie auf die Praktiken und Prozesse der Umwandlung, die analoge in digitale Signale überführen und digital verarbeitete und gespeicherte Informationen in Darstellungen übersetzen, die für die menschliche Wahrnehmung zugänglich sind.

Die medienwissenschaftliche Diskussion zur A/D-Umwandlung ist für das Verständnis der Bilderzeugung in der computergestützten Mikroskopie von besonderer Bedeutung, da sie es erlaubt, die lange Folge von Transformationsschritten, als deren Resultat die digitalen Bilder gelten müssen, in einen übergreifenden theoretischen Rahmen zu stellen. Umgekehrt veranlasst die eingehende Auseinandersetzung mit jener spezifischen Transformationskette, die in der computergestützten Mikroskopie das Objekt mit dem Bild verbindet, dazu, sowohl eben jene medienwissenschaftlichen Positionen einer kritischen Revision zu unterziehen, die auf einer historiografischen Pointierung des Analog/Digital-Umbruchs beharren und daraus die Konstitutionsbedingungen des Fachs Medienwissenschaft herleiten, als auch jene Positionen zu hinterfragen, die den Verlust des Wirklichkeitsbezugs des digitalen Bildes beklagen. Argumentiert wird, dass die A/D-Umwandlung in der computergestützten Mikroskopie lediglich *einen* Umwandlungsschritt in einer langen Transformationskette darstellt. Das übergeordnete Ziel der vielfältigen Umwandlungen, mit denen die Mikroskopie arbeitet, ist die Vermessung der Zelle. Die Umwandlung eines analogen Signals in digitale Daten ist lediglich ein Hilfsmittel zu diesem Zweck.

Der standardmäßige Einsatz des Computers und die damit verbundene Entwicklung von Verfahren der computergestützten Bilderzeugung und Bildverarbeitung veränderten zusammen mit den neueren, auf gentechnischen Eingriffen basierenden Verfahren der Kontrasterzeugung vermittels Fluoreszenz und den von Lasern induzierten Verfahren der Photonenanregung und Photonendetektierung die Praktiken der Lebendzellmikroskopie in den letzten Dekaden des zwanzigsten Jahrhunderts. Die Entwicklung

verschiedener computergestützter bildgebender Verfahren ermöglichte es in den Jahren um die Jahrtausendwende, die vormalig als naturgegebene Schwelle anerkannte Beugungsgrenze des Lichts zu unterschreiten und Vergrößerungen im unteren Nanometerbereich zu erzielen.

Wenngleich die Techniken der Lebendzellmikroskopie in den vergangenen rund hundertzwanzig Jahren beständig weiterentwickelt und deutlich ausdifferenziert wurden, so integrieren diese technischen Neuerungen doch auch einige ältere bildgebende Verfahren zur Untersuchung von Bewegung, die in ihrem Kern in den exakten Wissenschaften bereits im neunzehnten Jahrhundert eingesetzt wurden. Beispielsweise lassen sich in der gegenwärtigen Forschung zur Dynamik innerzellulärer Ultrastrukturen deutliche Bezüge zu den grundlegenden technischen Verfahren zur Bewegungsaufzeichnung und Bewegungsanalyse sowie zu den Techniken der Vergrößerung und der Bildbeschleunigung erkennen, die im ausgehenden neunzehnten und frühen zwanzigsten Jahrhundert entwickelt wurden. So kommen etwa Methoden der Bewegungsanalyse wie die grafische Methode und die Chronofotografie, die wir aus den Jahrzehnten vor der Erfindung des Kinos kennen, in der gegenwärtigen Mikroskopie in abgewandelter Form und in deutlich kleinerer Dimensionierung wieder vor.

Diese Aktualisierung und Integration älterer Verfahren zur Bewegungsanalyse in die computergestützte Mikroskopie rückt Fragen und Konzepte ins Zentrum der medienkulturwissenschaftlichen Auseinandersetzung, die in wissenschaftsgeschichtlichen Untersuchungen von Verfahren zur Bewegungsaufzeichnung, die in der zweiten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts in Gebrauch kamen, formuliert wurden. Wie die wissenschaftsgeschichtliche Forschung zeigen konnte, entspann sich beispielsweise um die Methode der Kymografie herum ein Diskurs zur Selbstaufzeichnung der Natur. Der Diskurs zur Selbstaufzeichnung oder Selbstabbildung verknüpfte sich mit allen automatisierten Aufzeichnungsverfahren – ganz besonders prominent mit der Fotografie – und brachte einen wissenschaftlichen Stil hervor, den die Wissenschaftshistorikerin Lorraine Daston und der Wissenschaftshistoriker und Physiker Peter Galison als »mechanische Objektivität« (»mechanical objectivity«)⁴ bezeichnet haben. Wenn nun Verfahren wie die Kymografie in die gegenwärtige computergestützte Mikroskopie integriert

4 Lorraine Daston und Peter Galison, »Mechanical Objectivity«, in *Objectivity*, 115–190 (New York: Zone Books, 2007), 120. Siehe auch dies., »The Image of Objectivity«, in »Seeing Science«, Themenheft, *Representations* 40 (Herbst 1992): 82–83.

werden, stellt sich die Frage, ob, und wenn ja, wie das diskursive Gepäck, das diesem Verfahren anhaftet, gleichfalls mit in die Gegenwart transportiert wird.

Die Idee von der Selbstaufzeichnung der Natur ist an ein »maschinales Dispositiv«⁵ gebunden, wie es der deutsche Wissenschafts- und Medienhistoriker Wolfgang Schäffner genannt hat: eine apparative Anordnung, die maschinenlesbare Zeichen produziert und mit automatisierten Abläufen arbeitet, die der menschlichen Intervention keinen Raum lassen.⁶ Zur genaueren Beschreibung und Analyse dieses Dispositivs konzentriere ich mich zunächst auf die automatisierten Prozesse der Bilderzeugung in der computergestützten Mikroskopie.

1.1 Die Analog/Digital-Umwandlung in der computergestützten Mikroskopie

Mit Blick auf die medienwissenschaftliche Diskussion zur A/D-Umwandlung erscheint es lohnend, für die computergestützte Mikroskopie jene Umwandlungsschritte genauer zu untersuchen, in denen analoge Informationen in digitale Daten transformiert werden, mit denen der Computer rechnen kann, und zudem die weiteren Schritte der Transformationskette zu betrachten, in denen digitale Daten in Ausgabeformate übersetzt werden, die für die menschliche Sinneswahrnehmung zugänglich sind.

Den Ausgangspunkt für die Analyse der A/D-Umwandlung in der computergestützten Mikroskopie bildet die Definition des »Digitalen«, wie der deutsche Kultur- und Medienwissenschaftler Wolfgang Ernst sie in seiner Intervention in die Diskussion zur Analog/Digital-Unterscheidung vorschlägt. Ernst kritisiert die Gleichsetzung von »analog« und »kontinuierlich« sowie von »digital« und »diskret«, wie sie der deutsche Literaturwissenschaftler und Medientheoretiker Friedrich Kittler anregte,⁷ und bietet die

5 Wolfgang Schäffner, »Bewegungslinien: Analoge Aufzeichnungsmaschinen«, in *Electric Laokoon: Zeichen und Medien, von der Lochkarte zur Grammatologie*, Hg. Michael Franz, Wolfgang Schäffner, Bernhard Siegart und Robert Stockhammer (Berlin: Akademie Verlag, 2007), 132.

6 Siehe ebd., 131–132.

7 Siehe zum Beispiel in Friedrich Kittler, »Computergrafik: Eine halbtechnische Einführung«, in *Paradigma Fotografie: Fotokritik am Ende des fotografischen Zeitalters*, Band I, Hg. Herta Wolf (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2002). Siehe auch ders., »Die Welt des Symbolischen – eine Welt der Maschine«, 58–80, »Real Time Analysis, Time Axis Manipulation«, 182–207, »Protected Mo-

folgende Definition an: »Mit ›digital‹ ist – seitdem die Epoche der zeitkritisch sequenziellen Von-Neumann-Architektur des Computers diese Frage aufgeworfen hat – tatsächlich das Binäre gemeint.«⁸ In seiner Definition des ›Digitalen‹ hebt Ernst die mediengeschichtlich einschneidende Rolle des Computers und der sequenziellen Datenverarbeitung heraus und weist auf die Binarität als grundlegendes Funktionsprinzip eben dieser Form der Datenverarbeitung hin. Mit dem Begriff »zeitkritisch« rekurriert Ernst auf die Instrumentalisierung der Zeit in der Signalverarbeitung. Ernst geht es um die »Wiederentdeckung der Zeit als kritisches Paradigma in der Informationstheorie«⁹, wie die frühe Kybernetik Norbert Wiensers sie geleistet habe. Wiener hob die »Wahrscheinlichkeitsverteilung als Funktion von Zeit«¹⁰ heraus. Die Von-Neumann-Architektur, so Ernst, verarbeite »immer jeweils nur ein *bit* pro Zeitmoment« und folge einer Logik der »reinen Sukzessivität in der Prozessierung«¹¹ gemäß der Einsicht des britischen Logikers, Ma-

de«, 208–224, und »Es gibt keine Software«, 225–242, in *Draculas Vermächtnis: Technische Schriften* (Leipzig: Reclam, 1993). In der medienästhetischen Diskussion findet sich die Unterscheidung in ›analog‹ und ›digital‹ bereits in Nelson Goodmans Überlegungen aus dem Jahr 1968. »[S]yntaktisch und semantisch dicht[e]«, »undifferenziert[e]« Symbolsysteme bezeichnet Goodman als »analog«, »syntaktisch und semantisch durchgängig differenziert[e]«, »diskontinuierlich[e]« Systeme nennt Goodman »digital«. Nelson Goodman, *Sprachen der Kunst: Entwurf einer Symboltheorie* [i.O. 1968], aus dem amerikanischen Englisch übersetzt von Bernd Philippi (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1995), 154 und 155, Hervorhebung im Original. Jens Schröter datiert den Beginn der Analog/Digital-Unterscheidung bereits auf das Jahr 1946 und bezieht sich dazu auf die Diskussion zu dem ersten US-amerikanischen Digitalcomputer ENIAC und das Aufkommen der Kybernetik. Siehe Jens Schröter, »Analog/Digital – Opposition oder Kontinuum?«, in *Analog/Digital*, 10–11.

8 Wolfgang Ernst, »Den A/D-Umbruch aktiv denken – medienarchäologisch, kulturtechnisch«, in *Analog/Digital*, 51. Für eine Erklärung der Funktionsweise der Von-Neumann-Architektur siehe Friedrich Kittler, »Die Stadt ist ein Medium«, in *Geburt einer Hauptstadt*, Band 3: *Am Horizont*, Hg. Dietmar Steiner et al. (Wien: Edition BuchQuadrat, 1988) und ders., »Geschichte der Kommunikationsmedien«, in *Raum und Verfahren*, Hg. Jörg Huber und Alois Müller (Basel und Frankfurt am Main: Stroemfeld/Roter Stern, 1993), 187. Für eine Diskussion der Herausbildung des Binärstandards siehe Schröter, »Analog/Digital«, 11–12. Auch ›das Analoge‹ ist eine Kategorie, die eine komplexe Gemengelage auf eine einfache Formel zu bringen sucht. Und in der Debatte um ›digitale Bilder‹ wurde »jahrelang gar nicht oder nur unzureichend zwischen digitalen und digitalisierten Fotos sowie komplett am Computer errechneten Bildern differenziert«. Dominik Schrey, *Analoge Nostalgie in der digitalen Medienkultur* (Berlin: Kadmos, 2017), 155–156.

9 Ernst, »A/D-Umbruch«, 55.

10 Ebd. Ernst bezieht sich hier auf Norbert Wiener, »Time, Communication, and the Nervous System«, *Annals of the New York Academy of Sciences* 50 (Oktober 1948): 200, <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1948.tb39853.x>.

11 Ernst, »A/D-Umbruch«, 56.

thematikers, Kryptoanalytikers und Informatikers Alan Turing (1912–1954), »daß die Zeit zu bestimmten Zwecken als eine Aufeinanderfolge von Augenblicken anstatt als kontinuierlicher Fluß betrachtet werden kann«¹². Ernst führt aus:

»Die Turing-Maschine (als Entwurf von 1936 auf Papier) ist abstrakt und zeitunkritisch; im Moment der materiellen Implementierung aber kommen Signale (Messwerte) ins Spiel, die in Zahlen übertragen werden müssen, um digital rechenbar zu sein. Am Kippunkt zwischen analog und digital werden Medien von Welt-Repräsentations- zu Welterzeugungsorganen (berechnender, als es das Teleskop je vermochte). Symptomatisch dafür stehen die so genannten bildgebenden Verfahren in der Medizin (*imaging science*). Der digitale Raum ist der rechnende Raum, der eine Teilmenge des physikalischen Raums zu einem kybernetisch digitalen Universum macht und zur physikalischen Realität damit in etwa in einem Verhältnis steht wie das digitale zum »klassischen« Bild.«¹³

In der technischen Umsetzung von Turings Ideen, wie Ernst sie hier skizziert, werden analoge Messwerte in digitale Zahlen umgewandelt. Diese Beschreibung charakterisiert zunächst einmal zutreffend jene Umwandlungsleistung, die in der computergestützten Mikroskopie zwischen dem Detektor und dem Computer erfolgt: Die Anzahl der gemessenen Photonen, die auf ein Pixel im CCD-Chip des Detektors auftreffen, wandelt der Computer um in Bits. Die These zum Funktionswandel von Medien, die, sobald Information digitalisiert wird, »von Welt-Repräsentations- zu Welterzeugungsorganen« würden, wofür Ernst beispielhaft die bildgebenden Verfahren in der Medizin nennt, muss für die computergestützte Mikroskopie allerdings hinterfragt werden. Fraglich ist nämlich, ob der Funktionswandel tatsächlich »[a]m Kippunkt zwischen analog und digital«, wo Ernst ihn ansetzt, festzumachen ist. Träfe die Behauptung von Ernst zu, so wären Mikroskope genau solange als Repräsentationsmedien zu verstehen, wie sie noch nicht mit Computern verschaltet wurden, und sie würden in genau jenem Moment zu Medien der Welterzeugung, in dem sie in ein apparatives Gefüge eingebettet werden, das maßgeblich vom Computer bestimmt wird.

12 Alan M. Turing: »The State of the Art« [Vortrag London 1947], in ders., *Intelligence Service. Schriften*, Hg. Bernhard Dotzler und Friedrich Kittler (Berlin: Brinkmann und Bose, 1987), 192, zitiert in Ernst, »A/D-Umbruch«, 56.

13 Ernst »A/D-Umbruch«, 59.

1.1.1 Welterzeugung ohne Computer

Zwei Einwände gegen die Behauptung eines linearen Wandels der Funktion von technischen Medien, wie Ernst sie aufstellt, sollen hier vorgebracht werden. Bereits ältere Verfahren der Kontrasterzeugung wie etwa die Phasenkontrastmikroskopie¹⁴, die der niederländische Physiker Frits Zernike (1888–1966) zu Beginn der 1930er-Jahre entwickelte¹⁵, und das vom französisch-polnischen Physiker Georges Nomarski (1919–1997) in den frühen 1950er-Jahren entwickelte Differentielle Interferenzkontrastverfahren¹⁶ generieren Bilder, deren Relation zur Welt über ein simples Abbildungs-

14 Der Eintrag auf der deutschsprachigen Wikipedia-Seite bietet eine knappe und für Nicht-Fachleute gut verständliche Erklärung des Verfahrens an: »Das Phasenkontrast-Verfahren (aus griechisch *φασις*, *phasis* ›Erscheinung‹ und lateinisch *contra stare* ›entgegen stehen‹) ist ein Abbildungsverfahren in der Lichtmikroskopie. Dabei wird ausgenutzt, dass sich neben der Amplitude auch die Phase von Lichtwellen beim Durchgang durch ein Medium abhängig von seinem Lichtbrechungsindex verändert. So ist eine direkte Abbildung von Strukturen möglich, die nur einen geringen Eigenkontrast aufweisen und bei Hellfeldmikroskopie nur mit künstlicher Einfärbung sichtbar wären.« Wikipedia, »Phasenkontrastmikroskopie«, zuletzt geändert am 3. August 2021, <https://de.wikipedia.org/wiki/Phasenkontrastmikroskopie>. Ein neueres Lehrbuch der Zellbiologie weist auf die charakteristische Erscheinungsweise der Objekte hin, die von einem hellen Rand eingefasst im Bild sichtbar werden: »Für die im Phasenkontrastmikroskop sichtbaren Strukturen ist es typisch, dass sie gewöhnlich von einem weißen Saum umgeben sind. Man spricht vom Haloeffekt.« Sabine Schmitz und Christine Desel, *Der Experimentator: Zellbiologie* (Berlin: Springer Spektrum, 2018), 64.

15 Siehe Frits Zernike, »Das Phasenkontrastverfahren bei mikroskopischen Beobachtungen«, *Zeitschrift für Technische Physik* 16 (1935): 454–457. Für die Entdeckung des Phasenkontrasts erhielt Zernike 1953 den Nobelpreis für Physik. Siehe »The Nobel Prize in Physics 1953«, The Nobel Prize, zuletzt geprüft: 24. September 2021, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1953/summary/>.

16 Siehe Georges Nomarski, »Microinterféromètre Différentiel à Ondes Polarisées«, *Le Journal de Physique et le Radium* 16 (1955): 9–13. Der Wikipedia-Eintrag zum Stichwort »Differentialinterferenzkontrast« bietet die folgende knappe Erklärung des Verfahrens: »Der Differentialinterferenzkontrast (auch: differentieller Interferenzkontrast, Differential-Interferenz-Kontrast oder Nomarski-Kontrast, abgekürzt DIK oder DIC von englisch differential interference contrast) ist eine Methode der abbildenden Lichtmikroskopie, die Unterschiede in der optischen Weglänge im betrachteten Objekt in Helligkeitsunterschiede des Bildes umwandelt. Dadurch können transparente Phasenobjekte sichtbar gemacht werden.« Wikipedia, »Differentialinterferenzkontrast«, zuletzt geändert am 15. Februar 2018, <https://de.wikipedia.org/wiki/Differentialinterferenzkontrast>. Im Lehrbuch fällt die Erklärung deutlich fachlicher aus; zudem erfolgt hier der Hinweis auf die Vortäuschung einer räumlichen Struktur im Bild: »Durch Interferenz zweier Lichtstrahlen – d. h. zweier Bilder – werden Hell-Dunkel-Differenzen erzeugt, die zu einer Schattierung oder reliefartigen Darstellung des Objekts führen. [...] Die Reliefstruktur repräsentiert die Phasenverschiebungen des Lichtes, die durch das durchstrahlte Material erzeugte [sic] werden. Da das scheinbar plastische Abbild nicht durch die Raumstruktur des Ob-

verhältnis weit hinausweist. Beide Verfahren erschaffen deutlich mehr als Repräsentationen im Sinne von Abbildern der mikroskopischen Welt. Vielmehr bringen beide Bilderwelten hervor, die dezidierte Unterschiede zur physikalischen Welt aufweisen. So erscheinen die Objekte beim Phasenkontrastverfahren entsprechend des Haloeffekts (siehe Fußnote 14 in diesem Kapitel) als von einem hellen Schein umgebene Strukturen (siehe Abb. 1.1, linkes Bild). Das Nomarski-Verfahren macht zweidimensionale Objekte als räumliche Formen sichtbar (siehe Abb. 1.1, rechtes Bild). Beide Formen der Sichtbarmachung nutzen *optische Effekte* und nicht die Ergebnisse von Rechenprozessen.

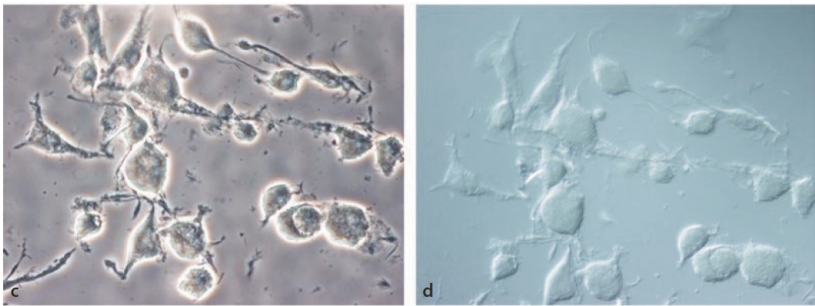


Abb. 1.1: Vergleich zwischen einem Phasenkontrastbild (c) und einem Bild, das mithilfe des Differenziellen Interferenzkontrastverfahrens erzeugt wurde (d)

Quelle: Sabine Schmitz und Christine Desel, *Der Experimentator: Zellbiologie* (Berlin: Springer Spektrum, 2018).

Die unhintergehbaren Einsichten der Wissenschaftsforschung seit der praktischen Wende, dass Fakten fabriziert, Sichtbarkeiten erzeugt und Phänomene – vermittelt verschiedener Darstellungsformen – zur Anschauung gebracht werden,¹⁷ lassen ein naives Verständnis von Bildern als Abbilder

jekts erzeugt wird, darf es nicht als Darstellung einer dreidimensionalen Oberflächenstruktur des Präparates missverstanden werden.« Schmitz und Desel, *Experimentator*, 64.

¹⁷ Siehe etwa Bruno Latour und Steve Woolgar, *Laboratory Life: The Social Construction of Scientific Facts* [1979], Einleitung von Jonas Salk, mit einem neuen Postskript und Index der Autoren (Princeton: Princeton University Press, 1986); Karin Knorr-Cetina, »The Fabrication of Facts: Toward a Microsociology of Scientific Knowledge«, in *The Sociology of Knowledge*, Hg. Nico Stehr und Volker Meja (New Brunswick: Transaction Books, 1984); Hans-Jörg Rheinberger, »Experimentalsysteme, Epistemische Dinge, Experimentalkulturen: Zu einer Epistemologie des Experiments«, *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* 42, Nr. 3 (1994), <https://doi.org/10.1524/dzph.1994.42.3.405>; ders., *Expe-*

der Welt schon längst nicht mehr zu. »Transversale Referenten«¹⁸, um einen Begriff Bruno Latours, einen der Begründer der Wissenschafts- und Technikforschung, aufzugreifen, also Bilder, die auf andere Bilder verweisen und erst im Zusammenspiel mit numerischen, diagrammatischen und verbalen Darstellungsformen einen Sinn ergeben, bringen bereits vor dem Einsatz von Computern durch die Verkettung unterschiedlicher Darstellungsformen Phänomene überhaupt erst hervor. Für die Erzeugung »epistemischer Dinge«¹⁹, wie Hans-Jörg Rheinberger sie genannt hat, jener konstruierten Gegenstände, an denen sich die Erkenntniswelt der Naturwissenschaften entfaltet, bedarf es nicht notwendigerweise des Computers. Beispielsweise wurden Zellbiolog*innen der Partikel im Zytoplasma, die später Ribosomen getauft wurden – jener Makromoleküle auf dem rauen endoplasmatischen Retikulum, die Proteine produzieren – um 1940 in den USA und Frankreich durch den Einsatz eines *mechanischen* Instruments, der Ultrazentrifuge, gewahr, wie Rheinberger aufgewiesen hat.²⁰

rimentalsysteme und epistemische Dinge: Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas [i.O. 1997], aus dem Englischen übersetzt von Gerhard Herrgott (Göttingen: Wallstein-Verlag, 2001); ders., »Objekt und Repräsentation«, in *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, Hg. Bettina Heinz und Jörg Huber (Zürich: Edition Voldemeer, 2001); Martina Heßler (Hg.), *Konstruierte Sichtbarkeiten: Wissenschafts- und Technikbilder seit der Frühen Neuzeit* (München: Fink, 2006).

18 Bruno Latour, »Arbeit mit Bildern oder: Die Umverteilung der wissenschaftlichen Intelligenz«, in *Der Berliner Schlüssel: Erkundungen eines Liebhabers der Wissenschaft*, aus dem Französischen von Gustav Roßler, 159–190 (Berlin: Akademie Verlag, 1996), 185 und 188. In dem Aufsatz »Der ›Pedologen-Faden‹ von Boa Vista – eine photo-philosophische Montage« hat Bruno Latour das Kaskadenmodell der – analogen – Referenz in der Analyse der Rückentwicklung des Urwaldes in der zentralbrasilianischen Provinz Roraima beschrieben. Siehe Bruno Latour, »Der ›Pedologen-Faden‹ von Boa Vista – eine photo-philosophische Montage«, in *Der Berliner Schlüssel: Erkundungen eines Liebhabers der Wissenschaft*, aus dem Französischen von Gustav Roßler, 191–248 (Berlin: Akademie Verlag, 1996).

19 Zum »epistemischen Ding« siehe die Fußnoten 54–57 in der Einleitung.

20 Siehe Hans-Jörg Rheinberger, »Partikel im Zellsaft: Bahnen eines wissenschaftlichen Objekts«, in *Ansichten der Wissenschaftsgeschichte*, Hg. Michael Hagner (Frankfurt am Main: Fischer, 2001), 307, 310–311. Der Begriff »Ribosom« etablierte sich allerdings erst ab dem Jahr 1958. Siehe ebd., 321.

1.1.2 Umwandlungsschritte und Quantifizierung

Die A/D-Umwandlung stellt in der computergestützten Mikroskopie lediglich *einen* von vielen Umwandlungsschritten in einer langen Transformationskette dar. Bereits die Zurichtung der Probe – ein Bearbeitungsschritt, in dem fluoreszierende Moleküle in die Zelle eingeschleust werden – führt das Moment des Künstlichen ein und betont die Herstellung. Verändert werden – in Abhängigkeit von dem eingesetzten Verfahren – entweder die Chemie der Zelle oder das Erbgut im Zellkern. In der Experimentalsituation läuft eine Vielzahl weiterer Umwandlungsschritte ab, wenn Licht in Elektrizität, Elektrizität in digitale Zahlen und digitale Zahlen in digitale Bilder transformiert werden. Wie sehen die Schritte der Transformationskette im Einzelnen aus?

Der am Labor des Zellbiologen Ron Vale an der Universität von San Francisco tätige Bioinformatiker und Mikroskopiker Nico Stuurman betont in seinem Videovortrag zur Bilderzeugung in der computergestützten Fluoreszenzmikroskopie, dass es bei der Datenerhebung am Mikroskop um die Umwandlung eines analogen Signals in ein digitales Ausgabeformat ginge. Gemessene Photonenquanten werden in speicherbare und prozessierbare Zahlenfolgen umgewandelt, wie Stuurman verdeutlicht, wenn er sagt: »We go from an analogue entity to a digital fixed number that now can be moved through computer memory without any loss whatsoever.«²¹ Schaut man sich Stuurmans Darstellung der einzelnen Umwandlungsschritte jedoch genauer an, stellt man fest, dass die Umwandlung von einem analogen in ein digitales Signal lediglich *einen* Umwandlungsschritt unter vielen darstellt. Viel wichtiger als die A/D-Umwandlung erscheint die Quantifizierung: Ziel eines fluoreszenzmikroskopischen Experiments ist es, Messwerte zu generieren, die zuverlässige Aussagen über die Strukturen und Dynamik der Zelle zulassen.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden bereits auf dem Weg zur Erzeugung eines digitalen Bildes verschiedene Verfahren eingesetzt, die mit Formen der Quantifizierung arbeiten. Beim Verfahren der Photonenanregung (*photon excitation*) etwa werden einzelne Photonen in den fluoreszierenden Bestandteilen der Probe mithilfe stark gebündelten Lichts, das der Probe in Form eines Laserstrahls zugeführt wird, auf ein höheres Energieniveau gebracht.

21 Nico Stuurman, »Image Acquisition for Quantitative Analysis«, aufgenommen im Oktober 2018 für *iBiology*, Videovortrag, 29:35, <https://www.ibiology.org/techniques/image-acquisition/>.

Ziel der Anregung der Photonen ist die Emission messbarer Lichtquanten in definierten Wellenlängenbereichen, die einzelne Pixel auf einem CCD-Chip eines Detektors – wie beispielsweise einer CCD-Kamera – aktivieren.²² Ähnlich wie jene Digitalkameras, die im Alltag in Gebrauch sind, erfüllt die CCD-Kamera in der Mikroskopiepraxis ihre Aufgabe als optisches Aufzeichnungsinstrument. Anders als die Digitalkamera im Alltag ist die CCD-Kamera in der Mikroskopie allerdings ein Messgerät, das die von der Probe ausgesandten Photonen detektiert und die Intensität des Lichts misst, das von den einzelnen Punkten der Probe ausgeht und auf den CCD-Chip auftrifft. Der CCD-Chip wandelt, gemäß des fotoelektrischen Effekts, die auf ihn auftreffenden Photonen in Photoelektronen um. Die Anzahl der Photonen, die jeweils auf ein Pixel des Chips auftreffen, bestimmen den Grauwert, in dem dieses Pixel am Bildschirm erscheint. Damit überhaupt Pixel am Bildschirm erscheinen können, übermittelt die Kamera die Messwerte zur Lichtintensität jedes einzelnen Pixels an den angeschlossenen Computer. Der Computer speichert die von der Kamera übermittelten Informationen in symbolischer Form, nämlich als Zahlen, und gibt sie in Form von Bildpunkten aus.

Jedes von der Digitalkamera aufgezeichnete Einzelbild besteht aus einem Raster, in dem die einzelnen Pixel gemäß der binären Codierung entweder aktiviert oder deaktiviert sind. Die auf dem Chip als Binärcode gespeicherte und in einem starren Raster angeordnete Information wird präzisen Zahlenwerten zugeordnet, mit denen der Computer arbeiten kann. Im Falle der 8-Bit-Architektur sind das 256 verschiedene Grauwerte. Nico Stuurman er-

22 Die Fluoreszenzmikroskopie nutzt allerdings nicht allein Kamera-basierte Systeme. Die konfokale Laser-Scanning-Mikroskopie (LSM) etwa arbeitet standardmäßig nicht mit CCD-Kameras, sondern verwendet ein Rasterverfahren, bei dem ein Laserstrahl, der von beweglichen Scanspiegeln gelenkt wird, die fluoreszierenden Moleküle nacheinander anregt. Detektoren wie Photomultiplier (PMTs), Avalanche-Photodioden und Hybrid-Detektoren wandeln hier die emittierten Photonen in Elektronen um. Dabei nutzen sie den fotoelektrischen Effekt. Die Messdaten, die auf diese Weise erhoben werden, werden im Computer Punkt für Punkt und Zeile für Zeile zu einem vollständigen Bild zusammengesetzt (zum Beispiel im Format 512 mal 512 Pixel). Eine spezielle Lochblende (»pinhole«) blendet Licht außerhalb der Schärfeebene aus und erhöht auf diese Weise den Kontrast. Für eine knappe, für Nicht-Fachleute verständliche Erklärung des Verfahrens siehe Wikipedia, »Laser-Scanning-Mikroskop«, zuletzt bearbeitet am 4. Juli 2018, <https://de.wikipedia.org/wiki/Laser-Scanning-Mikroskop>. Für eine detaillierte Erklärung der konfokalen Mikroskopie siehe Kurt Thorn, »Optical Sectioning and Confocal Microscopy«, aufgenommen im Juni 2009 für *iBiology*, Videovortrag, 24:46, <https://www.ibiology.org/talks/confocal-microscopy/>.

klärt die Schritte, die notwendig sind, um Photonen in Bilder umzuwandeln, folgendermaßen:

»All these types of detectors share the same principle. They take in light in the form of photons and they convert that into electrons through the photoelectric effect. At a certain point the charge, the number of electrons, is converted into a voltage and that voltage is then subsequently converted into a digital number that is being transported into the computer. And the computer then uses the digital number to build up the image.«²³

Photonen werden in Elektronen umgewandelt, Ladung, also die Anzahl der Elektronen, wird in Spannung transformiert, die sodann in eine digitale Zahl übersetzt wird, die dem Computer zugeführt und von diesem zu einem Bild verarbeitet wird. Kann in diesem mehrschrittigen Prozess eindeutig ein Punkt identifiziert werden, an dem analoge in digitale Daten umgewandelt werden? Die Krux der Analog/Digital-Umwandlung liegt in der Konvertierung von Spannung in Binärcode. Gemessen und gezählt wird allerdings bereits vor diesem Konvertierungsschritt, nämlich an dem Punkt, an dem die Anzahl der Elektronen bestimmt wird.²⁴

1.1.3 Erwünschte und gefürchtete Verluste

In der medienwissenschaftlichen Diskussion zur A/D-Umwandlung wird immer wieder die Frage des Verlusts angesprochen.²⁵ So schreibt beispielsweise der Medienwissenschaftler Harmut Winkler: »Jede Umsetzung von analog zu digital oder umgekehrt bringt Verluste mit sich.«²⁶ Dabei bleibt allerdings unklar, was genau verloren geht, wie der Medienkulturwissenschaftler Dominik Schrey anmerkt, der eine nostalgische Grundhaltung in Positionen identifiziert, wie sie etwa Winkler vertritt, und vermutet,

23 Nico Stuurman, »Cameras and Photosensitive Detectors I: How do They Work?«, aufgenommen im April 2012 für *iBiology*, Videovortrag, 22:56, <https://www.ibiology.org/talks/photosensitive-detectors/>. Die CCD-Kamera ist eine wesentliche Komponente vieler Mikroskop-Systeme, die in der gegenwärtigen Fluoreszenzmikroskopie verwendet werden. Die Digitalkamera ist fest mit dem Mikroskop verbunden und an einen Computer angeschlossen.

24 Ernst reflektiert diesen nicht beabsichtigten analogen Wirklichkeitsbezug des Digitalen: »Tatsächlich bewahrt selbst das *bit* einen kleinstdenkbaren analogen Bezug zur Wirklichkeit, insofern es deren Impuls(e) abbildet und in elektrische Signale *umsetzt*, unwillkürlich.« Ernst, »A/D-Umbruch«, 57, Hervorhebung im Original.

25 Siehe Jens Schröter, »Das Ende der Welt«, 335–336.

26 Hartmut Winkler, *Basiswissen Medien* (Frankfurt am Main: Fischer, 2008), 129.

dass es Winkler um einen »Verlust von Wirklichkeit«²⁷ gehe, die dieser stillschweigend als der medialen Repräsentation vorausgehend setze, anstatt sie als einen Effekt derselben zu konzipieren.²⁸ Schrey gibt zu, dass es »prinzipiell nicht falsch« sei, »von der Digitalisierung als einem verlustbehafteten Transformationsprozess zu sprechen, doch es erscheint notwendig, diese Feststellung zumindest zu konkretisieren und von einem ›Komplexitätsverlust‹ oder – besser – von einer ›Komplexitätsreduktion‹ zu sprechen«²⁹. Zudem sind auch Umwandlungen zwischen verschiedenen digitalen Formaten verlustbehaftet. Der russisch-US-amerikanische Computerwissenschaftler und Medientheoretiker Lev Manovich hat aufgewiesen, dass die Annahme eines Informationsverlusts bei der Umwandlung von analogen in digitale Formate, die als Begründung für die grundlegende Differenz der beiden Formate angeführt wird, nicht haltbar ist. Denn auch die Umwandlungen von einem digitalen Format in ein anderes seien mit einer Datenreduktion oder einer Datenkompression verbunden wie beispielsweise im Falle der Speicherformate JPEG und MPEG, die nach dem Prinzip der »lossy compression«³⁰ arbeiteten.³¹

In der Praxis der computergestützten Mikroskopie lassen sich einzelne Schritte im Forschungsprozess erkennen, in denen der Datenverlust ein Problem darstellt, und von anderen Schritten unterscheiden, in denen eine Komplexitätsreduktion durchaus wünschenswert ist. So wird das Problem der »lossy compression« sehr ernst genommen, sofern es den Verlust von Messdaten betrifft, da der damit einhergehende Präzisionsverlust als uneingeschränkt vermeidungswürdig gilt. Anders als in der Digitalfotografie im Alltagskontext, bei der lediglich jene Daten gespeichert werden, die die Ausgabe von Bildern ermöglichen, die das menschliche Auge sehen kann, wird in der computergestützten Messung am Mikroskop der gesamte Datensatz – die Fachsprache der Mikroskopie verwendet den Begriff der »Metadaten« – festgehalten, der die Anzahl der gemessenen Photonen für jedes einzelne Pixel zu jedem Zeitpunkt der Messung genau dokumentiert. Die verlustfreie Speicherung der Metadaten ist deshalb wünschenswert, damit die Daten zu einem späteren Zeitpunkt mit anderen Methoden noch einmal analysiert werden können. Gespeichert und in die Weiterverarbeitung

27 Schrey, *Analoge Nostalgie*, 151.

28 Siehe ebd.

29 Ebd., 152.

30 Lev Manovich, *The Language of New Media* (Cambridge, MA: MIT Press, 2001), 54.

31 Siehe ebd., 52–54.

eingespeist werden auch jene Daten, die Informationen enthalten, die sich dem menschlichen Sehvermögen entziehen, da sie in den 256 Graustufen der 8-Bit-Architektur am Bildschirm nicht zur Erscheinung kommen.

Bei der Wahl der Anzahl der Bits der Graustufenskala hingegen, die in einem vorangehenden Schritt während der Vorbereitung der Aufnahmen getroffen wird, orientiert sich die Mikroskopie an dem Wahrnehmungsvermögen des menschlichen Auges und an den Ausgabeoptionen, die der Bildschirm zur Verfügung stellt.³² Die Größe und Anzahl der Pixel auf dem CCD-Chip in der Kamera wird mit dem optischen Auflösungsvermögen des Mikroskops abgestimmt. Während der Datenverlust bei der Speicherung des Datensatzes am Ende der Messung ein erhebliches Problem darstellt und die Ergebnisse des Experiments ungültig machen kann, gilt bei der Zuordnung von Pixeln zur Auflösungsgrenze des Mikroskops gemäß dem Nyquist-Theorem ein Verhältnis von zwei bis drei Pixel pro auflösbarem Abstand als erstrebenswert.³³ Im letztgenannten Fall soll eine Untergrenze von Komplexität in der Praxis nicht unterschritten werden.

1.1.4 Die Widerständigkeit des Analogen

Bislang ist deutlich geworden, dass im Mikroskop-System während eines Experiments eine Folge von Schritten abläuft, in denen analoge Daten in analoge Daten, analoge Daten in digitale Daten und digitale Daten in digitale Daten umgewandelt werden. Die Umwandlung von analogen in digitale Daten bildet lediglich einen Umwandlungsschritt in einer Kette von Umwandlungsschritten. Die Transformationskette umfasst die Umwandlung von Photonen in Elektronen, von Ladung in Spannung und die Konversion von Elektronen, das heißt Spannung, in digitale Zahlen, die ihrerseits in Bilder und Graphen umgewandelt und am Bildschirm ausgegeben und zugleich als numerischer Datensatz gespeichert werden. Die fluoreszenzmikroskopische Hardware integriert die Kette der einzelnen

³² Maßgeblich ist weiterhin, in welcher Größe das Bild publiziert werden soll. Bereits bei der Bildherstellung berücksichtigen Forschende die Größen- und Auflösungsvorgaben der für die Publikation avisierten Fachzeitschrift.

³³ Siehe Nico Stuurman und Kurt Thorn, »Cameras and Digital Image Analysis«, aufgenommen im April 2013 für *iBiology*, Videovortrag, 33:40, <https://www.ibiology.org/talks/digital-image-analysis/>.

Umwandlungsschritte. Die Software, deren Konfiguration die Nutzenden am Bildschirm vornehmen, führt die Schritte automatisch aus.

Deutlich geworden ist weiterhin, dass es sich bei fluoreszenzmikroskopischen Systemen, wie sie in der Laborforschung seit Beginn der 1980er-Jahre standardmäßig in Gebrauch sind, um Analog/Digital-Hybride handelt. Den Analog/Digital-Hybrid hat der deutsche Medienwissenschaftler Jens Schröter, der die Geschichte der Analog/Digital-Unterscheidung aufgearbeitet hat, als ein »technisches Dispositiv« identifiziert, das, wie Schröter hervorhebt, »auf verschiedenen Ebenen zugleich analog und digital« ist und bei dem es sich nicht etwa um ein »Kontinuum zwischen analog und digital«³⁴ handelt. Dominik Schrey betont die Wichtigkeit dieser Feststellung, die Schröter im Ergebnis seiner Kittler-Lektüre getroffen hat,

»bedeutet sie doch, dass dadurch die ›binäre Logik‹ aufgebrochen wird, der die Medienwissenschaft in Bezug auf die A/D-Unterscheidung ansonsten meist folgt. Medien oder ihre Produkte sind entweder analog oder digital, Zwischenräume in der Regel nicht vorgesehen.«³⁵

In diesen Konsens, der digital und analog kategorisch unterscheidet und der die Diskussion um das digitale Bild in den 1990er-Jahren kennzeichnete, hat der deutsche Medienwissenschaftler und Medienhistoriker Claus Pias bereits früh interveniert und provokativ behauptet, dass es das digitale Bild als solches nicht gebe. Entscheidend für Pias' Argumentation war der Verweis auf den materiellen Träger des digitalen Bildes: »Es gibt keine Daten ohne Datenträger. Es gibt keine Bilder ohne Bildschirme. Alle Information ist an materielle Technologien und historisch wandelbare Verfahren geknüpft.«³⁶ Die Schweizer Filmwissenschaftlerin Barbara Flückiger unterstreicht diesen Gedanken, wenn sie in ihren Ausführungen zu digitalen Spezialeffekten beobachtet, dass das digitale Bild sich sowohl über seine Speichermedien als auch über »die Materialität seiner Oberfläche, auf der es [...] in einer für den Rezipienten wahrnehmbaren Dimension erscheint«³⁷, mit der

34 Schröter, »Analog/Digital«, 23, der Kittler paraphrasiert. Siehe Kittler, »Geschichte der Kommunikationsmedien«, 185.

35 Schrey, *Analoge Nostalgie*, 155.

36 Claus Pias, »Das digitale Bild gibt es nicht: Über das (Nicht-)Wissen der Bilder und die informatische Illusion«, *Zeitenblicke* 2, Nr. 1 (2003), o.S., Absatz 53, <https://doi.org/10.25969/mediarep/4082>.

37 Barbara Flückiger, *Visual Effects: Filmbilder aus dem Computer* (Marburg: Schüren, 2008), 43. Zur engen Verflechtung des Analogenen und des Digitalen in den bildgebenden Verfahren der Naturwissenschaften siehe auch Martina Hefler, »Von der doppelten Unsichtbarkeit digitaler Bilder«, *Ze-*

physikalischen Welt verbindet. Der Bogenschlag zur sinnlichen Wahrnehmung der Rezipierenden, den Flückiger vollzieht, erfolgt in der computer-gestützten Mikroskopie erst an jenem Punkt des mehrschrittigen Prozesses des Messens und Konvertierens, an dem die Ergebnisse des Experiments in verschiedenen bildlichen, grafischen und numerischen Darstellungsformen am Bildschirm sichtbar werden (siehe Abb. 1.2). Doch muss man berücksichtigen, dass alle diese Schritte nahezu zeitgleich ablaufen: Bereits im Verlauf des Experiments erscheinen bildliche, numerische und diagrammatische Darstellungsformen simultan am Bildschirm und bieten sich dem interpretierenden Verstand und der respondierenden Sensibilität der Betrach-tenden dar.

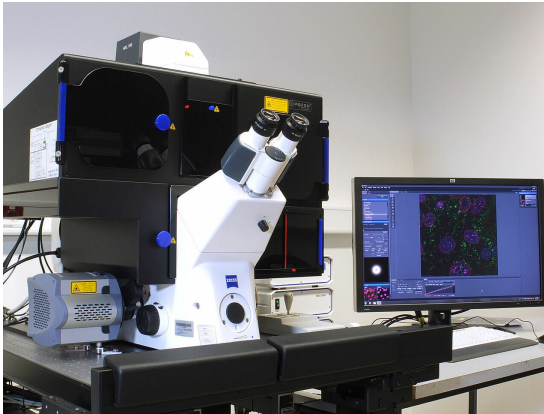


Abb. 1.2: Visualisierung der Ergebnisse eines Experiments in der hochauflösenden Mikroskopie

Quelle: Center for Advanced Imaging (CAi), Zeiss Elyra PS Weitfeld-Mikroskop-System, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, <https://www.cai.hhu.de/ausrustung/superaufloesungs-mikroskope/zeiss-elyra-ps>.

Der materielle Versuchsaufbau belegt auch, dass »die Welt der Physik« in Verfahren der Lebendzellmikroskopie sich keineswegs leicht »ausfiltern«³⁸ lässt, wie Wolfgang Ernst es für das Digitale behauptet hat. So bleibt »das

tenbliche 5, Nr. 3 (2006), <https://doi.org/10.25969/mediarep/4073>. Dort heißt es: »Analoge und digitale *Praxen* sind aufeinander bezogen und aufeinander angewiesen. Das Analoge wird, so lässt sich beobachten, keineswegs durch das Digitale verdrängt oder substituiert.« Ebd., o.S., Absatz 3, Hervorhebung im Original.

³⁸ Ernst, »A/D-Umbruch«, 54.

Analoge« in mindestens drei Erscheinungsweisen präsent. Zum einen bildet das Mikroskop, dessen funktionaler Bestandteil aus einer komplexen Anordnung von Linsen konstruiert ist, das Kernelement des Mikroskop-Systems, das in der Fachsprache als »Set-up« bezeichnet wird. Die Linsen im Mikroskop gehorchen den Gesetzen der Optik wie der Lichtbrechung, der Aberration – das heißt der Ablenkung – und der Beugung des Lichts. Zweitens ist die Materialität – die physische Ausdehnung – der komplexen Anordnung technischer Geräte (siehe Abb. 1.3), die neben dem Mikroskop aus Lasern, Kühlgerät, Bildschirm und Computer besteht und die die technische Voraussetzung für die Erzeugung digitaler Daten überhaupt bildet, physikalischen Gesetzen wie der Schwerkraft und der Thermodynamik unterworfen.

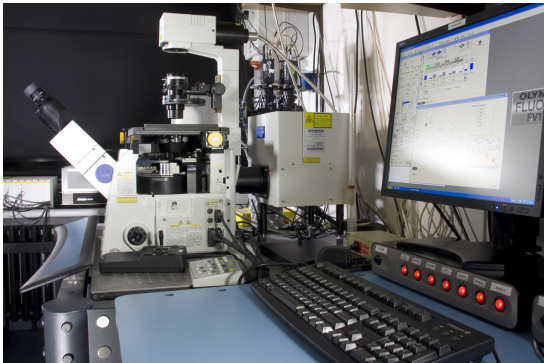


Abb. 1.3: Konfokalmikroskop-System

Eines von fünf Konfokalmikroskop-Systemen, mit denen Forschende in den Lebenswissenschaften am CAi arbeiten

Quelle: Center for Advanced Imaging (CAi), Olympus Fluoview 1000, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, <https://www.cai.hhu.de/ausrustung/konfokale-systeme/olympus-fluoview-1000-picoquant-flim-6ch>.

Und drittens manifestiert sich »das Analoge« auf der Ebene der Rezeption, da »digitale Medien«, wie Schröter mit Recht feststellt, »auf ihren Oberflächen *aesthetisch* analog bleiben«³⁹. Der Grund dafür ist allerdings nicht, dass »menschliche Sinne nur kontinuierliche Schwingungen verarbeiten können«⁴⁰, wie er argumentiert. Wie Flückiger mit Bezug auf die Filmwahr-

39 Schröter, »Analog/Digital«, 25, Hervorhebung im Original.

40 Ebd.

nehmung und die Wahrnehmung digitaler Bilder am Computerbildschirm zutreffend bemerkt, ist es vielmehr »eine genuine Eigenschaft des menschlichen Wahrnehmungssystems, insbesondere des visuellen Systems, dass es diskontinuierliche Erscheinungen zu einem Ganzen verschmilzt, wenn die zeitlichen oder räumlichen Einheiten klein genug sind«⁴¹. Auch wenn »die binär kodierte Informationen wieder in physikalische Dimensionen übersetzt werden müssen, die für das menschliche Wahrnehmungssystem zugänglich sind«, so ist es – sagt Flückiger – doch keinesfalls »so, dass diese Daten kontinuierlich aufbereitet werden müssen«, da die Übersetzung »in elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Bereich zwischen circa 400 und 700 nm«⁴² vom Grafikprogramm geleistet wird. Und auch Ernst erkennt an, dass beispielsweise bei der Digitalisierung von Audiosignalen, ähnlich wie im Fall von Bewegtbildern im Film und im Fall der Grauwert-Skalen in der digitalen Bilderzeugung, oberhalb bestimmter Schwellenwerte eine Unterscheidbarkeit zwischen den zusammengefügte diskreten Einheiten, die der menschlichen Wahrnehmung als eine kontinuierliche Form dargeboten werden, nicht mehr möglich ist. Er schreibt: »Erst in ästhetischer Form, also phänomenologisch wird die Operation des Computers für menschliche Sinne fassbar.«⁴³ Schröter, Flückiger und Ernst weisen alle drei darauf hin, dass digitale Daten und analoge Signale in bestimmten Bereichen für die menschliche Wahrnehmung nicht unterscheidbar sind.

Soweit kann festgehalten werden, dass der Übergang von der Repräsentation zur Welterzeugung in der Mikroskopie nicht an den Einsatz des Computers gebunden ist. In der computerstützten Mikroskopie kommen das Analoge und das Digitale auf mehreren Ebenen zusammen: Zum einen verbindet das materielle Mikroskop-System analoge Komponenten mit digitalen Prozessen. Zum anderen ist die Umwandlung von einem analogen Signal in digitale Zahlen lediglich ein Umwandelungsschritt in einer langen Transformationskette, die auf die quantitative Erfassung des untersuchten Phänomens abzielt, zugleich aber auch mit der Herausforderung umgehen muss, das Phänomen für die menschliche Wahrnehmung zugänglich zu machen. Die Probleme, die diese doppelte Zielsetzung aufwirft, und eine Möglichkeit, wie sie gelöst werden, zeigt die Praxis des Umgangs mit dem Datenverlust in der computergestützten Mikroskopie auf. Der Einsatz

41 Flückiger, *Visual Effects*, 40.

42 Ebd., 40.

43 Ernst, »A/D-Umbruch«, 62.

des Computers in der Mikroskopie eröffnet neue Möglichkeiten für die Sichtbarmachung und für die Quantifizierung innerzellulärer Strukturen und Dynamik und bringt zugleich neue Probleme für die Wahrnehmung und Darstellung der untersuchten Phänomene mit sich, für die Lösungen gefunden werden müssen.

1.2 Die Selbstaufzeichnung der Natur am Computer

Bei allen Veränderungen weisen die gegenwärtigen Verfahren der Lebendzellmikroskopie jedoch auch erstaunliche Ähnlichkeiten zur Kymografie und zur Chronofotografie auf, jenen mechanisch-optischen Verfahren, die zur Aufzeichnung und Analyse der Bewegungsabläufe von Mensch und Tier bereits in der zweiten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts in der exakten Physiologie entwickelt und angewendet wurden. Bewegungsvermessung und Bewegungsanalyse können noch immer als Zielrichtungen der Erforschung der lebenden Objekte gelten, die heutzutage in der biologischen Forschung vermittels von Mikroskopen, Lasern, fluoreszierenden Proteinen, Detektoren und Computern untersucht werden. Allein der Maßstab hat sich drastisch verändert. In der heutigen Lebendzellmikroskopie verlagerte sich die Größenordnung des Untersuchungsgegenstands von der Makroebene in den Mikro- und Nanometerbereich hinein und die verwendeten kymografischen und chronofotografischen Verfahrensweisen wurden entsprechend angepasst. Während in der Physiologie des neunzehnten Jahrhunderts noch der menschliche Pulsschlag und ein Möwenflügel ihre Bewegungen vermittels eines apparativen Arrangements, das aus Drähten, Spulen und Holz- und Metallgerüsten bestand, als Spuren auf Papier übertrugen, so werden in der hochauflösenden Mikroskopie heutzutage die Spuren der Bewegung zellulärer Ultrastrukturen aufgezeichnet und in grafischer Form als Bewegungsmuster am Computerbildschirm dargestellt. Richtete sich das Interesse von Physiologen wie Carl Ludwig (1816–1895), Hermann von Helmholtz (1821–1894) und Étienne-Jules Marey (1830–1904) noch auf menschliche und tierische Organismen, so gilt das Forschungsinteresse von Zellbiolog*innen gegenwärtig sehr spezifischen innerzellulären Ultrastrukturen wie etwa der feinen Kanalstruktur des peripheren endoplasmatischen Retikulums oder den Bewegungsmustern einzelner Proteine wie etwa GPI-

GFP, das mit dem fluoreszierenden Protein GFP⁴⁴ gekennzeichnete Molekül GPI, das für die stetige Neuformierung des am Zellstoffwechsels beteiligten Golgi-Apparates verantwortlich ist. In der Forschung zur Struktur des peripheren endoplasmatischen Retikulums und seiner Dynamik, wie sie gegenwärtig in der Zellbiologie betrieben wird, werden beispielsweise vermittels eines kymografischen Verfahrens die Bewegungen der feinen Kanäle des peripheren endoplasmatischen Retikulums bildlich aufgezeichnet, grafisch erfasst und numerisch vermessen.⁴⁵ Die bereits um 1850 in den exakten Wissenschaften verbreitete Vorstellung, die Dinge zeichnen sich vermittels der Apparate selbst auf, schreibt sich in der computergestützten Mikroskopie als Praxis der apparativ gesteuerten Vermessung lebendiger Strukturen und Prozesse im submikroskopischen Bereich fort.

1.2.1 Die grafische Methode als Verfahren zur Selbstaufzeichnung der Natur

Die Entwicklung der grafischen Methode stellte einen Wendepunkt in der Wissenschaft um 1850 dar.⁴⁶ Die Wissenschafts-, Technik- und Medizinhistorikerin Soraya de Chadarevian ordnet die grafische Methode in die Geschichte exakter Messmethoden ein, da sie an der »genaueren Erfassung schneller Bewegungen« interessiert wäre und auf die »Visualisierung und

44 Zur Geschichte und Funktionsweise von GFP siehe die Ausführungen im Abschnitt 3.3.1.

45 Für ein Beispiel aus der aktuellen Forschung zum endoplasmatischen Retikulum, das im Folgenden noch eingehend diskutiert wird, siehe Jonathon Nixon-Abell et al., »Increased Spatiotemporal Resolution Reveals Highly Dynamic Dense Tubular Matrices in the Peripheral ER«, *Science*, neue Reihe, 354, Nr. 6311 (2016), aaf3928-2 sowie Fig. 1B, 2Ci und Cii, <https://doi.org/10.1126/science.aaf3928>.

46 Siehe Robert Brain, »The Graphic Method: Inscription, Visualization, and Measurement in Nineteenth-Century Science and Culture«, Dissertationsschrift, University of California, 1996. Siehe auch Schäffner, »Bewegungslinien«, 130–131. Schäffner folgt Brains Ausführungen zur Relevanz der grafischen Methode für die Ausdifferenzierung der Wissenschaften im neunzehnten Jahrhundert. Robert Brain hat im Ergebnis langjähriger weiterführender und vertiefender Forschung im Jahr 2015 eine Monografie vorgelegt, die die grafische Methode in den größeren Kontext der physiologischen Forschung, der künstlerischen Praktiken der Avantgarde und der ästhetischen Theorie des ausgehenden neunzehnten Jahrhunderts einordnet. Siehe Robert Brain, *The Pulse of Modernism: Physiological Aesthetics in Fin-de-Siècle Europe* (Seattle und London: University of Washington Press, 2015). Zur grafischen Methode als Einschnitt in der naturwissenschaftlichen Praxis in der Mitte des neunzehnten Jahrhunderts in Europa siehe ebd. 5 und 7.

Messung kurzer Zeitabschnitte«⁴⁷ ziele. Den kulturellen Kontext, in dem die Methode entwickelt wurde, kennzeichne

»eine Faszination mit der Transformation und Übersetzung verschiedener sinnlicher Qualitäten ebenso wie verschiedener Energieformen ineinander, ein Interesse an der exakten mechanischen Registrierung und Einschreibung natürlicher Phänomene, der Versuch einer weitestgehenden Ausschaltung menschlicher Intervention und konventioneller Kommunikationssysteme.«⁴⁸

Wenngleich Naturwissenschaftler bereits im frühen neunzehnten Jahrhundert mit grafischen Aufschreibesystemen experimentierten, so ließe sich die Zäsur am deutlichsten an der Beschreibung des Kymografen oder Wellenschreibers durch Carl Ludwig im Jahr 1847 festmachen.⁴⁹ Ludwigs Kymograf ermöglichte es, so unterschiedliche Bewegungen wie den Pulsschlag oder die Übertragungsgeschwindigkeit der Nervenreizung in Form von Graphen und Kurven aufzuzeichnen. Den Begriff »grafische Methode« (*méthode graphique*) etablierte der französische Physiologe und Pionier der Fototechnik Étienne-Jules Marey schließlich in seinem 1878 erschienenen Buch *La Méthode Graphique dans les Sciences Expérimentales*.⁵⁰

Das ausgeprägte Interesse der Wissenschaften im neunzehnten Jahrhundert an der automatischen Registrierung betont auch Wolfgang Schäffner, der die Kurven und Graphen als »Bestandteil eines maschinalen Dispositivs« interpretiert, in dem »sich die Dinge gewissermaßen selber aufzuschreiben scheinen«⁵¹. Im Aufzeichnen und Aufschreiben sieht Schäffner

»das entscheidende Medium experimenteller Datenerzeugung. Die Aufzeichnung produziert und formatiert Daten. In diesem Sinne kann die Produktion und Speicherung naturwissenschaftlichen Wissens im Labor als eine der entscheidenden Domänen europäischer Datenverarbeitung im 19. Jahrhundert gelten«⁵².

Die Delegation der Erzeugung, Speicherung und Verarbeitung eines experimentell erzeugten Datenflusses an automatisierte Systeme ist, Schäffner zu-

47 Soraya de Chadarevian, »Die ›Methode der Kurven‹ in der Physiologie zwischen 1850 und 1900«, in *Die Experimentalisierung des Lebens: Experimentalsysteme in den biologischen Wissenschaften 1850/1950*, Hg. Hans-Jörg Rheinberger und Michael Hagner (Berlin: Akademie Verlag, 1993), 34.

48 Ebd., 37–38.

49 Bei Ludwig hieß das Instrument noch »Kymographion«.

50 Siehe de Chadarevian, »Die ›Methode der Kurven‹«, 28, 29 und 32.

51 Schäffner, »Bewegungslinien«, 132.

52 Ebd., 131–132.

folge, aufs Engste mit der Begrenztheit des menschlichen Wahrnehmungsvermögens verknüpft:

»Dieser Datenfluß überfordert aber die Beobachtungs- und Übertragungskapazität des Experimentators dann, wenn die Phänomene durch ihre Geschwindigkeit oder ihre Langsamkeit die Wahrnehmungsschwelle unterlaufen oder in ihrer synchronen Vielfalt nicht gleichzeitig beobachtet werden können.«⁵³

Nicht allein die Phänomene, die zu schnell oder zu langsam ablaufen, als dass die unvermittelte menschliche Wahrnehmung sie erfassen könnte, sondern auch die maschinell erhobenen Datenmengen führen die menschliche Wahrnehmungsleistung an ihre Grenze. Was sich in der automatisierten Datenerhebung bereits im neunzehnten Jahrhundert entspinnt – und nicht erst in Zeiten von Big Data –, ist ein Dialog zwischen der Natur und der Maschine, die den menschlichen Akteur ausschließt. Die Vorstellung eines direkten Kontakts zwischen den Phänomenen und der Maschine, der den Menschen ausklammert und die apparativ vermittelte Selbstregistrierung der Natur ermöglicht, findet sich beispielsweise auch in der damaligen Idee, die Fotografie sei ein »pencil of nature«⁵⁴, wie sie der Brite William Henry Fox Talbot (1800–1877), der Erfinder der Fotografie, in seinem gleichnamigen Werk formulierte.

1.2.2 Automatisierung, die »Rhetorik der Selbstevidenz« und das Ideal der »mechanischen Objektivität«

Die Ausklammerung des Menschen ist eng verknüpft mit dem Glauben an das Objektivitätsversprechen automatisierter Verfahren der Bildgebung und wird vor dem Hintergrund des Wandels des Objektivitätsbegriffs im neunzehnten Jahrhundert verständlich. Die Vorstellung der »Selbstabbildung« oder »Selbst-Repräsentation der Natur«, die sich im neunzehnten Jahrhundert formierte, sieht der deutsche Medizinhistoriker Cornelius Borck in der gegenwärtigen Rhetorik der Naturwissenschaften im inter-

53 Ebd., 132.

54 William Henry Fox Talbot, *The Pencil of Nature* (London: Longman, Brown, Green and Longmans, 1844), <https://www.gutenberg.org/files/33447/33447-pdf.pdf>, online gestellt am 16. August 2010.

disziplinären Diskurs fortgeführt. Borck spricht von einer »Rhetorik der Selbstevidenz«⁵⁵.

Daston und Galison zeigen in ihrer Untersuchung der verschiedenen Dimensionen des Objektivitätsbegriffs in den Naturwissenschaften und seines Wandels vom achtzehnten Jahrhundert bis in die Gegenwart am Beispiel von bildgebenden Verfahren, die in der Herstellung wissenschaftlicher Atlanten zum Einsatz gebracht wurden, dass in der zweiten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts das Ideal der »mechanischen Objektivität« in Konkurrenz zu dem bereits etablierten Ideal der »Naturwahrheit« (»truth-to-nature«)⁵⁶ trat. In ihren Ausführungen zur »mechanischen Objektivität« sprechen sie auch von »noninterventionist objectivity«⁵⁷, womit sie bereits den Ausschluss menschlicher Akteur*innen aus der Experimentalanordnung signalisieren. Automatisierte Bildgebungsverfahren wie die Fotografie, das Durchpausen und die Messkontrolle »zielten auf Automatisierung: Bilder sollten ›ohne Berührung‹ durch die Hand des Künstlers oder Wissenschaftlers hergestellt werden« mit dem Ziel, »Eingriffe auf ein Minimum zu beschränken, in der Hoffnung, ein Bild herzustellen, das nicht von Subjektivität ›verschmutzt‹ war«⁵⁸.

55 Cornelius Borck, »Die Unhintergebarkeit des Bildschirms: Beobachtungen zur Rolle von Bild-techniken in den präsentierten Wissenschaften«, in *Mit dem Auge denken. Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, Hg. Bettina Heintz und Jörg Huber (Zürich: Edition Voldemeer, 2001), 389.

Dass der Evidenzbegriff seit etwa fünfzehn Jahren in der deutschsprachigen Kulturwissenschaft Konjunktur hat, lässt sich etwa an Veröffentlichungen ablesen wie Michael Cuntz et al. (Hg.) *Die Listen der Evidenz* (Köln: DuMont, 2006); Horst Wenzel und Ludwig Jäger (Hg.), in Zusammenarbeit mit Robin Curtis und Christina Lechtermann, *Deixis und Evidenz* (Freiburg: Rombach, 2008); Karin Harrasser, Helmut Lethen und Elisabeth Timm (Hg.) »Sehnsucht nach Evidenz«, Themenheft, *Zeitschrift für Kulturwissenschaften* 1 (2009); Ludwig Jäger und Albrecht Koschorke (Hg.), *Auf die Wirklichkeit zeigen: Zum Problem der Evidenz in den Kulturwissenschaften. Ein Reader* (Frankfurt am Main: Campus Verlag, 2015). Eine spezifisch medienwissenschaftliche Wendung erfährt die Forschung zum Evidenzbegriff etwa in Rolf F. Nohr (Hg.), *Evidenz – ...das sieht man doch!* (Münster: Lit Verlag, 2004). Zur Frage nach der bildlichen Evidenzerzeugung arbeitete die interdisziplinäre Forschergruppe »BildEvidenz: Geschichte und Ästhetik« von 2012 bis 2021 unter Federführung der Kunstgeschichte an der Freien Universität Berlin. Eines von vielen Themengebieten, »Sichtbarkeit/Unsichtbarkeit: Ästhetik des ›optisch Unbewussten‹«, richtete sich auf die Evidenzerzeugung in der naturwissenschaftlichen Bildproduktion um 1900.

56 Zum Ideal der Naturwahrheit siehe Lorraine Daston und Peter Galison, »Truth-to-Nature«, in *Objectivity*, 55–114 (New York: Zone Books, 2007), insbesondere 58.

57 Daston und Galison, »The Image of Objectivity«, 82.

58 Lorraine Daston und Peter Galison, *Objektivität*, aus dem amerikanischen Englisch von Christa Krüger (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2007), 45 und 46.

Daston und Galison schreiben der »mechanischen Objektivität« eine negative und eine positive Seite zu: Einerseits wurden die Sinneswahrnehmung der Experimentatoren und die Theorie im Experiment als Störfaktoren erachtet und ausgeschlossen, andererseits wurde von den Experimentatoren ein außerordentliches Maß an Präzision gefordert. Die menschliche Tätigkeit sollte sich dem Ideal der Exaktheit annähern, dessen mustergültige Verkörperung der Maschine vorbehalten war. Bei Daston und Galison heißt es:

»In its negative sense, the ideal of objectivity attempts to eliminate the mediating presence of the observer: some versions of this ideal rein in the judgments that select the phenomena, while others disparage the senses that register the phenomena, and still others ward off the theories and hypotheses that distort the phenomena. In its positive sense, mechanical objectivity requires painstaking care and exactitude, infinite patience, unflagging perseverance, preternatural sensory acuity, and an insatiable appetite for work. *The phenomena never sleep and neither should the observer.*«⁵⁹

Doch zeigen neuere Forschungen in kritischer Weiterführung der Überlegungen von Daston und Galison auch, dass mit dem Gebrauch chronofotografischer und filmischer Verfahren in der Medizin »[a]n die Stelle eines Ideals strikter mechanisch kontrollierter Objektivität der naturwissenschaftlichen Forschung des 19. Jahrhunderts, die den Anspruch hat, nichts Menschliches zwischen Natur und Repräsentation treten zu lassen, [...] eine interpretierende Beurteilung von medizinischen Bildern«⁶⁰ rückte.

In der computergestützten Mikroskopie fungiert das Bild als eine Darstellungsform, die aufgrund ihrer Zugänglichkeit für die menschliche Wahrnehmung einen Ausgangspunkt für Interpretationen bietet – die, kurzum, als Erkenntnismedium fungiert. Zugleich spielt die dem Ideal der mechanischen Objektivität als Zugangsweise zur Welt verbundene Automatisierung in der gegenwärtigen Mikroskopie weiterhin eine wichtige Rolle. Einmal eingestellt, läuft das Experiment mit lebenden oder toten Zellkulturen – Zellbiolog*innen sprechen von lebenden oder fixierten Proben – im apparativen Gefüge von Mikroskop, Lichtquelle, Computer und Bildschirm automatisch ab. Das Zutun der menschlichen Akteur*innen besteht darin, das Mikroskop-System korrekt einzustellen und die automatisch erzeugten Bilder und Messdaten zu interpretieren. In der gegenwärtigen Lebendzellmikro-

59 Ebd., 82–83, Hervorhebung B.P.

60 Ute Holl, »Neuropathologie als filmische Inszenierung«, in *Konstruierte Sichtbarkeiten. Wissenschafts- und Technikbilder seit der Frühen Neuzeit*, Hg. Martina Heßler (München: Fink, 2006), 232.

skopie sind also beide Formen der Bezugnahme präsent: Zum einen laufen im Experiment automatisierte Prozesse der Vermessung und Bewegungsaufzeichnung ab. Zum anderen verlangen die Bilder, die sich am Computerbildschirm aufbauen, den Fachleuten vor dem Bildschirm eine Interpretationsleistung ab. Diese Gleichzeitigkeit von Automatismen und Interpretationen wird im dritten Kapitel »Daten-Sehen« noch eingehend thematisiert werden.

1.2.3 Aufzeichnung und Quantifizierung der Bewegung von zellulären Ultrastrukturen

An dieser Stelle soll zunächst anhand eines Beispiels für ein gegenwärtiges kymografisches Verfahren, das die Aufzeichnung der Bewegungen von innerzellulären Ultrastrukturen ermöglicht, gezeigt werden, dass die computergestützte Mikroskopie die Bewegungsvermessung in den submikroskopischen Bereich ausweitet. Des Weiteren soll aufgewiesen werden, dass sich die Selbstaufzeichnung der Natur in der computergestützten Mikroskopie nicht vom menschlichen Eingreifen trennen lässt. Dazu muss zunächst einmal der Forschungskontext beschrieben sowie das Einsatzgebiet der Forschung, der das Beispiel entnommen ist, dargestellt werden, bevor die technischen Verfahren und ihre Bezüge zur Idee der Selbstaufzeichnung der Natur, zum menschlichen Eingreifen und zur Quantifizierung analysiert werden.

Die Forschung, die hier als Beispiel herangezogen wird, wurde am Janelia Research Campus durchgeführt, einer weltweit führenden Institution für zellbiologische und neurologische Spitzenforschung in den USA. Das Bildgebungszentrum beherbergt eine Vielzahl von Mikroskop-Systemen aus dem Bereich der hochauflösenden Mikroskopie, die am Standort kontinuierlich weiterentwickelt werden. Die Gruppe um die US-amerikanischen Zellbiolog*innen Craig Blackstone vom National Institute of Health und Jennifer Lippincott-Schwartz vom Howard Hughes Medical Institute⁶¹ hat mittels fünf verschiedener, im Jahr 2016 in der Entwicklungsphase befind-

⁶¹ Das Howard Hughes Medical Institute wird von der Howard-Hughes-Stiftung finanziert, die vom Hollywood-Magnaten gleichen Namens im Jahr 1953 ins Leben gerufen wurde. Das Institut engagiert sich in der biomedizinischen Forschung und in der öffentlichen Vermittlung biomedizinischen Wissens.

licher Verfahren aus dem Bereich der hochauflösenden Licht- und Elektronenmikroskopie⁶² die dynamische Umgestaltung und die feine Ultrastruktur des peripheren endoplasmatischen Retikulums genauer bestimmen können, jenes Zellorganells, das den Zellstoffwechsel reguliert und für Prozesse wie die Proteinbiosynthese und die Membranproduktion verantwortlich ist. Bekannt war, dass das endoplasmatische Retikulum aus Schichten besteht, die von einem feinen Kanalsystem durchzogen sind. Das periphere endoplasmatische Retikulum, so die Annahme, bestehe aus flachen Membranschichten ohne Kanäle. Die Forschungsgruppen von Blackstone und Lippincott-Schwartz hingegen haben gezeigt, dass auch die peripheren Membranschichten von einem dichten Kanalnetzwerk durchzogen sind, einer Struktur, die das Forschungsteam die »ER matrix«⁶³ nennt. Das Team hat herausgefunden, dass die Matrizes des peripheren endoplasmatischen Retikulums sich zusammenziehen und ausweiten können; die Kanäle können ihre Struktur von einem dichten Verbund zu einer losen Anordnung verändern. Die Flexibilität des peripheren Kanalnetzwerks, so heißt es in dem von den Forschungsgruppen gemeinsam publizierten *Science*-Artikel, ermögliche es dem endoplasmatischen Retikulum, sich bis zur inneren Zellmembran hin auszudehnen.⁶⁴ Die Morphologie des endoplasmatischen Retikulums verändere sich in Abhängigkeit von der Verdichtung und Lockerung der Kanalstrukturen. Schichtstrukturen verwandelten sich in Kanalstrukturen; Kanalstrukturen würden zu Schichtstrukturen.

Den Gestaltwandel des peripheren endoplasmatischen Retikulums erkannten die Forschenden, indem sie Verfahren der computergestützten Mikroskopie mit der Methode der Kymografie und der algorithmischen Bildrekonstruktion kombinierten. Sie vermaßten die Bewegungen am Rande des endoplasmatischen Retikulums und visualisierten die Messergebnisse in Form von Kurvendiagrammen (siehe Abb. 1.4).

62 Die fünf Verfahren der hochauflösenden Mikroskopie, die hier angewendet wurden, heißen »structured illumination microscopy (SIM)«, »three-dimensional SIM (3D-SIM)«, »airyscan imaging«, »lattice light sheet-point accumulation for imaging in nanoscale topography (LLS-PAINT)« und »focused ion beam scanning electron microscopy (FIB-SEM)«. Siehe Nixon-Abell et al., »Increased Spatiotemporal Resolution«. Während es sich bei den ersten vier Verfahren um lichtmikroskopische Methoden handelt, ist das letztgenannte Verfahren, FIB-SEM, eine elektronenmikroskopische Untersuchungsmethode, die nicht mit lebenden sondern mit fixierten Proben arbeitet, die sukzessive in einzelne Scheiben geschnitten werden.

63 Nixon-Abell et al., »Increased Spatiotemporal Resolution«, 433.

64 Siehe ebd.

Um die diagrammatischen Verlaufskurven am Ende der Transformationskette zu erhalten, mussten die Forschenden an mehreren Stellen eingreifen. Erstens richteten sie das Präparat chemisch in einer Weise zu, die dazu führte, dass es unter dem Lichtmikroskop Fluoreszenz exprimierte. Zweitens stellten sie das Mikroskop-System so ein, dass aussagekräftige Bilder generiert und Messdaten erhoben werden konnten. Drittens schrieben sie einen Algorithmus, der die in einem Ausschnitt einer mikroskopisch erzeugten Bewegtbildsequenz sichtbare Struktur auf ihre Grundform reduzierte. Und viertens wählten sie einzelne Punkte dieser Grundstruktur zur näheren Beobachtung aus. Die Aufzeichnung lief folglich lediglich in Intervallen automatisch ab und wurde wiederholt von bewussten Eingriffen unterbrochen. Dabei wurde ein Bild, das mithilfe eines optischen Verfahrens hergestellt wurde (siehe Abb. 1.4, linkes Bild), in ein algorithmisch generiertes Bild (siehe Abb. 1.4, mittleres Bild) umgewandelt, das wiederum in drei Kurvendiagramme übersetzt wurde (siehe Abb. 1.4, die drei im rechten Bild untereinander angeordneten Verlaufskurven). Von einer Selbstaufzeichnung der Natur kann also nur insofern die Rede sein, als das Untersuchungsobjekt dazu veranlasst wurde, Messdaten freizugeben, die am Computer weiterverarbeitet wurden, und zwar innerhalb von Szenarien, die die Forschenden mithilfe von Instrumenten schufen.

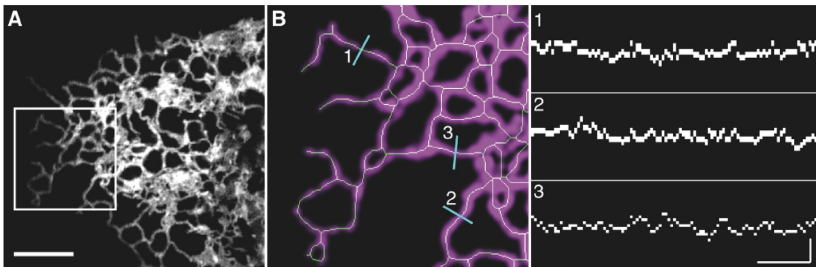


Abb. 1.4: Quantifizierung innerzellulärer Vorgänge in der computergestützten Mikroskopie. Die Bildfolge zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus einem vermittelten Lichtmikroskopie erzeugten Bild des peripheren endoplasmatischen Retikulums (A), ein bereinigtes Bild eines am Computer nochmals weiter vergrößerten und algorithmisch bearbeiteten Bildausschnitts (B) sowie Bewegungslinien dreier ausgewählter Punkte in drei Kanälen über den Zeitraum einer halben Sekunde (1–3).

Quelle: Jonathon Nixon-Abell et al., »Increased Spatiotemporal Resolution Reveals Highly Dynamic Dense Tubular Matrices in the Peripheral ER«, *Science, neue Reihe*, 354, Nr. 6311 (2016), Fig. 1A und B, aaf3928-2, <https://doi.org/10.1126/science.aaf3928>.

Ähnlich wie bei den Messungen, die Marey mit dem Pulsschreiber, dem Sphygmograf, durchführte, in denen eine Stelle nahe des menschlichen Handgelenks für die Messung ausgewählt wurde (siehe Abb. 1.5, linkes Bild), wurden hier – allerdings in viel kleinerem Maßstab und im Inneren einer Zelle statt außen am Körper – drei Punkte am peripheren endoplasmatischen Retikulum markiert, deren Bewegungen gemessen werden sollten. Den Kurven vergleichbar, die Mareys Sphygmograf als Spuren des Pulsschlags aufzeichnete (siehe Abb. 1.5, rechtes Bild), dokumentieren die Verlaufskurven im letzten Bild der oben dargestellten Bildfolge 1.4 die Bewegungen ausgewählter Stellen eines Zellorganells. Die weißen Bildpunkte geben präzise numerische Auskunft über die flirrenden Bewegungen am Rand des Zellorganells: Mit einer Amplitude von wenigen hundert Nanometern bewegen sich die Kanäle im peripheren endoplasmatischen Retikulum unregelmäßig über den Zeitraum von einer halben Sekunde. Die Quantifizierung innerkörperlicher Vorgänge, die sich bereits bei Marey andeutet, weitet die computergestützte Mikroskopie auf den innerzellulären Bereich aus.

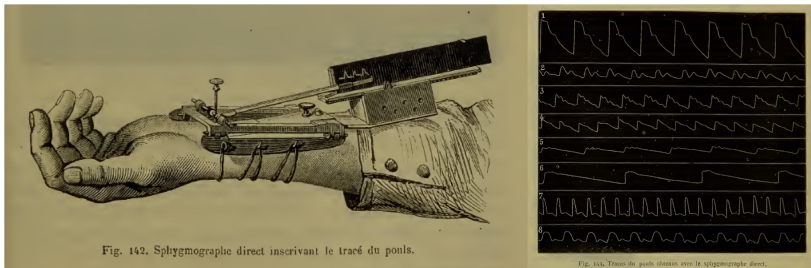


Abb. 1.5: Mareys Anordnung zur Messung des Pulsschlags (links) und die sphygmografisch erzeugten Spuren des Pulsschlags (rechts)

Quelle: Étienne-Jules Marey, *La Méthode Graphique dans les Sciences Expérimentales et Principalement en Physiologie et en Médecine* (Paris: Masson, 1885), 281 und 282, Abbildungen 142 und 143.

An die bisherigen Ausführungen schließen sich mehrere Fragen an: Kann angesichts der vielfachen Formen des menschlichen Eingreifens überhaupt noch von einer Selbstaufzeichnung der Natur gesprochen werden? In welchem Verhältnis stehen die diagrammatischen Visualisierungen zu den bildlichen Darstellungsformen? Die Analyse der Kymografie einer innerzellulären Ultrastruktur hat gezeigt, dass die bildliche Darstellungsform über mehrere Schritte sowohl des menschlichen Eingreifens als auch der

automatisierten Abstraktion und Vermessung in eine diagrammatische Visualisierung überführt wird. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zur Idee der autonomen Selbstaufzeichnung.

1.2.4 Indexikalischer Maschinencode

Damit rückt die übergeordnete Frage nach der Beziehung zwischen wissenschaftlichen Bildern und ›der Realität‹ erneut in den Blickpunkt, die in der Diskussion zur Welterzeugung am Computer weiter oben bereits angesprochen wurde und die im folgenden zweiten Kapitel noch ausführlich diskutiert werden soll. Zur Erhellung dieser Frage scheint der semiotische Begriff der Indexikalität gut geeignet. Der US-amerikanische Logiker, Philosoph und Mathematiker Charles Sanders Peirce (1839–1914) merkte in seiner Charakterisierung der drei Zeichentypen – Ikonen, Indizes und Symbole – unter dem Stichwort »indication« an, wie er den Index auch nennt, Zeichen dieses Typs »show something about things, on account of their being physically connected with them«⁶⁵. Einen ersten Hinweis auf die Diskussion der Überlegungen zum indexikalischen Weltbezug digitaler Bilder soll Wolfgang Schäffners Interpretation der Kurven in der Physiologie des neunzehnten Jahrhunderts als indexikalische Maschinenschrift geben. Schäffner deutet die Kurven in einem semiotischen Interpretationsraster als maschinenlesbare Schriftzeichen. Mit Rückbezug auf die Definition des Index als »brute force in existence«⁶⁶, wie Peirce sie im Jahr 1887 anbot, argumentiert Schäffner, dass sich im neunzehnten Jahrhundert unter der Oberfläche des Glaubens an die Selbsteinschreibung der Natur eine indexikalische Maschinenschrift entwickelte. Diesen Prozess nennt er »technische Indexikalisierung«⁶⁷. Schäffner führt aus:

»Es sind Kurven, die mechanisch und automatisch sowohl aufgezeichnet als auch gelesen werden; Kurven als indexikalische Schrift von und für Maschinen. Von hier aus wird zugleich der Weg deutlich, den parallel dazu die diskreten Zahl- und Buchstabenzeichen vor

65 Charles S. Peirce, »What Is a Sign?«, in *The Essential Peirce: Selected Philosophical Writings*, Band 2 (1893–1913), Hg. Peirce Edition Project (Bloomington, Indiana und Indianapolis: Indiana University Press, 1998), 5.

66 Charles S. Peirce, »Logical Machine«, in ders., *The New Elements of Mathematics*, Band 3.1: *Mathematical Miscellanea*, Hg. Carolyn Eisele (Den Haag und Paris: Mouton Publishers, 1976), 628, zitiert nach Schäffner, »Bewegungslinien«, 144.

67 Schäffner, »Bewegungslinien«, 145.

sich haben, um im selben Maße wie die graphischen Linien technisch indexikalisiert zu werden.«⁶⁸

In diesem Resümee von Schöffner deuten sich bereits jene algorithmischen Verfahren und numerischen Datensätze an, die in der Mikroskopie in den letzten Jahrzehnten des zwanzigsten Jahrhunderts zusammen mit und mithilfe der computergestützten Aufzeichnung und Vermessung von Naturphänomenen entwickelt und erzeugt wurden. So handelt es sich denn auch bei jenen Datensätzen, die in der computergestützten Mikroskopie heute generiert werden, um eine Variation der von Schöffner angesprochenen »indexikalische[n] Schrift von und für Maschinen«. Mit der indexikalischen Zahlenfolge, in die die gemessenen Photonenanzahlen umgewandelt werden, kann der Computer, die Maschine der Gegenwart, rechnen. Und die Zahlen stehen in einem kausalen Verhältnis zu den Phänomenen, die sie repräsentieren. Wenngleich sie sich dem menschlichen Interpretationsvermögen entziehen, so sind sie doch unzweifelhaft Indizes der realen Welt. In Abwandlung von Schöffners Begriff der »indexikalischen Maschinenschrift« können diese Zahlen in der computergestützten Mikroskopie treffend als »indexikalischer Maschinencode« bezeichnet werden, eine zeichenhafte Darstellungsform eines Realweltphänomens, die vom Computer gelesen und weiterverarbeitet werden kann.

Bis hierher kann festgehalten werden, dass sich die bereits um 1850 in den Wissenschaften verbreitete Vorstellung, die Dinge schrieben sich vermittlels der Apparate selbst auf, die Daston und Galison mit dem Begriff der »mechanischen Objektivität« fassen und die Borck mit dem Begriff der »Rhetorik der Selbstevidenz« belegt, in der computergestützten Mikroskopie als Praxis der apparativ gesteuerten Vermessung der lebendigen Dinge fortschreibt. Jedoch verschränkt sich die Selbstabbildung mit mannigfachen Formen des menschlichen Eingreifens. Und selbst wenn die Experimentalanordnung so angelegt ist, dass es die automatische Selbstregistrierung gestattet, so geht es hier doch um mehr als lediglich um eine Selbstaufzeichnung der Natur. Ziel ist vielmehr die Vermessung der Natur, und der Weg dahin führt über ihre Zurichtung, die sie in einen Zustand zwingt, in dem sie Bilder und Zahlen freigibt.⁶⁹

68 Ebd.

69 Einen ähnlichen Gedanken äußert Soraya de Chadarevian, wenn sie die Effekte der Standardisierung der grafischen Aufschreibegeräte in der zweiten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts beschreibt: »Die graphischen Geräte werden zudem nicht nur genormt, sondern wirken selbst

normierend. Sie repräsentieren eine Praxis, welche die Natur zwingt, Dauer und Verlauf der Ereignisse auf Papier aufzuschreiben und damit graphisch sichtbar, analysierbar und kommunizierbar zu machen.« De Chadarevian, »Die ›Methode der Kurven««, 45.

2. Der Weltbezug des digitalen Datenbildes

Im Folgenden komme ich auf den medien-, film- und bildwissenschaftlichen Diskurs zum Weltbezug digitaler Bilder zurück, der in der Einleitung zum vorigen Kapitel bereits angesprochen wurde. Während die Argumentation im vorigen Kapitel durch die Analyse der *Techniken* der Bilderzeugung in der digitalen Mikroskopie untermauert wurde, richtet sich dieses Kapitel auf die erzeugten Bilder selbst und greift die Frage nach dem *Weltbezug* digitaler Bilder auf, die im vorigen Kapitel bereits anklang. Meine Analyse hat gezeigt, dass die Bilder der gegenwärtigen Zellbiologie über eine Kette von Umwandlungsschritten erzeugt werden, in deren Folge Darstellungsformen am Bildschirm sichtbar gemacht werden, die etwas über realweltliche mikroskopische Phänomene aussagen. Offen geblieben in der Mikroanalyse der Umwandlungsschritte im vorigen Kapitel ist jedoch die Frage, wie genau das Verhältnis zwischen den Darstellungsformen und den Objekten der Darstellung zu begreifen ist, eine Frage, die anhand des Gebrauchs digitaler Bilder in wissenschaftlichen, juristischen und militärischen Kontexten in der medienwissenschaftlichen Diskussion in den 2000er-Jahren mithilfe der Terminologie der Semiotik eingehend verhandelt wurde und die seit einigen Jahren über den Begriff des ›Datenbildes‹ in einen breiteren, dezidiert disziplinübergreifenden Kontext gestellt wird.

Bei den digitalen Bildern, die am Fluoreszenzmikroskop hergestellt werden, handelt es sich weder um digitale Fotografien noch um computergenerierte Bilder oder um Bilder, die am Computer synthetisiert wurden. Vielmehr liegt hier ein Bildtypus vor, der als ›Datenbild‹ identifiziert werden kann. Das Datenbild zeichnet sich dadurch aus, dass es seine Beweiskraft erst in Verbindung mit einem zugrundeliegenden Datensatz erlangt. Damit Bilder als Datenbilder bezeichnet werden können, bedürfen sie einer verlässlichen Datenbasis, das heißt Zahlenwerten, die die

visuelle Darstellungsform abstützen. Bei der Datenbasis handelt es sich in der Fluoreszenzmikroskopie, wie sie die Zellbiologie zur Sichtbarmachung innerzellulärer Strukturen und Prozesse verwendet, um experimentell erhobene Messdaten. In anderen naturwissenschaftlichen Forschungsgebieten wie etwa der Atomphysik, Astrophysik, Klimaforschung, synthetischen Biologie oder Schwarmforschung besteht die Datenbasis hingegen vorwiegend aus mathematischen Modellen.¹

Der Begriff des ›Datenbildes‹ bezieht sich auf die historische Gegenwart und ging aus der kulturwissenschaftlichen Auseinandersetzung mit den Bildgebungspraktiken in den Naturwissenschaften hervor. Das Autor*innenquartett Ralf Adelman, Jan Frercks, Martina Heßler und Jochen Hennig, das in seiner Analyse der Prozesse der Bildherstellung und des Bildgebrauchs in den Naturwissenschaften Kompetenzen aus Medienwissenschaft (Adelman), Physik (Frercks, Hennig) sowie Kultur- und Technikgeschichte (Heßler, Hennig) bündelt, hat den Begriff des »Datenbildes« zur Bezeichnung jener digitalen Bilder vorgeschlagen, »die derzeit sowohl innerhalb der Naturwissenschaften als auch in der kulturwissenschaftlichen Bild- und Wissenschaftsforschung eine zentrale Herausforderung darstellen«². Der Begriff verweist im Kontext der Forschungen der vier Autor*innen auf jene visuellen Darstellungsformen, die extraterrestrische und atomare Phänomene sichtbar machen, auf die sich gegenwärtig das Interesse der Astronomie, Astrophysik und Nanotechnologie richtet.

1 Zur mathematischen Modellierung in der Atomphysik siehe etwa Peter Galison, »Monte Carlo Simulations: Artificial Reality«, in *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics* (Chicago: University of Chicago Press, 1997); in der Astrophysik siehe Jan Frercks, »Runs: Computersimulationen des Unsichtbaren am Max-Planck-Institut für Astrophysik«, in Ralf Adelman et al., *Datenbilder: Zur digitalen Bildpraxis in den Naturwissenschaften* (Bielefeld: Transcript, 2009); in der Klimaforschung siehe Gabriele Gramelsberger, »Simulation: Analyse der organisationellen Etablierungsbestrebungen der epistemischen Kultur des Simulierens am Beispiel der Klimamodellierung«, in *Organisationen der Forschung: Der Fall der Atmosphärenwissenschaft*, Hg. Jost Halfmann und Falk Schützenmeister (Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaft, 2009); in der synthetischen Biologie siehe dies., »The Simulation Approach in Synthetic Biology«, *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 44, Nr. 4 (2013); und in der Schwarmforschung siehe Sebastian Vehlken, *Zootechnologien: Eine Mediengeschichte der Schwarmforschung* (Zürich: Diaphanes, 2012). Zur mathematischen Modellierung in computerbasierten Echtzeitsimulationen allgemein siehe Inge Hinterwaldner, *Das systemische Bild: Ikonizität im Rahmen computerbasierter Echtzeitsimulationen* (München: Fink, 2010).

2 Ralf Adelman et al., »Dank«, in ders. et al., *Datenbilder*, 7.

Für das Verständnis der bildgebenden Verfahren in der gegenwärtigen Zellbiologie erweist sich der Begriff des Datenbildes insofern als aufschlussreich, da diese Fachrichtung – ähnlich wie Astronomie, Astrophysik und Nanotechnologie – auf visuelle Darstellungsformen angewiesen ist, mittels derer sie ihre Wissensobjekte greifbar zu machen sucht. Ähnlich wie in den genannten Gebieten finden auch in der Zellbiologie die visuellen Darstellungsformen ihre verlässliche Grundlage in numerischen Daten. Bei der Durchführung von Experimenten am Fluoreszenzmikroskop gelten die visuellen Darstellungsformen und der ihnen zugrundeliegende Datensatz als zwei verschiedene Ausgabeformate der Ergebnisse einer Messung. Während die verschiedenen visuellen Darstellungsformen am Bildschirm fast zeitgleich in ein und derselben Bildschirmansicht ausgegeben werden, und zwar nebeneinander als verschiedene Darstellungsformen in unterschiedlichen Fenstern, bleibt der Datensatz im Verborgenen. Doch bildet er die Basis für die Datenanalyse und Datenauswertung.

Der Datensatz gilt Biophysiker*innen und Bioinformatiker*innen, die mit der Erforschung zellbiologischer Phänomene befasst sind, als vertrauenswürdiger Bezugspunkt für die Fundierung von Aussagen über Realweltphänomene. Das digitale Bild hingegen betrachten Vertreter*innen dieser quantitativ arbeitenden Disziplinen mit Argwohn. Die Vorbehalte, die von naturwissenschaftlicher Seite gegenüber dem digitalen Bild vorgebracht werden, sind allerdings deutlich anders gelagert als die Bedenken, die die Bild-, Film-, und Medienwissenschaft hinsichtlich des Weltbezugs des digitalen Bildes anmelden. Während sich die Sorge der Bild-, Film- und Medienwissenschaftler*innen in der intensiv geführten Debatte zum digitalen Bild seit den 1990er-Jahren an dem angeblich fehlenden Wirklichkeitsbezug des digitalen Bildes entzündete und um den semiotischen Begriff der Indexikalität kreiste, erwächst das Misstrauen der Bildgebungsfachleute gegenüber dem digitalen Bild aus dem Bewusstsein, dass jene Abfolge von Umwandlungsschritten in der Transformationskette, in der Zahlen in Bilder umgeschrieben werden, nicht allein die Gefahr des Datenverlustes birgt, wenn exakte Messdaten in eine Darstellungsform umgewandelt werden, die für die menschliche Wahrnehmung zugänglich ist, sondern dass die Darstellungen vielmehr von kulturellen Konventionen beeinflusst sind. Hierdurch können sie gleichsam verzerrt werden, und zwar gerade, weil in der Bildherstellung und Bildbearbeitung Rücksicht auf Wahrnehmungs- und Darstellungskonventionen genommen wird.

Angehörige beider Fachgruppen thematisieren die Besorgnis um die Manipulierbarkeit des digitalen Bildes.³ Doch steht dem digitalen Bild jeweils ein anderes Pendant gegenüber, das im jeweiligen Kontext ein hohes Maß an Vertrauen genießt: Während Film-, Bild- und Medienwissenschaftler*innen, die den unmittelbaren Wirklichkeitsbezug⁴ des digitalen Bildes bestreiten oder dessen Mangelhaftigkeit beklagen, den indexikalischen Wirklichkeitsbezug für das analoge Bild betonen, der sich über die Spur herstellt, die der Einfall von Licht auf Zelluloid hinterlässt, setzen Bildgebungsfachleute ihr Vertrauen in die digitale Zahl, die, wenn auch nicht unvermittelt, so doch weniger stark auf Umwandlungsprozesse angewiesen ist als digitale Bilder.

2.1 Das Referenzproblem aus medienwissenschaftlicher und bioinformatischer Perspektive

Die divergierenden Bewertungen der Symbolisierungsformen Bild und Zahl in der Bildgebungspraxis der gegenwärtigen Zellbiologie sollen im Folgenden mit Rückbezug auf die Diskussion zu den Formen des Wirklichkeitsbezugs digitaler Bilder, wie sie in der Film-, Kultur- und Medienwissenschaft in den 2000er-Jahren geführt wurde, zunächst in einen breiteren diskursiven Rahmen gestellt werden. In dieser Diskussion finden sich bereits erste

3 Für die Film- und Medienwissenschaft siehe etwa Tom Gunning, »What's the Point of an Index? Or, Faking Photographs«, *Nordicom Review* 25, Nr. 1–2 (2004), <https://doi.org/10.1515/nor-2017-0268>. Für die Mikroskopie siehe beispielsweise Douglas W. Cromey, »Avoiding Twisted Pixels: Ethical Guidelines for the Appropriate Use and Manipulation of Scientific Digital Images«, *Science Engineering Ethics* 16, Nr. 4 (Dezember 2010), <https://doi.org/10.1007/s11948-010-9201-y>, und ders., »Digital Images Are Data: And Should Be Treated as Such«, in *Cell Imaging Techniques: Methods and Protocols*, 2. Auflage, Hg. Douglas J. Taatjes und Jürgen Roth (Totowa, New Jersey: Springer, 2013), https://doi.org/10.1007/978-1-62703-056-4_1.

4 Die Begriffe »Weltbezug« und »Wirklichkeitsbezug« verwende ich hier deckungsgleich, auch wenn zu jedem einzelnen Begriff eine differenzierte Diskussion existiert. Den Begriff »Weltbezug« verwenden vor allem die Philosophie und die Theologie. Den Begriff »Wirklichkeitsbezug« greifen Realismusdebatten auf, wie sie etwa in der Literaturwissenschaft geführt werden. In der Diskussion zum Weltbezug digitaler wissenschaftlicher Bilder ist auch vom »Referenzproblem« die Rede. Siehe etwa Martina Hefler, »BilderWissen: Bild- und wissenschaftstheoretische Überlegungen«, in Adelman et al., *Datenbilder* (Bielefeld: Transcript, 2009), 153–159, und Sven Stollfuß, *Digitale Körperinnenwelten: Endoskopische 3D-Animationen zwischen Medizin und Populärkultur* (Marburg: Schüren, 2014), 23–33. Den Ausgangspunkt der Diskussion bilden die Überlegungen zur Referenz wissenschaftlicher Bilder, wie Bruno Latour sie angestellt hat. Siehe Fußnote 18 im ersten Kapitel.

Hinweise, um die Frage nach dem Weltbezug des digitalen Datenbildes in der Zellbiologie zu erörtern. Einige Autor*innen weisen auf die Verbindung des digitalen Bildes mit einem Datensatz hin und lenken das Augenmerk auf den Verwendungskontext und die Datenpraktiken. Dieses Unterkapitel greift die Überlegungen zur Erscheinungsweise und Tiefenstruktur digitaler Bilder auf und überprüft sie anhand der Einsichten zur Bildevidenz, wie sie die Bioinformatik erarbeitet hat. Im nächsten Unterkapitel werden die medienwissenschaftlichen Perspektiven mit disziplinär unterschiedlich verankerten Überlegungen zu Darstellungs- und Wahrnehmungskonventionen naturwissenschaftlicher Visualisierungen kontrastiert.

2.1.1 »Digital Indexicality«: Der medienwissenschaftliche Diskurs zur indexikalischen Referenz des digitalen Bildes

Als aufschlussreich für eine erste medienkulturwissenschaftliche Annäherung an die Frage nach dem Weltbezug digitaler Bilder und Zahlen erweisen sich die Ausführungen zum Begriff der »digitalen Indexikalität« (»digital indexicality«)⁵, wie sie der US-amerikanische Kultur- und Medienwissenschaftler Philip Rosen in die Diskussion zur Frage nach der Indexikalität in der digitalen Kultur eingebracht, und die Überlegungen zur Indexikalität digitaler Bilder, wie sie der US-amerikanische Filmhistoriker Tom Gunning angestellt hat⁶. Die Positionen von Rosen und Gunning gelten als Einschnitt in der Diskussion um unterschiedliche Formen des Weltbezugs von analogen und digitalen Bildern in den ersten Jahren nach der Jahrtausendwende, eine Diskussion, die in der Bildwissenschaft mit den Überlegungen zum »post-fotografischen Bild«⁷ im Jahr 1992 begann.

Die filmwissenschaftliche Diskussion greift zeitlich noch etwas weiter zurück, und zwar auf die semiotische Re-Lektüre des Aufsatzes »Ontolo-

5 Philip Rosen, »Old and New: Image, Indexicality, and Historicity in the Digital Utopia«, in *Change Mummified: Cinema, Historicity, Theory* (Minneapolis: University of Minnesota Press, 2001), 307.

6 Siehe Gunning, »What's the Point of an Index?« und ders., »Moving Away from the Index: Cinema and the Impression of Reality«, *Differences: A Journal of Feminist Cultural Studies* 18, Nr. 1 (2007), <https://doi.org/10.1215/10407391-2006-022>.

7 Zum Begriff des »post-fotografischen Bildes« siehe Geoffrey Batchen, »On Post-Photography«, *Afterimage* 20, Nr. 3 (1992), und W.J.T. Mitchell, *The Reconfigured Eye: Visual Truth in the Post-Photographic Era* (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1992).

gie des photographischen Bildes«⁸ des französischen Filmtheoretikers André Bazin aus dem Jahr 1945 durch den britischen Filmwissenschaftler Peter Wollen im Jahr 1969.⁹ Wollen fasste Bazins ästhetisch ausgerichtete Überlegungen zum filmischen Realismus in der semiotischen Terminologie von Charles Sanders Peirce und interpretierte das fotografische Bild als einen der drei Zeichentypen, in die Peirce unterschieden hatte, namentlich den Index. Bei Wollen heißt es:

»His [Bazin's] conclusions are remarkably close to those of Peirce. Time and again Bazin speaks of photography in terms of a mould, a death-mask, a Veronica, the Holy Shroud of Turin, a relic, an imprint. [...] Thus Bazin repeatedly stresses the existential bond between sign and object, which, for Peirce, was the determining characteristic of the indexical sign.«¹⁰

Gunning hat darauf aufmerksam gemacht, dass sich der semiotische Diskurs innerhalb der Filmwissenschaft, wie Wollen ihn angestoßen hat, bald auf die Frage der Indexikalität des fotografischen und filmischen Bildes zu spitzte und die beiden anderen Zeichentypen der Peirce'schen Semiotik – das Ikon und das Symbol – marginalisierte.¹¹ Den Index definiert Peirce über die physische Verbindung zwischen dem Zeichen und dem Bezeichneten, die es dem indexikalischen Zeichen erlaube, einen spezifischen Aspekt des Bezeichneten zu betonen. Als Beispiele für Indizes führt Peirce nicht allein die Fotografie an, sondern nennt auch Gewohnheiten wie die Gangart, die Menschen als Angehörige bestimmter Berufsgruppen identifiziere, und so diverse Gegenstände wie den Wetterhahn, die Sonnenuhr, Buchstaben in geometrischen Diagrammen und den Donnerschlag.¹² Angesichts der Heterogenität dieser Beispiele, die Peirce anführt, erscheint Wollens Engführung der semiotischen Diskussion zum Weltbezug des filmischen Bildes über eine Reduktion auf die indexikalische Bezugnahme zumindest fragwürdig.

8 Siehe André Bazin, »Ontologie des photographischen Bildes« [i.O. 1945], in *Was ist Film?*, Hg. Robert Fischer, aus dem Französischen von Robert Fischer und Anna Düpee, mit einem Vorwort von Tom Tykwer und einer Einleitung von François Truffaut (Berlin: Alexander Verlag, 2004).

9 Siehe Peter Wollen, »The Semiology of the Cinema«, in *Signs and Meanings in the Cinema*, 79–106 (Bloomington, Indiana: Indiana University Press, 1998).

10 Ebd., 86.

11 Siehe Gunning, »Moving Away from the Index«, 30.

12 Siehe Charles S. Peirce, »What Is a Sign?«, in *The Essential Peirce: Selected Philosophical Writings*, Band 2 (1893–1913), Hg. Peirce Edition Project (Bloomington, Indiana und Indianapolis: Indiana University Press, 1998), 8.

Sowohl Gunning als auch Rosen intervenierten mit ihren Thesen in eine Debatte, die in ihrer frühen Phase von Positionen geprägt war, die für das fotografische und filmische Analogbild eine bevorzugte Form des indexikalischen Weltbezug in Anspruch nahmen. Rosen hingegen argumentierte in dem Kapitel »Old and New: Image, Indexicality, and Historicity in the Digital Utopia« seiner im Jahr 2001 erschienenen Monografie *Change Mummified* ganz dezidiert für den indexikalischen Weltbezug des digitalen Bildes.¹³ Und Gunning führte in dem Aufsatz mit dem Titel »What's the Point of an Index? Or, Faking Photographs« aus dem Jahr 2004 eine Reihe von Kriterien an, die erfüllt sein müssten, damit für das digitale Bild von einem indexikalischen Weltbezug gesprochen werden könne.¹⁴

Rosen, der in »Old and New« darauf abzielte, die Geschichte der Digitalisierung zu verstehen, entwickelte den Begriff der »digitalen Indexikalität«, den er mit Verweis auf den mexikanisch-US-amerikanischen Philosophen Manuel De Landa aus dem Überwachungsdiskurs herleitet, und zwar, indem er auf De Landas Beispiel der Satellitenbilder verweist, die in digitalen Überwachungspraktiken im Kalten Krieg erzeugt wurden. Rosen zitiert De Landa, der seine Überlegungen zur medialen Spezifität digitaler Überwachung am Beispiel jener Datenpraktiken festmacht, in denen US-amerikanische Spionagesatelliten digitale Daten zu Geschützstellungen in der Sowjetunion generierten und an Einrichtungen der US-Armee übermittelten. Medientechnische Entwicklungen, die von der fotografischen zur digitalen Überwachung überleiteten, beschreibt De Landa wie folgt:

»[T]he imaging apparatus has left the plane of mechanical replication to become completely computerized, ceasing to create ›flat replicas‹ of the world and producing instead streams of pure data from which information of many kinds can be extracted.«¹⁵

Die apparativen Gefüge der digitalen Überwachungspraxis erzeugen De Landa zufolge keine fotografischen Abbilder der Realwelt mehr, sondern generieren Datenströme, die unterschiedlich ausgewertet werden können.

Für Rosen zeigt der Übergang von der fotografischen Überwachung zur digitalen Überwachung, von der De Landa spricht, dass der indexikalische Weltbezug keineswegs an ein Ähnlichkeitsverhältnis zwischen einem Bild und einem Gegenstand geknüpft sei. Diese Entwicklung unterlaufe damit

13 Siehe Fußnote 5.

14 Siehe Fußnote 6.

15 Manuel De Landa, *War in the Age of Intelligent Machines* (New York: Zone Books, 1991), 180–181, zitiert in Rosen, »Old and New«, 307.

die Vorstellung, dass im fotografischen Bild die ikonische und die indexikalische Form der Bezugnahme zusammenfallen, die bereits Peirce formulierte – ein Gedanke, der sich in der Diskussion zur Theorie der Fotografie verfestigte.¹⁶ Bei Rosen heißt es:

»Yet, even if this example of the digital leaves coded pictorial resemblance behind, it has not given up concern with an indexical origin. The ›purity‹ of ›pure data‹ cannot mean the obliteration of referential origins, for without referential entities or events pre-existing the data itself, that data would have no informational value as surveillance.«¹⁷

Die Bezugnahme der digitalen Datenströme auf realweltliche Phänomene gilt Rosen denn auch als eine Spielart der, wie er es nennt, »digitalen Indexikalität«, einer Form des Weltbezugs, die »pragmatics or functions of digital information«¹⁸ berücksichtige. Damit gibt Rosen bereits einen entscheidenden Hinweis für die Zielrichtung der nachfolgenden Analyse der Formen der Referenz digitaler Daten in der computergestützten Fluoreszenzmikroskopie: Der Fokus wird sich auf den Gebrauch und Zweck digitaler Daten richten, kurzum, auf Datenpraktiken.

Statt von »reinen Daten« (»pure data«) zu sprechen, wie es De Landa vorschlägt, sollte für den hier betrachteten Kontext der fluoreszenzmikroskopischen Bildgebung zutreffender von maschinenlesbaren Rohdaten, Messdaten oder Metadaten gesprochen werden, die in lesbare Datenbilder umgewandelt werden, die sich der Interpretation durch die Forschenden als zugänglich erweisen und denen menschliche Akteur*innen Informationen entnehmen können. Von dem poetischen Ausdruck der »Datenströme«, den De Landa verwendet und der seit einigen Jahren für viele Internetnutzende in Form von Newsfeeds oder beim Nutzen von Streaming-Portalen alltäglich erfahrbar wird, würde ich für den hier analysierten Gegenstand Abstand nehmen. In der Lebendzellmikroskopie werden Daten nicht kontinuierlich per Ferntransfer übermittelt. Vielmehr wird eine Reihe von diskreten Messungen vorgenommen, aus denen diskrete Datensätze generiert werden, die mitunter zu einem übergreifenden Datensatz zusammengeführt wer-

16 Dies stellt etwa Schrey fest, der sich auf die Überlegungen zur Theorie der Fotografie von Roland Barthes bezieht. Siehe Schrey, *Analoge Nostalgie*, 200, siehe Roland Barthes, *Die helle Kammer. Bemerkungen zur Photographie* [i.O. 1980], aus dem Französischen übersetzt von Dietrich Leube (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1985), 13. Barthes bezieht sich hier allerdings nicht auf Peirce.

17 Rosen, »Old and New«, 307.

18 Ebd.

den, der seinerseits in eine serielle Bildfolge oder ein laufendes Bewegtbild umgewandelt wird.

In dieser Hinsicht schließe ich mich eher Gunning als De Landa an, da Gunning auf die ausschlaggebende Rolle der Messinstrumente aufmerksam macht, über die seiner Ansicht nach ein indexikalischer Weltbezug etabliert werde. Gunning weist überzeugend auf, dass digitale Bilder sehr wohl als Indizes fungieren können, die auf Realweltphänomene verweisen, sofern dem Bild Messdaten zugrunde liegen. Als ein aktuelles Beispiel, in dem die bildliche Darstellung auf einem digitalen Datensatz basiert, nennt Gunning digitale Passbilder. Im Fall des digitalen Passbildes wird das Bild – ähnlich wie in der computergestützten Fluoreszenzmikroskopie – mit einem biometrischen Datensatz verknüpft, der im Falle des biometrischen Passbildes die Geometrie des Gesichts der dargestellten Person in computerlesbarer Form fixiert. Das Bild fungiert dabei als Bindeglied zwischen maschinenlesbaren Zahlen und menschlicher Wahrnehmung. Die Fotografie, so Gunning, sei allerdings lediglich eine unter vielen Techniken, die auf einem indexikalischen Weltbezug basieren. Messinstrumente jeglicher Art wandelten Informationen in Zahlen um:

»[...] it would be foolish to closely identify the indexical with the photographic; most indexical information is not recorded by photography. Long before digital media were introduced, medical instruments and other instruments of measurement, indexical instruments par excellence – such as devices for reading pulse rate, temperature, heart rate, etc, or speedometers, wind gauges, and barometers – all converted their information into numbers.«¹⁹

Als Paradebeispiel für den indexikalischen Weltbezug grafischer Darstellungsformen nennt Gunning die chronofotografische Aufzeichnung von Messergebnissen, wie sie der französische Physiologe Étienne-Jules Marey seit den späten 1870er-Jahren anfertigte. In den Jahren nach seiner Begegnung mit der Serienfotografie des US-amerikanischen Fotografen Eadweard Muybridge (1830–1904) im Jahr 1878 experimentierte Marey mit fotografischen Verfahren der Bewegungsanalyse, wie Gunning mit Rückbezug auf die Arbeiten zu Marey anmerkt, die der US-amerikanische Kunsthistoriker Joel Snyder²⁰ und die nordamerikanische Kunsthistorikerin und Medien-

19 Gunning, »What's the Point of an Index?«, 40.

20 Siehe Joel Snyder, »Visualization and Visibility«, in *Picturing Science, Producing Art*, Hg. Caroline Jones und Peter Galison (New York: Routledge, 1998).

wissenschaftlerin Marta Braun²¹ vorgelegt haben. Marey konzentrierte sich jedoch bald auf die Umwandlung fotografischer Bilder in abstrakte grafische Darstellungsformen, die eine Fülle von visuellen Informationen auf das Wesentliche reduzierten (siehe Abb. 2.1).²²

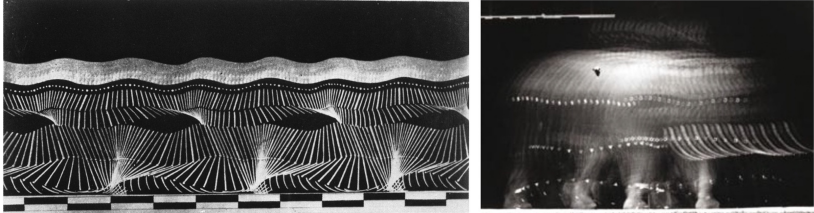


Abb. 2.1: Zwei Beispiele für Mareys chronofotografische Aufnahmen eines Läufers (links) und eines Elefanten in Bewegung (rechts) aus den Jahren 1883 und 1887

Quelle: Institut Marey, Collège de France.

Hier deutet sich bereits der Gedanke der Transformationskette an, in der unterschiedliche Darstellungsformen ineinander überführt werden. Dieser Gedanke, den Bruno Latour über den Begriff der »transversalen Referenz«²³ weiter zugespitzt hat, wie bereits in Kapitel 1.1.1 erwähnt, soll in der Analyse im zweiten Teilabschnitt dieses Kapitels noch aufgegriffen und weitergeführt werden.

An die Mareysche Tradition der Bildgebung schließt die computergestützte Mikroskopie der Gegenwart an. Wie im vorigen Kapitel gezeigt werden konnte, werden fluoreszenzmikroskopische Bilder zum einen aus Messdaten erzeugt, wie anhand des Beispiels der Transformationskette aufgewiesen wurde, in der unter anderem digitale Zahlen in digitale Bilder umgewandelt werden. Zum anderen werden die Zahlen, die den Bildern zugrunde liegen und ihnen vorausgehen, mittels rechnerischer Verfahren in abstrakte Bilder übersetzt, an denen weitere Messungen vor-

21 Siehe Marta Braun, *Picturing Time: The Work of Etienne-Jules Marey (1830–1904)* (Chicago: University of Chicago Press, 1992).

22 Siehe Gunning, »What's the Point of an Index?«, 43–44.

23 Siehe Fußnote 18 im vorigen Kapitel. Latour bezieht sich ausdrücklich auf die grafische Methode, die Marey in seinem Labor bei Paris anwandte und entwickelte. Siehe Bruno Latour, »Arbeit mit Bildern oder: Die Umverteilung der wissenschaftlichen Intelligenz«, in *Der Berliner Schlüssel: Erkundungen eines Liebhabers der Wissenschaft*, aus dem Französischen von Gustav Roßler, 159–190 (Berlin: Akademie Verlag, 1996), 161.

genommen werden, deren Resultate in grafischer Form zur Darstellung gebracht werden, wie es die Analyse des Beispiels zur Kymografie zellulärer Ultrastrukturen im ersten Kapitel verdeutlicht hat.

Gunning hat zudem den Verwendungskontext als ein weiteres entscheidendes Kriterium für die Akzeptanz des digitalen Bildes als Evidenz hervorgehoben. Beispielhaft nennt er die Gültigkeit digitaler Bilder als Beweisstücke im Kontext von Gerichtsverhandlungen oder physiologischen Forschungen. Diese Verwendungsweisen des fotografischen Bildes als Dokument gingen einher mit einer »Disziplinierung des fotografischen Bildes« (»disciplining of the photographic image«)²⁴. Bereits im späten neunzehnten Jahrhundert bändigten Wissenschaftler das fotografische Bild, indem sie Protokolle einführten, die seine Herstellung und Lesart festlegten.²⁵ Dabei sei für die Akzeptanz eines fotografischen Bildes als Beweismittel neben der Kontrolle der Umstände der Bilderzeugung seine Einpassung in eine Aussage, das heißt seine Abstimmung auf die Diskursregeln, wesentlich: »[T]he photograph must be integrated into a statement, subjected to complex rules of discourse – legal, rhetorical and even scientific.«²⁶

Gunnings Beobachtung, dass Bilder durch die Integration in eine Aussage, die in einem als wissenschaftlich gerahmten Verwendungskontext getätigt wird, zu Beweismitteln werden, trifft vollumfänglich auf die Praktiken der Evidenzerzeugung durch Bilder in der computergestützten Mikroskopie zu. So stehen die Bilder niemals allein, sondern werden der Fachgemeinschaft stets im Kontext anderer bildlicher, diagrammatischer, textlicher und sprachlicher Darstellungsformen präsentiert, die eine Hypothese untermauern. In Fachartikeln werden Bilder üblicherweise in ein Gefüge aus weiteren Bildern, Texten und Formeln eingebettet, das heißt, sie werden in Verbünde aus bildlichen, sprachlichen und numerischen Zeichen eingelassen, die erst im orchestrierten Zusammenspiel eine Aussage treffen. Zahlen indizieren Größenordnungen sowie Zeitintervalle und Messergebnisse der bildlich dargestellten Phänomene, Bildunterschriften erklären die Phänomene und Prozesse, die in den eingefügten Bildern und verlinkten Filme sichtbar gemacht werden, und Textpassagen legen die einzelnen Schritte dar, die zur Erzeugung der eingebundenen Bilder im Laborexperiment unternommen wurden. Die stillen und bewegten Bilder dokumentieren die

24 Gunning, »What's the Point of an Index?«, 43.

25 Siehe ebd., 43 und 44.

26 Ebd., 42.

Ergebnisse der einzelnen Schritte eines Experiments und fungieren in der Zusammenschau mit anderen Darstellungsformen als Beleg für die im Text vertretene Hypothese. Zudem machen die Bilder die im Text erklärten Phänomene anschaulich: Sie zeigen das, was der Text erklärt.

Die »Disziplinierung des fotografischen Bildes«²⁷, von der Gunning spricht, lässt sich in der computergestützten Fluoreszenzmikroskopie an der von den Fachleuten praktizierten Offenlegung jener Verfahrensschritte festmachen, die zu einem bildlichen Ergebnis geführt haben, sowie an der präzisen Benennung der verwendeten Instrumente und der genauen Beschreibung des Experiments in der Fachpublikation. Als ein weiteres entscheidendes Mittel zur Disziplinierung des Bildes in der Fluoreszenzmikroskopie muss der Datensatz gelten, der über eine physikalisch-informatische Verbindung mit dem Bild verknüpft ist und der dem Bild seine Autorität zuallererst verleiht. Im Folgenden soll nun das Verhältnis zwischen dem digitalen Bild und dem ihm zugrundeliegenden Datensatz aus Sicht bildgebungstheoretischer Überlegungen genauer betrachtet werden.

2.1.2 Trägerische Bilder und vertrauenswürdige Zahlen: Die implizite Bildtheorie der Bioinformatik

»Was ist ein digitales Bild?«, fragt der Bioinformatiker und Mikroskopiker Nico Stuurman in seinem Einführungsvortrag zur digitalen Bildgebung in der Fluoreszenzmikroskopie, »Cameras and Digital Image Analysis«, in dem er die Funktionsweise der CCD-Kamera und ihr Zusammenwirken mit dem Computer am fluoreszenzmikroskopischen System erklärt. In seiner Antwort unterscheidet er das »repräsentationale Bild« – Nico Stuurman spricht vom »representational image« –, das am Bildschirm erscheint, während ein Experiment abläuft, vom »tatsächlichen Bild« – dem »actual image« –, das heißt, den Zahlen, die der Computer in tabellarischer Form speichert und die die Grauwerte der einzelnen Pixel bestimmen und damit festlegen, in welcher Helligkeit die einzelnen Bildpunkte am Bildschirm ausgegeben werden.²⁸ Mit dem Begriff des »repräsentationalen Bilds« be-

²⁷ Siehe Fußnote 24.

²⁸ Nico Stuurman und Kurt Thorn, »Cameras and Digital Image Analysis«, aufgenommen im April 2013 für *iBiology*, Videovortrag, 33:40, <https://www.ibiology.org/talks/digital-image-analysis/>. Kurt Thorn war an der Ausarbeitung des Vortrags beteiligt, den Nico Stuurman hält.

zeichnet Stuurman den vergrößerten, aus Klötzchen zusammengesetzten Ausschnitt aus einem Bild, das am Fluoreszenzmikroskop erzeugt wurde und am Bildschirm zur Darstellung kommt (siehe die beiden Bilder links in Abb. 2.2), und betont, dass die Pixel des Bildes mit den Pixeln auf dem CCD-Chip korrespondierten. Er bemerkt: »The image is just a way of displaying your numbers, your measurements.«²⁹ Beim *tatsächlichen* Bild, so hebt er hervor, handele es sich um eine Matrix von Zahlen, die in Zeilen und Spalten angeordnet seien (siehe die Tabelle in Abb. 2.2) und erst diese Zahlen ermöglichten es, zwei oder mehr Bilder miteinander zu vergleichen.³⁰ Mit Verweis auf die Tabelle setzt Stuurman den Akzent auf die Messdaten, wenn er sagt: »Your image is a matrix, rows and columns of numbers that tell you how, at each of these pixel elements, how much light was detected there during your exposure.«³¹

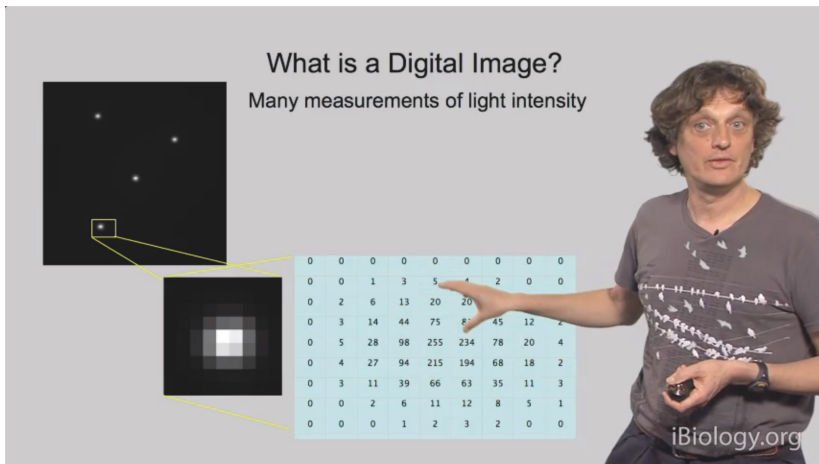


Abb. 2.2: Der Bioinformatiker Nico Stuurman erklärt den Unterschied zwischen dem »repräsentationalen Bild« und dem »tatsächlichen Bild«.

Quelle: Nico Stuurman und Kurt Thorn, »Cameras and Digital Image Analysis«, aufgenommen im April 2013 für iBiology, Videovortrag, 33:40, <https://www.ibiology.org/talks/digital-image-analysis/>.

In Stuurmans Vortrag wird deutlich, dass bioinformatische Diskurse sich vornehmlich auf die Zahlen beziehen, die der Anzahl der Photonen, die

29 Ebd.

30 Siehe ebd.

31 Ebd.

auf die einzelnen Pixel auftreffen, vom Computer zugeordnet werden, und weniger auf das Bild, das sich am Bildschirm zeigt. Stuurman nennt die Datenerhebung – er spricht vom Sammeln analysierbarer Zahlen – als das eigentliche Ziel der Mikroskopie. Die Bilder erachtet er als Nebenprodukt und nicht etwa als Ziel und Zweck eines Experiments. Visualisierungen, so sagt es Stuurman, seien Werkzeuge für die Datensammlung; sie enthielten – möglichst umfassende – Informationen. Dem Publikum seines Vortrags gibt er daher auch die folgende Merkformel mit auf den Weg: »What I want you to get away with in the end is that we are going to care much more about those numbers than how good the picture looks.«³²

Das repräsentationale Bild nennt Stuurman »Visualisierung« (»visualization«). Die Pixel eines repräsentationalen Bildes visualisieren den numerischen Datensatz, der vom Mikroskop-System während des Experiments über die Messung der emittierten Photonen pro Zeiteinheit generiert wird.³³ Die Visualisierung sei leicht zu manipulieren,³⁴ wie Stuurman es in seinem Vortrag »Image Acquisition and Quantitative Analysis« hervorhebt, der sich an erfahrene Zellforscher*innen richtet, die ihre Fertigkeiten in der Bildanalyse optimieren wollen.³⁵ So steht es beispielsweise im Ermessen der Nutzenden der Software – in diesem Fall der Open-Source Software Micro-Manager, einer Steuerungssoftware für Mikroskope, an deren Entwicklung Stuurman maßgeblich mitwirkte –, welche Farben sie den einzelnen Grauwerten zuweisen. Das Helligkeitsspektrum und der Kontrast des ausgegebenen Bildes lässt sich gleichfalls über eine Funktion der Software auswählen und einstellen.

Festhalten lässt sich, dass die Zahlen der Bioinformatik als die verlässliche und aussagekräftige Darstellungsform gelten. Während diese als un-

32 Ebd.

33 Siehe auch Nico Stuurman und Jason R. Swedlow, »Software Tools, Data Structures, and Interfaces for Microscope Imaging«, *Cold Spring Harbor Protocols*, Nr. 1 (2012), <https://doi.org/10.1101/pdb.top067504>. Dort heißt es: »[A]n image presented as a visual representation of the sample is also a quantitative measurement of photon flux.« Stuurman und Swedlow, »Software Tools«, 50.

34 Zum Problem der unzulässigen Manipulation digitaler Bilder in den Naturwissenschaften siehe auch Cromey, »Avoiding Twisted Pixels« und ders., »Digital Images Are Data«, 1. An der zuletzt genannten Stelle heißt es: »Scientists must remember that digital images are numerically sampled data that represent the state of a specific sample when examined with a specific instrument. These data should be carefully managed. Changes made to the original data need to be tracked like the protocols used for other experimental procedures.«

35 Siehe Nico Stuurman, »Image Acquisition for Quantitative Analysis«, aufgenommen im Oktober 2018 für *iBiology*, Videovortrag, 29:35, <https://www.ibiology.org/techniques/image-acquisition/>.

veränderlich erachtet werden, kann das repräsentationale Bild, das heißt die Visualisierung, in unterschiedlichen Intensitätsskalierungen am Bildschirm ausgegeben werden. Beispielsweise erscheinen oder verschwinden spezifische Bildbereiche in der visuellen Darstellung als Effekt der Erhöhung oder Verminderung des Kontrasts. Das repräsentationale Bild erscheint als wandelbar, leicht veränderbar und manipulierbar. Die Zahlen hingegen bergen ein Objektivitäts- und Erkenntnisversprechen. Dem Bild gegenüber ist ein gewisses Misstrauen geboten; der Zahl jedoch darf man mit Recht Vertrauen entgegenbringen.

2.2 Darstellungskonventionen, Bildgestaltung, Datensätze

2.2.1 »Schneetreiben, das von starkem Wind erfasst«: Rückgriff auf Darstellungskonventionen in naturwissenschaftlichen Visualisierungen

Dass die Befürchtungen, die Stuurman äußert, als nicht ganz unbegründet gelten dürften, verdeutlichen die folgenden Beispiele, die zeigen, wie sich Visualisierungen in den Naturwissenschaften an Darstellungskonventionen anlehnen. Das gilt sowohl für Visualisierungen, die in der Kommunikation mit einer breiteren Öffentlichkeit verwendet werden, als auch für Visualisierungen, die sich an ein Fachpublikum richten. Allein die maßgeblichen Darstellungskonventionen, auf die Bezug genommen wird, sind in den beiden Fällen je andere. Während sich Visualisierungen, die für Präsentationen in der Öffentlichkeit hergestellt werden, an Sehgewohnheiten orientieren, die über die Alltagserfahrung, die Kunsterfahrung oder die Begegnung mit Bildern im Unterhaltungskontext eingeübt wurden, richten sich Visualisierungen, die in Fachvorträgen oder Fachpublikationen gezeigt werden, an den Sehgewohnheiten der Fachgemeinschaft aus.

Für die Kunstgeschichte, wie sie am Helmholtz-Zentrum für Kulturtechnik an der Humboldt-Universität zu Berlin betrieben wird, formulierte Horst Bredekamp die programmatische Frage,

»ob sich nicht auch naturwissenschaftliche Bilder in einem solchen Maß auf ihre eigene Vorgeschichte der Bilder und nicht nur auf ihre jeweils aktuelle Erkenntnisleistung beziehen, dass von einer veritablen Traditionsbildung gesprochen werden kann«³⁶.

Bredekamp und seine Ko-Autorinnen des Editorials des ersten Bandes des *Kunsthistorischen Jahrbuchs für Bildkritik*, das das Programm des Helmholtz-Zentrums formuliert, vertreten die These, dass sich auch wissenschaftliche Bilder in Bildtraditionen, das heißt in eine Form- oder Stilgeschichte einordnen lassen.³⁷ Der Physiker Jochen Hennig etwa, der seinerzeit am Helmholtz-Zentrum forschte, hat dargelegt, wie sich die Visualisierungen in der Nanotechnologie auf Vorbilder aus der Atomphysik wie etwa Kugelmodelle zurückbeziehen.³⁸

Die US-amerikanische Kunsthistorikerin Elizabeth Kessler hat aufgewiesen, dass sich Bilder von Sternennebeln wie etwa des Adlernebels, die aus Daten generiert werden, die das Hubble-Weltraumteleskop übermittelt, an Darstellungskonventionen der US-amerikanischen Landschaftsmalerei des achtzehnten Jahrhunderts orientieren, die häufig mit dem Modus des Erhabenen assoziiert werden (siehe Abb. 2.3).³⁹ Das linke, recht bekannte Bild des Adlernebels ging aus einer Folge von Bearbeitungsschritten hervor, die an einem Bildgebungszentrum der NASA ausgehend von Mess- und Bilddaten des Hubble-Teleskops am Computer ausgeführt wurden. Die schwarze Fläche rechts oben im Bild verdeutlicht, dass das Bild aus mehreren Bildkacheln zusammengesetzt wurde. Vorbild solcher Visualisierungen sind, wie Kessler aufzeigt, die US-amerikanische Landschaftsmalerei der

36 Bildwelten des Wissens, »Interview: Bildunterschätzung – Bildüberschätzung. Ein Gespräch der »Bildwelten des Wissens« mit Michael Hagner«, in *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 1,1: *Bilder in Prozessen* (Berlin: Akademie Verlag, 2003), III.

37 Siehe Horst Bredekamp et al., »Bildwelten des Wissens«, in *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 1,1: *Bilder in Prozessen*, Hg. Horst Bredekamp und Gabriele Werner (Berlin: Akademie Verlag, 2003).

38 Siehe Jochen Hennig, »Vom Experiment zur Utopie, Bilder in der Nanotechnologie«, in *Bildwelten des Wissens*, Band 2,2: *Instrumente des Sehens*, Hg. Angela Fischel (Berlin: De Gruyter, 2004) und ders., *Bildpraxis: Visuelle Strategien in der frühen Nanotechnologie* (Bielefeld: Transcript, 2011), 221–276.

39 Siehe Elizabeth Kessler, »The Astronomical Sublime and the American West«, in *Picturing the Cosmos: Hubble Space Telescope Images and the Astronomical Sublime*, 19–68 (Minneapolis: The University of Minnesota Press, 2012). Einen ersten Hinweis, der in diese Richtung geht, gibt bereits der britische Kunsthistoriker Martin Kemp in seinem Kommentar zu den Bildern der Venus, die aus der Magellan-Mission (1991–1994) hervorgingen. Siehe Martin Kemp, »Venus's Voyeurs«, *Nature* 393, Nr. 6686 (18. Juni 1998): 633.

Romantik (wie hier Thomas Moran, *Cliffs of the Upper Colorado River, Wyoming Territory*, 1882) und Landschaftsfotografien des späten neunzehnten und frühen zwanzigsten Jahrhunderts.



Abb. 2.3: Eine gegenwärtige Visualisierung des Adlernebels und ihr kunsthistorisches Vorbild
 Quelle: Elizabeth Kessler, *Picturing the Cosmos: Hubble Space Telescope Images and the Astronomical Sublime* (Minneapolis: The University of Minnesota Press, 2012), 27 und 33.

Der deutsche Medienwissenschaftler Ralf Adelman hat ausgeführt, wie in den Visualisierungen der Marsoberfläche die perspektivische Ansicht und der Schattenwurf an Landschaftsdarstellungen angepasst werden, die Betrachtenden aus den Darstellungen von Erdlandschaften vertraut sind (siehe Abb. 2.4).⁴⁰ Die European Space Agency in Paris und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Berlin generieren diese Bilder aus Daten, die von verschiedenen Messinstrumenten, insbesondere einer High-Resolution-Stereo-Kamera, die auf der Raumsonde *Mars Express* installiert sind, erhoben wurden.

Bereits im siebzehnten Jahrhundert führten Astronomen und Mikroskopiker die Sinneseindrücke vom Kosmos und von der Mikrowelt, die ihnen Instrumente wie das Fernrohr und das Mikroskop vermittelten, auf das Bekannte zurück. Der deutsche Literatur-, Kultur- und Medien-

⁴⁰ Siehe Ralf Adelman et al., »Einleitung: Datenbilder und Bildpraxen«, in ders. et al., *Datenbilder*, 11, und ders., »Orbits: Visuelle Modellierungen der Marsoberfläche am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt«, in ders. et al., *Datenbilder*, 46. Für weiterführende Überlegungen zur Relevanz des Schattens für die Erzeugung eines Raumeindrucks in Galileis Mondzeichnungen, den am DLR erzeugten Marsbildern und der am MPI für Astrophysik in Garching erstellten Computersimulationen zur Verteilung von dunkler Materie siehe Jochen Hennig, »Epistemologie des Schattens«, in Adelman et al., *Datenbilder*.

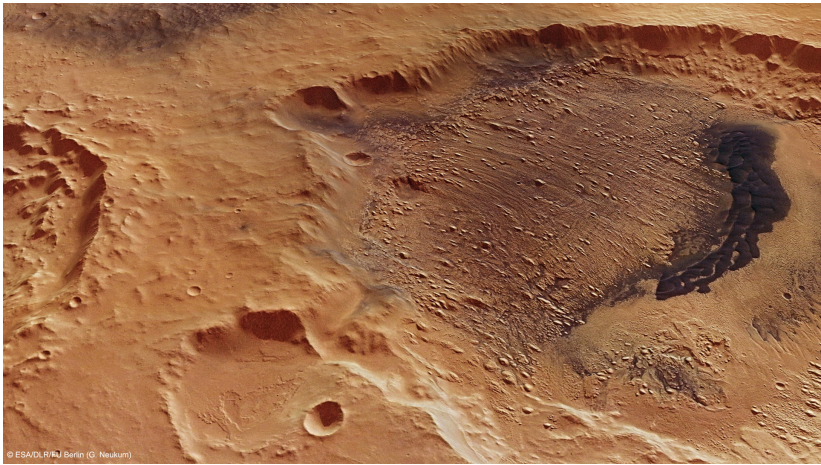


Abb. 2.4: Visualisierung des Danielson-Kraters auf dem Planeten Mars

Die Breite des Bildes entspricht etwa einer Distanz von 100 Kilometern. Urheber: European Space Agency.

Quelle: Wikimedia-Creative-Commons, zuletzt geändert am 18. Dezember 2014, [https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Mars_Express_captures_Danielson_crater_\(7347752534\).jpg](https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Mars_Express_captures_Danielson_crater_(7347752534).jpg).

wissenschaftler Joseph Vogl hat darauf hingewiesen, dass der italienische Universalgelehrte Galileo Galilei (1564–1642) die Seheindrücke, die er um 1610 in seinen Himmelsbeobachtungen gewann und im *Sidereus Nuncius*⁴¹ niederlegte, vermittelt von beschreibenden Texten und Zeichnungen in den Bereich des Bekannten übertrug.⁴² Galilei, so Vogl, sah die Mondlandschaft durch das Fernrohr in neuer, ungewohnter Weise und deutete seinen Seheindruck im Modus des Bekannten, namentlich als vertraute Erdlandschaft. Vogl schreibt: »Wenn nämlich Galilei durch das Fernrohr sieht und fremde Planeten und vor allem den Mond anschaut, sieht er zuallererst die Erde selbst [...].«⁴³ In seinen Beschreibungen der Mondoberfläche zog Galilei Erfahrungen von Landschaften sowie von Licht- und Raumkonstellationen

41 Der lateinische Titel wird häufig mit dem Ausdruck »Sternenbote« ins Deutsche übersetzt. Die maßgebliche deutsche Fassung trägt den erweiterten Titel *Nachricht von neuen Sternen*. Siehe Galileo Galilei, *Sidereus Nuncius: Nachricht von neuen Sternen*, Hg. und eingeleitet von Hans Blumenberg, 1. Auflage (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1965). Zum *Sidereus Nuncius* siehe die weiteren Ausführungen auf den Seite 147–148.

42 Siehe Joseph Vogl, »Medien-Werden: Galileis Fernrohr«, in *Mediale Historiographien*, Hg. Lorenz Engell und ders. (Weimar: Universitäts-Verlag, 2001), 117–119.

43 Ebd., 117.

heran, die er von der Erde kannte, und erschloss sich und seinen Lesenden auf diese Weise das Unbekannte auf der Folie des Bekannten.

Auch in der Geschichte der Mikroskopie finden sich immer wieder Beschreibungen und Darstellungen, die das Unbekannte auf das Bekannte zurückführten, sprich, die das Mikroskopische an das Makroskopische anlehnten. Den Bezug zur makrokosmischen Welt stellte bereits der niederländische Naturforscher und Mikroskopiker Antoni van Leeuwenhoek (1632–1723) her, wenn er die Blutkörperchen, die er im durchscheinenden Bein einer jungen Krabbe unter dem Mikroskop beobachtete, mit einem Schneetreiben verglich. Im Jahr 1694 schrieb Leeuwenhoek in einem an die Royal Society gerichteten Brief:

»Nun, ich kann die runden Blutkörperchen, die vor meinem Auge vorbeizogen, nicht besser vergleichen als mit einem Schneetreiben, das von starkem Wind erfasst, von uns wie durch eine Träne oder durch die Öffnung eines Fensters wahrgenommen wird.«⁴⁴

Bemerkenswert erscheint die dezidiert emphatische Aufladung und der haptisch-sinnliche und poetisch-romantische Assoziationshorizont, der in Leeuwenhoeks Worten anklingt. Der deutsche Bakteriologe Robert Koch (1843–1910) ließ die mikroskopischen Ansichten von Schimmelpilzen, die er fotografierte, durch die Ausrichtung und Rahmung der Fotogramme wie makroskopische Ansichten von Blumenwiesen oder Bäumen wirken (siehe Abb. 2.5).⁴⁵

Die deutsche Medienkulturwissenschaftlerin Brigitte Weingart weist in ihrer Analyse der Repräsentationen von Viren in aktuellen medizinischen Lehrbüchern auf, wie diese Darstellungen in Beziehung zu populären Bildsujets und bekannteren Beispielen aus dem Bereich der modernen Kunst

44 Antoni van Leeuwenhoek, Brief I39 vom 14. September 1694, adressiert an Richard Waller, in *Alle de Brieven van Antoni van Leeuwenhoek: Een volledige Uitgave van Leeuwenhoeks Werken, toegelicht en gezien in het Perspectief van de Geschiedenis der Wetenschappen en Geneeskunde, in het bijzonder met betrekking tot de algemene en biologische Mikroskopie* [Niederländisch – Englisch], hg. unter Schirmherrschaft der Leeuwenhoek-Gesellschaft der Königlichen Niederländischen Akademie der Wissenschaften und Künste, Band 10 (1694–1695), Hg. L. C. Palm (Lisse: Swets und Zeitlinger, 1979), 148, zitiert nach der Übersetzung des Zitats aus dem Niederländischen in Karin Leonhard, »Blut sehen«, in *Transfusionen: Blutbilder und Biopolitik in der Neuzeit*, Hg. Anja Lauper (Zürich, Berlin: Diaphanes, 2005), 124.

45 Siehe Franziska Brons, »Kochs Kosmos«, in *Mikrofotografie: Schönheit jenseits des Sichtbaren*, Hg. Ludger Derenthal und Christiane Stahl (Ostfildern: Hatje Cantz, 2010), 29.



Abb. 2.5: Robert Koch, Sporen-Aufnahmen

Quelle: Museum für Fotografie, Berlin. Oliver Heilwagen, »Mikrofotografie: Schönheit jenseits des Sichtbaren«, *Kunst und Film*, veröffentlicht am 02.10.2010, <https://kunstundfilm.de/2010/10/mikrofotografie/>.

gesetzt werden (siehe Abb. 2.6.)⁴⁶ Das Bild links zeigt die mikroskopische Ansicht der fadenförmigen Zellen eines Pilzes im Stile eines abstrakt-expressionistischen Gemäldes des US-amerikanischen Malers Jackson Pollock (1912–1956). Im Bild rechts ist das Konzept des Syndroms, das heißt einer Kombination verschiedener Symptome, in Anlehnung an die Bildsprache des katalanischen Malers Joan Miró (1893–1983) dargestellt. Weingart kommentiert die Darstellungen wie folgt:

»Natürlich sind diese Illustrationen vor allem kurios. Darüber hinaus können sie jedoch tatsächlich die Aufmerksamkeit darauf lenken, dass gängige biomedizinische Repräsentationen – seien es mikroskopische Aufnahmen oder stark abstrahierende Diagramme – das konnotative Feld bestimmter künstlerischer Avantgarden des 20. Jahrhunderts aufrufen.«⁴⁷

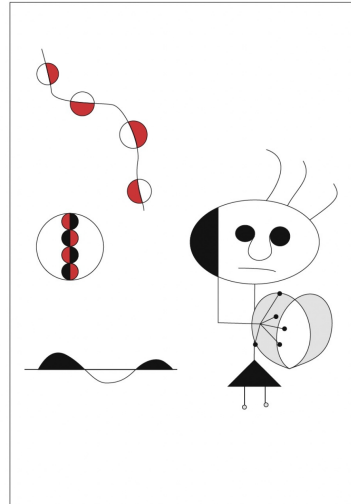
Im Unterschied zu den auf Wissenschaftspopularisierung und Wissensvermittlung abzielenden Darstellungsformen, die Bezüge zur Kunst, Alltagserfahrung und Unterhaltungskultur herstellen, orientieren sich fachliche Darstellungen an disziplinären Darstellungskonventionen, die ihrerseits

⁴⁶ Siehe Brigitte Weingart, »Viren visualisieren: Bildgebung und Popularisierung«, in *Virus! Mutationen einer Metapher*, Hg. Ruth Mayer und dies. (Bielefeld: Transcript, 2004), 115–120.

⁴⁷ Ebd., 119.



Pilze



Syndrome

Abb. 2.6: Virusdarstellungen in einem aktuellen medizinischen Lehrbuch

Quelle: Klaus Miksits und Helmut Hahn, *Basiswissen Medizinische Mikrobiologie und Infektiologie*, 2., überarbeitete und korrigierte Auflage (Berlin: Springer, 1999), 211 und 391.

wiederum die Kunst beeinflussen.⁴⁸ Darüber hinaus prägen Medientechniken – wie etwa die Computergrafik im Falle der interaktiven molekularen Modellierung – und die epistemischen Räume spezifischer Forschungsinstitutionen die Darstellungsmöglichkeiten, wie der kanadische Wissenschaftssoziologe und Wissenschaftshistoriker Éric Francoeur, der sich in seiner Forschung zu Fragen der Repräsentation und der Visualisierung in den exakten Wissenschaften auf die Geschichte der Modellierung in der Chemie und Molekularbiologie konzentriert, aufgewiesen hat.⁴⁹ In vielen Fällen, beispielsweise im Fall von Satellitenbildern der Erdatmosphäre und Erdoberfläche, bestimmen zudem ökonomische und politische Interes-

48 Zu konventionalisierten Darstellungsformen in der Chemie und ihren Auswirkungen auf den Kubismus siehe etwa Reinhard Nesper, »Die chemische Symbolik«, in *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, Hg. Bettina Heinz und Jörg Huber (Zürich: Edition Voldemeer, 2001). Zu Darstellungsformen in der Molekularbiologie und deren zeitlichen Wandel siehe Gerd Folkers, »Architektur und Eigenschaften der Moleküle des Lebens«, in *Mit dem Auge denken*.

49 Siehe Éric Francoeur, »Cyrus Levinthal, the Kluge and the Origins of Interactive Molecular Graphics«, *Endeavour* 26, Nr. 4 (2002), [https://doi.org/10.1016/s0160-9327\(02\)01468-0](https://doi.org/10.1016/s0160-9327(02)01468-0).

sen, was dargestellt wird und wie ein Phänomen zur Darstellung kommt, wie der britische Kunsthistoriker Martin Kemp herausgestellt hat.⁵⁰ Die Visualisierungen des Planeten Neptun und seiner Gashülle, die aus den Bilddaten erzeugt wurden, die von der Voyager-2-Raumsonde der NASA im Jahr 1989 erhoben und per Radiosignal an die Erde übertragen wurden, und der Erdatmosphäre und Erdoberfläche im Ausgang von multispektralen Scan-Daten, die von den Landsat-Satelliten in den 1970er-Jahren erhoben wurden, kommentiert Kemp folgendermaßen: »The underlying conception behind the rigging is never a neutral matter. It is determined by a series of intersecting intellectual, human, social, economic and political values.«⁵¹

Dass sich die Darstellungskonventionen wissenschaftlicher Einzeldisziplinen über die Zeit hinweg allerdings auch verändern, hat der polnische Mikrobiologe, Immunologe und Erkenntnistheoretiker Ludwik Fleck (1896–1961) bereits im Jahr 1935 betont. Wissenschaftliche Darstellungen, insbesondere mittelalterliche und frühneuzeitliche Zeichnungen, identifiziert Fleck als »Sinnbilder« oder »Ideogramme«. Mit vergleichendem Blick auf die anatomischen Zeichnungen des menschlichen Skeletts, wie sie der flämische Anatom und Chirurg Andreas Vesalius (1514–1564) anfertigte, und Zeichnungen desgleichen Sujets aus dem mittelalterlichen Persien schreibt Fleck: »Vor uns liegen also Sinnbilder, die wohl die zeitgenössische Auffassung, nicht aber die naturgetreue Form – wie sie unserer Auffassung entspricht – zur Darstellung bringen.«⁵² Und weiter: »Wir haben Ideogramme vor uns, d. h. grafische Darstellungen gewisser Ideen, gewissen Sinnes, einer Art des Begreifens: der Sinn ist in ihnen dargestellt wie eine Eigenschaft des Abgebildeten.«⁵³

Der US-amerikanische Ethnomethodologe und Wissenschafts- und Technikforscher Michael Lynch und der US-amerikanische Kunsthistoriker Samuel Edgerton haben in den 1980er-Jahren mithilfe von Interviews und Laborbeobachtungen die Entscheidungsprozesse studiert, die die Herstellung von astronomischen Bildern an zwei US-amerikanischen Bildgebungszentren flankieren, und die Rolle untersucht, die ästhetische Erwägungen

50 Siehe Martin Kemp, »Seeing and Picturing: Visual Representation in Twentieth-Century Science«, in *Science in Twentieth Century*, Hg. John Krige und Dominique Pestre (Paris: Harwood Academic Publishers, 1997).

51 Ebd., 368.

52 Ludwik Fleck, *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache: Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv* [i.O. 1935] (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1980), 181.

53 Ebd., 183.

dabei spielen. Die beiden Forscher kommen zu dem Schluss, dass Realismus und Ästhetik in den Bildbearbeitungs- und Bildverarbeitungspraktiken der Astronomie einander keineswegs ausschließen. Vielmehr leiteten die Ideale des Realismus und des Naturalismus die Darstellungspraktiken, und zwar sowohl bei der Herstellung von Bildern für semi-populäre Magazine wie den *Scientific American* als auch für astrophysikalische Fachjournale wie etwa das *Journal of Astrophysics*.⁵⁴ Lynch und Edgerton resümieren:

»If, indeed, astronomers make use of colour and other elements of composition as abstractable representational media, rather than as mirrored properties of objects, they do so as committed realists, aiming to endow their compositions with naturalistic adequacy.«⁵⁵

In der semiotisch ausgerichteten Bildtheorie werden die Visualisierungspraktiken der Naturwissenschaften mit Rückbezug auf einen konstruktivistischen Bildbegriff verhandelt, wie ihn etwa der italienische Semiotiker Umberto Eco (1932–2016) entwickelt⁵⁶ oder wie ihn beispielsweise der US-amerikanische Philosoph Nelson Goodman (1906–1998) in seiner allgemeine Symboltheorie formuliert hat⁵⁷, der sich seinerseits auf den britischen Kunsthistoriker Ernst H. Gombrich (1909–2001) zurückbezieht⁵⁸. Eco, Goodman und Gombrich, so die deutsche Kultur- und Technikhistorikerin Martina Heßler, hätten bereits in den 1960er-Jahren gezeigt, dass nicht etwa eine Ähnlichkeitsbeziehung das Verhältnis zwischen Bild und Wirklichkeit strukturiere, sondern dass vielmehr unsere Wahrnehmungskonventionen bestimmen, was wir sehen. Goodman etwa entkoppelt die Frage nach der bildlichen Referenz von den Ideen der Ähnlichkeit und des Abbilds, unterstreicht die Denotation als verbindende Kraft zwischen Bild und Gegenstand und behauptet in deutlicher Abgrenzung von Charles Sanders Peirce, dass die Denotation gänzlich ohne eine Ähnlichkeitsbeziehung auskomme.⁵⁹ Vielmehr symbolisiere das Bild den Gegenstand und die symbolische Kraft

54 Siehe Michael Lynch und Samuel Y. Edgerton Jr., »Aesthetics and Digital Image Processing: Representational Craft in Contemporary Astronomy«, in *Picturing Power: Visual Depiction and Social Relations*, Hg. Gordon Fyfe und John Law (London: Routledge, 1988), 192–193.

55 Ebd., 214.

56 Siehe Umberto Eco, *Einführung in die Semiotik* [i.O. 1968], aus dem Italienischen übersetzt von Jürgen Trabandt (München: Fink, 1972).

57 Siehe Nelson Goodman, *Sprachen der Kunst: Entwurf einer Symboltheorie* [i.O. 1968], aus dem amerikanischen Englisch übersetzt von Bernd Philippi (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1995).

58 Siehe Ernst H. Gombrich, *Das forschende Auge: Kunstbetrachtung und Naturwahrnehmung* (Frankfurt am Main und New York: Campus, 1994).

59 Siehe Heßler, »BilderWissen«, 154.

des Bildes speise sich allein aus »Konventionen der Bezugnahme«⁶⁰. Heßler fasst diesen Gedankengang von Gombrich und Goodman zusammen und resümiert: »Referenz beruht, so der bildtheoretische Diskurs, damit nicht auf Ähnlichkeit mit dem Abgebildeten. Der Bezug beruht vielmehr auf Konventionalisierung.«⁶¹

Bemerkenswert an diesem Gedankengang ist, dass die symbolische Referenz gegenüber der ikonischen Referenz deutlich hervorgehoben und die indexikalische Referenz überhaupt nicht angesprochen wird. Das Verständnis des Weltbezugs digitaler Datenbilder und Bildmodelle, wie sie gegenwärtig in der computergestützten Lebendzellmikroskopie erzeugt werden, kann allerdings nicht allein ein konstruktivistischer Bildbegriff anleiten, wie Eco, Gombrich und Goodman ihn vertreten. Vielmehr stellt sich für diese Bildtypen die Frage nach der indexikalischen Referenz ganz vordringlich, da diese Bilder Darstellungskonventionen bisweilen unterlaufen und nicht allein ›als Bilder‹ einen Bezug zu ihrem Gegenstand herstellen, sondern dieser Bezug vielmehr erst zuverlässig über den mit dem Bild verbundenen Datensatz erzeugt wird. Hier kommt der indexikalischen Referenz demnach eine entscheidende Bedeutung zu, allerdings nicht im Verbund mit ikonischer Referenz, sondern über die Zwischenform des Datensatzes, der gleichsam als Scharnier zwischen digitalem Bild und realweltlichem Gegenstand fungiert, wie Rosen und Gunning hervorgehoben haben.

2.2.2 Gestaltete Oberflächen und evidenzstiftende Datensätze: Erscheinungsweise und Tiefenstruktur des Datenbildes

Eine Position, die nicht zeichentheoretisch argumentiert und die hier von Interesse ist, da sie den Fokus auf die Zahl legt, beziehen Wolfgang Ernst sowie der deutsche Germanist, Philosoph und Medienwissenschaftler Wolfgang Hagen. Ernst grenzt sich dezidiert von Goodmans Symboltheorie und dessen Ausführungen zum Digitalen ab und setzt Hagens Überlegungen zur digital-elektronischen Bildaufzeichnung dagegen, die er wie folgt zusammenfasst: »Eine *Messung* aber ergibt niemals das ›Zeichen‹ eines Ge-

60 Ebd.

61 Ebd.

genstands, sondern buchstäblich sein *Maß*: einen Signalwert, eine Zahl.«⁶² Anders als Goodman, der die syntaktische und semantische Differenzierung als Merkmal digitaler Systeme behauptete⁶³ – und damit beispielsweise auch das Alphabet als ein digitales System einordnete – bestehen Hagen und Ernst auf der Zahl als notwendige Bedingung für die Rede vom Digitalen. Für die computergestützte Mikroskopie lässt sich allerdings – mit Goodman *und* mit Ernst und Hagen – zeigen, dass eine Messung sowohl das Maß eines Gegenstands als auch sein Zeichen hervorbringt. Wie im vorigen Kapitel aufgewiesen wurde, erzeugt die computergestützte Mikroskopie sowohl einen numerischen, prozessierbaren Datensatz als auch ein visualisiertes ›Bild‹ des Untersuchungsgegenstands.

Hilfreich für die Entwicklung eines vertieften Verständnisses der Beziehung zwischen den Symbolisierungsformen Bild und Zahl in der gegenwärtigen Fluoreszenzmikroskopie erscheint daher der Vorschlag von Lev Manovich, zwei Ebenen des computerbasierten Bildes – Manovich spricht vom »computer-based image« – zu unterscheiden: die Ebene der Oberflächenerscheinung und die Ebene der zugrundeliegenden Codes.⁶⁴ Manovich differenziert zwischen zwei verschiedenen Symbolisierungsformen, in denen sich das computerbasierte Bild gleichsam janusköpfig manifestiert: Er unterscheidet zwischen der ästhetischen Ebene der Erscheinung als Bild und der codierten Ebene als Zahlen-, Buchstaben- und Zeichenfolge:

»The computer-based image consists of two levels, a surface appearance and the underlying code (which may be the pixel values, a mathematical function, or HTML code). In terms of its ›surface‹, an image participates in dialog with other cultural objects. In terms of its code, an image exists on the same conceptual plane as other computer objects.«⁶⁵

Eine ähnliche Differenz wie Manovich führt auch der deutsche Medienwissenschaftler Sven Stollfuß ein, wenn er für das Bild in der virtuellen Endoskopie zwischen einer »sichtbaren ›Vorderseite‹« und einer »maschi-

62 Wolfgang Ernst, »Den A/D-Umbruch aktiv denken – medienarchäologisch, kulturtechnisch«, in *Analog/Digital – Opposition oder Kontinuum? Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung*, Hg. Jens Schröter und Alexander Böhnke (Bielefeld: Transcript, 2004), 51, Hervorhebung im Original. Ernst bezieht sich hier auf Wolfgang Hagen, »Die Entropie der Fotografie. Skizzen zu einer Genealogie der digital-elektronischen Bildaufzeichnung«, in: *Paradigma Fotografie: Fotokritik am Ende des fotografischen Zeitalters*, Band 1, Hg. Herta Wolf (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2002).

63 Siehe Nelson Goodman, *Languages of Art: An Approach to a Theory of Symbols* (Indianapolis: Bobbs Merrill, 1968), 161.

64 Siehe Lev Manovich, *The Language of New Media* (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2001), 289.

65 Ebd.

nenlesbaren ›Rückseite‹⁶⁶ unterscheidet. Während Erstere als »Bewegungsbild« im Hinblick auf die Begriffe des Bildes und der Bewegung analysiert werden könne, lasse sich Letztere, die aus »digitalen Informationen« aufgebaut sei, über ihre »medientechnische Verfasstheit«⁶⁷ bestimmen. Stollfuß leitet diese Einsicht mit Rückbezug auf die Überlegungen zum digitalen Bild her, wie sie der US-amerikanische Medienwissenschaftler William Uricchio⁶⁸, der deutsche Philosoph Gernot Grube⁶⁹ und der deutsche Medienwissenschaftler Harmut Winkler⁷⁰ angestellt haben. Bei Uricchio heißt es zur Seherfahrung in Augmented-Reality-Umgebungen: »[T]he algorithmic domain ultimately determines *what* we see, and even *how* we see it«, eine Beobachtung, die eine Kehrseite habe, denn: »after all, we attend to the images before us and not to the underlying selection and organization process«⁷¹. Im Zusammenhang mit dem Gebrauch von Animationsprogrammen in der virtuellen Endoskopie macht Stollfuß auf die Rolle des »Computational Design« aufmerksam, »eines computerbasierten, integrativen (Animations-)Designs«⁷² für die Darstellung des Körperinneren. Über den Umgang mit den Grenzen und Möglichkeiten der Software, über eine »gestalterische Epistemologie«⁷³, wie Stollfuß mit Rückbezug auf einen Begriff des Kunsthistorikers Peter Stephan anmerkt, rückten Datenpraktiken in den Fokus der Wissens- und Erkenntnisproduktion: »Die Intervention, der manipulierende Eingriff in das Darzustellende ist der generative Modus.«⁷⁴ Stollfuß resümiert: »Wir arbeiten also keineswegs lediglich mit Binärcodes,

66 Sven Stollfuß, »Animierte Anatomie: Zum Wissen algorithmischer Bewegungsbildlichkeit in der modernen Medizin«, in *In Bewegung setzen...*, Hg. Franziska Bruckner, Erwin Feyersinger, Markus Kuhn und Maike Sarah Reinert (Wiesbaden: Springer, 2017), 154.

67 Ebd.

68 Siehe William Uricchio, »The Algorithmic Turn: Photosynth, Augmented Reality and the State of the Image«, *Visual Studies* 26, Nr. 1 (2001), <https://doi.org/10.1080/1472586X.2011.548486>.

69 Siehe Gernot Grube, »Digitale Abbildungen – ihr prekärer Zeichenstatus«, in *Konstruierte Sichtbarkeiten. Wissenschafts- und Technikbilder seit der Frühen Neuzeit*, Hg. Martina Heßler (München: Fink, 2006).

70 Siehe Hartmut Winkler, *Prozessieren: Die dritte, vernachlässigte Medienfunktion*, Vortrag auf der Tagung: Media Theory in North America and German-Speaking Europe, 8.–10. April 2010, University of British Columbia, Vancouver, zuletzt geprüft: 1. Juli 2021, http://homepages.uni-paderborn.de/winkler/proc_d.pdf.

71 Uricchio, »The Algorithmic Turn«, 33.

72 Stollfuß, »Animierte Anatomie«, 159.

73 Peter F. Stephan, »Wissen und Nicht-Wissen im Entwurf«, in *Entwerfen – Wissen – Produzieren: Designforschung im Anwendungskontext*, Hg. Claudia Mareis et al. (Bielefeld: Transcript, 2010), 83.

74 Stollfuß, »Animierte Anatomie«, 159.

sondern durchaus auch mit visuell identifizierbaren Zeichensystemen im Sinne sichtbarer Oberflächen.«⁷⁵ Die »analoge Erscheinungsweise«, seine »Oberflächeneigenschaften« ordnen das Computerbild in eine »allgemeine Bildertradition« ein, wie bereits Barbara Flückiger hervorgehoben hat, »[m]it dem zugrunde liegenden Kode stehen ihm alle Möglichkeiten digitaler Bildbearbeitung offen, und gleichzeitig wird das Bild Teil eines digitalen Ökosystems«⁷⁶.

Diese Anerkennung der Doppelgesichtigkeit digitaler Bilder ist für das Verständnis des Weltbezugs jener Visualisierungen, die in der computer-gestützten Mikroskopie erzeugt werden, insofern wesentlich, als sie diese als einen Aspekt eines Phänomens verständlich macht, das zwar im Bild in Erscheinung tritt und wahrgenommen werden kann, dessen informative Tiefenstruktur, die sich der menschlichen Wahrnehmung entzieht, allerdings die Voraussetzung nicht allein für die Erscheinung des Bildes, sondern auch für die weitere Datenverarbeitung und -analyse darstellt. Erst Letztere ermöglicht weiterführende Erkenntnisse über das Phänomen, wie sie die Bilder allein nicht zulassen. Die Unterscheidung zwischen der bildlichen Oberflächenerscheinung und der numerischen Tiefenstruktur erlaubt es, fluoreszenzmikroskopische Bilder als auf Zahlen gründende Konstrukte zu bestimmen, die als Ergebnisse von Umwandlungsprozessen anzusehen sind, die etwas Unanschauliches in den Bereich des Anschaulichen übertragen und deren Weltbezug auf eben diese Zahlen angewiesen ist.

2.3 Zum Weltbezug des computergenerierten Bildmodells

Bis hierhin habe ich einen begrifflich-theoretischen Rahmen aufgespannt, der es im Folgenden ermöglichen soll zu verstehen, wie sich das Bild, der Datensatz und der Untersuchungsgegenstand in der Experimental-, Bildgebungs- und Modellierpraxis der computergestützten Lebendzellmikroskopie aufeinander beziehen. Als zweckdienlich für diese Überlegungen erweist es sich, dem Begriff des »Datenbildes« den Begriff des »Bildmodells«⁷⁷ an

75 Ebd., 154.

76 Barbara Flückiger, *Visual Effects: Filmbilder aus dem Computer* (Marburg: Schüren, 2008), 40.

77 Der Begriff des Bildmodells findet sich in einem Aufsatz des Biologen, Philosophen und Wissenschaftshistorikers Olaf Breidbach aus dem Jahr 2006. Breidbach führt diesen Begriff jedoch

die Seite zu stellen. Unter einem Bildmodell wird im Folgenden die computergestützte Auswertung und algorithmische Weiterverarbeitung eines Datenbildes verstanden, die einen weiteren Umwandelungsschritt des erhobenen Datensatzes impliziert, der rechnerisch abstrahiert und darauf abzielt, das Augenmerk auf einen oder mehrere ausgewählte Aspekte des Untersuchungsgegenstands zu lenken. Die folgende Diskussion der Prozesse und Praktiken der Erzeugung von Datenbildern und Bildmodellen des Embryos soll, anknüpfend an die bereits dargestellten Begriffe und Theorielinien, die medienwissenschaftliche Diskussion zu Fragen des Weltbezugs des digitalen Datenbildes weiterführen und verfeinern, und zwar unter anderem unter Berücksichtigung von Überlegungen zur indexikalischen Referenz in bildgebenden Verfahren, wie sie in der Medienwissenschaft angestellt, und mit Rückbezug auf die Begriffe der »transversalen Referenz« und des »Modells«, wie sie in der Wissenschafts- und Technikforschung entwickelt wurden.

2.3.1 Der »digitale Embryo«: Von der mikroskopischen Visualisierung zur computergestützten Modellierung des Embryos

Seit ungefähr fünfzehn Jahren untersuchen die Teams um den physikalischen Biologen und Fluoreszenzmikroskopiker Ernst Stelzer am European Molecular Biology Laboratory (EMBL) in Heidelberg und den Physiker Philipp Keller am Janelia Research Campus im US-Bundesstaat Virginia Embryonen mittels der computergestützten Lichtblattmikroskopie. Sie machen die embryonale Entwicklung unterschiedlicher Modellorganismen wie Zebrafisch, Fadenwurm und Taufliede ausgehend von am Mikroskop erhobenen Messdaten nicht allein als Visualisierungen am Bildschirm sichtbar, sondern wandeln die Messdaten darüber hinaus in vierdimensionale digitale Modelle um, die spezifische Aspekte der Embryonalentwicklung visuell herausheben.⁷⁸ Dazu erzeugen die Forschenden am Lichtblatt-

nicht weiter aus. Siehe Olaf Breidbach, »Naturbilder und Bildmodelle: Zur Bildwelt der Wissenschaft«, in *The Picture's Image. Wissenschaftliche Visualisierung als Komposit*, Hg. Inge Hinterwaldner und Markus Buschhaus (München: Fink, 2006).

⁷⁸ Siehe Philipp J. Keller et al., »Fast, High-Contrast Imaging of Animal Development with Scanned Light Sheet-Based Structured-Illumination Microscopy«, *Nature Methods* 7, Nr. 8 (August 2010), <https://doi.org/10.1038/nmeth.1476>, und ders. et al., »Reconstruction of Zebrafish Early Embryonic Development by Scanned Light Sheet Microscopy«, *Science*, neue Reihe, 322, Heft 5904 (14.

mikroskop umfassende Metadaten, die eine Software in eine Folge von Einzelbildern umwandelt, aus denen sie Zeitrasterfilme generiert, die es ermöglichen, die Teilung und Ausdifferenzierung von Zellen sowie die Herausbildung einzelner Organe zu erkennen.

Die Messdaten verarbeiten die Physiker am Computer mittels eigens dafür entwickelter Algorithmen weiter. Das resultierende vierdimensionale Modell bezeichnen sie als »digitalen Embryo« (»digital embryo«)⁷⁹. Beim digitalen Embryo handelt es sich um ein *in-silico*-Modell des Embryos, das heißt, um ein Computermodell, das mit Rückgriff auf eine Kombination von Datensätzen produziert wird, die in ein Bildmodell umgewandelt werden, das am Bildschirm rezipiert wird.

Das Verfahren der Lichtblattmikroskopie, das zur Erzeugung der Metadaten verwendet wird, ist in seinen Grundzügen bereits über hundert Jahre alt. Im Jahr 1903 entwickelten der Physiker Henry Siedentopf (1872–1940) und der Chemiker Richard Zsigmondy (1865–1929) das sogenannte »Ultramikroskop«. Neu gegenüber anderen Mikroskopieverfahren war, dass die Lichtquelle beim Ultramikroskop nicht unterhalb der Probe angebracht wurde, sondern dass das Licht vielmehr im rechten Winkel zur Sichtachse auf die Probe auftraf. In den ersten zwei Dekaden des einundzwanzigsten Jahrhunderts erwies sich diese Trennung von Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel für die Weiterentwicklung der Fluoreszenzmikroskopie, einem Verfahren, das mit relativ hohen Lichtmengen arbeitet, die für den Untersuchungsgegenstand toxisch sind, als außerordentlich nützlich. So adaptierten Entwicklungsbiolog*innen am European Molecular Biology Laboratory seit Mitte der 1990er-Jahre die Technik der Ultramikroskopie für die computergestützte Fluoreszenzmikroskopie. Das Verfahren nannten sie »selective plane illumination microscopy«⁸⁰, wofür die Kurzform SPIM steht. In der Fachpublikation beschreiben sie die Vorzüge des Verfahrens:

»The system combines two-dimensional illumination with orthogonal camera-based detection to achieve high-resolution, optically sectioned imaging throughout the sample,

November 2008), <https://doi.org/10.1126/science.1162493>. Der zuerst genannte Fachartikel fokussiert auf die lichtblattmikroskopischen Verfahren zur embryonalen und neuronalen Entwicklung der Taufliede. Der zweite Fachartikel stellt die Forschung zum digitalen Embryo des Zebrafischs vor.

79 Keller et al., »Reconstruction of Zebrafish Early Embryonic Development«, 1066.

80 Jan Huisken et al., »Optical Sectioning Deep inside Live Embryos by Selective Plane Illumination Microscopy«, *Science*, neue Reihe, 305, Heft 5686 (13. August 2004): 1007, <https://doi.org/10.1126/science.1100035>.

with minimal photodamage and at speeds capable of capturing transient biological phenomena.«⁸¹

Mittels der Methode der Lichtblattfluoreszenzmikroskopie erzeugen die Forschenden den ersten Typus zweier unterschiedlicher Typen von Datensätzen. Der erste Typ Datensatz umfasst Metadaten, das heißt Messdaten, die am Mikroskop erhoben und mittels verschiedener Algorithmen »bereinigt« wurden, das heißt, dass der Kontrast zwischen Bildvordergrund und Bildhintergrund erhöht und die Schärfe der Darstellung einzelner Zellen verbessert wurde. Der zweite Typ Datensatz enthält errechnete Daten, unter anderem Variablen, Funktionen und Matrices, die aus den Messdaten hergeleitet wurden. Die Datensätze werden zu einer frei zugänglichen Datenbank zusammengeführt. Der Zugriff auf die Datenbanken erfolgt über die Webseite des European Molecular Biology Laboratory und über eine gemeinsame Webseite des Howard Hughes Medical Institute und des Janelia Research Campus. Die Datenbanken können allerdings lediglich von Fachleuten effektiv genutzt werden, die mit der MATLAB-Software von Microsoft umgehen können. Die Webseiten bietet eine Liste mit Links zu Filmen, Abbildungen, Roh- und Rechendaten sowie den Quellcodes zu den in *Nature Methods* und *Science* erschienenen Fachartikeln zur embryonalen und neuronalen Entwicklung der Taufliege und zum digitalen Embryo. Der Quellcode, der zur Berechnung der einzelnen Dimensionen des Modells verwendet wurde – dazu zählen die Fusion der verschiedenen Ansichten, der Bewegungsanalyse, dem Slicing und Rendering der Bilder, dem Tracking der einzelnen Zellen und der Visualisierung von Vektorfeldern –, ist ebenfalls über die genannten Webseiten der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich.

Die beiden Typen von Datensätzen führen zu zwei unterschiedlichen Typen von repräsentationalen Bildern (siehe Abb. 2.7). Datensätze, die Messdaten enthalten, die vermittels gängiger Bildgebungssoftware in Visualisierungen umgewandelt wurden, ergeben runde Schwarz-Weiß-Bilder, die eine Ansammlung von Zellen zeigen, die zunächst undifferenziert erscheinen und sich im zeitlichen Verlauf in erkennbare Strukturen wie die Wirbelsäule und den Kopf ausdifferenzieren. Diese Bilder sind in der Abbildung 2.7 jeweils in der linken Bildhälfte angeordnet. Datensätze, die errechnete Daten umfassen, ergeben runde farbige Bilder, in denen

81 Ebd.

Keller et al. (2008); figure 2

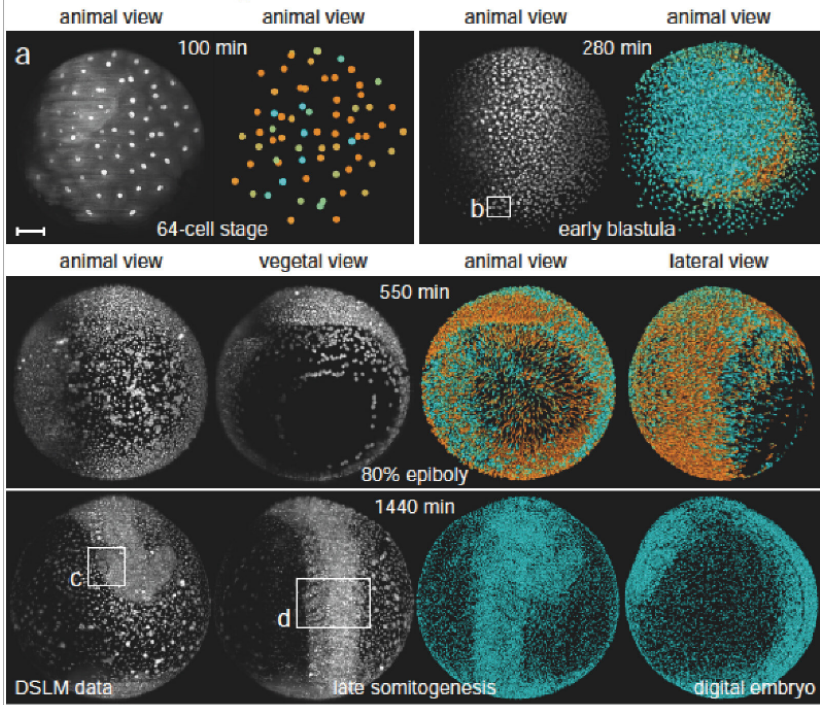


Abb. 2.7: Standbilder aus zwei Forschungsfilmen, die verschiedene Entwicklungsstadien des Zebrafischembryos zeigen

Quelle: Philipp J. Keller et al., »Reconstruction of Zebrafish Early Embryonic Development by Scanned Light Sheet Microscopy«, *Science, neue Reihe*, 322, Heft 5904 (14. November 2008), 1066, <https://doi.org/10.1126/science.1162493>.

verschiedene Zelltypen in unterschiedlichen Farben markiert sind, um hervorzuheben, zu welchen spezifischen Organen sich die Zellen im Verlauf des Experiments entwickeln, in welche Richtung sich die Zellen bewegen – zum Beispiel in die Richtung der Bauchseite oder des Dottersacks des Embryos – oder in welcher Geschwindigkeit sich die Bewegung vollzieht. Die türkisfarbenen Punkte etwa indizieren Zellen, die sich langsam bewegen, die orangefarbenen Punkte, markieren Zellen, die sich schnell bewegen. Die Bedeutung des Farbcodes beruht nicht auf fachlichen Konventionen, sondern ändert sich von Film zu Film und kann dem beschreibenden Text in der Bildlegende in der Publikation entnommen werden. Bei den farbigen

Bildern handelt es sich um modellhafte Rekonstruktionen des digitalen Zebrafischembryos.

Die Bewegung der Zellen und ihre funktionale Ausdifferenzierung zu einzelnen Organen macht die Vielzahl von kurzen Forschungsfilmen anschaulich, die auf der Webseite des EMBL zugänglich sind. »Movie 11: Reverse Engineering of Migratory Tracks of Retinal Progenitor Cells«⁸² hebt beispielsweise diejenigen Zellen in Rot hervor, die sich zu einem Auge entwickeln. In »Movie 9: Global Cell Tracking and Colour-Indexing of Morphogenetic Domains«⁸³ zeigt die Farbe Türkis an, dass sich die in dieser Farbe dargestellten Zellen in Richtung der sich formierenden Wirbelsäule bewegen, die Farbe Grün markiert Zellen, die sich auf den Bauch zu bewegen, rot und gelb eingefärbte Zellen wandern auf die Körperachse zu oder von ihr weg und in Pink dargestellte Zellen bewegen sich zum Dottersack hin. In der Embryogenese ist die Funktion der Zellen zunächst noch unspezifisch und bildet sich erst nach und nach heraus. Vermittels hinzugefügter Farben heben die Forschenden einen Prozess der zunehmenden Ausdifferenzierung von Zellfunktionen und embryonalen Strukturen heraus.

Farben schaffen dabei Klarheit und befördern die Erkenntnis. Die Unterscheidung verschiedener Zelltypen mittels von Farben bringt Ordnung in die Vielzahl der sich in verschiedene Richtungen bewegenden Zellen. Die Farben ermöglichen es nicht nur, die Bewegungen einzelner Zellen und ganzer Gruppen von Zellen zu verfolgen und zu sehen, wie sich die Organe des Embryos ausformen. Die Farben zeigen vielmehr bereits zu Beginn eines zeitlichen Ablaufs die zukünftige Funktion an, die eine Zelle erfüllen wird. Während weder die schwarz-weißen Datenbilder noch die farbigen Bildmodelle selbstevident sind, heben die hinzugefügten Farben der Bildmodelle doch Prozesse und Strukturen hervor, die im Datenbild latent vorhanden sind, aber auf den ersten Blick verborgen bleiben. Im Bildmodell setzen die Farben Akzente und lenken den Blick der Betrachtenden.

82 Siehe Philipp Keller et al., »Reconstruction of Zebrafish Early Embryonic Development«: Movie 11: Reverse Engineering of Migratory Tracks of Retinal Progenitor Cells, <https://doi.org/10.1126/science.1162493>, Daten hinterlegt am EMBL, Digital Embryo Movies, zuletzt geprüft: 17. August 2021, <https://www.embl.de/digitalembryo/fish.html#Movies>.

83 Siehe ebd.: Movie 9: Global Cell Tracking and Colour-Indexing of Morphogenetic Domains, <https://doi.org/10.1126/science.1162493>, Daten hinterlegt am EMBL, Digital Embryo Movies, zuletzt geprüft: 17. August 2021, <https://www.embl.de/digitalembryo/fish.html#Movies>.

Die Beziehung zwischen dem untersuchten Organismus und dem digitalen Bildmodell des Organismus wird über ein mehrschrittiges Verfahren hergestellt, in dem Messdaten und die mit ihnen korrespondierenden Fluoreszenzbilder – die mithilfe von mikroskopisch-optischer Sensor- und Messtechnik gewonnen wurden – vermittels von algorithmischen Verfahren in ein mehrfarbiges vierdimensionales Bewegtbild umgewandelt werden.⁸⁴ Das Team um Stelzer beschreibt das Verfahren anhand eines Experiments, in dem es die Entwicklung eines Taufliegenembryos aus vier verschiedenen Perspektiven mittels eines computergestützten lichtblattmikroskopischen Verfahrens mit der Bezeichnung »digital scanned laser light-sheet-based fluorescence microscopy – structured illumination«, kurz DSLM-SI, über einen Zeitraum von zwölf Stunden dokumentierte. Die Einzelbilder wurden in zehnminütigen Intervallen erzeugt und zu laufenden Bewegtbildern zusammengefügt.

Das Ergebnis des Experiments wurde in Form mehrerer Filme und Bildtafeln dokumentiert. Die Bildreihen der Bildtafeln erfüllen verschiedene Zwecke: Die als Paare angeordneten Bilder in der oberen Bildreihe der Abbildung 2.8 etwa stellen das höhere Maß an Klarheit heraus, das jene Bilder, die mithilfe des Verfahrens der strukturierten Beleuchtung erzeugt wurden (markiert als »SI«, das bedeutet »structured illumination«), gegenüber jenen Bildern auszeichnet, die mithilfe konventioneller lichtblattmikroskopischer Verfahren produziert wurden (markiert als »LS«, das bedeutet »light-sheet« und bezieht sich auf ein Standardverfahren). Die Bildquartette, die sich über die folgenden zwei Bildreihen erstrecken, zeigen den Embryo aus vier verschiedenen Ansichten zu vier unterschiedlichen Zeitpunkten des Experiments und zwar nach 2,35 Stunden, 3,95 Stunden, 4,80 Stunden und 10,15 Stunden. Die Bilder indizieren die Positionen von Zellen – deren Kerne mit einem fluoreszierenden Protein markiert wurden – über den gesamten Zeitraum des Experiments und mit einem, wie die Forschenden anmerken, für die automatisierte Bildverarbeitung hinreichenden Kontrast. Die vierte Bildzeile zeigt algorithmische Rekonstruktionen der mikroskopisch generierten Datenbilder, das heißt Ansichten des Bildmodells, und zwar zu vier verschiedenen Zeitpunkten. Vermittels von Algorithmen, die die Forschenden eigens für die weitere Bildverarbeitung schrieben, wandelten sie dazu die Intensitätsverteilung des fluoreszierenden Proteins im Inneren

⁸⁴ Siehe Keller et al., »Fast, High-Contrast Imaging«.

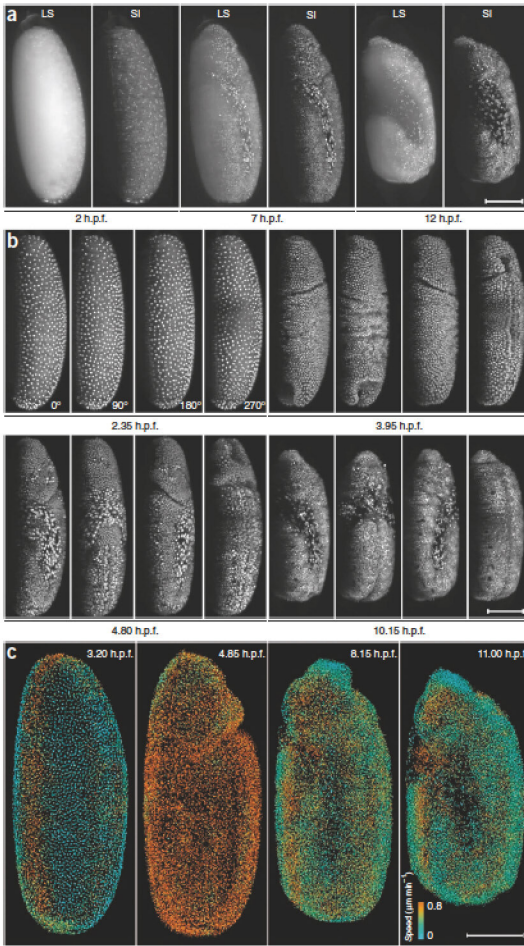


Abb. 2.8: Drei Bildserien, die den Entwicklungsprozess des Embryos der Tauflye visualisieren

Quelle: Philipp J. Keller et al., »Fast, High-Contrast Imaging of Animal Development with Scanned Light Sheet-Based Structured-Illumination Microscopy«, *Nature Methods* 7, Nr. 8 (August 2010), 640, <https://doi.org/10.1038/nmeth.1476>.

der Zellen in eine »digitale Rekonstruktion« (»digital reconstruction«) jeder der vier Ansichten des Embryos um.⁸⁵

Vermittels mehrerer weiterer im Rahmen des Experiments geschriebener Algorithmen richteten die Forschenden die Daten in den vier Ansichten so im virtuellen Raum zueinander aus, dass sie die Informationen zu einem einzigen Datensatz zusammenführen konnten.⁸⁶ Diesen Datensatz nennen sie den digitalen Fliegenembryo, »the digital fly embryo«⁸⁷. Der Datensatz wurde in ein vierdimensionales Bild umgewandelt, das in einem weiteren Bearbeitungsschritt als Bewegtbildmodell gerendert wurde, das den sich entwickelnden Embryo zeigt, der um seine Mittelachse rotiert.⁸⁸

Die Umwandlung von Daten, die mittels von Mikroskopieverfahren generiert wurden, in einen Datensatz, der es erlaubt, aussagekräftige Berechnungen durchzuführen und in der computergestützten Datenanalyse weiterverarbeitet zu werden, wird in der Fachsprache der Biophysik mit dem Begriff der »Rekonstruktion« belegt. Dieser verweist darüber hinaus auf die algorithmengestützte Umwandlung von Messdaten, die am Mikroskop zu einem lebendigen Organismus erhoben wurden, in ein computergeneriertes Modell, das Einsichten in die Entwicklung eben dieses Organismus ermöglicht.

Welches Verständnis des Verhältnisses zwischen Bild und Welt steht hinter dem Begriff der »Rekonstruktion«? Der US-amerikanische Medienwissenschaftler Mark J.P. Wolf hat darauf aufmerksam gemacht, dass es sich bei computergenerierten vierdimensionalen Repräsentationen nicht bloß um Rekonstruktionen von Bildern handelt, sondern vielmehr um Rekon-

85 Siehe ebd., 641.

86 Siehe ebd. Der Datensatz ist abrufbar unter Keller et al., »Fast, High-Contrast Imaging«: Data Set 2: Fused Reconstruction of Early Drosophila Wild-Type Development, <https://doi.org/10.1038/nmeth.1476>, Daten hinterlegt am HHMI/Janelia Research Campus, Digital Embryo, Imaging Development with Structured Illumination, zuletzt geprüft: 17. August 2021, <http://www.digital-embryo.org/>.

87 Keller et al., »Fast, High-Contrast Imaging«, 641.

88 Für das Bewegtbildmodell siehe ebd.: Movie 6: The Drosophila Digital Embryo, <https://doi.org/10.1038/nmeth.1476>, Daten hinterlegt am HHMI/Janelia Research Campus, Digital Embryo, Imaging Development with Structured Illumination, zuletzt geprüft: 17. August 2021, <http://www.digital-embryo.org/>. Das rotierende Modell, das die Ansichten aus allen vier Perspektiven miteinander verbindet, findet sich ganz rechts in der Bildreihe.

struktionen von Systemverhalten.⁸⁹ Rekonstruktionen bezeichnet Wolf als Simulacren, die an die Stelle fotografischer Bilder treten.⁹⁰ Das Verfahren der mathematischen Rekonstruktion beschreibt er als Vereinfachung, Mechanisierung und Neu-Schöpfung der untersuchten Objekte, Ereignisse und Situationen: »most visualizations seek to re-create objects and situations that are thought to have existed or that could exist in the material world«⁹¹. Das Bildmodell des digitalen Embryos rekonstruiert Systemverhalten, indem es den Taufliiegenembryo am Computer als Modell neu erschafft und das Augenmerk auf signifikante Aspekte der Embryonalentwicklung lenkt.

In der Geschichte der Mikroskopie wurde der Rekonstruktionsbegriff bereits um 1850 mit Bezug auf die Zeichnungen verwendet, die räumliche Modelle darstellen, die ausgehend von Schnittserien erzeugt wurden.⁹² In dem Begriff der Rekonstruktion verbirgt sich der Begriff der Konstruktion. Beide Begriffe bringen zum Ausdruck, dass die Forschenden den digitalen Embryo als eine algorithmisch vermittelte Re-Konstruktion der mittels eines optischen Verfahrens erzeugten Bilder von unterschiedlichen Entwicklungsstadien des Fliegenembryos begreifen. Der Ausdruck verdeutlicht, dass es sich bei dem rekonstruierten Computerbild oder Bildmodell um etwas Hergestelltes handelt, das ausgehend von einem realen Fliegenembryo in mehreren aufeinanderfolgenden komplexen Umwandlungsschritten erzeugt wurde.

Die digitalen Embryomodelle der Stelzer-Gruppe brechen über eine Betonung der mehrfachen Umwandlung mit den Darstellungskonventionen der Embryologie, die lange Zeit naturalistischen Konventionen folgte, und setzen sich zudem deutlich von den Darstellungskonventionen der embryonalen Entwicklung im populärwissenschaftlichen Bereich ab. Die seit Mitte der 1960er-Jahre sehr populären Fotografien des menschlichen Fötus, die der schwedische Fotograf Lennart Nilsson (1922–2017) anfertigte, orientieren sich ebenfalls an naturalistischen Darstellungskonventionen. In Nilssons Fotografien ähneln die hinzugefügten Farben und Texturen den Fötus an

89 Siehe Mark J. P. Wolf, »Subjunctive Documentary: Computer Imaging and Simulation«, in *Collecting Visible Evidence*, Hg. Michael Renov und Jane Gaines (Minneapolis: University of Minnesota Press, 1999), 280.

90 Siehe Ebd., 274.

91 Ebd., 281.

92 Siehe Dieter Gerlach, *Geschichte der Mikroskopie* (Frankfurt am Main: Deutsch, 2009), 839.

Darstellungen eines neugeborenen Kindes an (siehe Abb. 2.9).⁹³ Und auch in der Herstellung von Bewegungsbildern des Fötus, die für die Präsentation in der Öffentlichkeit und im Kunstkontext verwendet werden und die ihren Ausgang von Bildern nehmen, die mittels des 4D-Ultraschall-Verfahrens erzeugt und am Computer bearbeitet wurden, ist man um Naturalismus bemüht und arbeitet mit etablierten Farbcodes.

Die Wachsmodelle des Embryos, wie sie der Mediziner Adolf Ziegler (1820–1889) und sein Sohn Friedrich in Freiburg im Breisgau ausgehend von Modellen, die ihnen Anatomen und Embryologen übersandten, anfertigten, wurden in den Dekaden um 1900 in Forschung und Lehre verwendet und erreichten darüber hinaus ein breiteres Publikum. Sie veranschaulichten die einzelnen Entwicklungsstadien des Embryos und zielten auf eine möglichst naturalistische Darstellung ab, wie der britische Wissenschafts- und Medizinhistoriker Nick Hopwood ausführt.⁹⁴ So wurde etwa die Haut der in Wachs modellierten Embryonen gelblich bis zartrosa gefärbt und als leicht durchscheinend dargestellt. Die Zieglerschen Embryomodelle markieren ein weiteres Stadium der bildlichen Darstellung, da sie als skulpturale Formen die räumliche Dimension miteinbeziehen.⁹⁵ Zudem wird in den beweglichen Kompositmodellen Zieglers (siehe Abb. 2.10) bereits die Praktik des Schneidens augenfällig, die in den mikroskopischen Verfahren in Form des optischen Schneidens wieder aufgegriffen wird: Schnitte durch das Modell ermöglichen Einsichten in die feineren Strukturen im Inneren des Embryos.

93 Siehe Lennart Nilsson, *A Child is Born: The Drama of Life before Birth in Unprecedented Photographs. A Practical Guide for the Expectant Mother*, aus dem Schwedischen von Britt und Claes Wirsen und Annabelle MacMillian (New York: Dell, 1966). Nilssons Fotografien erreichten über die Veröffentlichung in der Zeitschrift *Life* am 30. April 1965 ein breites Publikum. Zu dem weiteren kulturellen Bedeutungsfeld der Fotografien Nilssons siehe Barbara Duden, *Der Frauenleib als öffentlicher Ort: Vom Mißbrauch des Begriffs Leben* (Hamburg: Luchterhand, 1991); Solveigh Jühlich, »Lennart Nilsson's *A Child Is Born*: The Many Lives of a Best-Selling Pregnancy Advice Book«, in »Publishing for Public Knowledge«, Hg. Johan Fornäs et al., Thementeil, *Culture Unbound: Journal of Current Cultural Research* 7, Nr. 4 (2015), <https://doi.org/10.3384/cu.2000.1525.1573627>.

94 Siehe Nick Hopwood, *Embryos in Wax: Models from the Ziegler Studio*, mit einem Wiederabdruck von »Embryological Wax Models« von Friedrich Ziegler (Cambridge, England: Whipple Museum of the History of Science: University of Cambridge, 2002).

95 Zu skulpturalen wissenschaftlichen Modellen siehe Soraya de Chadarevian und Nick Hopwood (Hg.), *Models: The Third Dimension of Science* (Stanford: Stanford University Press, 2004).

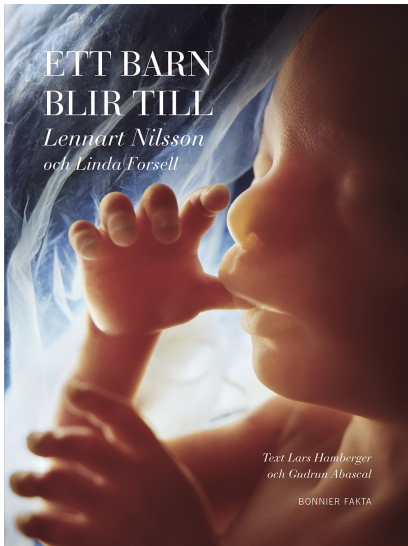


Abb. 2.9: Cover der fünften Schwedischen Ausgabe des Fotobands *Ett Barn Blir Till* von Lennart Nilsson und Linda Forsell

Text von Lars Hamberger und Gudrun Abascal
(Stockholm: Bonnier Fakta, 2018)

Quelle: Lennart Nilsson, »Ett Barn Blir Till«, *Lennart Nilsson Photography 2022*, <http://www.lennartnilsson.com/en/books/>. Mit freundlicher Genehmigung von *Lennart Nilsson Photography*.

Hier deutet sich bereits eine Entwicklung zum »interpretierten Bild«⁹⁶ an, wie Daston und Galison es nennen – oder vielmehr zum interpretierten Bildmodell, da die skulpturale Form hier den Ausschlag gibt –, eine realistische Darstellungsweise, die sich im zwanzigsten Jahrhundert herausbildet und die in wissenschaftlichen Atlanten ab den 1960er-Jahren Prominenz erlangt. Im Unterschied zum Naturalismus abstrahiert diese Darstellungsweise vom Natürlichen. Die Erarbeitung und Lektüre interpretierter Bilder ist auf das fachliche, »geschulte Urteil« (»trained judgment«)⁹⁷, wie Daston und

⁹⁶ Lorraine Daston und Peter Galison, *Objektivität*, aus dem amerikanischen Englisch von Christa Krüger (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2007), 377.

⁹⁷ Siehe Lorraine Daston und Peter Galison, »Trained Judgment«, in *Objectivity*, 309–362 (New York: Zone Books, 2007), 309.

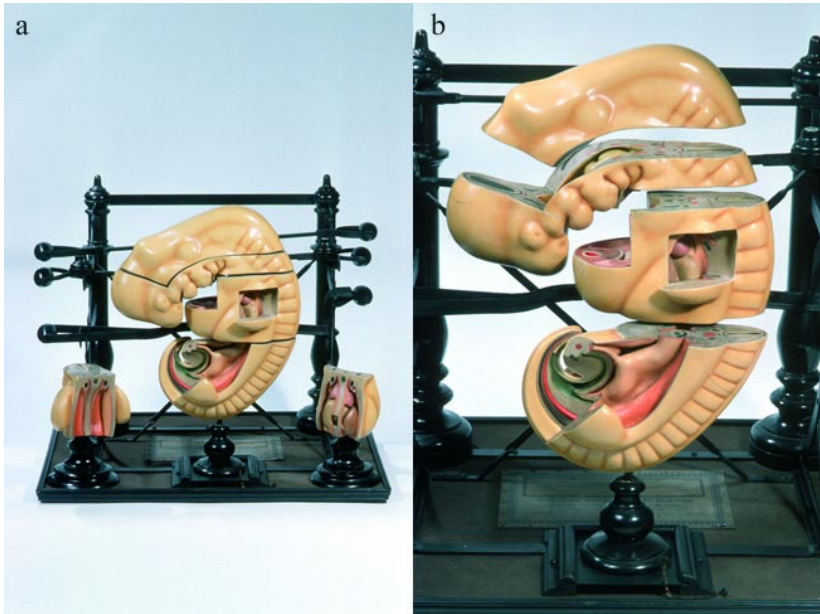


Abb. 2.10: Embryomodelle aus Wachs im Metallgestell, ca. 1902

Das Modell fungierte als Exponat in der virtuellen Ausstellung »Making Visible Embryos« an der Universität Cambridge im Jahr 2008.

Quelle: Tatjana Buklijas and Nick Hopwood, »Remodelling: Publishing in Wax and Print«, *Making Visible Embryos*, zuletzt geprüft: 22. September 2021, stabile URL: http://www.sites.hps.cam.ac.uk/visibleembryos/s5_3.html.

Galison es nennen, angewiesen.⁹⁸ Daston und Galison schreiben: »Auf der Basis des Natürlichen bearbeitet, aber mittels Fachwissen strukturiert, um spezifische Merkmale zu verdeutlichen, verkörpert die Abbildung im zwanzigsten Jahrhundert die Erfahrung von Experten; sie ist eine Bild-Präsentation durch und für das geübte Auge.«⁹⁹ Der Rückbezug auf das natürliche Vorbild, aus dem Fachleute über die Erzeugung weiterführender, abstrahierender Darstellungsformen Muster herausheben, die für Fachleute erkennbar werden, gestaltet sich im Fall des digitalen Embryos allerdings einigermaßen komplex, da hier erst die Zusammenschau einer Reihe von ganz unter-

⁹⁸ Das »geschulte Urteil« als eine interpretierende Sehmodalität und seine Relevanz für die Lektüre der Bilder der gegenwärtigen Zellbiologie diskutiere ich in Kapitel 3.3.1 noch ausführlich.

⁹⁹ Ebd.

schiedlichen Darstellungsformen die relevanten Prozesse anschaulich werden lässt.

Die Praktik des Schneidens, die sich bereits ganz deutlich in den Kompositmodellen Zieglers manifestiert, führt die Arbeitsgruppe Stelzer weiter, allerdings mithilfe eines mikroskopischen Verfahrens, das Photonen in ausgewählten Ebenen des untersuchten Embryos sukzessive aktiviert und ausgehend von den Messungen der Emission von Lichtquanten in diesen Ebenen einzelne Schnittbilder erzeugt. Der Embryo wird dabei optisch zerlegt und als abstraktes, numerisches Bildmodell neu zusammengesetzt. In der Fachsprache ist von »optical sectioning«¹⁰⁰ und von »segmentation and fusion«¹⁰¹ des Embryos die Rede. Ziel ist dabei allerdings nicht die mimetische Nachahmung eines imaginierten Vorbilds, sondern die Mustererkennung und die Quantifizierung früher morphogenetischer Prozesse. Dazu abstrahiert das Team von dem am Lichtmikroskop hergestellten Bildmaterial, indem es die einzelnen Schnittbilder algorithmisch weiterverarbeitet und zu einem vierdimensionalen Bildmodell zusammenfügt.

Der Gruppe geht es in den Experimenten zur embryonalen Entwicklung nicht vorrangig darum, ihre Untersuchungsgegenstände durch Bewegtbildtechniken zu verlebendigen, sondern vielmehr darum, einen lebendigen Embryo in einen Datensatz umzuwandeln, den sie über verschiedene Zwischenschritte in visuelle Darstellungsformen transformiert. Sie unterscheidet sich hierin von den frühen Mikrokinematographen wie etwa dem Schweizer Biologen Julius Ries, die vermittels der filmischen Darstellung ihrer Untersuchungsgegenstände Einsichten in die Entwicklungsprozesse des Embryos gewannen. Ries stellte im Jahr 1907 am Institute Marey in Paris einen Zeitrafferfilm von der Befruchtung und Entwicklung des Seeigels her. Der Film verdichtet eine Aufnahmezeit von vierzehn Stunden auf eine Länge von zwei Minuten und macht auf diese Weise den Prozess der Zellteilung sichtbar.¹⁰² Ähnlich wie andere Mikrokinematografen wie etwa der französische Mikrobiologe Jean Comandon (1877–1970) setzte Ries große Hoffnung in das damals neue Medium Film, um mikroskopische Entwicklungsprozesse visuell zugänglich zu machen.

100 So beispielsweise gleich im Titel von Huiskens et al., »Optical Sectioning«.

101 Keller et al., »Fast, High-Contrast Imaging«: Anhang »Online Methods«, o.S. Die Überschrift »*Drosophila* Segmentation und Fusion« befindet sich auf der dritten der nicht nummerierten Seiten im Anhang des Artikels.

102 Siehe Hannah Landecker, »Microcinematography and the History of Science and Film«, *Isis* 97, Nr. 1 (März 2006): 124, <https://doi.org/10.1086/501105>.

Hinter der Methode von Stelzer, Keller und ihren Teams steht eine ähnliche Motivation, wie sie bereits Ries antrieb, nämlich einen Gegenstand besser untersuchen und seine Gesetzmäßigkeiten erkennen zu können, indem Entwicklungsprozesse, die über die Zeit ablaufen, beobachtet werden. Die filmische Aufzeichnung von Entwicklungsprozessen fungiert bei Stelzer und Keller allerdings als Zwischenschritt in einem Prozess, der auf die Umwandlung der gewonnenen Messdaten in einen prozessierbaren Datensatz abzielt, der seinerseits in ein vierdimensionales rotierendes Bildmodell umgewandelt wird. Im weiteren Verlauf der Datenanalyse hebt der unmittelbare Bildvergleich, also die Zusammenschau von am Mikroskop generierten Filmen und algorithmisch weiterverarbeiteten Bewegungsbildmodellen, signifikante Bewegungsabläufe von Zellclustern hervor.

Bislang ist deutlich geworden, dass das Verhältnis zwischen Bild und Datensatz im Falle des Embryo-Beispiels komplex ist, wie es Rosens Überlegungen zur »digitalen Indexikalität« bereits andeuten. Die medienwissenschaftlichen Überlegungen zur Oberflächenerscheinung und Tiefenstruktur des Bildmodells werden im vorliegenden Fall dadurch verkompliziert, dass das Bildmodell in einem mehrschrittigen Verfahren erzeugt und gestaltet wird, in dem mehrere Datensätze generiert und unterschiedliche Visualisierungsformen miteinander ins Verhältnis gesetzt werden. Gunnings Gedanke, dass das digitale Bild in eine Aussage integriert werden müsse, um Beweiskraft zu erlangen, soll im Folgenden aufgegriffen und mit Überlegungen zur »transversalen Referenz« zusammengeführt werden, wie sie die Science and Technology Studies anstellen.

2.3.2 Indexikalität des computergenerierten Bildmodells: Die Herstellung »transversaler Referenz« als Datenpraktik

Einen ersten Hinweis für die Erörterung des komplexen Referenzverhältnisses zwischen Bildmodell und Gegenstand geben die Überlegungen von Mark J.P. Wolf zur Veränderung der indexikalischen Bezugnahme in den bildgebenden Verfahren gegenüber der filmbasierten Fotografie. Für bildgebende Verfahren generell und ganz besonders für die Computersimulation konstatiert Wolf, dass sich das indexikalische Band zwischen dem Bild und der Realität lockere und verlängere.¹⁰³ Computergenerierte Bilder seien im Ver-

103 Siehe Wolf, »Subjunctive Documentary«, 274.

gleich zur filmbasierten Fotografie »indexically less direct«¹⁰⁴, da sie durch Computertechnik und Programme vermittelt seien, die Speicherung von Informationen in Form von Signalen erfolge und keine fixierten Dokumente angelegt würden. Anders als Darstellungsformen, die indexikalisch eng mit ihren Untersuchungsgegenständen verknüpft seien, ermöglichten Computersimulationen jedoch neues Wissen, »that would otherwise be unattainable within the stricter requirements of indexical linkage that were once needed to validate knowledge empirically«¹⁰⁵.

Der Destabilisierung und Auflösung des indexikalischen Bandes könne Wolf zufolge über die Vergrößerung des Datensatzes entgegengewirkt werden, so dass eine Simulation einen Ausschnitt oder Aspekt der physischen Welt durchaus angemessen repräsentieren könne: »As a simulation is constructed, and the data set becomes larger and more comprehensive, its indexical link to the physical world grows stronger, until the simulation is thought to be sufficiently representative of some portion or aspect of the physical world.«¹⁰⁶

Im Falle des oben beschriebenen digitalen Embryomodells wird der Datensatz allerdings nicht dahingehend vergrößert, dass man etwa mehrere Messreihen parallel aufbaut. Vielmehr ist der Abgleich der errechneten mit den mikroskopisch gewonnenen Datenbildern die Strategie der Wahl, mittels derer der Auflösung des indexikalischen Bandes entgegengewirkt wird. Dem mikroskopisch erzeugten Datenbild und dem ihm zugrundeliegenden Datensatz kommt gleichsam eine Autorisierungsfunktion zu, die den Wirklichkeitsbezug des computergenerierten Bildmodells beglaubigt. Anders gesagt fungiert das indexikalisch über die Messdaten enger mit dem Untersuchungsgegenstand verbundene, vermittels eines lichtblattemikroskopischen Verfahrens generierte Datenbild als Beweis für die Validität des errechneten Bildmodells. Das am Mikroskop erzeugte Bild legt einen der Transformationsschritte der Referenzkette offen. Es fungiert als Zwischenglied und erfüllt zusammen mit den Datensätzen und den detaillierten Beschreibungen der methodischen Vorgehensweise den Anspruch nach der lückenlosen Dokumentation der Zwischenschritte, die Gunning als eine Voraussetzung für die Autorität des digitalen Bildes hervorgehoben hat. Mit Wolf gedacht, stabilisieren die Datenbilder, Datensätze und Ausführungen zur Methode

104 Ebd., 278.

105 Ebd., 274.

106 Ebd., 280.

in den Dokumenten zum digitalen Embryomodelle das indexikalische Band zwischen dem Untersuchungsgegenstand und dem Bildmodell.

Die konstruktivistische Wissenschaftstheorie hat die Konstruiertheit von Wissenschaftsbildern mit dem Begriff der »Transformationskette« genauer bestimmt, die sich in einer Parallelwelt wissenschaftlicher Darstellungen entfaltet. Wissenschaftliche Bilder verweisen seit der Neuzeit stets auf andere wissenschaftliche Bilder und nehmen Bezug auf andere wissenschaftliche Darstellungsformen. Hans-Jörg Rheinberger, der die Forschungsrichtung der historischen Epistemologie im deutschsprachigen Raum etabliert und maßgeblich weitergeführt hat, versteht das Zusammenwirken der verschiedenen Darstellungsformen in der Molekularbiologie im poststrukturalistischen Sinne als ein Spiel der Signifikanten. Er schreibt:

»Die neuzeitliche Errungenschaft eines Weltbildes im Sinne eines Weltgebildes selbst impliziert, daß jede Unmittelbarkeit, jede Möglichkeit von unvermittelter Evidenz immer schon vergeben ist. Der Prozeß des Analogisierens, Modellierens und Realisierens verläuft nicht von der Erscheinung zum Wesen, von der Repräsentation zum Repräsentierten, von der Oberfläche in die Tiefe; er konstituiert sich vielmehr horizontal, als ein laterales Oszillieren zwischen verschiedenen Repräsentationsräumen [...].«¹⁰⁷

Bruno Latour bezeichnet diesen unabschließbaren Verweis von Darstellungsformen auf andere Darstellungsformen als »transversale Referenz«¹⁰⁸ und führt aus:

»Ein isoliertes wissenschaftliches Bild ist bedeutungslos, es beweist nichts, sagt nichts, zeigt nichts, es hat keinen Referenten. Wieso? Weil ein wissenschaftliches Bild [...] ein Satz von Instruktionen ist, *um ein anderes, weiter hinten in der Kette zu erreichen*. Eine Zahlentabelle wird zur [sic] einem Kartennetz führen, das zu einer Fotografie führen wird, die zu einem Absatz führen wird, der zu einer Behauptung führen wird. Die ganze Serie hat eine Bedeutung, doch keines ihrer Elemente irgendeinen Sinn.«¹⁰⁹

Schauen wir uns die einzelnen Handlungsschritte an, die Naturwissenschaftler*innen vollziehen, wenn sie Evidenz erzeugen, so sähen wir

»[n]ichts, und vor allem keinen Referenten außerhalb eines Bildes. Bestenfalls können wir hoffen, daß irgendetwas durch die Serie der Transformationen von Spuren bewahrt wird.

107 Hans-Jörg Rheinberger, »Von der Zelle zum Gen: Repräsentationen der Molekularbiologie«, in *Räume des Wissens: Repräsentation, Codierung, Spur*, Hg. Hans-Jörg Rheinberger, Michael Hagner und Bettina Wahrig-Schmidt (Berlin: Akademie Verlag, 1997), 274, Hervorhebung im Original.

108 Latour, *Berliner Schlüssel*, 185 und 188.

109 Bruno Latour, *Iconoclasm oder Gibt es eine Welt jenseits des Bilderkrieges?*, aus dem Englischen von Gustav Roßler (Berlin: Merve, 2002), 67, Hervorhebung im Original.

Anstelle eines äußeren Referenten haben wir es mit einem *transversalen*, nicht lokalisierbaren inneren Referenten zu tun, der, wenn alles gut geht, durch das Netz der Transformationen zirkuliert, und der unterbrochen wird, wenn die eine oder andere der tausend Operationen, durch die er in Umlauf gehalten wird, nicht glückt.«¹¹⁰

Es bedarf folglich der Zusammenschau unterschiedlicher Darstellungsformen, um ein Phänomen näherungsweise zu erfassen. Empirisch fundierte naturwissenschaftliche Erkenntnis entsteht erst dann, wenn man eine Kette von Bildern in den Blick nimmt. Bei Latour heißt es: »Im Gegensatz zu den herrschenden Vorurteilen rührt die Tiefe der Wissenschaften daher, daß sie uns die Möglichkeit eines direkten, unmittelbaren, brutalen Zugangs zum Referenten für immer entzieht.«¹¹¹ Wissenschaftliche Bilder bestimmt Latour als »Bilder, die in einer Weise gebrochen sind, daß sie zu einem weiteren Bild führen«¹¹². Und die Bilder, die zusammen gesehen werden müssen, und damit auch das Phänomen und der Blick auf das Phänomen verändern sich, wenn Instrumente verbessert oder neue Instrumente entwickelt werden. Das heißt, Phänomene bleiben nicht stabil, sondern verändern sich in Abhängigkeit von den Instrumenten, die zum Zwecke ihrer Untersuchung entwickelt werden.

Für die instrumentell vermittelte Bilderzeugung hat Latour eine enge Verzahnung der verschiedenen Schritte und der einzelnen Untersuchungsverfahren beobachtet, wenn er schreibt: »Kein Instrument ist in sich abgeschlossen. Die Einschreibung des einen wird zur Welt des anderen.«¹¹³ Ein Instrument beginnt seine Arbeit dort, wo die eines anderen geendet hat. So durchlaufen die Einschreibungen einen instrumentell geleiteten, mehrschrittigen Umwandlungsprozess, den Latour als einen »Fluß der Spuren«¹¹⁴ bezeichnet. Er führt aus:

»Keine Darstellung ohne Neu-Darstellung, keine Repräsentation, ohne Re-Repräsentation. Es sind nicht die Inskriptionen, die wir untersuchen, sondern eine Kaskade von Inskriptionen, die sich gegenseitig repräsentieren, resümieren, analysieren und neu kombinieren.«¹¹⁵

110 Latour, *Berliner Schlüssel*, 185, Hervorhebungen im Original.

111 Ebd., 186.

112 Latour, *Iconoclash*, 67–68.

113 Latour, *Berliner Schlüssel*, 172.

114 Ebd., 185 und passim.

115 Ebd. 172.

Dass die Inskription und das Bild im frankophonen wissenschaftlichen Diskurs ganz eng zusammenhängen und mit dem Begriff der Spur aufs Engste verknüpft sind, zeigen Bruno Latours Überlegungen zum transversalen Referenten beispielhaft. Bei Latour heißt es: »Wenn wir der Bewegung des Bildes, der Übertragung der Inskriptionen folgen, können wir auch hier wieder im wörtlichen Sinne seine Spur verfolgen.«¹¹⁶

Diese Einsicht Latours lässt sich an der Anordnung der Bildfolgen, die in dem oben bereits angesprochenen Aufsatz zur Rekonstruktion der Embryonalentwicklung des Zebrafischs abgedruckt sind, sehr gut festmachen (siehe Abb. 2.11). Die einzelnen Visualisierungsformen werden dort gleichrangig nebeneinander angeordnet und in der Zusammenschau mit dem erklärenden Text präsentiert. Ein Phänomen wird nicht in einem einzigen Bild anschaulich, sondern gewinnt vielmehr Kontur im Spiegel einer ganzen Reihe unterschiedlicher Darstellungsformen, die Lesende wechselseitig aufeinander zurückbeziehen.

116 Ebd., 186. Ein ähnlicher Gedanke findet sich in Hans-Jörg Rheinbergers Überlegungen zum Begriff der »epistemischen Dinge« in der Molekularbiologie. Siehe Rheinberger, »Von der Zelle zum Gen«, 274.

formed at 26.5°C [13]) (movie S10). Whereas planes of cell division are evenly distributed (fig. S6b; in contrast to the asymmetry in gas-

trulation [18, 19]), a symmetry break in the spatiotemporal pattern occurs at the 512-cell stage (movie S10 and Fig. 4A). Initially, cell divisions

follow 3-min-long radial waves, originating in the embryonic center. After the 512-cell stage, two circular peripheral waves break this radial symmetry (Fig. 4, A and B, and fig. S8 and movie S10). They occur during division cycles 10 to 13 at an angle that correlates with the future body axis (Fig. 4B).

To investigate whether the break of radial symmetry can also be related to nuclear densities, we determined the nuclear counts in small volumes around the animal pole. This analysis indicates a divergence commencing at 5 hpf, i.e., two hours after the symmetry break in cell division patterns, but still before the morphological signs of shield formation at the onset of convergence (8 hpf) (Fig. 4C). Between 5 and 8 hpf, reduced cell proliferation rates in the future embryonic shield result in lower cell densities dorsally (rather than dorsal compaction) (20, 21) and, thereby, indicate the position of the future body axis.

Thus, by dissecting the three-dimensional pattern of cell divisions in the entire embryo, we reveal an early morphodynamic symmetry break, concomitant with the nuclear localization of β -catenin, that allows an early prediction of the orientation of the body axis, preceding the midblastula transition (22).

A model of hypoblast formation. In addition to enabling the analysis of global quantitative studies, the digital embryos allow us to focus on confined morphogenetic events. We investigated the formation of the hypoblast, the inner cell layer, which gives rise to mesoderm and endoderm. The formation of the hypoblast is known to result from internalization of cells (emboly) of the outer layer (epiblast) during gastrulation and stretching and thinning of cell sheets over the yolk (epiboly) (23). Our data

Fig. 3. Cell tracking and detection of cell divisions in the digital embryo. (A) Microscopy data (right half of embryo: animal view, maximum projection) and digital embryo (left half of embryo) with color-encoded migration directions (see movie S9). Color code: dorsal migration (cyan), ventral migration (green), toward or away from body axis (red or yellow), toward yolk (pink). (B) Dividing cells (red) and their daughter cells (blue). See movie S10 and fig. S6b for complete coverage (1.7 to 6.7 hpf). Yellow, red, and gray overlays indicate progression of the peripheral cell division waves during division cycle 12 (arrows show direction of peripheral waves; $t_0 = 216$ min, see also Fig. 4).

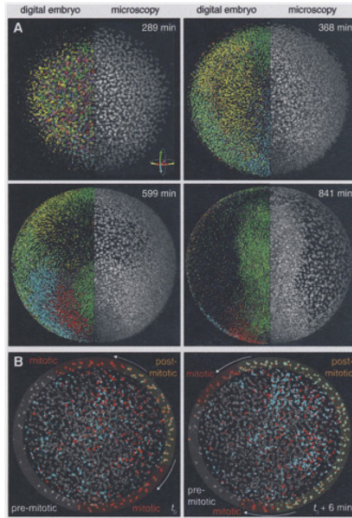
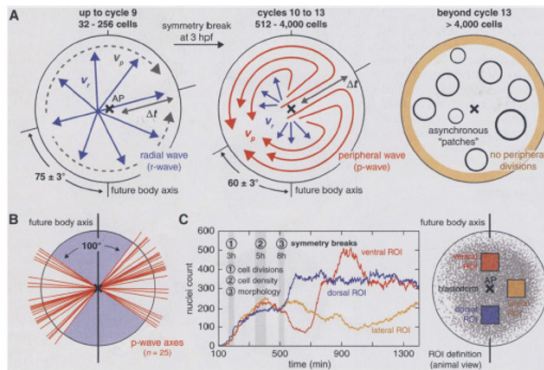


Fig. 4. Symmetry-breaking of the global cell division pattern. (A) Illustration of the cell division patterns during early zebrafish embryogenesis: fast radial waves (cycles 1 to 9, progression speed v_r), slow circular peripheral waves (cycles 10 to 13, progression speed v_p), and asynchronous cell-division patches (cycles 14+). Errors are indicated as SEM. A quantification of the parameters v_r , v_p , and the time shift Δt between radial and peripheral waves is provided in fig. S8. (B) Symmetry axes of 25 peripheral waves (20 slow waves in cycles 10 to 13 and 5 fast waves in cycle 9; $n = 5$ embryos). Of the 25 waves, 92% occurred at an angle of 45 to 90° to the future body axis. (C) Nuclei counts in three 110 by 110 μm^2 domains (future dorsal, ventral, and lateral) reveal the first symmetry break in cell division pattern (3 hpf) precedes the symmetry break in cell densities (5 hpf) and the first morphogenetic symmetry break (onset of convergence, 8 hpf).



RESEARCH ARTICLE

reveal a pronounced "embolic wave" of internalization and regional differences in modes of internalization (Fig. 5 and fig. S9 and movies S14 and S15).

Starting at 5.8 hpf (40% epiboly at 26.5°C) (13) and lasting for 2 hours, ~1550 cells (34% of all cells) internalize around the perimeter of the blastopore to form the mesoderm (Fig. 5

and fig. S9). After this time window, we did not observe any further cells moving from epiblast to hypoblast.

Internalizing cells follow the path of a wave, which stretches inward toward the yolk cell, reaches a peak height of 50 µm before rolling over, touches the deep cells situated closer to the animal pole (Fig. 5, green cell population, and movie S16), and completes epiboly at 7.5 hpf. Whereas cells internalize around the entire perimeter, the wave is most prominent dorsally. The onset of internalization is synchronized along the blastopore (fig. S9, c and d), but the folding-over at the dorsal shield takes 30 min longer than at other locations along the blastopore. As a consequence of this dorsally pronounced emboly, the dorsal leading edge of epiboly lags behind in its vegetal approach (movie S14).

Modes of internalization (24), either involution (synchronously flowing sheets as in amphibian gastrulation) or ingression (cells individually sinking inward), have been subject to intense discussion (25, 26). To determine whether modes of internalization vary regionally, we generated "internalization maps" for the dorsal and ventral hemispheres (fig. S9a). An analysis of time shifts between internalization events around the blastopore reveals that asynchronous internalization and radial intercalation of single cells in the shield region disrupt the internalization pattern on the dorsal hemisphere (fig. S9, b and c; supporting previous single cell-tracking studies (27, 28)). On the ventral hemisphere, however, mesoderm internalization occurs exclusively in a synchronous manner (fig. S9, b and c) reminiscent of involution (24) or an intermediate mechanism termed "synchronized ingression" (23, 29).

In dorso-anterior regions on the animal hemisphere, internalized cells move antiparallel to epiblast cells toward the animal pole for ~100 min (Fig. 5, purple and yellow cell populations; movie S14). In contrast, internalized cells in the ventral hemisphere change direction within 30 min after internalization and migrate toward the vegetal pole (Fig. 5 and movies S15 and S16).

Unlike gastrulation in *Xenopus* (30), a continuous rolling internalization with hypoblast cells moving toward the animal pole does not occur as epiboly proceeds to the vegetal hemisphere (movie S16). Instead, hypoblast cells follow a well-defined leading edge and move parallel to epiblast cells toward the vegetal pole (movie S14, x,z slice).

A comparative reconstruction of the zebrafish *MZep* mutant quantitatively describes its deficiency in forming mesoderm (15, 27): Whereas ~1550 cells internalize via the embolic wave in the wild-type embryo, the *MZep* digital embryo (movies S4 and S5) reveals merely ~60 internalizing cells in the entire embryo during the same time period (movie S6). This visualization shows that the oversized epiblast (15) forms through convergence and absence

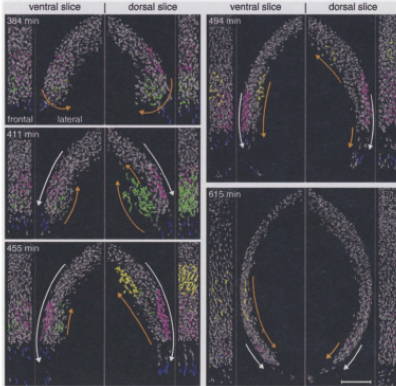


Fig. 5. Mesoderm internalization and migration in dorsal and ventral hemispheres. Frontal and lateral views of slices on dorsal (shield region, right) and ventral hemispheres (opposite of shield, left). Four cell populations were tracked (movie S16): green or yellow nuclei in the early or late embolic wave, blue nuclei at the leading edge of epiboly, and noninternalizing pink nuclei. Orange and white arrows indicate hypoblast and epiblast cell movements. Scale bar, 100 µm.

Fig. 6. A model of mesoderm formation in zebrafish. The hypoblast forms in a single synchronized internalization wave around the entire circumference ("deposition"). On the dorsal side, internalized cells become distributed along the entire future body axis ("stretching"). On the ventral side, the internalized ring of hypoblast cells moves toward the vegetal pole. The ring closes at the vegetal pole ("zipping") and completes the formation of the hypoblast. Orange arrows indicate hypoblast cell movements. Gray arrows indicate epiboly.

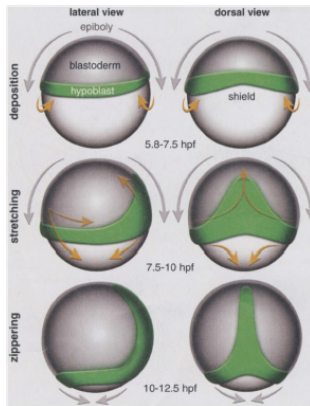


Abb. 2.11: Integration von Bildern in eine Aussage

Quelle: Screenshot einer Doppelseite aus Keller et al., »Reconstruction of Zebrafish Early Embryonic Development«, 1067–1068.

Die Linearität, die im Begriff der Transformationskette anklingt, geht dabei in eine gegenseitige, quasi strukturelle Interdependenz der Darstel-

lungsformen über, wodurch ein vieldimensionales Zusammenspiel unterschiedlicher Repräsentationsformen und -formate entsteht. Den einzelnen Elementen kommt dabei nicht mehr allein die Rolle von Durchgangsstadien zu, vielmehr erhalten sie eine relative Eigenständigkeit innerhalb der Gesamtdarstellung. Darauf weist auch die Gleichrangigkeit in der Abbildung – etwa in Größe und in Farbigkeit – hin, die keine Rangfolge impliziert, sondern vielmehr auf ein konzertiertes Zusammenspiel aufmerksam macht.

Die Kombination mikroskopisch generierter und algorithmisch weiterverarbeiteter Bilder oben auf der linken Seite von Abb. 2.11 (Fig. 3A) etwa veranschaulicht, wie das Tracking unterschiedlicher Zelltypen, die im digitalen Embryomodell farbig markiert wurden, Teilungsmuster in den mikroskopisch generierten Ausgangsbildern hervorhebt. Die rot, gelb und grau markierten Zellen in dem darunter angeordneten Bildpaar (Fig. 3B) zeigen die sich ausbreitenden Teilungswellen, die zu einem Prozess gehören, der in dem Schaubild schematisch vereinfacht und in abstrakter Form verdeutlicht dargestellt wird (Fig. 4A. Ganz besonders deutlich wird das Prinzip der Teilungswelle in der Zeichnung in der Mitte der oberen Bildreihe veranschaulicht.). Das auf der gegenüberliegenden Seite angeordnete, als Modell bezeichnete Schaubild (Fig. 6) veranschaulicht die Herausbildung der Keimblätter und wurde aus dem algorithmengesteuerten Tracking von vier verschiedenen Zelltypen hergeleitet, wie der Bildunterschrift der darüber angeordneten Bildsequenzen (Fig. 5) zu entnehmen ist. Diese Bildsequenzen wurden ihrerseits im Resultat der algorithmengestützten Weiterverarbeitung von am Mikroskop generierten Messdaten erzeugt, einem Umwandlungsprozess, dessen visuelle Ausgangspunkte in der anfangs beschriebenen Bildfolge oben links anschaulich werden. Erst im orchestrierten Zusammenspiel der unterschiedlichen Darstellungsformen werden die Bedeutung von Zellbewegungen und die Herausbildung von Mustern klar erkennbar. Die Anordnung der Bilder und Texte führt konzertiert vor, was Latour meint, wenn er von Transformationsketten, Inskriptionskaskaden und transversaler Referenz spricht. Dass digitale Bilder derart in eine Aussage integriert werden, ist eine Voraussetzung dafür, dass sie als indexikalische Referenten fungieren können.

2.3.3 Wissenschaftstheoretische Problematisierungen des Modellbegriffs

Die genaue Darlegung der einzelnen, für die Erzeugung der Visualisierungen notwendigen Umwandlungsschritte bringt das Verständnis zum Ausdruck, dass der digitale Embryo nicht etwa eine dem Bild vorausgehende natürliche Form abbildet, sondern dass er vielmehr als ein Modell fungiert, das bestimmte Eigenschaften des Embryos heraushebt. Das digitale Embryomodell stellt in idealtypischer, perfektionierter Form jene Entwicklungsprozesse dar, die mittels mikroskopischer Verfahren vermessen und aufgezeichnet wurden.

Der Modellbegriff beschäftigt die Wissenschaftsphilosophie, -geschichte und -forschung seit geraumer Zeit.¹¹⁷ Arbeiten aus den 1990er-Jahren betonen den Praxisaspekt, heben den Gebrauch von Modellen hervor, verweisen auf die Gestaltung und betonen die Eingriffsmöglichkeiten, die die Gestaltung eröffnet.¹¹⁸ In ihrer Einleitung zu dem vielbeachteten Sammelband *Models as Mediators* haben die kanadische Wissenschaftsphilosophin Margaret Morrison und die britische Wirtschaftshistorikerin und -philosophin Mary S. Morgan Modelle als Instrumente bestimmt, die es ermöglichen, die Theorie und die Welt zu untersuchen. Dabei heben sie die Herstellung des Modells und die Interaktion mit demselben heraus, wenn sie schreiben: »We do not learn much from looking at a model – we learn more from building the model and from manipulating it.«¹¹⁹

In der Wissenschaftstheorie besteht große Einigkeit über den zunehmend hohen Stellenwert, der computergestützten Modellierungsverfahren in der naturwissenschaftlichen Forschungspraxis zukommt. Hans-Jörg Rheinberger etwa hat bereits in den frühen 1990er-Jahren auf die Verknüpfung von Modellierpraktiken und Experimentierpraktiken im naturwissenschaftlichen Forschungsprozess hingewiesen.¹²⁰ Naturwissenschaftliche

117 Für einen Überblick der Ansätze aus den genannten Gebieten siehe Martina Merz und Inge Hinterwaldner, »Neue Bilder, Modelle und Simulationen: Zwischen Repräsentativität und Produktivität«, in *Handbuch Wissenschaftssoziologie*, Hg. Sabine Maasen et al. (Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2012), 305–308.

118 Siehe etwa Robert N. Giere, »Visual Models and Scientific Judgment«, in *Picturing Knowledge: Historical and Philosophical Problems Concerning the Use of Art in Science*, Hg. Brian S. Baigrie (Toronto: University of Toronto Press, 1996).

119 Margaret Morrison und Mary S. Morgan. »Models as Mediating Instruments«, in *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*, Hg. Mary S. Morgan und Margaret Morrison (Cambridge, England: Cambridge University Press, 1999), 11–12.

120 Siehe Hans-Jörg Rheinberger, *Experiment. Differenz. Schrift* (Marburg: Basiliken-Press, 1992), 85.

Forschung oszilliere zwischen dem Gebrauch wissenschaftlicher Modelle und der experimentellen Praxis. Diesen Gedanken führen andere Autor*innen in ihren Überlegungen zum Stellenwert von Computersimulationen in der Forschung dahingehend weiter, dass sie Experimente *in situ* von Experimenten *in silico* unterscheiden und hervorheben, dem ›wet lab‹ stehe mit zunehmender Häufigkeit ein ›dry lab‹ zur Seite.¹²¹ Die Wissenschaftsforscherin Martina Merz und die Kunsthistorikerin Inge Hinterwaldner bemerken in einem jüngeren Überblicksartikel zu den Themengebieten ›Bild‹, ›Modell‹ und ›Simulation‹, dass Modelle, Bilder und Computersimulationen in den meisten Untersuchungen getrennt behandelt werden, obwohl diese drei Visualisierungsformen in der naturwissenschaftlichen Praxis häufig zusammen gebraucht werden.¹²²

Für die Zell- und Molekularbiologie stellt sich das Repräsentationsproblem der Modellierung in besonders prononcierter Weise. Denn die Objekte der zell- und molekularbiologischen Forschung – Zellen, Moleküle, Proteine, Genome – entziehen sich aufgrund ihres Maßstabs der technisch unvermittelten menschlichen Wahrnehmung.¹²³ Selbst das hochleistungsmikroskopisch erweiterte menschliche Sehvermögen vermag mithilfe röntgenmikroskopischer Verfahren derzeit maximal im Bereich von 200 Nanometern allenfalls schattenhafte Umrisse einzelner Atome zu erkennen. In der Molekularbiologie ermöglichen es Modelle überhaupt erst, die Forschungsobjekte in den Bereich der sinnlichen Wahrnehmung zu rücken. Éric Francoeur macht klar, dass im Falle von Molekülmodellen das Verhältnis zwischen dem Zeichen und dem Referenten keineswegs als eine Ähnlichkeitsbeziehung gedacht werden könne. Diesen Gedanken formuliert er wie folgt:

121 Siehe etwa Annamaria Carusi, Blanca Rodriguez und Kevin Burrage, »Model Systems in Computational Systems Biology«, in *Computer Simulations and the Changing Face of Scientific Experimentation*, Hg. Juan M. Durán und Eckhart Arnold (Cambridge, England: Cambridge Scholars Publishing, 2013). Der Begriff des ›wet lab‹ bezeichnet das klassische Chemielabor, in dem Experimente mit Chemikalien und lebenden Substanzen durchgeführt werden. Der Begriff des ›dry lab‹ bezieht sich auf Laboratorien, in denen Experimente am Computer mithilfe von Methoden wie der mathematischen Modellierung und der Computersimulation durchgeführt werden.

122 Siehe Merz und Hinterwaldner, »Neue Bilder, Modelle und Simulationen«, 313.

123 Zur erkenntnisleitenden Rolle und politischen Wirksamkeit von Modellen in der Molekularbiologie siehe Soraya de Chadarevian, *Designs for Life: Molecular Biology after World War II* (Cambridge, England: Cambridge University Press, 2002), und dies., »Portrait of a Discovery: Watson, Crick, and the Double Helix«, *Isis* 94, Nr. 1 (März 2003), <https://doi.org/10.1086/376100>.

»From a [...] sociological point of view there is no such thing as comparing a molecular model to the ›real‹ thing, since it is through the model itself, or through other forms of representational work, that a molecular structure becomes coherently visible.«¹²⁴

An anderer Stelle unterstreicht Francoeur diesen Punkt, wenn er schreibt: »[N]o chemist would propose that models, even in their more elaborate forms, are about what molecules ›really‹ look like.«¹²⁵

Damit veranschaulicht Francoeur anhand eines Verweises auf die Chemie, was Michael Lynch bereits einige Jahre zuvor für die Biologie zum Ausdruck gebracht hat:

»Biologists [sic] representations are not transparent windows on an independent reality, since in many fields of biology, visual and other forms of representation are the only way phenomena can become materially witnessable. Researchers cannot directly observe living brain cells, ribosomes, strands of DNA, or bird migration routes without making use of complex procedures for technically visualizing these phenomena as picturable, graphable, mappable, or measurable configurations.«¹²⁶

Lynch betont hier den hohen Stellenwert, der Darstellungsformen und Visualisierungen in der Biologie zukommt. Er macht deutlich, dass Phänomene erst im Zuge ihrer Darstellung in verschiedenen Formen und Formaten zur Anschauung kommen. Ein ähnliches Argument führt die finnische Wissenschaftsphilosophin Tarja Knuuttila zur Begründung ihrer These an, Modelle sollten keineswegs als Repräsentationen begriffen werden, sie stellen keineswegs ›fertiges‹ Wissen aus, sondern eröffneten vielmehr die Möglichkeit, das begrenzte Wissen über die Welt zu erweitern. Knuuttila schreibt: »I suggest that we model the phenomena because we usually do not know enough about those ›systems‹.«¹²⁷ Knuuttila betont, dass die Entwicklung

124 Éric Francoeur, »The Forgotten Tool: The Design and Use of Molecular Models«, *Social Studies of Science* 27, 1 (1997): 12, <https://doi.org/10.1177/030631297027001002>.

125 Ebd. Siehe auch Francoeurs weiterführende Überlegungen zu Homomorphie und Homologie von Modellen, die er in Anlehnung an Peter Galisons Ideen aus *Image and Logic* entwickelt: Éric Francoeur, »Beyond Dematerialization and Inscription: Does the Materiality of Molecular Models Really Matter?«, *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 6, Nr. 1 (2000), <http://www.hyle.org/journal/issues/6/francoe.htm>.

126 Michael Lynch, »Science in the Age of Mechanical Reproduction: Moral and Epistemic Relations Between Diagrams and Photographs«, *Biology and Philosophy* 6, Nr. 2 (1991): 208, <https://doi.org/10.1007/BF02426838>.

127 Tarja Knuuttila, »Models, Representation, and Mediation«, *Philosophy of Science* 72, Nr. 5 (Dezember 2005): 1268, <https://doi.org/10.1086/508124>.

von Darstellungsformen für das, was wir nicht wissen, für sich genommen bereits als Herausforderung begriffen werden müsse.

Die Gruppe um Stelzer konzentrierte sich darauf, einen einzigen Embryo über die Zeit hinweg zu beobachten, da die Strategie des Zusammenfügens von Bildern unterschiedlicher Embryonen ein unbefriedigendes Ergebnis lieferte. Philipp Keller beschreibt das folgendermaßen: »If you stitch together data from different animals, [...] you don't get the same coherent data set that you'd get by looking at one animal and observing it over time.«¹²⁸ Hier zeigt sich eine Haltung gegenüber dem Verhältnis zwischen dem Typischen und dem Besonderen, dem Abstrakten und dem Konkreten. In den Experimenten der Arbeitsgruppe Stelzer enthüllt sich das Idealtypische, das Modellhafte bemerkenswerterweise an einem individuellen Objekt. Dem Einzelfall wird hier Modellcharakter zugeschrieben.¹²⁹

In der Einleitung zu dem Sammelband *Visuelle Modelle*, der Ergebnisse der Arbeitsgruppe »Die Welt als Bild« der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften versammelt, weisen die Kunsthistorikerin Ingeborg Reichle, der Kunsthistoriker Steffen Siegel und der Philosoph Achim Spelten auf den etymologisch engen Zusammenhang zwischen dem Modellbegriff und Vorstellungen eines idealen Maßes hin, dem eine universell gültige Orientierungs- und Vorbildfunktion für sowohl mikrokosmische als auch makrokosmische Vorgänge zukomme. Sie schreiben:

»Der lateinische Ausdruck *modulus*, auf den unser Begriff ›Modell‹ zurückgeht, ist die Verkleinerungsform von *modus*, dem Maß. Die Rede von einem *modulus* diente schon in der Antike nicht allein als Bezeichnung für die ideale Proportion eines Gebäudes; zugleich konnte mit dem *modulus* der Anspruch erhoben werden, ein umfassendes, ja sogar ein

128 Christine Suh, »Movie Magic«, *HHMI Bulletin* (November 2010): 32.

129 Die Beziehung zwischen dem Individuellen und dem Idealtypischen wird in wissenschaftlichen Visualisierungen auf vielfältige Weise verhandelt. Im *Visible Human Project* etwa, einem von der US-amerikanischen National Library of Medicine produzierten digitalen Atlas der Anatomie eines männlichen und eines weiblichen Körpers, werden die Leichname eines spezifischen Mannes und einer spezifischen Frau – und nicht etwa der idealisierte Durchschnitt einer Vielzahl von Körpern – als idealtypische Anschauungsobjekte verwendet. Anders verhält es sich bei dem Portrait des »typischen Mörders« von Francis Galton, das aus zahlreichen Portraits verschiedener Mörder abstrahiert wurde. Zum *Visible Human Project* siehe etwa Lisa Cartwright, »A Cultural Anatomy of the Visible Human Project«, in *The Visible Woman: Imaging Technologies, Gender, and Science*, Hg. Paula Treichler, Lisa Cartwright und Constance Penley (New York: New York University Press, 1998). Zu Francis Galtons Portrait des »typischen Mörders« siehe Lorraine Daston und Peter Galison, »The Image of Objectivity«, in »Seeing Science«, Themenheft, *Representations* 40 (Herbst 1992): 82.

universales Maß zu bezeichnen. Die Symmetrien und Verhältnisse dieses Maßes sollten sowohl für den Kosmos im Großen wie auch im Kleinen, das heißt den Menschen, gelten.«¹³⁰

Die drei Autor*innen heben hervor, dass Modelle als »idealisierte Prototypen oder mustergültige Beispiele«¹³¹ gelten müssten und nicht etwa lediglich als Vorbilder oder Abbilder. Als allgemeingültige Idealtypen erlaubten es naturwissenschaftliche Modelle, Naturgesetze zu veranschaulichen und Einzelphänomene zu bündeln sowie Einsichten zu gewinnen, Definitionen zu formulieren, Regeln aufzustellen, Standards zu etablieren und Theorien zu bilden:

»Die konkrete Form mathematischer oder naturwissenschaftlicher Modelle etwa ist einzig ein Mittel, um allgemeingültige Verhältnisse, Beziehungen oder Strukturen – kurz: um Gesetze greifbar und begreifbar zu machen, die für einen ganzen Anwendungsbereich als bindend gelten. Solche Modelle geben Regeln vor, an denen sich die Vielfalt der Einzelphänomene ausrichten, messen und nicht zuletzt definieren lässt.«¹³²

Auf das visuell-kognitive Erkennen durch darstellend-gestaltendes Hervorheben von Entwicklungsmustern und -prozessen zielt der digitale Embryo als idealtypisches Bildmodell ab. Dieses Ziel erreicht das Bildmodell über die algorithmische Abstraktion – also über Formen der symbolischen Umschrift – von mikroskopischen Bewegtbildern, die sich über einen Datensatz auf den Untersuchungsgegenstand indexikalisch zurückbeziehen. In diesem Abstraktionsprozess – der nicht allein formal-logisch, sondern darüber hinaus auch ästhetisch zu verstehen ist – treten naturalistische und realistische Darstellungskonventionen in den Hintergrund. Die Ähnlichkeitsbeziehung zwischen Untersuchungsgegenstand und Darstellungsform, die ältere embryologische Modelle betonen, tritt hier gegenüber indexikalischen und symbolischen Formen der Referenz ebenfalls zurück. Die Frage, die sich daraus ergibt, lautet, ob, und wenn ja, wie Datenbilder und Bildmodelle nicht allein als Ergebnisse eines algorithmischen Abstraktionsprozesses zu betrachten sind, sondern vielmehr auch einer ästhetischen Betrachtungsweise offenstehen. Dies führt zu der übergeordneten Frage des folgenden zweiten Teilabschnitts, ob überhaupt ein kategorischer Unterschied zwischen einem epistemischen Objekt und einem ästhetischen Objekt existiert,

130 Ingeborg Reichle, Steffen Siegel und Achim Spelten, »Die Wirklichkeit visueller Modelle«, in *Visuelle Modelle*, Hg. dies. (München: Fink, 2008), 9.

131 Ebd.

132 Ebd.

und falls ja, wie sich dieser Unterschied für das wissenschaftliche Bild beschreiben lässt.

Medienästhetik der Mikroskopie:
Theorie und Geschichte der
mikroskopischen Wahrnehmung

Perspektivwechsel

Der erste Teilabschnitt, »Datenpraktiken: Lebendzellmikroskopie als Medientechnik«, zielte darauf ab, die Lebendzellmikroskopie als eine Visualisierungstechnik zu konturieren, die vermöge einer Reihe von Umwandlungsschritten Datenbilder produziert. Der folgende, zweite Teilabschnitt fokussiert auf die Mikroskopie als Wahrnehmungsmethode, die Betrachtende affektiv involviert und über die instrumentell vermittelte Beobachtung einen Erkenntnisgewinn erlaubt. Der Schwerpunkt verlagert sich also im Folgenden von der Medientechnik auf die Medienästhetik. Eine epistemologisch ausgerichtete und historiographisch angelegte Medienästhetik der Mikroskopie zu skizzieren ist hier das Ziel. Die mikroskopische Wahrnehmung in der Geschichte und Gegenwart wird unter historiographischen und epistemologischen Gesichtspunkten analysiert, um weitreichendere Einsichten in die Frage nach der Rolle der Sinneswahrnehmung und der affektiven Involvierung im naturwissenschaftlichen Erkenntnisprozess zu erlangen.

Die Medienepistemologie untersucht, wie technische Instrumente im Gebrauch zu Erkenntnismedien werden. Dazu führt sie genaue, historische und kulturell situierte Analysen jener Effekte durch, die vom Gebrauch eines technischen Instruments sowohl für die Gewinnung von Erkenntnis als auch für die Praxis und Konzeption der Wahrnehmung ausgehen, und erwägt die Konsequenzen, die sich daraus für das Verständnis von Subjektivität und Objektivität ergeben. Medienästhetisch gewendet schließt hier die Frage an, wie Medien nicht allein an der Verfertigung von Wissen beteiligt sind, sondern wie sie im Prozess der Erkenntnisgewinnung die sinnliche Wahrnehmung grundlegend umgestalten. Die Medienästhetik wird im Kontext des vorliegenden Buches als ein Ansatz verstanden, der sich auf die Erforschung des Verhältnisses zwischen Medientechniken, Sinneswahrnehmungen und Affekten richtet. In der hier vorgeschlagenen

medienepistemologischen Ausrichtung von Medienästhetik werden sowohl technische Instrumente als auch Sinneswahrnehmungen und Affekte zu Medien der Erkenntnis.

Richtungsweisend ist dabei der ästhetische Ansatz aus der ästhetischen Theorie, der die philosophische Disziplin der Ästhetik über das Schöne und die Kunstbetrachtung hinaus erweiterte¹ und die Sinneswahrnehmung als eine psycho-physiologische Praxis in den Mittelpunkt rückte.² Diesen wahrnehmungszentrierten Ansatz hat die film- und medienwissenschaftliche Forschung zur Synästhesie und zur Inter- und Multimodalität der Wahrnehmung³ – eine Forschungsrichtung, die ihre Inspiration maßgeblich aus der Filmphänomenologie⁴ bezieht und die in die Debatte um Wahrnehmungspolitiken interveniert⁵ – vor rund zwanzig Jahren aufgegriffen und kontinuierlich weiterverfolgt. Ich beziehe mich hier explizit auf diese Forschungsrichtung und schlage damit einen anderen Weg ein als etwa jenen, den das Auftaktgespräch des Themenhefts zur Medienästhetik der *Zeitschrift für Medienwissenschaft* anbietet.⁶ Die dort vorgestellten Überlegungen schlie-

1 Karlheinz Barck hat diesen ästhetischen Ansatz in seiner Kontinuität und seinen Verästelungen dargestellt und in den Kontext der Forschungsrichtung der Ästhetik eingeordnet. Siehe Karlheinz Barck, Jörg Heiningner und Dieter Kliche, »Ästhetik/ästhetisch«, in *Ästhetische Grundbegriffe*, Studienausgabe, Band 1, Hg. Karlheinz Barck et al. (Stuttgart: J. B. Metzler, 2010), 389–399.

2 Dieter Kliche hat die Bezüge der exakten Wissenschaften wie der Physiologie und der Psychologie zur Ästhetik im letzten Drittel des neunzehnten Jahrhunderts und in den ersten beiden Dekaden des zwanzigsten Jahrhunderts herausgearbeitet. Siehe ebd., 374–380.

3 Siehe etwa Laura U. Marks, *The Skin of the Film: Intercultural Cinema, Embodiment, and the Senses* (Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2000); dies. *Touch: Sensuous Theory and Multisensory Media* (Minneapolis und London: Minnesota University Press, 2002); Jennifer Barker, *The Tactile Eye: Touch and the Cinematic Experience* (Berkeley: University of California Press, 2009); Robin Curtis, Marc Glöde und Gertrud Koch (Hg.), *Synästhesie-Effekte: Zur Intermodalität der ästhetischen Wahrnehmung* (München: Fink, 2010); Klaus Sachs-Hombach et al., »Perspektiven: Medienwissenschaftliche Multimodalitätsforschung«, *Medienwissenschaft* 1 (2018).

4 Siehe die wegweisenden filmphänomenologischen Publikationen von Vivian Sobchack, *The Address of the Eye: A Phenomenology of Film Experience* (Princeton: Princeton University Press, 1992) und dies. *Carnal Thoughts: Embodiment and Moving Image Culture* (Berkeley und Los Angeles: University of California Press, 2004). Für eine jüngere Auseinandersetzung mit Sobchacks Ansatz siehe Christian Ferencz-Flatz und Julian Hanich (Hg.), »Film and Phenomenology«, *Studia Phaenomenologica*, Band XVI (2016).

5 Siehe etwa Bettina Papenburg und Marta Zarzycka (Hg.), *Carnal Aesthetics: Transgressive Imagery and Feminist Politics* (London: I. B. Tauris, 2013); Marta Zarzycka und Bettina Papenburg (Hg.), »Motion Pictures: Politics of Perception«, Themenheft, *Discourse: Journal for Theoretical Studies in Media and Culture* 35, Nr. 2 (Frühling 2014).

6 Siehe Erich Hörl und Luciana Parisi, »Was heißt Medienästhetik? Ein Gespräch über algorithmische Ästhetik, automatisches Denken und die postkybernetische Logik der Komputation«,

ßen an die Kybernetik an, verabschieden sich vom menschlichen Subjekt und verkürzen die Ästhetik auf Algorithmen. Wenngleich die im Folgenden entwickelten Überlegungen auch Spielarten der apparativen Wahrnehmung berücksichtigen, so bleibt doch das Subjekt als wahrnehmende*r Akteur*in zentral.

Wesentlich für meine Argumentation ist die Überzeugung, dass Affekte, Sinneswahrnehmungen und geistige Prozesse als unauflösbar miteinander verweben angesehen werden müssen. Hier folge ich – wenn man auf den Diskurs zur Ästhetik, wie er in der deutschen Philosophie in den 1990er-Jahren geführt wurde, zurückgehen will, ein Diskurs, der auf die vermehrte Verwendung des Computers in der Kunst und Architektur antwortete und der in gegenwärtigen Überlegungen zur Medienästhetik aktualisiert und rückblickend bewertet wird⁷ – eher Wolfgang Welsch als Martin Seel. Während Seel auf der Trennung zwischen sinnlicher Wahrnehmung und ästhetischer Wahrnehmung insistiert,⁸ beharrt Welsch mit Recht auf

in »Medienästhetik«, Themenheft, *Zeitschrift für Medienwissenschaft* 8 (2013). <https://doi.org/10.25969/mediarep/696>. Siehe auch Luciana Parisi, »Technoecologies of Sensation«, in *Deleuze | Guattari & Ecology*, Hg. Bernd Herzogenrath (Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2009).

⁷ Siehe etwa Jens Schröter, »Medienästhetik, Simulation und ›Neue Medien‹«, in »Medienästhetik«, Themenheft, *Zeitschrift für Medienwissenschaft* 8 (2013), <https://doi.org/10.25969/mediarep/702>. Schröter beurteilt die philosophische Debatte zur Ästhetik neuer Medien ausgehend von der Auseinandersetzung mit der Computersimulation, jener Praxis, die ihm zufolge diese Debatte zu allererst eingeleitet hat. Als Ausgangspunkte der Debatte nennt Schröter den von Florian Rötzer herausgegebenen Sammelband *Digitaler Schein: Ästhetik der elektronischen Medien* (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1991) sowie die beiden Monographien von Norbert Bolz, *Theorie der neuen Medien und Eine kurze Geschichte des Scheins* (beide München: Fink, 1990 und 1991).

Die norwegische Medienwissenschaftlerin Liv Hausken geht in ihren breit angelegten, auf die Sinneswahrnehmung ausgerichteten Überlegungen zur Medienästhetik von den Veränderungen aus, die sich aus der massenhaften Verbreitung digitaler Medientechnologien ergeben. Allerdings erweitert sie den Fokus auf die Alltagswahrnehmung und berücksichtigt neben künstlerischen Praktiken auch die kulturellen und sozialen Auswirkungen der Digitalisierung. Siehe Liv Hausken, »Introduction«, in *Thinking Media Aesthetics: Media Studies, Film Studies and the Arts*, Hg. dies. (Berlin: Peter Lang, 2013), 29. Schröter hingegen besteht im Anschluss an Martin Seel auf der Unterscheidung zwischen ästhetischer Wahrnehmung und Alltagswahrnehmung, ohne allerdings einen »modernistischen« Begriff von Medienreflexion« fortschreiben zu wollen. Schröter, »Medienästhetik«, 91.

⁸ Siehe Martin Seel, »Zur ästhetischen Praxis der Kunst«, *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* 41, Nr. 1 (1993). Dort heißt es: »Es ist sinnlos, die ästhetische Praxis der Kunst in einem methodischen oder normativen Sinn zum Modell ästhetischer Praxis im allgemeinen zu erheben [...]«, 31, Hervorhebung im Original. Siehe auch ders., »Ästhetik und Aisthetik: Über einige Besonderheiten ästhetischer Wahrnehmung«, in *Bild und Reflexion: Paradigmen und Perspektiven gegenwärtiger Ästhetik*, Hg. Birgit Recki und Lambert Wiesing (München: Fink, 1997).

der unauflösbaren Verbindung zwischen Wahrnehmung und Denken.⁹ Wichtig für meine Argumentation ist allerdings die von Seel getroffene Unterscheidung zwischen pragmatischer Wahrnehmung und ästhetischer Wahrnehmung. Ästhetische Wahrnehmung zeichnet sich, Seel zufolge, durch ihre Selbstbezüglichkeit aus, das heißt dadurch, dass sie im Vollzug reflexiv als Wahrnehmung erfahrbar wird. Seel schreibt: »Ästhetische Wahrnehmungen sind erstens *vollzugsorientierte* und zweitens in einem bestimmten Sinn *selbstbezügliche* Formen sinnlichen oder sinnengeleiteten Vernehmens.«¹⁰ Die Unterscheidung zwischen pragmatischer Wahrnehmung und ästhetischer Wahrnehmung wird noch wichtig werden, wenn ich im fünften Kapitel die Selbstbezüglichkeit der Beobachtung diskutiere und die methodische Frage nach der Betrachtung epistemischer Objekte – Forschungsfilme, die lebendige Materie präsentieren – als ästhetische Objekte adressiere.

Bewusste, pragmatische und ästhetische Wahrnehmungsakte und reflexive, kognitive Prozesse werden von nicht-bewussten, unterschwelligem Affekten begleitet und bisweilen gelenkt. Folglich wirken Affekte hinein in die Wahrnehmung und Deutung der Untersuchungsobjekte in den Naturwissenschaften, ganz besonders dann, wenn es sich um lebendige Objekte handelt und der Zugang zu ihnen über Bewegtbilder erfolgt, wie dies bei Lebendzellularfilmen der Fall ist.

Den Ausgangspunkt für meine Überlegungen zur ästhetischen Erfahrung des Lebendzellularfilms bildet der Affektbegriff des niederländischen Philosophen Baruch de Spinoza (1632–1677). Spinoza, der einen monistischen Ansatz vertritt, fasst den Affekt als die Steigerung oder Herabminderung der Handlungsfähigkeit des Körpers, wobei er die unauflösbare Verbindung zwischen körperlichem und geistigem Vermögen betont. Die Verwendung von Spinozas Affektbegriff in der gegenwärtigen psychologischen und

9 Siehe etwa Wolfgang Welsch, *Aisthesis: Grundzüge und Perspektiven der aristotelischen Sinneslehre* (Stuttgart, Klett-Cotta, 1987); ders., »Erweiterungen der Ästhetik. Eine Replik«, in *Bild und Reflexion: Paradigmen und Perspektiven gegenwärtiger Ästhetik*, Hg. Birgit Recki und Lambert Wiesing (München: Fink, 1997); ders., *Ästhetisches Denken* [1990], 5. Auflage (Stuttgart: Reclam, 1998). Hier heißt es: »Aisthesis« ist ja ein doppeldeutiger Ausdruck, kann Empfindung oder Wahrnehmung, Gefühl oder Erkenntnis, *sensation* oder *perception* meinen. Und während die Ästhetik in ihrer traditionellen Ausformung meist doch wieder nur den kognitiven Pol betont, bezieht sich Anästhetik, wie ich sie hier in die ästhetische Diskussion einführen möchte, primär auf die Empfindung.« Ebd., 13.

10 Seel, »Ästhetik und Aisthetik«, 28, Hervorhebung im Original.

medienwissenschaftlichen Affekttheorie ist für meine Überlegungen wegweisend. Ganz besonders die dort vorgeschlagene Definition des Affekts als Empfinden und Erleben der körperlichen Verbundenheit mit anderen Menschen¹¹ und – was in dem hier untersuchten Zusammenhang noch entscheidender ist – mit der lebendigen Materie wird für die im Folgenden entwickelte Argumentation ausschlaggebend sein. Diesen Ansatz kombiniere ich mit der aktuellen Neubewertung der psychologischen Forschung zur Einfühlungsästhetik aus den 1900er-Jahren, wie sie seit den 1990er-Jahren in der Medienwissenschaft vorgenommen wird. Die beiden Ansätze präsentiere ich zu Beginn des fünften Kapitels. Dort beziehe ich Position zu den Ansätzen, biete eine Kombination von ausgewählten Schlüsselbegriffen und wegweisenden Einsichten aus den genannten Gebieten an und zeige, wie diese Kombination den dort behandelten Gegenstand – die Wahrnehmung des Lebendzellularfilms – gewinnbringend erschließen kann. Hier sei bereits gesagt, dass beide Ansätze als Katalysatoren für eine Neuausrichtung der Ästhetik gelten können, die sich vermehrt auf die somatisch-perzeptiven Dimensionen der Erfahrung von jenen Bildern richtet, die vermittels optischer Instrumente und algorithmischer Verfahren hergestellt werden.

Damit ist das Ziel dieses Teilabschnitts abgesteckt. Er beabsichtigt, eine ästhetisch orientierte Medienepistemologie in Grundzügen zu umreißen, wobei ›das Ästhetische‹ hier primär als das sinnlich Wahrgenommene verstanden wird, das weder von den Sensationen (den Affekten), die unterhalb der Wahrnehmungsschwelle ablaufen, noch von den mentalen Prozessen (den Kognitionen), die bewusst und reflexiv vollzogen werden, abgelöst werden kann. ›Das Epistemologische‹ ergibt sich aus dem Kontext und bezieht sich auf jene Erkenntnisse, die vermittels der epistemischen Objekte gewonnen werden, also der Lebendzellularfilme, das heißt, mithilfe eines komplexen technischen Instrumentariums hergestellte Visualisierungen innerzellulärer Dynamik, die in der zellbiologischen Forschung zu Erkenntnismedien werden.

11 Die Affektübertragung hat die in Australien geborene US-amerikanische Psychologin Teresa Brennan herausgehoben. Brennan schreibt: »The origin of transmitted affects is social in that these affects do not only arise within a particular person but also come from without. They come via an interaction with other people and an environment. But they have a physiological impact.« Teresa Brennan, *The Transmission of Affect* (Ithaca, New York und London, England: Cornell University Press, 2004), 3. Siehe auch Gregory J. Seigworth und Melissa Gregg, »An Inventory of Shimmers«, in *The Affect Theory Reader*, Hg. Melissa Gregg und Gregory J. Seigworth (Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2010), 1.

Eine richtungsweisende medienwissenschaftliche Position, die ästhetische und epistemologische Fragestellungen in ihrer Bezogenheit aufeinander erörtert – wenn auch ohne die Begriffe »Medienästhetik« und »Medienepistemologie« zu verwenden – und dabei die Veränderung der Wahrnehmung durch die Instrumente der Naturwissenschaften in ihrem wissenschaftshistorischen Kontext reflektiert, vertritt Joseph Vogl in seinem programmatischen Aufsatz zum »Medien-Werden« aus dem Jahr 2001.¹² Eine programmatische Funktion erfüllte der Aufsatz insofern, als Vogl dort grundlegende theoretisch-methodische Überlegungen für ein medienhistoriographisches Forschungsprogramm präsentiert.¹³ Die vier Thesen, die Vogl in dem Aufsatz vorstellt und untermauert, wurden in der deutschsprachigen Medienwissenschaft vornehmlich als *medienepistemologische* Thesen rezipiert, und zwar in Forschungsarbeiten, die auf eine Bestimmung des Verhältnisses zwischen Medien und Wissen abzielen und die Rolle von Praktiken der Sichtbarmachung in der naturwissenschaftlichen Forschung erörtern.¹⁴ Neben der medienepistemologischen Rezeption existiert auch eine erste kursorische *medienästhetische* Rezeption von Vogls Text, und zwar in jenem Teilgebiet der Medienwissenschaft, das die mediale Bedingtheit von

12 Siehe Joseph Vogl, »Medien-Werden: Galileis Fernrohr«, in *Mediale Historiographien*, Hg. Lorenz Engell und ders. (Weimar: Universitäts-Verlag, 2001). In englischer Übersetzung erschien der Aufsatz sechs Jahre später im Kontext eines Themenhefts zur »New German Media Theory« der am MIT publizierten Fachzeitschrift *Grey Room*, die auf die kritische Reflexion aktueller Debatten zur Ästhetik abzielt. Siehe Joseph Vogl, »Becoming Media: Galilei's Telescope«, aus dem Deutschen übersetzt von Brian Hanrahan, in »New German Media Theory«, Hg. Eva Horn, Themenheft, *Grey Room* 29 (Herbst 2007), <https://doi.org/10.1162/grey.2007.1.29.14>.

13 Das Forschungsprogramm wurde am Graduiertenkolleg »Mediale Historiographien« an der Bauhaus-Universität Weimar (2005–2013) realisiert, an dessen Konzeption Vogl mitwirkte.

14 Für eine medienwissenschaftliche Untersuchung der Mikrofotografie mittels Vogls Thesen siehe Sebastian Scholz, »Bilderwelten, welche im Kleinsten wohnen: Vom Medien-Werden der Mikrofotografie zwischen Sichtbarem und Unsichtbarem«, in *Medialisierungen des Unsichtbaren um 1900*, Hg. Susanne Scholz und Julika Griem (Paderborn: Brill, 2010). Zur Relevanz von Vogls Thesen für eine medienwissenschaftliche Perspektive auf die gegenwärtige Astrophysik siehe Lina Maria Stahl, »Horizonte der Sichtbarkeit: Astronomische Apparate als Medien der Sichtbarmachung«, in »Objektkulturen der Sichtbarmachung: Instrumente und Praktiken«, Reihe: Junges Forum für Sammlungs- und Objektforschung, Band II, Hg. Gesellschaft für Universitätssammlungen, Online-Veröffentlichung, edoc-Server der Humboldt-Universität zu Berlin, 2018, <https://doi.org/10.18452/19743>. Für ein Beispiel, das den Impuls Vogls für die gegenwärtige medienwissenschaftliche Erforschung der Visualisierungstechniken in der Ozeanografie fruchtbar macht, siehe Sebastian Vehlken, »The Great Pacific Garbage Catch: Müll als Medium einer »Plastic Oceanography««, in »Zirkulation«, Themenheft, *Zeitschrift für Medienwissenschaft* 23 (2020), <https://doi.org/10.25969/mediarep/14836>.

Wahrnehmungsprozessen wie dem Sehen und dem Hören zu bestimmen sucht.¹⁵

Wichtig für eine medienästhetische Betrachtung von Vogls Text ist es zu betonen, dass Vogl nicht allein auf die Relevanz der Vermittlungsleistung von optischen Instrumenten für den Erkenntnisgewinn aufmerksam macht. Vielmehr hebt er die tiefgreifende Transformation der Wahrnehmung und des Selbstverständnisses des Beobachters heraus, die der Instrumentengebrauch in den Naturwissenschaften der Frühen Neuzeit herbeiführte. Die aus dem Instrumentengebrauch resultierende Verschränkung von Wissensverfertigung und Wahrnehmungsveränderung belegt Vogl mit dem Begriff des »Medien-Werdens«. Am Beispiel von Galileo Galileis Gebrauch des Fernrohrs um 1610 reflektiert Vogl die weitreichenden Auswirkungen, die der Instrumentengebrauch in der naturwissenschaftlichen Praxis auf die Konzeption des Sehens, auf das Selbstverständnis des Beobachters und auf das Verhältnis zwischen dem Sichtbaren und dem Unsichtbaren hatte. Das Fernrohr, so formuliert es Vogl in seinen drei Kernthesen zum Medien-Werden, wurde in Galileis Gebrauch von einem Instrument zu einem Medium durch eine *Denaturierung der Sinne*, durch die *Etablierung einer grundlegenden Selbstreferenz der Beobachtung* und durch die *Erzeugung eines anästhetischen Feldes*, welches die Demarkationslinie zwischen dem Sichtbaren und dem Unsichtbaren verschob. Ehemals neue Medientechniken wie die optische Teleskopie in der Frühen Neuzeit, so macht Vogl deutlich, veränderten existierende Konzeptionen der Sinneswahrnehmung grundlegend, konfigurierten die Beziehung zwischen dem Forschenden und dem Untersuchungsgegenstand prinzipiell neu und verschoben die Grenze zwischen dem Wahrnehmbaren und dem Nicht-Wahrnehmbaren maßgeblich.

Der vielfältig dimensionierte Begriff des Medien-Werdens, wie Vogl ihn vorschlägt, ist insofern für die im Folgenden entwickelten Überlegungen zentral, weil er einen explizit *medienwissenschaftlichen* Zugang zu Fragen der instrumentenbasierten Wissenserzeugung in den Naturwissenschaften eröffnet und in diesem Zusammenhang die Relevanz der Wahrnehmung und die Selbstbezüglichkeit der Beobachtung heraushebt. Methodisch-analytisch beispielgebend ist Vogls Ansatz nicht zuletzt deswegen, weil er *erstens* verschiedene Diskursebenen innerhalb der Naturwissenschaften berücksichtigt – er zeigt den Austausch von Leitideen zwischen so unter-

15 Siehe etwa Beate Ochsner und Robert Stock, »Vorwort«, in *senseAbility: Mediale Praktiken des Sehens und Hörens*, Hg. dies. (Bielefeld: Transcript, 2016), 9.

schiedlichen Disziplinen wie der Astronomie und der Mathematik auf. Weil er *zweitens* die schriftlichen und bildlichen Zeugnisse des Beobachters – Galileo Galilei in diesem Fall – berücksichtigt, in denen dieser seine eigene Beobachtungspraxis und Beobachterposition reflektiert. Und weil er *drittens* von der Praxis ausgeht – vom Instrumentengebrauch – und aufweist, wie die Praxis Theorien materialisiert und zugleich auf theoretische Überlegungen zurückwirkt.

In den folgenden drei Kapiteln soll ein medienepistemologischer Zugang mit einer medienästhetischen Perspektive kombiniert werden, um das Medien-Werden des Mikroskops genauer zu untersuchen. Den Ausgangspunkt für die Untersuchung der Prozesse und Praktiken, die das Medien-Werden des Mikroskops bedingten und weiterhin bedingen, bilden die ersten beiden Thesen Vogls.¹⁶ Die Thesen zur ersten und zweiten Medienfunktion, die Vogl hinsichtlich der Veränderung naturwissenschaftlicher und philosophischer Theorien über die Sinneswahrnehmung und bezüglich der Wahrnehmungspraxis im Kontext naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung formuliert hat, sollen im Folgenden aufgegriffen und neu ausgerichtet werden. Die übergreifenden Ziele dieser Neuausrichtung sind, *erstens*, zu verstehen, wie der Gebrauch des Mikroskops an der Veränderung der Praxis und Konzeption des Sehens von der Frühen Neuzeit bis in die Gegenwart mitwirkte und welche Transformationen die Vorstellung über das Verhältnis von Sehen und Erkennen im Resultat dieser Veränderungen durchlief (Kapitel drei), *zweitens*, die affektiven Register und ästhetischen Kategorien herauszuarbeiten, mit denen die Mikroskopie in diesem Zeitraum in Verbindung gebracht wurde (Kapitel vier), und, *drittens*, zu beschreiben, welche Formen des Selbstbezugs des naturwissenschaftlichen Beobachters die sich über die Jahrhunderte wandelnde Mikroskopie zu etablieren verhalf (Kapitel fünf).

16 Im Folgenden werden die erste und die zweite Medienfunktion, die Vogl nennt, mit Blick auf das Medien-Werden des Mikroskops eingehend behandelt, da die Erörterung dieser beiden Medienfunktionen einen reicheren Ertrag bezüglich der Frage nach dem Verhältnis zwischen Affekt und Erkenntnis in der Medienkultur der Zellbiologie verspricht, als es die Auseinandersetzung mit der dritten Medienfunktion verheißt. Die dritte These Vogls zur Erzeugung eines anästhetischen Feldes wird in den hier entwickelten Überlegungen zunächst einmal zurückgestellt, da sie sich eher tangential zu den Zielen dieses Buches verhält. Die vierte These Vogls klang bereits im eingangs zitierten Medienbegriff an, den Vogl im Rahmen seiner Überlegungen zum Mediendispositiv im Aufsatz »Medien-Werden« wieder aufgreift. Siehe Fußnote 3 in der Einleitung.

Um diese Ziele zu erreichen, orientieren sich die nachfolgenden Überlegungen an drei Leitfragen: Wie veränderte sich das mikroskopische Sehen in der Mikrofotografie im letzten Drittel des neunzehnten Jahrhunderts gegenüber der Frühen Neuzeit und welche weiteren Transformationen durchlief das mikroskopische Sehen in der Lebendzellmikroskopie seit ungefähr 1980? In welcher Weise beziehen sich die gegenwärtigen verbalen und visuellen Strategien zur Akzentuierung der affektiven Wirkung mikroskopischer Bilder auf ältere Diskurse zurück? Wie etabliert die affektive Involvierung in Relation zu der intentionalen Wahrnehmung und der rationalen Erkenntnis eine grundlegende Selbstreferenz der Beobachtung in der gegenwärtigen Lebendzellmikroskopie?

Im Zuge der Untersuchung des Medien-Werdens des Mikroskops werden die bei Vogl eher allgemein gehaltenen Thesen zu den ersten beiden Medienfunktionen – namentlich die Denaturierung der Sinne und die Selbstreferenz der Beobachtung – für die Mikroskopie neu gefasst und zugespitzt. Das Mikroskop wird zu einem Medium, so die in den folgenden Kapiteln vertretenen Thesen, durch, *erstens*, die Umwandlung des Sehens von einem Akt der Beobachtung in einen Akt der Interpretation und durch, *zweitens*, die affektive Involvierung der Beobachtenden, die über die Begegnung mit Visualisierungen innerzellulärer und molekularer Bewegung reflexiv ihrer eigenen Lebendigkeit und somit zugleich ihrer eigenen Sterblichkeit gewahr werden.

Das Medien-Werden des Mikroskops, so wird im dritten Kapitel argumentiert, vollzieht sich über eine Denaturierung des Sehens, ein Prozess, der im zwanzigsten Jahrhundert zu einer Sehmodalität führte, die ich mit dem Begriff des ›Daten-Sehens‹ bezeichne. Dieser Begriff verweist auf eine Kombination aus Visualisierungs-, Wahrnehmungs- und Erkenntnisleistungen, die maschinelle und menschliche Akteur*innen gemeinschaftlich erbringen: Das Mikroskop-System erzeugt Messdaten und setzt die Messdaten in Bilder um, deren Bedeutung allerdings erst die beteiligten menschlichen Akteur*innen zu erschließen vermögen. Das ›Daten-Sehen‹ integriert die automatisierte Datenerhebung durch die Apparate und die Interpretationsleistung der Forschenden. Dabei greifen extrasensorische und versinnlichende Formen der Bilderzeugung und Bildinterpretation ineinander. Die durch Technikeinsatz ermöglichte Ausweitung der Wahrnehmung reinstituuiert das Sehen als eine computergestützte – allerdings nicht von Computern erbrachte – Sinnesaktivität, die auf die Vermittlungsleistung des Bildschirms angewiesen ist und zur Voraussetzung für die Interpretationsleis-

tung der menschlichen Akteur*innen wird. Die computergestützte Bildgebung delegiert die Mess-, Aufzeichnungs- und Visualisierungsarbeit an die Apparate und setzt das menschliche Sehen frei für die Konzentration auf die Interpretation. Die Modalität des Daten-Sehens wird anhand einer Kontrastierung mit zwei ausgewählten früheren Modalitäten des mikroskopischen Sehens konturiert, namentlich der Erweiterung des menschlichen Sehens vermittels optischer Techniken wie dem ersten zusammengesetzten Mikroskop bei dem englischen Universalgelehrten Robert Hooke (1635–1703) in den 1660er-Jahren und der Übernahme der Sehfunktion durch die mikrofotografische Apparatur bei dem deutschen Mikrobiologen Robert Koch (1843–1910) ungefähr zweihundert Jahre später.

Das dritte Kapitel ist als ein medien- und ideengeschichtlich ausgerichtetes Überblickskapitel konzipiert und verfolgt das Ziel, eine Geschichte des mikroskopischen Sehens als Mediengeschichte zu schreiben – eine Geschichte, die notwendigerweise fragmentarisch bleiben muss. Dazu zeigt das Kapitel zwei paradigmatische Transformationen auf, die das mikroskopische Sehen in den vergangenen vier Jahrhunderten durchlief. Es erweitert den zeitlichen Rahmen zu den Anfängen der Mikroskopie in der Frühen Neuzeit und springt sodann zweihundert Jahre nach vorn zur Mikrofotografie im letzten Drittel des neunzehnten Jahrhunderts, bevor es uns mittels eines weiteren, einhundertfünfzig Jahre umgreifenden Zeitsprungs in die Gegenwart bringt. Die Auswahl der genannten Zeitperioden liegt im methodischen Vorgehen des Kapitels begründet: Das Sehen in der heutigen computergestützten Lebendzellmikroskopie wird im Kontrast zu und Vergleich mit zwei deutlich älteren Sehmodalitäten akzentuiert und reflektiert. Den diskursiven Rahmen für die sich abzeichnende Mediengeschichte des mikroskopischen Sehens bildet die kontextsensible Auseinandersetzung mit ausgewählten technik- und wahrnehmungsphilosophischen sowie kunst- und wissenschaftsgeschichtlichen Positionen.

Das vierte Kapitel bietet ebenfalls einen zwangsläufig selektiven medien- und ideengeschichtlichen Überblick über einen Zeitraum von rund vierhundert Jahren. Allerdings erzählt es die Mediengeschichte des mikroskopischen Sehens – und in dieser Hinsicht komplementiert es das dritte Kapitel –, nicht vorrangig als Instrumenten- und Technikgeschichte, sondern als Affektgeschichte. Dabei weist das Kapitel ganz besonders die Kontinuität der affektiven Register auf, die von Mikroskopiediskursen der Naturforschung in der Frühen Neuzeit und den Diskursen der Amateurmikroskopie im siebzehnten Jahrhundert über den Diskurs zur Mikrokineematografie um

1900 bis in die Gegenwart reicht. In dem Kapitel zeige ich, dass sich der gegenwärtige Lebendzellfilm durch ein Ästhetisierungspotenzial auszeichnet, dass sich wohl am treffendsten als affektiver Surplus beschreiben lässt, der bei den Betrachtenden eine Präsenzerfahrung hervorruft. Sprechende im gegenwärtigen zellbiologischen Diskurs heben diese nicht nur strategisch heraus, sondern inszenieren sie auch bewusst, um die Strahlkraft der naturwissenschaftlichen Forschungspraxis zu erhöhen und die Schockwirkung, die von der Begegnung mit der mikroskopischen Dimension ausgeht, die sich von der Dimension menschlicher Alltagserfahrung wesentlich unterscheidet, einerseits anzuerkennen und andererseits abzumildern.¹⁷

Das fünfte Kapitel erweitert die affekttheoretische Diskussion um psychologische, philosophische und ästhetische Dimensionen und überprüft diese Überlegungen anhand von Beispielen aus der aktuellen computergestützten Lebendzellmikroskopie. Die Lebendzellmikroskopie, so lautet die Hypothese, schließt die Beobachtenden in ihre Versuchsanordnung ein und belegt sie strukturell mit einer doppelten Funktion, nämlich als beobachtende und beobachtete Subjekte, da sie die Lebendigkeit der Materie nicht allein kognitiv erfassbar, sondern auch affektiv spürbar macht und dadurch reflexiv zurückverweist auf die Verfasstheit der Beobachtenden als lebendige Subjekte, die folglich auf die Erfahrung ihrer eigenen Entwicklung und ihres eigenen Verfalls zurückgeworfen werden, und zwar in unauflöslicher Verbindung mit der Lebendigkeit und Vergänglichkeit *alles* zellulären Lebens.

Das Mikroskop, so wird dieser zweite Teilabschnitt deutlich machen, wird zum Medium durch die Etablierung einer interpretierenden Sehmodalität, durch die affektive Involvierung der Betrachtenden von vergrößerten und beschleunigten Bildern lebendiger Materie und durch den reflexiven Rückbezug auf die endliche Lebendigkeit der Beobachtenden. Das Daten-Sehen und die Pointierung fremder wie eigener Lebendigkeit wie Sterblichkeit müssen als die beiden grundlegenden Medienfunktionen der computergestützten Lebendzellmikroskopie gelten.

17 Diese Einsicht untermauere ich anhand der Analyse der Rhetorik eines Vortrags des US-amerikanischen Zellbiologen Ron Vale, der als Auftakt zu einem Bildgebungskurs auf einer Fachplattform der Zell- und Molekularbiologie fungiert. Siehe Ron Vale, »Historical Contributions from Light Microscopy. What Can You Learn with a Light Microscope?«, aufgenommen im März 2012 für iBiology, Videovortrag, 19:23, <https://www.ibiology.org/talks/light-microscopy/>.

3. Daten-Sehen: Mikroskopisches Sehen als Anschauung und Interpretation

Technische Medien wie das Mikroskop und der Computer sowie differenzierte Kenntnisse der Molekularbiologie der Zelle ermöglichen Erkenntnis in der heutigen Zellbiologie. Die Medientechnik der Mikroskopie – eine komplexe Anordnung technischer Geräte, die optische, mechanische, chemische und seit geraumer Zeit darüber hinaus auch algorithmische Verfahrensweisen sowie Techniken aus der Robotik miteinander kombiniert – macht Zellen und ihre kleinsten Bestandteile für die Forschenden wahrnehmbar und der Anschauung zugänglich. Die Bilder, also die Anschauungsgegenstände, die mithilfe dieser Geräte erzeugt werden, erhalten ihre Aussagekraft als Resultat der Messdaten, aus denen sie errechnet werden.

Damit vermittelt von Techniken, Kenntnissen und Darstellungsformen Einsichten und Wissen gewonnen werden können, muss allerdings eine spezifische Form des Sehens hinzutreten, und zwar ein fachkundiges Sehen, das heißt, die fachgerechte Lektüre oder, anders gesagt, das Interpretieren der mikroskopischen Bilder. Dieses fachkundige Sehen in der gegenwärtigen Mikroskopiepraxis, das Deuten apparativ erzeugter Bild- und Messdaten, wird hier als ›Daten-Sehen‹ bezeichnet. Der Begriff des Daten-Sehens umfasst das menschliche Vermögen, Seheindrücke mit Bedeutung zu belegen, ein Vermögen, das an einen Leib, an die multimodale Wahrnehmung und an die kulturelle Teilhabe gebunden ist, und berücksichtigt zugleich die Vermittlungsleistung der Instrumente im Prozess der Erkenntnisgewinnung. Dabei hat das Daten-Sehen deutlich mehr gemeinsam mit dem »anschaulichen Denken«¹, einer Verbindung von Bildern und Begriffen, die aus der Gestaltwahrnehmung resultiert, wie der in Deutschland geborene und in

¹ Siehe Rudolf Arnheim, *Anschauliches Denken: Zur Einheit von Bild und Begriff*, aus dem amerikanischen Englisch übersetzt vom Verfasser (Köln: DuMont, 2001). Auf Arnheims Begriff des »anschaulichen Denkens« gehe ich im dritten Unterkapitel noch genauer ein und erörtere die Rele-

die USA emigrierte Psychologe und Kunstwissenschaftler Rudolf Arnheim (1904–2007) aufgeschlüsselt hat, und dem »geschulten Urteil« (»trained judgment«)², einer interpretierenden Sehmodalität, die sich, wie Lorraine Daston und Peter Galison ausgeführt haben, im zwanzigsten Jahrhundert in den Naturwissenschaften herausbildete, als mit der »extrasensorischen Bildgebung«³, bei der, wie der US-amerikanische Technikphilosoph Don Ihde argumentiert, die Instrumente die menschliche Sinneswahrnehmung ersetzen.

Doch welche Transformationen musste das Sehen durchlaufen, seit Galileo Galilei im Jahr 1609 erstmalig ins Mikroskop schaute,⁴ bevor es sich im zwanzigsten Jahrhundert unauflösbar mit dem Interpretieren verband? Das mikroskopische Sehen, so soll in diesem Kapitel gezeigt werden, veränderte sich in den vergangenen rund vierhundert Jahren wiederholt grundlegend: Wurde das mikroskopische Sehen in der Frühen Neuzeit noch als ein Sehen mit dem physischen Auge konzipiert, dessen Vermögen das optische Instrument ausweitete, und in der zweiten Hälfte des achtzehnten Jahrhunderts als eine Aktivität der Apparate verstanden, die die physiologischen Funktionen des Auges technisch imitierten und sein Leistungsvermögen übertrafen, so muss das mikroskopische Sehen heute als eine Sinnes- und Geistesschau beschrieben werden, als eine Kombination somatischer und hermeneutischer Aktivitäten: als ein denkendes Sehen, das nicht allein wahrnimmt und aufzeichnet, sondern deutet. Mikroskopisches Sehen bedeutet heute nicht mehr allein, den Mikrokosmos vermittels von Instrumenten zu beobachten und auch nicht allein mikroskopische Strukturen und Phänome-

vanz des Begriffs für gegenwärtige Praktiken der Bildinterpretation in der computergestützten Mikroskopie.

2 Siehe Lorraine Daston und Peter Galison, »Trained Judgment«, in *Objectivity*, 309–362 (New York: Zone Books, 2007), 309.

3 Don Ihde, *Postphenomenology and Technoscience* (Albany: The State University of New York Press, 2009), 57.

4 Sowohl das Mikroskop als auch das Teleskop wurden um das Jahr 1600 entwickelt. Die technische Grundlage für die Entwicklung beider Instrumente bildete die Herstellung von Linsen durch niederländische Brillenschleifer, die namentlich unbekannt sind. Galileo Galilei adaptierte die Technik und konstruierte ein Mikroskop, das »Occhiolino«, das aus einer konkaven und einer konvexen Linse bestand. Aus zwei Linsen und einem Rohr fertigte Galilei zudem das erste Teleskop. Zur Geschichte der Mikroskopie in der Frühen Neuzeit siehe Marian Fournier, *The Fabric of Life: Microscopy in the Seventeenth Century* (Baltimore und London: Johns Hopkins University Press, 1996); Catherine Wilson, *The Invisible World: Early Modern Philosophy and the Invention of the Microscope* (Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1995).

ne technisch zu erfassen, aufzuzeichnen und zu fixieren. Mikroskopisches Sehen bedeutet heute vielmehr Datenbilder zu interpretieren.

Um diese Transformationen des mikroskopischen Sehens genauer zu beschreiben, ist es unerlässlich, die Verbindungen zwischen den jeweiligen historischen Praktiken des Sehens und den Vorstellungen über das Sehen, die aus diesen Praktiken resultierten, in ihren übergreifenden medientechnischen Kontexten zu betrachten und die wissenschaftlichen Rahmenbedingungen zu berücksichtigen, innerhalb derer das mikroskopische Sehen zu den oben genannten Zeitperioden in der Vergangenheit praktiziert wurde. Diese wiederum gilt es schließlich mit jenen wissenschaftlichen Idealen zu vergleichen, die das mikroskopische Sehen gegenwärtig leiten. Denn die Sehkonzepte, die Mikroskopiker artikulierten, wurden von den jeweiligen zeitgenössischen Vorstellungen über das Sehen und von den Objektivitätsidealen ihrer Zeit geprägt. Diese Sehkonzepte und Objektivitätsideale materialisierten sich wiederum in den Apparaten und Praktiken der Mikroskopie, die ihrerseits im Kontext medientechnischer Konstellationen und kultureller Transformationen konstruiert, erprobt und verfeinert wurden.

Aus medienhistorischer Perspektive stellt sich somit die Frage, wie sich die tiefgreifenden *medientechnischen Umbrüche*, etwa die Entwicklung mechanischer Aufzeichnungsverfahren wie der Fotografie im neunzehnten Jahrhundert und der computergestützten Bilderzeugung und Bildverarbeitung im zwanzigsten Jahrhundert, in den Sehkonzepten und Sehmodalitäten der Mikroskopie niederschlugen. Eng verbunden mit der Frage nach den Folgen medientechnischer Entwicklungen für das mikroskopische Sehen ist die erkenntnistheoretische Frage nach den *wissenskulturellen Bedingungen* der Konzeption und Praxis des mikroskopischen Sehens, die sich zu unterschiedlichen historischen Zeitpunkten veränderten oder neu formierten. Aus der Kombination der medienhistorischen und der medienepistemologischen Frage ergibt sich die Leitfrage dieses dritten Kapitels: Wie gestaltete die Entwicklung von Medientechniken wie der Mikrofotografie im neunzehnten und der computergestützten Mikroskopie im zwanzigsten Jahrhundert in Kombination mit sich wandelnden Sehmodellen und Objektivitätsidealen die Konzeption des mikroskopischen Sehens um?

Mikroskopisches Sehen in der Gegenwart, so wird hier argumentiert, kann nicht von Interpretations- und Auslegungspraktiken losgelöst betrachtet werden. Diese interpretierende Sehmodalität – das ›Daten-Sehen‹ – unterscheidet sich grundlegend von der Praxis eines Delegierens der

menschlichen Sehleistung an die Apparatur, wie sie die frühen Mikrofotografen betrieben. Sie geht über ein mit solchem Delegieren verbundenes Verständnis der Apparatur als eines Instruments zur Optimierung der Sehleistung deutlich hinaus. Das interpretierende Sehen setzt sich ebenfalls dezidiert ab von dem Verständnis der mikroskopischen Sehapparatur, das diese als eine Erweiterung des menschlichen Sehvermögens versteht, wie es unter den Mikroskopikern der Frühen Neuzeit verbreitet war. Interpretierendes Sehen, wie Mikroskopiker*innen es heutzutage praktizieren, funktioniert vielmehr einem hermeneutischen Prozess vergleichbar. Damit ändert sich auch, wie Apparate und Forschende zusammenwirken: Die Apparate messen und visualisieren Messergebnisse; die Forschenden lesen und interpretieren Bilder.

Um diese Argumentation zu untermauern, werden in diesem Kapitel exemplarisch drei historische Einzelfallstudien zum mikroskopischen Sehen im siebzehnten Jahrhundert, um 1860 und in der Gegenwart auf der Hintergrundfolie von Überlegungen zu sich wandelnden Modellen und Praktiken des Sehens betrachtet und zu den jeweiligen medientechnischen Entwicklungen in Beziehung gesetzt. Ausgehend von der antiken Philosophie wird gefragt, wie sich Konzeptionen und Praktiken des Sehens in der Mikroskopie im siebzehnten Jahrhundert und in der Mikrofotografie der 1860er-Jahre durch den Instrumentengebrauch veränderten und wie der Instrumentengebrauch auf Sehmodelle und Sehmodalitäten zurückwirkte. Hierbei soll besonders auf eine »Denaturierung der Sinne«⁵ eingegangen werden, wie sie Joseph Vogl beschrieben hat: eine reflexive Auseinandersetzung mit der Funktionsweise der Sinnesorgane anhand eines technischen Modells wie es das Fernrohr, das Mikroskop und die Camera obscura anboten. Damit ist die größere Frage nach der Geschichte des Sehens angesprochen.

Für die hier entwickelten medienhistorischen Überlegungen zur Modulation der Wahrnehmung durch das Mikroskop ist die von dem US-amerikanischen Kunsthistoriker Jonathan Crary vorgelegte Studie zu den »skopischen Regimen«⁶ im neunzehnten Jahrhundert von besonderem Interesse. Crary zeigt dort auf, wie der damalige Wandel der Sehpraktiken eine Disziplinierung des Subjekts herbeiführte. Er verdeutlicht vermittels einer Kom-

5 Joseph Vogl, »Medien-Werden: Galileis Fernrohr«, in *Mediale Historiographien*, Hg. Lorenz Engell und ders. (Weimar: Universitäts-Verlag, 2001), 115.

6 Siehe Jonathan Crary, *Techniques of the Observer: On Vision and Modernity in the Nineteenth Century* (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1990), 57.

bination von Foucaults epistemologischem Ansatz⁷ und Marx' kapitalismuskritischem Ansatz, welche Rollen die naturwissenschaftliche Forschung – vor allem die Sinnesphysiologie – und die technischen Bildmedien wie das Stereoskop dabei jeweils spielten.

Crarys Projekt verortet sich in der breit angelegten, konzertierten Forschung der US-amerikanischen Kunstgeschichte in den späten 1980er- und frühen 1990er-Jahren, die auf eine Analyse unterschiedlicher Sehregime abzielte. Als eine wegweisende Publikation, die erste zentrale Thesen dieser gemeinsamen Forschung versammelte, gilt der von Hal Foster herausgegebene Sammelband *Vision and Visuality*⁸, zu dem auch Jonathan Crary – neben Martin Jay, Rosalind Krauss, Norman Bryson und Jacqueline Rose – einen Beitrag leistete. Der Band entstand im Ergebnis eines Symposiums der Dia Art Foundation, das am 30. April 1988 am Dia Chelsea in New York stattfand, und das auf die Sondierung historisch spezifischer Theorien, Modelle und Modalitäten des Sehens abzielte und die soziale, psychologische und biologische Bedingtheit der Wahrnehmung, ganz besonders der Kunstwahrnehmung im Kontext der Moderne akzentuierte. Crarys dort präsentierte Überlegungen⁹ bildeten zusammen mit den Forschungsergebnissen, die er im selben Jahr in einem Artikel in der Fachzeitschrift *October* veröffentlichte¹⁰, die Grundlage zu seiner ersten Monographie, *Techniques of the Observer*. Die Tragweite der Diskussion am Dia lässt sich an der Tatsache ablesen, dass ähnlich wie Jona-

7 Michel Foucault bezeichnet die *episteme* als die kulturellen Möglichkeitsbedingungen von Erkenntnis, das heißt, »die Konfigurationen [...], die den verschiedenen Formen der empirischen Erkenntnis Raum gegeben haben.« Michel Foucault, *Die Ordnung der Dinge* [i.O. 1966], aus dem Französischen übersetzt von Ulrich Köppen (Frankfurt a.M.: Suhrkamp, 2012), 24. An anderer Stelle schreibt Foucault: »Die fundamentalen Codes einer Kultur, die ihre Sprache, ihre Wahrnehmungsschemata, ihren Austausch, ihre Techniken, ihre Werte, die Hierarchie ihrer Praktiken beherrschen, fixieren gleich zu Anfang für jeden Menschen die empirischen Ordnungen, mit denen er zu tun haben und in denen er sich wiederfinden wird.« Ebd., 22. Von besonderem Interesse für Crary und für das vorliegende Buch sind die Wahrnehmungsschemata und die Techniken sowie die sich wandelnde Beziehung zwischen beiden als Rahmen, in dem Erkenntnisse gewonnen werden.

8 Siehe Hal Foster (Hg.), *Vision and Visuality* (Seattle: Bay Press, 1988).

9 Siehe Jonathan Crary, »Modernizing Vision«, in *Vision and Visuality*, Hg. Hal Foster (Seattle: Bay Press, 1988).

10 Siehe Jonathan Crary, »Techniques of the Observer«, *October* 45 (Sommer 1988).

than Crary auch Jacqueline Rose¹¹, Norman Bryson¹², Rosalind Krauss¹³ und Martin Jay¹⁴ ihre Beiträge zu *Vision and Visuality* später zu breit rezipierten Monographien ausgearbeitet haben.

Die Kunstgeschichte im deutschsprachigen Raum ging auf Abstand zu der Analyse der skopischen Regime, wie sie die Kunstgeschichte in den USA in den späten 1980er- und frühen 1990er-Jahren betrieb. So bemerkte etwa der deutsche Kunsthistoriker und Philosoph Gottfried Boehm mit Bezug auf die US-amerikanische Forschung, dass der von ihm »verfolgte Weg die vorgespurten Richtungen eher kreuzt als berührt«¹⁵. In der deutschsprachigen Kunstgeschichte findet seit der Jahrtausendwende allerdings eine intensive Auseinandersetzung mit den Bildwelten der Natur- und Technikwissenschaften statt, ganz besonders im Umfeld der Forschungen, die am Helmholtz-Zentrum für Kulturtechnik der Humboldt-Universität zu Berlin betrieben wurden und werden. Diese Auseinandersetzung fokussiert auf die Prozesse der Herstellung und Interpretation naturwissenschaftlicher Bilder in ihren historischen Kontexten, wie die Herausgeber*innen der ersten Ausgabe von *Bildwelten des Wissens*, dem kunsthistorischen Jahrbuch für Bildkritik betonen.¹⁶ Die historischen Einzelfallstudien zur frühen Mikroskopie Robert Hooques von Angela Fischel und zur Mikrofotografie Robert Kochs von Franziska Brons, die in diesem Umfeld entstanden, werden im Folgenden als Vergleichspunkte genommen, um Crarys Behauptung eines epistemischen Bruchs der Sehregime im neunzehnten Jahrhundert zu überprüfen.

11 Siehe Jacqueline Rose, *Sexuality in the Field of Vision* (London: Verso, 1986). Jacqueline Rose verdichtete in ihrem Beitrag die zentralen Gedanken einer früheren Monographie.

12 Siehe Norman Bryson, *Looking at the Overlooked: Four Essays on Still Life Painting* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1990).

13 Siehe Rosalind Krauss, *The Optical Unconscious* (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1993).

14 Siehe Martin Jay, *Downcast Eyes: The Denigration of Vision in Twentieth-Century French Thought* (Berkeley: University of California Press, 1993).

15 Gottfried Boehm, »Sehen. Hermeneutische Reflexionen«, in *Kritik des Sehens*, Hg. Ralf Konersmann (Leipzig: Reclam, 1997), 281.

16 Siehe Horst Bredekamp et al., »Bildwelten des Wissens«, in *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 1,1: *Bilder in Prozessen*, Hg. Horst Bredekamp und Gabriele Werner (Berlin: Akademie Verlag, 2003).

3.1 Modelle des Sehens

Den Einzelanalysen der verschiedenen historischen und gegenwärtigen Modalitäten des mikroskopischen Sehens sollen zwei maßgebende Modelle des Sehens in ihren historischen und diskursiven Kontexten vorangestellt werden: das Camera-obscura-Modell, das Seh-Apparaturen wie Teleskop, Mikroskop und Fotoapparat als eine Metapher für das Auge begreift und das vom siebzehnten bis ins neunzehnte Jahrhundert den philosophischen und den künstlerischen Diskurs dominierte, und das Kontiguitäts-Modell, das das Auge und die Apparatur in einem metonymischen Verhältnis anordnet und das im neunzehnten Jahrhundert diskursbestimmend wurde. Diese beiden Modelle sollen vor dem Hintergrund einiger Überlegungen zum Anschauungsbegriff und zur »Denaturierung der Sinne« durch den Instrumentengebrauch diskutiert werden. Ziel dabei ist es, die spezifischen Verschiebungen und Akzentuierungen genauer erkennen zu können, die die Modelle hinsichtlich der Konzeption des Verhältnisses zwischen Sehen und Denken und des Verhältnisses zwischen den Sinnen und der Technik initiieren, setzen und stabilisieren.

3.1.1 Zum Anschauungsbegriff: Sehen und Denken

Dem Begriff der »Anschauung« kommt in der hier entwickelten Argumentation eine Schlüsselrolle zu. »Anschauung« bezeichnet das Zusammenwirken des Vermögens des ›geistigen Auges‹ – dem Denken – mit dem Vermögen des physiologischen Auges – dem Sehen. Der Anschauungsbegriff hebt die enge Verbindung von Sehen und Erkennen heraus, indem er die Sinneschau und die Geistesschau miteinander verbindet. Die Philosophin Waltraud Naumann-Beyer betont in ihrem ideengeschichtlichen Abriss zum ästhetischen Begriff der Anschauung die sprachlich-kulturelle Spezifität des Begriffs: »Der Begriff der Anschauung ist eine typisch deutsche Schöpfung. Im Englischen und in den romanischen Sprachen gibt es dafür keinen adäquaten Ausdruck.«¹⁷ Sie verweist auf »ein Wortfeld, das sich etymologisch

17 Waltraud Naumann-Beyer, »Anschauung«, in *Ästhetische Grundbegriffe*, Studienausgabe, Band 1, Hg. Karlheinz Barck et al. (Stuttgart: J.B. Metzler, 2010), 212. Der Beitrag von Naumann-Beyer bietet eine umfassende Darstellung der langen und wechselvollen Geschichte des Anschauungsbegriffs und eine detaillierte Diskussion der Facetten des Begriffs und seiner unterschiedlichen

aus vier lateinischen Ausdrücken herleitet: visio, intuitio, evidentia, contemplatio¹⁸. In der hier entwickelten Argumentation folge ich den Überlegungen Rudolf Arnheims, der den Begriff des »anschaulichen Denkens« prägte, um das Gestaltsehen und dessen konzeptuelle Implikationen zu beschreiben. Mit dem titelgebenden Begriff seiner Monographie, *Anschauliches Denken*, die unter dem Titel *Visual Thinking*¹⁹ im Original in amerikanischem Englisch im Jahr 1969 erschien, die er selbst ins Deutsche übersetzte und drei Jahre später auf Deutsch veröffentlichte, rekurriert Arnheim auf den spezifisch deutschen Begriff der Anschauung. Neben der eingehenden Auseinandersetzung mit Arnheims Position sollen einige klassische und gegenwärtige Positionen zum Anschauungsbegriff, die sich für meine Argumentation als wichtig erweisen werden, in aller Kürze skizziert und hinsichtlich der Frage dargestellt werden, wie sie das Verhältnis zwischen der mentalen und der physiologischen Dimension des Begriffs konzipieren, die Arnheim zusammenführt.

Bereits in der antiken Philosophie wurden unterschiedliche Positionen zum Verhältnis zwischen Sehen und Denken vertreten. Platon entlarvte das Sehen mit dem Auge als Sinnestäuschung, die den Zugang zur Welt der Ideen verstellte.²⁰ Aristoteles hingegen galt das physiologische Sehen als ein Akt der Evidenzerzeugung. Die Differenz zwischen der Platonischen und der Aristotelischen Position charakterisiert Naumann-Beyer folgendermaßen:

»Während es die Platonische Trennung von »mundus intelligibilis« und »mundus sensibilis« fast notwendig mit sich brachte, daß sinnlich-körperliche Wahrnehmung verächtlich bis feindlich behandelt wurde, führte die Situierung der Ideen innerhalb der Phänomene, des Gesetzes in der Erscheinung, des Allgemeinen im Einzelnen oder der Form im Stoff fast ebenso zwangsläufig zur Indienstnahme der Sinnlichkeit für die Erschließung des immanent Logischen und damit zu ihrer Aufwertung. So war für Aristoteles die Wahrnehmung selbst logisch-noetisch.«²¹

Gebrauchsweisen in der Aufklärung, im Idealismus, in der Romantik und in der Phänomenologie.

18 Ebd.

19 Siehe Rudolf Arnheim, *Visual Thinking* (Berkeley, Los Angeles und London, England: University of California Press, 1969).

20 Siehe Platon, »Sonnen-, Linien- und Höhlengleichnis«, in *Kritik des Sehens*, Hg. Ralf Konersmann (Leipzig: Reclam, 1997).

21 Naumann-Beyer, »Anschauung«, 215.

An dem Zitat wird bereits deutlich, dass die beiden Hauptströmungen des klassischen westlichen Denkens die Geistestätigkeit und die Sinneswahrnehmung unterschiedlich zueinander positionieren und verschieden bewerten: Im Gegensatz zu Platon, der auf einer dezidierten Trennung von Denken und Sehen insistiert, betont Aristoteles die enge Verbindung von Reflexion und Wahrnehmung.

Laut der deutschen Philosophin Sybille Krämer kommt dem Visuellen und damit dem Sehsinn in der Antike und Frühen Neuzeit gegenüber den anderen Wahrnehmungsvorgängen eine dominierende Rolle zu. Dieses Primat des Visuellen beschränkt sich jedoch nicht allein auf das Sehen als Wahrnehmungstätigkeit, sondern schließt auch das Denken mit ein:

»Die Vorrangstellung des Visuellen bezieht sich nicht einfach auf das Tun des körperlichen Auges, sondern auf das ›Auge des Denkens‹. Der europäische Okularzentrismus beruht auf einer Dissoziation von körperlichem und geistigem Auge.«²²

Auch Gottfried Boehm weist darauf hin, dass in der Diskussion zum Anschauungsbegriff die »alltägliche, sinnliche Wahrnehmung« der »emphatischen Anschauung« unterordnet werde, eine binäre Denkweise, die sich ihm zufolge im deutschen Idealismus ausprägte und »das Gefälle zwischen einer höheren und einer niedrigeren, einer reinen und einer sinnlichen Wahrnehmung zum Kennzeichen europäischen Denkens werden ließ«²³. Das Verhältnis zwischen dem sehenden Auge und dem geistigen Auge, das heißt, zwischen visueller Tätigkeit und geistiger Erkenntnis könne jedoch zutreffender als ein fließender Übergang und weniger als eine klare Unterscheidung beschrieben werden, wie Boehm betont.²⁴ Ähnlich wie Arnheim vertritt Boehm die Ansicht, geistige Prozesse und damit die intellektuelle Anschauung seien mit den nicht-reflexiv, physiologisch-sinnlichen Wahrnehmungsprozessen verbunden.

22 Sybille Krämer, »Kann das ›geistige Auge‹ sehen?«, in *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, Hg. Bettina Heintz und Jörg Huber (Zürich: Edition Voldemeer, 2001), 349.

23 Boehm, »Sehen«, 272–273.

24 Siehe ebd., 274–275.

3.1.2 Kepler und Galilei: Sehen und Instrumentengebrauch

Joseph Vogl beschreibt, wie die Himmelsbeobachtungen, die der Universalgelehrte Galileo Galilei (1564–1642) mittels eines Fernrohrs durchführte, die theoretischen Überlegungen zur Funktionsweise des Auges unterstützten, die der Astronom, Mathematiker und Naturphilosoph Johannes Kepler (1571–1630) nahezu zeitgleich aus seinen Berechnungen der Bewegungen der Himmelskörper herleitete und in seiner *Dioptrik* entwickelte.²⁵ Bei Vogl heißt es: »Schon 1604 hatte Kepler das Auge als optischen Apparat – aus Linse, Dunkelkammer und Netzhaut bzw. Schirm –, das Sehen selbst als optische Verzerrung und damit jede Sinneswahrnehmung als konstitutive Sinnestäuschung bestimmt [...]«. ²⁶ Anders als der arabische Mathematiker, Optiker und Astronom Alhazen (ca. 965–1040) um das Jahr 1000 und der schlesische Mönch und Naturphilosoph Witelo (ca. 1230–1280) im dreizehnten Jahrhundert – Kepler bezieht sich explizit auf Witelo und zwar gleich im Titel seines Traktats, der lautet: *Ad Vitellionem* –, die die Vermittlungsleistung der Linse hervorhoben, betonte Kepler die wichtige Rolle, die der Netzhaut im Sehvorgang zukommt.²⁷ Die optischen Prinzipien, die Kepler für das Auge formulierte, waren für die Entwicklung der Zentralperspektive in der Renaissance maßgeblich.²⁸ Die Etablierung der Zentralperspektive, die Ausweitung des Sehens vermittels optischer Apparate und die Funktionalisierung des Sehens als Beobachten im wissenschaftlichen Experiment brachte in der Frühen Neuzeit eine »methodische Disziplinierung und Objektivierung des Sehaktes«²⁹ hervor.

25 Siehe Joseph Vogl, »Medien-Werden«, 115. Vogl bezieht sich hier auf Svetlana Alpers, *Kunst als Beschreibung: Holländische Malerei des 17. Jahrhunderts* (i.O. 1983), aus dem amerikanischen Englisch von Hans Udo Davitt, mit einem Vorwort von Wolfgang Kemp (Köln: DuMont, 1985), 91–92, die ihrerseits Johannes Kepler zitiert. Siehe Johannes Kepler, *Ad Vitellionem Paralipomena, Quibus Astronomiae pars Optica Traditur*, Hg. Walther von Dyck und Max Caspar, Band 2 (München: C.H. Beck, 1937), 143 und 153. Kepler war allerdings nicht allein Theoretiker. Als Assistent des dänischen Astronomen Tycho Brahe (1546–1601) in Prag betrieb er vielmehr ebenfalls astronomische Studien, bevor er sich der Optik zuwandte. Siehe Alpers, *The Art of Describing* (Chicago: University of Chicago Press, 1983), 33.

26 Vogl, »Medien-Werden«, 116.

27 Siehe Samuel Y. Edgerton, *The Renaissance Rediscovery of Linear Perspective* (New York: Basic Books, 1975), 175.

28 Siehe Ebd., 73.

29 Krämer, »Kann das ›geistige Auge‹ sehen?«, 48. Dort heißt es: »Fortan gilt das Anschauen als ein mechanischer, nach optischen Gesetzen berechenbarer Prozeß, bei dem eine Außenwelt durch einen – dieser Welt gegenüber externen – Beobachter abgebildet wird.«

In Keplers *Dioptrik* finden sich eine große Zahl von Schemazeichnungen, die die Lichtbrechung mittels verschiedener Linsen zeigen. Allerdings erläutert eine Schemazeichnung, die der französische Philosoph, Mathematiker und Naturwissenschaftler René Descartes (1596–1650), dessen optische Theorie eng mit der Keplers verbunden war,³⁰ in seiner *Dioptrique* veröffentlichte, die obigen Ausführungen zum Auge als einem optischen System, demzufolge die Linse Lichtstrahlen auffängt und bündelt, damit auf der Netzhaut ein umgekehrtes Bild erzeugt werden kann, deutlich besser als die Zeichnungen bei Kepler. Die genannte Schemazeichnung in Descartes *Dioptrique* veranschaulicht den Lichteinfall im Auge und stellt dar, wie durch Projektion ein verkleinertes und seitenverkehrtes Bild auf der Netzhaut entsteht (siehe Abb. 3.1).³¹

Keplers Theorie des Sehens manifestierte sich in der empirischen Praxis der Himmelsbeobachtungen Galileis. Die Wahrnehmungsveränderung, die der Himmelsbeobachter erfährt, der seinen Blick durch das Fernrohr auf die Sterne lenkt – und das ist entscheidend in Vogls Argumentation – bestimmt reflexiv den Status des Fernrohrs: Das Fernrohr sei nicht lediglich ein *Instrument*, das ein Mehr-Sehen ermöglichte, sondern würde im Gebrauch zu einem *Medium*, das die Selbstevidenz des Sehens, wie sie von Aristoteles behauptet und bis in die Frühe Neuzeit angenommen wurde, problematisierte. Als ein Objekt, das Keplers Theorie des Sehens materiell greifbar macht³², so Vogl, enthüllte das Fernrohr das Doppelspiel und die Unzuverlässigkeit des natürlichen Sehens. Wir könnten unseren Augen nicht trauen:

»Auch das, was das Auge selbst sieht, ist gebaut und konstruiert, das Auge ist nicht mehr das verlässliche Organ aristotelischer Welterschließung; auch das, was das Auge sieht, ist Wahrheit ebenso wie Täuschung, das Sehen hat seine naturwüchsige Evidenz verloren.«³³

Die Problematisierung des ›natürlichen‹ Sehens, so Vogl, gehe aus Galileis genauem Studium des Fernrohrs hervor, dessen Ergebnisse dieser im *Sider-*

30 Siehe Crary, *Techniques of the Observer*, 35, Fußnote 16.

31 Bereits Alpers verwendet die Zeichnung von Descartes in der Textpassage, in der sie Keplers Erkenntnis der Wahrnehmungsverzerrung durch die Camera obscura diskutiert. Siehe Alpers, *The Art of Describing*, 34.

32 Vogl bezieht sich in seinen Ausführungen zu Kepler und Galilei auf Hans Blumenberg, »Das Fernrohr und die Ohnmacht der Wahrheit«, in Galileo Galilei, *Sidereus Nuncius: Nachricht von neuen Sternen*, Hg. und eingeleitet von Hans Blumenberg, 1. Auflage (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1965). Blumenberg weist auf, dass zwischen dem Mathematiker Kepler und dem Astronomen Galilei eine zeitweilig äußerst rege Korrespondenz bestand.

33 Vogl, »Medien-Werden«, 116.

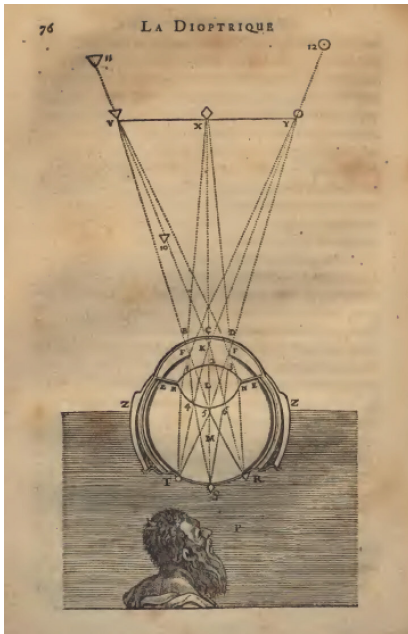


Abb. 3.1: Illustration der Theorie des Netzhautbildes

Quelle: René Descartes, *Discours de la Méthode pour bien Conduire la Raison, et Chercher la Vérité dans les Sciences. Plus la Dioptrique. Les Météores et la Géométrie* (Leiden: Ian Maire, 1637), 45.

eus Nuncius darlegte. Der *Sidereus Nuncius*, ein astronomisches Pamphlet, das im Jahr 1610 in lateinischer Sprache in Venedig erschien, enthielt die Ergebnisse von Galileis Himmelsbeobachtungen und leistete einen entscheidenden Beitrag zur Durchsetzung des heliozentrischen Weltbildes. Der »naturwüchsigen Evidenz des Sehens« setzte Galilei dort die apparativ erweiterte Schau des Himmels entgegen und untermauerte damit empirisch das von Kepler entwickelte Modell des Auges. Im Beobachtungsakt wurde das Fernrohr von einem bloßen Instrument zu einem Medium, indem es die Natürlichkeit des Sehens als unmittelbare Erkenntnisquelle in Zweifel zog. Vogl formuliert diesen maßgeblichen Funktionswechsel des Fernrohrs folgendermaßen:

»Das Fernrohr erscheint nun als *gebaut, konstruierte, materialisierte theoria oder Schau*: Es ist kein Apparat zur Vergrößerung, zum Näherrücken der Dinge oder zur Abbildung mehr;

es ist nicht einfach eine Verlängerung der Sinne, kein Hilfsmittel, das die Reichweite der Sinne erhöht oder korrigiert [...]. *Es erschafft vielmehr die Sinne neu, definiert das, was Sinneswahrnehmung und Sehen bedeutet* [...].³⁴

Vogl beschreibt hier die komplexen Wechselwirkungen zwischen Empirie und Theorie, zwischen Praxis und Vorstellung in den empirischen Naturwissenschaften, die sich in der Frühen Neuzeit zu etablieren begannen: Der Instrumentengebrauch in der Astronomie untermauerte Hypothesen über die Funktionsweise des Auges, die in der frühneuzeitlichen Mathematik entwickelt wurden. Galileis Anschauungspraxis lieferte handfeste Beweise für Keplers mathematische Spekulationen. Instrumentengebrauch und Theoriebildung zusammen führten zu einem Bruch mit der aristotelischen Vorstellung vom Sehen als verlässliche Erkenntnisquelle. An diesem Beispiel wird bereits das komplexe Zusammenwirken von Theorien und Modellen des Sehens mit Praktiken und Instrumenten des Sehens offenkundig: Das orchestrierte Zusammenspiel von Vorstellungen, Handlungen und Medientechniken verwandelt das Instrument in ein Medium. Der Instrumentengebrauch in den empirischen Naturwissenschaften unterstützt so die Neukonzeption des Sehens in der Frühen Neuzeit.

3.1.3 Die Modernisierung des Sehens als Mechanisierung im neunzehnten Jahrhundert

Im neunzehnten Jahrhundert untersuchte die Sinnesphysiologie die Funktionsweise des Auges experimentell über die strominduzierte Reizung des Sehnervs. Unterhaltungsmedien wie Stereoskop, Thaumatrope und Phenakistiskop inszenierten das Sehen als stereoskopisch und bewegt. Und die Kunst begann über das Sehen als subjektive Erfahrung zu reflektieren. Diese drei diskursiven Stränge führt Jonathan Crary in seiner umfassenden interdisziplinären Forschung zum Wandel der skopischen Regime im neunzehnten Jahrhundert zusammen.³⁵ Crary zufolge hatte das Zusammenwirken der

³⁴ Vogl, »Medien-Werden«, 115, Hervorhebungen B. P.

³⁵ Siehe Jonathan Crary, *Techniken des Betrachters: Sehen und Moderne im 19. Jahrhundert* [i.O. 1990], aus dem amerikanischen Englisch von Anne Vonderstein (Dresden und Basel: Verlag der Kunst, 1996), 41. Jens Schröter, der sich aus medienwissenschaftlicher Perspektive eingehend mit Crarys These zur grundlegenden Veränderung des Sehens im neunzehnten Jahrhundert auseinandersetzt und dazu differenziert und kritisch Position bezieht, beanstandet, dass in der Übersetzung von Crarys erster Monographie *Techniques of the Observer* aus dem amerikanischen Englisch ins Deutsche

sinnesphysiologischen Forschung mit der Entwicklung von optischen Apparaturen zum Zwecke der Unterhaltung und den Sehexperimenten der bildenden Kunst im neunzehnten Jahrhundert eine Modernisierung des Sehens zur Folge. Crary charakterisiert diese als eine Verschiebung von einem metaphorischen zu einem metonymischen Verhältnis zwischen Auge und Apparatur:

»Im 17. und 18. Jahrhundert war die Beziehung zwischen Auge und optischem Gerät im wesentlichen eine *metaphorische* gewesen: Auge und Camera obscura bzw. Auge und Teleskop oder Mikroskop beruhten auf den gleichen Konzepten, wobei die Autorität eines idealen Auges unangefochten blieb. Mit Beginn des 19. Jahrhunderts wandelt sich die Beziehung zwischen Auge und optischem Gerät zu einer *metonymischen*. Beide werden nun als nebeneinander auf derselben Funktionsebene angeordnete und durch unterschiedliche Möglichkeiten und Merkmale ausgezeichnete Instrumente gedacht.«³⁶

Im neunzehnten Jahrhundert, so postuliert Crary, wurde das Ähnlichkeitsverhältnis (Metapher) zwischen Auge und Apparatur von einem Nachbarschaftsverhältnis (Metonymie) abgelöst. An die Stelle der Metapher der Camera obscura, die in der Frühen Neuzeit häufig herangezogen wurde, um die Funktionsweise des menschlichen Auges zu erklären,³⁷ trat die Vorstellung,

»viele wichtige Nuancen verloren« gingen. Jens Schröter, *3D: Zur Geschichte, Theorie und Medienästhetik des technisch-transplanten Bildes* (München: Fink, 2009), 13. Diese Einsicht gilt für Übersetzungen ganz allgemein. Im Falle der Übersetzung von Anne Vonderstein gibt es allerdings – mit Ausnahme des Titels; hier kann Schröter zugestimmt werden – kaum Ungenauigkeiten. Jene Passagen, die hier aus der deutschsprachigen Übersetzungen zitiert werden, wurden mit den entsprechenden Passagen im englischsprachigen Original verglichen. Im Ergebnis konnten keine signifikanten Sinnverschiebungen oder Sinnverluste festgestellt werden. Deshalb und aus Gründen der Lesbarkeit wird hier im Fließtext vorwiegend mit der deutschsprachigen Übersetzung gearbeitet.

- 36 Crary, *Techniken des Betrachters*, 133–135 (Seite 134 enthält eine Abbildung). Hervorhebungen B.P.
- 37 Philosophen wie René Descartes, John Locke (1632–1704) und Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) explizierten zudem das Verhältnis zwischen dem Beobachter und der Außenwelt anhand der Camera obscura; der Beobachter wurde als von der Welt getrenntes Subjekt gedacht, das weltabgeschieden in seinem Studierzimmer sitzt und vermittels von Zerrbildern, die Bücher, Instrumente und der menschliche Verstand hervorbringen, Erkenntnisse über die Welt gewinnt. Crary hebt die Schlüsselstellung der Camera obscura hervor und betont die Ähnlichkeitsbeziehung zwischen optischem Gerät und denkendem Subjekt, die die Philosophie etablierte: »Im 17. und 18. Jahrhundert wurden das menschliche Sehen und das Verhältnis des Betrachters bzw. die Stellung des denkenden Subjekts zur Außenwelt an keinem Modell häufiger veranschaulicht als an der Camera obscura. Dieses zutiefst problematische Objekt war weit mehr als nur ein optisches Gerät. Über zwei Jahrhunderte hinweg diente die Camera als philosophische Metapher, als Modell für die optische Physik und zugleich als technischer Apparat, der in einem weiten Feld kultureller Aktivitäten Verwendung fand.« Ebd., 41.

die apparative Wahrnehmung und die menschliche Wahrnehmung erweiterten einander wechselseitig.

Crary entlehnt seinen Metapher-Begriff von Karl Marx (1818–1883), demzufolge das Werkzeug »in einer metaphorischen Beziehung zu den angeborenen Fähigkeiten des menschlichen Subjekts«³⁸ stehe, was in dem Moment erkennbar würde, in dem die Maschine das Werkzeug ersetzte. Damit hebt Crary die Ähnlichkeitsbeziehung und den Ersatz als Hauptvermögen der Metapher hervor. Seinen Metonymie-Begriff leitet Crary von dem US-amerikanischen Historiker und Literaturwissenschaftler Hayden White her, der in seiner historiografischen Argumentation von »Teil-zu-Teil-Beziehungen« spricht, in denen »die Reduktion eines Teils auf den Status eines Aspekts oder einer Funktion eines anderen möglich ist«³⁹. In Anlehnung an die bildliche Sprache der Rhetorik unterscheidet White vier allgemeine Modi des historischen Bewusstseins – Metapher, Synekdoche, Metonymie und Ironie –, die als Standards und vorausweisende Strategien für die Geschichtsschreibung fungierten, die White als eine interpretierende, dichterische Praxis entwirft, die theoriegeleitet vorgehe und über eine gleichnis-hafte, sinnbildliche Sprache dem Verstand Erfahrungen zugänglich mache, die sich der unzweideutigen Beschreibung entziehen.⁴⁰ Im Kontext des poetologischen Ansatz, den White vertritt, und der sich der Geschichtsschreibung literaturtheoretisch nähert, impliziert ein metonymisches Vorgehen, das White als Methode bei Marx identifiziert, dass hinter der phänomenalen Welt handelnde Mächte angenommen werden, deren Aktivitäten sich im wahrnehmbaren Geschehen manifestieren.⁴¹ Dieser marxistische Grundgedanke taucht in Crarys These wieder auf, dass die Sehtechnologien im neunzehnten Jahrhundert an einer Disziplinierung und Verfügbarmachung des Subjekts für den Anschluss an Warenströme mitwirkten. Als eine Voraussetzung dafür gilt Crary die Zerlegung der Wahrnehmung in die Einzelsinne und die weitere Reduktion ganz besonders des Sehens auf einzelne Aspekte, die wiederum als stellvertretend für das Sehen als Ganzes genommen werden.

38 Ebd., 135.

39 Ebd. 180, Fußnote 232. Crary zitiert Hayden White, *Metahistory: Die historische Einbildungskraft im 19. Jahrhundert*, aus dem amerikanischen Englisch übersetzt von Peter Kohlhaas (Frankfurt am Main: Fischer, 1994), 52.

40 Siehe Hayden White, *Metahistory: The Historical Imagination in Nineteenth-Century Europe* (Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1973), x–xi und 34.

41 Siehe ebd., 35.

Als Beispiel führt Crary das Stereoskop an. Das Stereoskop reduzierte das menschliche Sehen auf seine binokulare Funktion und ahmte das binokulare Sehen nach: Zwei Bilder, die in voneinander abweichenden Positionen angeordnet waren, mussten vom Betrachter synthetisiert werden. Der Blick ins Stereoskop setzte die unmittelbare Nachbarschaft des menschlichen Betrachters und des optischen Geräts voraus. Der Betrachter musste sein Auge an das Instrument heranführen und die »Parallelbilder der flachen Stereokarten zu einer spannenden Tiefenwirkung«⁴² zusammenbringen, beziehungsweise im Falle des Wheatstone-Stereoskops (siehe Abb. 3.2) – einer raumfüllenden Installation – zwei Bilder, die an zwei gegenüberliegenden Wänden angebracht waren, in der Seherfahrung verschmelzen.

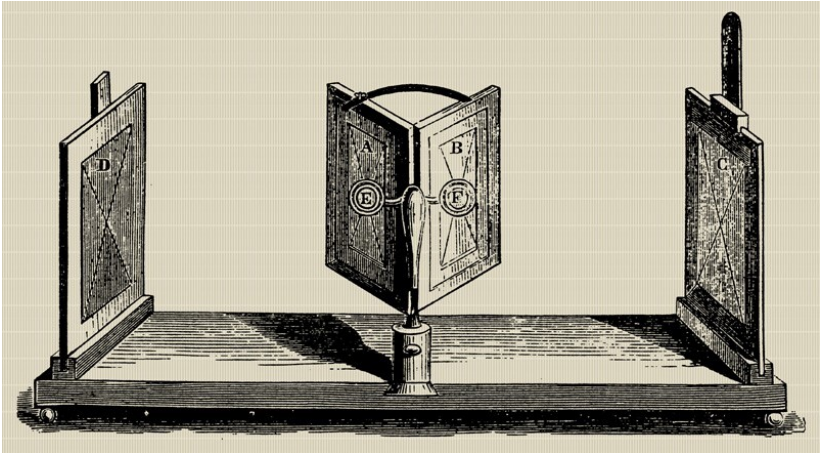


Abb. 3.2: Charles-Wheatstone-Stereoskop, Holzschnitt, ca. 1840 (unbekannter Autor).

Quelle: Wikimedia-Creative-Commons, zuletzt geändert am 20. März 2010, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Charles_Wheatstone-mirror_stereoscope_XIXc.jpg.

Neben den stereoskopischen und bewegtbildbasierten Unterhaltungsmedien ist ganz besonders die sinnesphysiologische Forschung des deutschen Mediziners, Physiologen und Naturforschers Johannes Müller (1801–1858), wegweisend für Crarys Überlegungen zum Wandel der Konzeption des Sehens in der ersten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts. Crary bezeichnet Müller, der die Reflexlehre weiter entwickelte und bei dem

⁴² Crary, *Techniken des Betrachters*, 136.

unter anderem der Physiologe und Physiker Hermann von Helmholtz und der Arzt und Pathologe Rudolf Virchow (1821–1902) studierten und in dessen Labor der Anatom und Physiologe Theodor Schwann (1810–1882), einer der beiden Mitbegründer der Zelltheorie, arbeitete, als den »herausragendsten Sehtheoretiker[...] der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts«⁴³ und diskutiert Müllers physiologische Einsichten ausführlich. Crary bezieht sich auf Müllers außerordentlich einflussreiches *Handbuch der Physiologie des Menschen*, dessen erste Bände 1833 erschienen, und auf dessen *Vergleichende Physiologie*⁴⁴. Crary stellt heraus, dass Müllers Werk ein mechanistisches Modell des Körpers und der Sinne beförderte und weist auf den merkwürdigen Widerspruch hin, dass Müller seinerseits den Vitalismus verteidigte:

»Auf Tausenden von Seiten entwarf Müller ein Bild vom menschlichen Körper als einem mannigfaltigen fabrikähnlichen Unternehmen, das aus verschiedenen Prozessen und Aktivitäten zusammengesetzt ist und von quantifizierbaren Mengen an Energie und Arbeit betrieben wird. Ironischerweise war dies einer der letzten Texte, der für den Vitalismus eintrat, obwohl er doch genau jene empirischen Informationen enthielt, die schließlich den Vitalismus als Idee hinfällig werden ließen.«⁴⁵

Ob es sich tatsächlich um einen der »der letzten Texte, der für den Vitalismus eintrat,« handelt, sei hier zunächst dahingestellt. Eine eingehendere Auseinandersetzung mit dem Vitalismus, der um 1900 und in der Gegenwart wieder aufkommt, folgt im fünften Kapitel.

Festzuhalten ist, dass die Sinnesphysiologie der 1820er- und 1830er-Jahre das Sehen als *körperlichen* Akt untersuchte und beabsichtigte, die Funktionsweise des Auges als eines innervierten und reizbaren Organs zu bestimmen. Damit löste die physiologische Forschung das Sehen nachhaltig vom Denken ab. Sehen und Bedeutung erschienen als vollkommen voneinander getrennte Bereiche. Die Physiologie um 1830 definierte »das Sehen als ein Vermögen, von Empfindungen berührt zu werden, die keine zwingende Verbindung zu einem Referenten besitzen und damit jedes kohärente Bedeutungssystem in Frage stellen«⁴⁶. Anders als diese pointierte konzeptuelle Trennung, die Crary identifiziert, vermuten lässt, spielte die Anschauung als Lehr- und Lernmethode oder, anders gesagt, als eine visuelle rhetorische

43 Ebd., 76.

44 Siehe Johannes Müller, *Zur Vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes des Menschen und der Thiere* (Leipzig: Cnobloch, 1826).

45 Crary, *Techniken des Betrachters*, 93–94.

46 Ebd., 78.

Form in der Physiologie des späten neunzehnten Jahrhunderts allerdings eine wichtige Rolle.⁴⁷ Dafür, wie sich die Konzeption des Sehens wandelte, könne die Rolle der Physiologie kaum überschätzt werden, so Crary. Diese Forschungsrichtung trieb die »Begeisterung für« und die »Verwunderung über den Körper« an, »der plötzlich wie ein neuer Kontinent erschien, den es zu vermessen, zu erforschen und zu beherrschen galt«⁴⁸. Die Physiologie vermaß den Körper, teilte ihn in fünf Sinne auf und ordnete den einzelnen Sinnen korrespondierende Nervenarten oder »Nervenenergien«⁴⁹ zu. Heraus trat »das Konzept eines Betrachters, für den das Sehen überhaupt keine Verbindung mehr zum Akt des Schauens hat«⁵⁰. Im Zuge der sinnesphysiologischen Erforschung des Sehvorgangs trat der begrifflich-intellektuelle Aspekt der Anschauung in den Hintergrund. Die Vorstellung vom Auge als optisches System löste die Vorstellung vom Sehen als eines Vorgangs, den elektrische Impulse steuerten, ab. Diese Veränderung der Sehkonzepte funktionalisierte Crary zufolge den Betrachter und reduzierte ihn auf seine Anschlussmöglichkeiten an Bild-, Waren- und Energieströme, auf deren unablässiges Fließen eine kapitalistische Wirtschafts- und Gesellschaftsordnung angewiesen war und ist.

Crarys Thesen zur Veränderung der skopischen Regime haben in der Medien-, Kultur- und Filmwissenschaft vielfach Beachtung gefunden. In der Forschung zur Geschichte der optischen Medien und der visuellen Wahr-

47 Siehe etwa Henning Schmidgen, »Pictures, Preparations, and Living Processes: The Production of Immediate Visual Perception (Anschauung) in Late-19th-Century Physiology«, *Journal of the History of Biology* 37, Nr. 3 (Herbst 2004), <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10739-004-2286-x>.

48 Ebd., 73. Dieses neu aufkommende, von kolonialen Fantasien befeuerte Interesse am Körper ist jedoch keinesfalls zu verwechseln mit dem Interesse am Leib, das ab den 1910er-Jahren die Phänomenologie motivieren sollte. Durchaus bemerkenswert sind allerdings auch die Überschneidungen zwischen den beiden Forschungsrichtungen: Der Psychologe Wilhelm Wundt, einer der Begründer der psychologischen Phänomenologie, arbeitete als Assistent bei Hermann von Helmholtz. Siehe Schmidgen, »Pictures, Preparations, and Living Processes«, 406.

49 Der Begriff der »Nervenenergien« kommt von Johannes Müller. Siehe Johannes Müller, »Von den Sinnesnerven«, in *Handbuch der Physiologie des Menschen*, Band 2.2, 752–761 (Coblenz: Holscher, 1838).

50 Crary, *Techniken des Betrachters*, 76. An anderer Stelle heißt es bei Crary: »Der Betrachter wird nun zu einem neutralen Leiter, einem Sender unter anderen, mit optimalen Zirkulations- und Austauschmöglichkeiten, ob es um Waren, um Energie, um Kapital, Bilder oder Informationen geht.« Ebd., 99.

nehmung wurde Crarys Studie überwiegend affirmativ rezipiert.⁵¹ In so verschiedenen Gebieten wie der Forschung zu den Bildkulturen der Medizin um 1900, der Forschung zur digitalen Ästhetik und der Dokumentarfilmforschung wurden Crarys Einsichten aufgegriffen.⁵²

Im Rahmen einer grundsätzlichen Würdigung von Crarys breit angelegter, sorgfältig recherchierter und pointiert argumentierender Untersuchung wurde auch auf einige kritische Punkte hingewiesen. Die britische Literatur- und Kulturwissenschaftlerin Isobel Armstrong etwa beanstandet Crarys monolithische Darstellung der Techniken ›des‹ Betrachters im neunzehnten Jahrhundert. Crarys Argumentation zu den skopischen Regimen ließe keinen Raum für miteinander im Konflikt stehende Erkenntnistheorien des Sehens, so Armstrong, und ließe zudem die vielfältigen Vermittlungsleistungen des Mikroskops als Sehprothese unberücksichtigt.⁵³ Armstrong gründet ihre Kritik auf ihre Fallstudien: Sie befasst sich eingehend mit der Rhetorik und Metaphorik in den Beschreibungen der Seherfahrung am Mikroskop bei dem britischen Hobby-Physiologen George Henry Lewes (1817–1878) und in den populärwissenschaftlichen Veröffentlichungen des britischen Naturforschers Philip Henry Gosse (1810–1888) zur Mikrobiologie und Mikroskopie aus der zweiten Hälfte der 1850er-Jahre. Lewes' und Gosses Begeisterung für die Transparenz der Seherfahrung am Mikroskop stellt Armstrong der ge-

51 Siehe beispielsweise Ulrike Hick, *Geschichte der optischen Medien* (München: Fink, 1999); Nicole Groenemeyer, *Optische Magie: Zur Geschichte der visuellen Medien in der Frühen Neuzeit* (Bielefeld: Transcript, 2004), 7–8 und 30–35; Petra Missomelius, »Zum Wandel der visuellen Wahrnehmung«, in »Technisierung des Blicks«, Hg. Angela Krewani, Themenheft, *Augen-Blick: Marburger Hefte zur Medienwissenschaft* 39 (2007): 14; Friedrich Kittler, *Optische Medien: Berliner Vorlesung 1999* (Berlin: Merve, 2011), 188. Auf den folgenden Seiten entwickelt Kittler eine affirmative Kritik an Crarys Thesen.

52 Siehe etwa Lisa Cartwright, *Screening the Body: Tracing Medicine's Visual Culture* (Minneapolis: University of Minnesota Press, 1995), 23, 84, 87; Sean Cubitt, *Digital Aesthetics* (London: Sage Publications, 1998), 30; Elizabeth Cowie, *Recording Reality, Desiring the Real* (Minneapolis: University of Minnesota Press, 2011), 9–10.

53 Siehe Isobel Armstrong, »The Microscope: Mediations of the Sub-Visible World«, in *Transactions and Encounters: Science and Culture in the Nineteenth Century*, Hg. Roger Luckhurst und Josephine McDonagh (Manchester: Manchester University Press, 2002), 35. Armstrong fordert die Untersuchung der ideologischen Implikationen der Mechanisierung des Sehens für die Herstellung von Wissen. Siehe Armstrong, »The Microscope«, 36. Diese Forderung haben Daston und Galison in ihrer Forschung zur »mechanischen Objektivität« eingelöst, einer Idealisierung des »Blindsehens ohne Vorurteile und ohne interpretierendes Denken« in den Naturwissenschaften des neunzehnten Jahrhunderts, die mit einer dezidierten Diskreditierung von Subjektivität und subjektiver Erfahrung verbunden war. Siehe Daston und Galison, *Objektivität*, 15.

genläufigen Position John Ruskins gegenüber, der scharfe Kritik an der technologisch herbeigeführten Verzerrung der Wahrnehmung übte, wie die Mikroskopie sie seines Erachtens bewirkte. Anhand ihrer drei Fallstudien weist Armstrong überzeugend auf, dass es ›den‹ Betrachter im neunzehnten Jahrhundert nicht gab. Vielmehr könnten sogar innerhalb der Praktiken der Mikroskopie in den 1850er-Jahren ganz unterschiedliche Positionen gegenüber der Modulation der Wahrnehmung durch das optische Instrument identifiziert werden.

Ähnlich wie Armstrong hat auch Jens Schröter in seiner Bewertung der Argumentation, die Crary in *Techniques of the Observer* entwickelt, angemerkt, dass Crary den Bruch betone und eine »problematische[...] Homogenisierung in der Darstellung sowohl des klassischen als auch des modernen Sehregimes«⁵⁴ betreibe. Schröter schlägt stattdessen ein Schichtmodell vor, das die Kontinuität von Sehmodellen berücksichtigt. Darauf, Crarys Argumentation auszudifferenzieren, wie Armstrong und Schröter anregen, zielt die nun folgende wahrnehmungs- und mediengeschichtliche Analyse der Konzeption des Sehens in der Mikroskopie.

3.2 Modalitäten des mikroskopischen Sehens

Das mikroskopische Sehen, so wird im Folgenden gezeigt werden, wandelte sich von einem Akt der instrumentell erweiterten Sehleistung eines menschlichen Beobachters in der frühen Mikroskopie zu einem Akt der technischen Aufzeichnung in der Mikrofotografie. Die Kombination aus Fotoapparat und Mikroskop in der Mikrofotografie der 1860er- und 1870er-Jahre übertraf nicht nur die menschliche Sehleistung bei weitem. Vielmehr drängte die Mikrofotografie den menschlichen Beobachter an den Rand und instituierte die mechanisch-optisch-chemische Aufzeichnungsapparatur als autoritatives Agens des wissenschaftlichen Sehens. Im zwanzigsten Jahrhundert durchlief das mikroskopische Sehen abermals eine grundlegende Transformation: Das mikroskopische Sehen entwickelte sich von einem Automatismus zu einer interpretierenden Handlung. Die Kombination des Mikroskops mit dem Computer setzte den menschlichen Beobachter für die

⁵⁴ Schröter, 3D, 15.

Interpretation frei und wies ihm den Platz des Interpretieren von visualisierten Messdaten zu.

In einem nächsten Schritt sollen nun die genannten Modalitäten des mikroskopischen Sehens konturiert und miteinander kontrastiert werden. Bevor das interpretierende Sehen in der gegenwärtigen Mikroskopie beschrieben wird, soll die Veränderung des mikroskopischen Sehens im neunzehnten Jahrhundert charakterisiert werden, und zwar vor dem Hintergrund der Vorstellungen über das Sehen, die sich in den Beschreibungen von Mikroskopikern in der Frühen Neuzeit finden. Für die vergleichende Betrachtung der Konzeptionen des mikroskopischen Sehens in der Frühen Neuzeit und in der zweiten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts wurden zwei Mikroskopiker ausgewählt, die den Wissenschaftsidealen ihrer Zeit folgten und deren Vorstellungen vom Sehen daher als exemplarisch gelten können: Robert Hooke, der englische Universalgelehrte, der den Weg für die wissenschaftliche Verwendung des Mikroskops bereitete, und Robert Koch, der deutsche Bakteriologe, der das Verfahren der Mikrofotografie in der Mikrobiologie etablierte.

3.2.1 Robert Hooke: Optische Medien als Sinneserweiterungen in der frühen Mikroskopie

Hooke richtete sich nach den »Methoden der neuen Wissenschaften«, wie sie der englische Philosoph, Jurist und Staatsmann Francis Bacon (1561–1626), der als Wegbereiter des Empirismus gilt, im Jahr 1620 im *Novum Organum*⁵⁵, dem »Neuen Werkzeug der Wissenschaften«, dargelegt hatte.⁵⁶ Selbst wenn sich in Hookes *Micrographia* keine direkte Bezugnahme auf Bacon findet, so kann doch davon ausgegangen werden, dass die empirische Methode, die Bacon formulierte, für Hooke maßgebend war. Seit 1662 bekleidete Hooke den Posten »Curator of Experiments« in der 1660 gegründeten Royal Society, der königlichen wissenschaftlichen Gesellschaft, die darauf abzielte, die experimentelle Wissenschaft, die Bacon propagiert hatte, umzusetzen und

55 Francis Bacon, *Novum Organum Scientiarum* (London: John Bill, 1620).

56 Siehe Angela Fischel, »Bildtechniken: Mikroskopie in populärwissenschaftlichen Büchern des 17. und 18. Jahrhunderts«, in *Sichtbarkeit und Medium: Austausch, Verknüpfung und Differenz naturwissenschaftlicher und ästhetischer Bildstrategien*, Hg. Anja Zimmermann (Hamburg: Hamburg University Press, 2005) 20.

für die wirtschaftliche und politische Entwicklung des englischen Königreichs einzusetzen.⁵⁷ Bacon zufolge, dessen Überlegungen als wegweisend für die empirischen Naturwissenschaften galten, wurden wissenschaftliche Erkenntnisse aus Beobachtungen gewonnen: Die Sinneswahrnehmung ermöglichte den Zugang zum Wissen.

Im Vorwort zur *Micrographia*, die 1665 und damit 55 Jahre nach dem *Siderius Nuncius* von Galilei erschien, verleiht Hooke der Hoffnung Ausdruck, dass die Unzulänglichkeit der menschlichen Sinne von optischen Instrumenten ausgeglichen, oder, wie er sich ausdrückt, »repariert« werden könne, und konstatiert, dass dies bereits seinerzeit mittels optischer Linsen gelungen sei. Hooke schreibt:

»[I]t is by the benefit of Senses that we receive all our Skill in the works of Nature, so they also may be wonderfully benefited by it, and may be guided to an easier and more exact performance of their Offices; 'is not unlikely, but that we may find out wherein our Senses are deficient, and as easily find ways of repairing them.«⁵⁸

Hookes Ansicht nach funktionierten die Sinne optischen Instrumenten vergleichbar, jedoch weniger gut, und müssten mithilfe künstlicher Organe erweitert werden. Hooke formuliert diese Überlegung folgendermaßen: »The next care to be taken, in respect of the Senses, is a supplying of their infirmities with Instruments, and, as it were, the adding of artificial Organs to the natural [...].«⁵⁹ Weiter heißt es:

»[T]his in one of them has been of late years accomplish [sic] with prodigious benefit to all sorts of useful knowledge, by the invention of Optical Glasses. By the means of Telescopes, there is nothing so far distant but may be represented to our view; and by the help of Mi-

57 Siehe The Royal Society, »Robert Hooke«, *The Royal Society: Science in the Making*, zuletzt geprüft: 10.02.2021, <https://makingscience.royalsociety.org/s/rs/people/fst00009590>, und Noel Fermor, »The Royal Society of London for Improving Natural Knowledge«, *Baconia* (Februar 1961), <http://www.sirbacon.org/royalsociety.htm>. Zum Einfluss der Royal Society auf die Darstellungsformen in der *Micrographia* siehe John T. Harwood, »Rhetorics and Graphics in *Micrographia*«, in *Robert Hooke. New Studies*, Hg. Michael Hunter und Simon Schaffer (London: Boydell und Brewer, 1989). Zu den Arbeitsweisen der Royal Society, der Popularisierung von Wissen in ihrem Umfeld und zur Rolle, die Hooke, das von ihm konstruierte Mikroskop und die *Micrographia* dabei spielten, siehe Steven Shapin und Simon Schaffer, *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life*, einschließlich einer Übersetzung von Thomas Hobbes' *Dialogus Physicus de Natura Aeris* von Simon Schaffer (Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1985).

58 Robert Hooke, *Micrographia, or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses with Observations and Inquiries Thereupon* (London: Jo. Martyn und Ja. Allestry, Drucker der Royal Society, 1665), »The Preface«, sig b4.

59 Ebd., sig a3.

croscopes, there is nothing so small, as to escape our inquiry; hence there is a new visible World discovered to the understanding.«⁶⁰

Als Beleg bietet er am Ende des Vorworts eine Zeichnung an, die das Mikroskop darstellt (siehe Abb. 3.3), vermittels dessen er seine Beobachtungen von Nadeln, Rasierklingen, Kork und Insekten anstellte und deren Ergebnisse er auf den folgenden Seiten in Form von Zeichnungen wiedergibt und im nachfolgenden Text diskutiert.

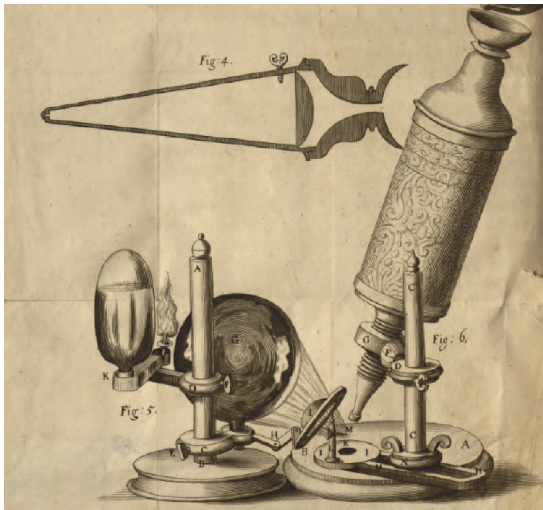


Abb. 3.3: Das Mikroskop als künstliches Organ und als Sinneserweiterung bei Hooke, 1665

Quelle: Robert Hooke, *Micrographia, or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses with Observations and Inquiries Thereupon* (London: Jo. Martyn und Ja. Allestry, Drucker der Royal Society, 1665).

In seinen Ausführungen zur Mikroskopie und Teleskopie benennt Hooke ein Mischverhältnis, in dem sowohl eine metaphorische als auch eine metonymische Beziehung zwischen den Sinnen und den Apparaten aufscheint. So bezeichnet er die optischen Instrumente metaphorisch als »künstliche Organe« und artikuliert damit umgekehrt auch ein technisiertes Verständnis der Sinne, wenn er davon spricht, die Sinne könnten »repariert« werden.

⁶⁰ Ebd., sig a4.

Weiterhin kommt in Hookes Formulierungen bereits die Vorstellung von optischen Medien als Sinneserweiterungen zum Ausdruck, wenn er sagt, die künstlichen Organe sollten an die natürlichen Organe angefügt werden. Dieser Gedanke, den Hooke bereits im Jahr 1665 äußerte, klingt erstaunlich modern, wenn wir etwa an die These von Medien als Ausweitungen der menschlichen Sinne denken, die der kanadische Medientheoretiker Marshall McLuhan fast dreihundert Jahre später, im Jahr 1964, in *Understanding Media* ausarbeiten sollte.⁶¹

Hookes Äußerungen verdeutlichen, dass bereits in der Mikroskopie in der Frühen Neuzeit die Vorstellung einer technischen Erweiterung der Sinne existierte. Anders als die rund zweihundert Jahre später aufkommende Sinnesphysiologie nahm die frühe Mikroskopie das Auge nicht zum Gegenstand der Forschung, sondern setzte es zusammen mit dem Mikroskop vielmehr als ein Medium ein, um einen Zugang zum Mikrokosmos zu erlangen. Zugleich wurde das Auge – ähnlich wie das Fernrohr bei Galilei – zu einem Gegenstand der Theorie. Ausgehend von der Praxis der Seherfahrung, von den Seheindrücken, die sie am Mikroskop gewannen, entwickelten frühe Mikroskopiker wie Hooke ihre Reflexionen über das Auge und den mit diesem Organ verbundenen Zugang zur Mikrowelt.

3.2.2 Robert Koch: Die »künstliche Retina« in der Mikrofotografie

Der Bakteriologe Robert Koch orientierte sich an dem Ideal der mechanischen Objektivität, das menschliche Sinneswahrnehmungen und »subjektiv gefärbte Anschauungen«⁶² als Störfaktoren erachtete. Die Praxis der Mikro-

61 Siehe Marshall McLuhan, *Understanding Media: The Extensions of Man* (New York: Signet Books, 1964).

62 Daston und Galison, *Objektivität*, 173. Daston und Galison zitieren hier Robert Koch, »Zur Untersuchung von pathogenen Organismen«, in: *Mittheilungen aus dem Kaiserlichen Gesundheitsamte*, Hg. Dr. Struck, erster Band (Berlin: Norddeutsche Buchdruckerei und Verlagsanstalt, 1881), 10, und verweisen auf die Studie von Thomas Schlich zur Mikrofotografie Robert Kochs. Siehe Thomas Schlich, »Wichtiger als der Gegenstand selbst – Die Bedeutung des fotografischen Bildes in der Begründung der bakteriologischen Krankheitsauffassung durch Robert Koch«, in *Neue Wege in der Seuchengeschichte*, Hg. Martin Dinges und Thomas Schlich (Stuttgart: Steiner, 1995), 143–144. Siehe auch Daston und Galison, »The Image of Objectivity«, in »Seeing Science«, Themenheft, *Representations* 40 (Herbst 1992): 82.

fotografie⁶³, die Koch in den 1860er- und 1870er-Jahren vorantrieb, wurde von einem an die Instrumente geknüpften Objektivitätsversprechen getragen, das dem menschlichen Sehvermögen allenfalls eine Randposition einräumte. Dem im neunzehnten Jahrhundert herrschenden wissenschaftlichen Ideal der mechanischen Objektivität lag der Glaube an die überlegene Sensibilität, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der technischen Instrumente gegenüber dem menschlichen Beobachter zugrunde. Dies wird an Kochs These aus dem Jahr 1877 zum Vermögen der fotografischen Platte der mikrofotografischen Apparatur unmissverständlich deutlich. Koch schrieb: »[Ich möchte] darauf aufmerksam machen, dass die *photographische Platte überhaupt das mikroskopische Bild besser oder vielmehr sicherer wiedergibt* [sic], als es die Netzhaut des Auges zu empfinden vermag.«⁶⁴ Er führt aus:

»Die lichtempfindliche Platte ist gewissermassen ein Auge, welches nicht durch helles Licht geblendet wird, welches nicht bei der nachhaltenden Unterscheidung der geringsten Lichtunterschiede ermüdet und das nicht durch Glaskörpertrübungen oder andere Fehler behindert wird. Oft habe ich auf dem Negativ, wenn das Bild nur scharf eingestellt gewesen war, feine Objecte [sic], zum Beispiel feinste Geiselfäden gefunden, welche ich nachträglich nur mit äusserster Mühe und unter den günstigsten Beleuchtungsverhältnissen im Mikroskop erblicken konnte.«⁶⁵

Koch war bemüht, die überlegene Schärfe und Präzision des künstlichen Sehinstruments mittels seines eigenen Blicks ins Mikroskop einzuholen, allerdings lediglich mit mäßigem Erfolg. Die überlegene Sehleistung des Instruments veranlasste den Experimentator, das Defizit der menschlichen Sinnesleistung einzugestehen und bewog ihn dazu, die Unerreichbarkeit der apparativen Leistung zu loben. Die offenkundige Überlegenheit der Technik der Fotografie gegenüber dem menschlichen Auge hinsichtlich der zuverlässigen Wahrnehmung mikroskopischer Phänomene betonte Koch im Jahr 1877 in eben jenem Text, »Verfahren zur Untersuchung, zum Konservieren und Photographieren der Bakterien«, den er zu seiner weltweit ersten Veröffentlichung von Fotogrammen von Bakterien verfasste, das heißt, von fotografischen Aufnahmen, die Bakterien ins Bild setzten.

63 Das im Verlauf des neunzehnten Jahrhunderts erheblich verbesserte, zusammengesetzte Mikroskop und die ab Mitte des neunzehnten Jahrhunderts verbreitete Technik der Mikrofotografie erweiterten den Bereich des Sichtbaren bis hin zu Vergrößerungen im fünfstelligen Bereich.

64 Robert Koch, »Verfahren zur Untersuchung, zum Konservieren und Photographieren der Bakterien«, In *Gesammelte Werke von Robert Koch*, hg. v. J. Schwalbe (Berlin: Robert-Koch-Institut, 2010), <http://dx.doi.org/10.25646/5065>, 33, Hervorhebung im Original.

65 Ebd.

Erzeugt wurden die Fotogramme vermittels einer apparativen Anordnung, die ein Mikroskop mit einem Fotoapparat kombinierte (siehe Abb. 3.4).

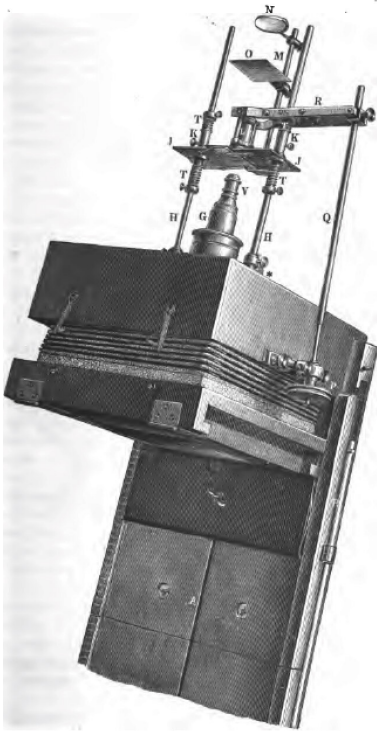


Abb. 3.4: Beneckes fotografischer Apparat, 1868
Eine Kombination aus einfachem Fotoapparat
und Mikroskop, wie auch Koch sie in ähnlicher
Form verwendete

Quelle: Berthold Benecke, *Die Photographie als Hilfsmittel mikroskopischer Forschung* (Braunschweig: Friedrich Vieweg, 1868).

In der Mikrofotografie der 1860er- und 1870er-Jahre fand die materialistische Konzeption des Sehens, wie sie die Sinnesphysiologie in den 1820er- und 1830er-Jahren anstieß, paradigmatisch ihre medientechnische Materialisierung. In Kochs Interpretation geriet der zentrale Bestandteil der mikrofotografischen Apparatur, die fotografische Platte, zu einer »künstliche[n]

Retina«⁶⁶, wie die deutsche Kunsthistorikerin Franziska Brons ausführt. In diesem Text verankert sie die Mikrofotografie Robert Kochs im Retina-Diskurs⁶⁷, wie er seinerzeit in der Sinnesphysiologie geführt wurde. Brons formuliert dieses, wie sie es nennt, »Versprechen der Retina« folgendermaßen:

»Die mikrofotografische Apparatur vermochte Beobachtungs- und Aufzeichnungsinstrument in einer medialen Instanz zu bündeln und versprach nicht nur, die Leistungsfähigkeit der zeichnenden Hand, sondern auch die des menschlichen Auges bei weitem zu übertreffen.«⁶⁸

Den Vergleich der fotografischen Apparatur mit dem menschlichen Auge bei Robert Koch überführt Brons eines »Reduktionismus [...], der entweder die Spezifika des Sehvorgangs außer Acht lassen oder die Aufzeichnungsqualität optischer Instrumente überbewerten muss«⁶⁹. Brons resümiert: »Mit dem Netzhaut-Vergleich hatte Koch das Medium der Fotografie naturalisiert und das Naturalisierte gleichzeitig als der menschlichen Natur überlegen dargestellt. Der Topos des bewaffneten Auges war damit aufgelöst, die vermittelnde Instanz ausgeschaltet worden [...].«⁷⁰

Die fotografische Platte »sieht« besser und zuverlässiger als die menschliche Retina und ersetzt das menschliche Auge. Das der Apparatur attestierte überlegene Sehvermögen reizten Mikrobiologen in den 1860er- und 1870er-Jahren aus: Der Anatom Joseph von Gerlach (1820–1896), ein Vorreiter der Mikrofotografie, wandte ein Verfahren an, mit dem er eine bis zu 30.000fache Vergrößerung erzielen konnte.⁷¹ Robert Koch lichtete das Negativ zwölf-

66 Franziska Brons, »Das Versprechen der Retina: Zur Mikrofotografie Robert Kochs«, in *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 2,2: *Instrumente des Sehens*, Hg. Angela Fischel (Berlin: Akademie Verlag, 2004), 26.

67 Brons attestiert eine »euphorische[...] Verwendung der Retina-Metapher im wissenschaftlichen Diskurs« der 1850er- bis 1870er-Jahre. »Das Versprechen der Retina«, so Brons, »war die automatische Aufzeichnung. Frei von jeglicher menschlichen Intervention brannten sich optische Phänomene in eine natürliche Membran. Das Selbstporträt der Natur schien apparativ gewährleistet.« Ebd., 25. Brons bezieht sich hier auf Robert Kochs Lob der Überlegenheit des Seh-, Aufzeichnungs- und Fixierungsvermögens der fotografischen Platte gegenüber dem Auge des Beobachters am Mikroskop. Darüber hinaus rekurriert Brons auf den Vergleich des Auges mit einer Camera obscura, wie ihn Helmholtz im Jahr 1865 anstellte, und mit einer fotografischen Werkstatt, wie er sich bei einem anderen deutschen Sinnesphysiologen, Friedrich Wilhelm Kühne, noch im Jahr 1877 findet.

68 Ebd., 19.

69 Ebd., 23.

70 Ebd., 26.

71 Bis zu 30.000fache Vergrößerungen gelangen Gerlach im Jahr 1863 allerdings nicht vermittels der einfachen mikrofotografischen Aufnahme. Vielmehr legte Gerlach die Mikrofotografien, die

einhalb Mal ab, um eine tausendfache Vergrößerung zu erzielen.⁷² Er nutzte »den ›optischen Mehrwert‹ der fotografischen Aufzeichnung zur »Sichtbarmachung des bis dato unsichtbar gebliebenen«⁷³. Was als Mehrwert der fotochemischen Registrierung des optisch Vergrößerten gilt – die Technik der Mikrofotografie macht »mehr« sichtbar als der Forscher und das Mikroskop zusammen es vermögen – schlägt auf der Seite der Verantwortlichkeit des menschlichen Beobachters allerdings negativ zu Buche. Für ihn bleibt lediglich die Einsicht in die Unzulänglichkeit seiner eigenen Sinnesleistung, die von der Apparatur deutlich übertroffen wird.

Die bislang herausgearbeiteten Antworten auf die Frage, wie sich die Objektivitätsideale, die Mikroskopiepraktiken und die Vorstellungen wandelten, die sich Mikroskopiker*innen von den Sinnesorganen und von deren Verhältnis zu den Instrumenten machten, legen es nahe, die von Crayry vorgeschlagene Chronologie zu nuancieren und anzuerkennen, dass mehrere Stränge in der Entwicklung von Sehmodalitäten und Sehkonzeptionen parallel zueinander verliefen. Während Hooke bereits 1665 das Mikroskop als eine Erweiterung des menschlichen Sehvermögens begriff, artikulierte Koch noch in der zweiten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts die Vorstellung, die fotografische Platte ersetze die menschliche Netzhaut. Diese Funktionsübertragung vom Bereich der Sinnesphysiologie des Menschen in den Bereich der Fotochemie war allerdings an die Reduktion des Auges auf die Netzhaut gebunden, die als eine Funktion der Apparatur rekonzeptualisiert

er erstellte, mehrfach erneut unter das Mikroskop und fotografierte wiederholt die in neuerlicher Vergrößerung sichtbar werdenden Strukturen. Siehe Joseph von Gerlach, *Die Photographie als Hilfsmittel mikroskopischer Forschung* (Leipzig: Engelmann, 1863), 11. Der Philosoph, Biologe und Wissenschaftshistoriker Olaf Breidbach bewertet den erkenntnistheoretischen Status der Mikrofotografien bei Gerlach und in weiteren Handbüchern zur Mikrofotografie der 1860er-Jahre und stellt heraus, dass den Fotogrammen nicht der Status von *Dokumenten*, sondern vielmehr der Status von *Arbeitsobjekten* zukam, die ihrerseits zum Gegenstand der mikromorphologischen Analyse wurden. Siehe Olaf Breidbach, »Representation of the Microcosm – The Claim for Objectivity in 19th Century Scientific Microphotography«, *Journal of the History of Biology* 35, Nr. 2 (2002): 232, <https://doi.org/10.1023/A:1016044427910>. Zum erkenntnistheoretischen Status der Fotogramme als Dokumente bei Robert Koch siehe Schlich, »Wichtiger als der Gegenstand selbst«. Siehe dazu auch Stefanie Dufhues, *Fotografie konstruierter Sichtbarkeiten: Bildpraxis der Mikrofotografie von den ersten Versuchen bis ins frühe 20. Jahrhundert* (München: Fink, 2020), 127–132.

72 Siehe Brons, »Das Versprechen der Retina«, 26 und 27.

73 Ebd., 22. Brons verwendet hier den Begriff des »optischen Mehrwerts«, den Peter Geimer in die Diskussion eingeführt hat. Siehe Peter Geimer, »Blow up«, in »*Der liebe Gott steckt im Detail*«: *Mikrostrukturen des Wissens*, Hg. Wolfgang Schäffner, Sigrid Weigel und Thomas Macho (München: Fink, 2003), 187.

wurde. Sowohl Hooke als auch Koch konzipierten das Sehen als eine isolierte Sinnestätigkeit, die getrennt von den anderen Sinnen und vom Denken abläuft. Ein genuin auf Wechselseitigkeit gründendes Verhältnis zwischen dem denkenden Auge und der rechnenden Apparatur beginnt sich in der Mikroskopie erst im zwanzigsten Jahrhundert abzuzeichnen und lässt sich besonders pointiert anhand der visuellen Praktiken aufweisen, die mit den gegenwärtigen bildgebenden Verfahren verbunden sind. Das bewusste, geschulte und interpretierende Sehen wird in der Gegenwart als ein Vermögen konzipiert, das unauflöslich mit anderen Sinneswahrnehmungen verbunden und nicht von kognitiven Aktivitäten abzulösen ist.

3.3 Daten-Sehen

Zellbiolog*innen, die heutzutage mit Verfahren zur digitalen Bildgebung arbeiten, sehen anders als die Mikrofotografen im späten achtzehnten Jahrhundert. Während Mikrofotografen die Wahrnehmungsleistung an die Apparatur delegierten, setzen Zellbiolog*innen heute ihr geschultes Urteilsvermögen ein, um die Strukturen und Dynamik, die in den instrumentell erzeugten Bildern sichtbar werden, zu *interpretieren*. Diese interpretierende Modalität des Sehens, die in der gegenwärtigen computergestützten Mikroskopiepraxis kultiviert wird, soll mit dem hier eingeführten Begriff des Daten-Sehens gefasst werden. Dieser Begriff bezeichnet eine spezifische Form des mikroskopischen Sehens, das die menschliche Seh- und Interpretationsleistungen und die Mess-, Aufzeichnungs-, und Umwandlungsleistungen der Apparatur in einem Kontiguitätsverhältnis anordnet.

Digitale Daten lassen sich, streng genommen, nicht sehen. Ein Problem großer Datenmengen ist es bekanntlich, dass sie sich dem unvermittelten Zugriff durch die menschliche Wahrnehmung entziehen. Für die Analyse und Auswertung ungreifbarer Daten bedarf es komplexer Transformationsprozesse, die in anschaulichen Visualisierungen resultieren. Auf die Prozesse der Bilderzeugung, die aus Messdaten Bilder machen, und die damit verbundene Bedeutungserzeugung, die aus dem Abgleich von Datenbildern und Hypothesen resultiert, verweist der Begriff des Daten-Sehens.

Anders als das maschinelle Sehen, wie es die Computerwissenschaft seit ungefähr 1980 konzipiert und erprobt, geht es beim Daten-Sehen nicht um die bildvermittelte Lokalisierung von Objekten im Raum. Das compu-

terwissenschaftliche Standardwerk zum Sehen aus dem Jahr 1982, das die Ergebnisse der Studien zur menschlichen Wahrnehmung präsentiert, die am Artificial Intelligence Laboratory am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in den 1970er-Jahren durchgeführt wurden, definiert Sehen als »the process of discovering from images what is present in the world, and where it is«⁷⁴. Die Computerwissenschaft versteht Sehen als *Informationsverarbeitung*, als einen Prozess, der von bildlichen Darstellungen zu mentalen Repräsentationen führt.⁷⁵

Während die computerwissenschaftliche Forschung zum Sehen in den 1970er-Jahren am MIT ein Verständnis des menschlichen Sehens hervorbrachte, das sich an Einsichten zum maschinellen Sehen orientierte, zielte die natur- und ingenieurwissenschaftliche Forschung in den frühen 1990er-Jahren in Deutschland darauf ab, das informationsverarbeitende Vermögen und die Erkenntnisleistungen natürlicher Systeme nachzubauen. Dieses Ziel verfolgt sie in dem Wissen, »daß das biologische Vorbild nicht imitiert werden kann: es geht darum, lediglich einen Teil seiner Funktionen nachzubilden und hoffentlich aus einigen der von der Natur eingesetzten Methoden zu lernen«⁷⁶, wie es im 1995 erschienenen Handbuch *Technische Bildverarbeitung – Maschinelles Sehen* heißt. Ähnlich wie die frühere Forschung am MIT verstand auch die deutsche Forschung das maschinelle Sehen als eine Form der technischen Bildverarbeitung. Das Verständnis von Erkenntnis bezieht sich in diesem Feld recht stark eingeschränkt auf die Objekterkennung durch Nachbarschaft sowie auf die Identifikation von Kanten, Texturen, Farben, Abständen und Bewegungen.⁷⁷ Die Identifikation dieser Strukturen und der Abgleich »mit bekannten, d.h. irgendwann vorher gelernten Mustern«⁷⁸ ermöglicht, dass die Maschine Muster erkennt.

Entscheidend für das hier entwickelte Argument ist zum Ersten, dass die Entwickler »sehender Maschinen« in den Ingenieurwissenschaften zurückkehren zu der Vorstellung, das Auge könne technisch nachgebaut werden,

74 David Marr, *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information* (Cambridge, Massachusetts und London, England: MIT Press, 2010), 3.

75 Siehe ebd. Für eine Kritik der Position von Marr aus medienwissenschaftlicher Perspektive siehe Lev Manovich, »The Engineering of Vision from Constructivism to Computers«, Dissertationschrift, University of Rochester, 1993, o.S.

76 Robert Massen, »Sehen, Erkennen, Entscheiden«, in *Technische Bildverarbeitung – Maschinelles Sehen*, Hg. Bernd Jähne et al. (Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1995), 2.

77 Siehe Massen, »Sehen, Erkennen, Entscheiden«, 19.

78 Ebd., 31.

und die Natur könne, wenn auch nicht durch Technik erschöpfend imitiert, so doch im Nachbau zumindest approximiert werden. Diese Vorbildfunktion der Natur, die häufig mit der Vorstellung der menschlichen Höherentwicklung verbunden wird, lässt sich an Formulierungen ablesen, die sich in neueren Veröffentlichungen zum maschinellen Sehen im Kontext des autonomen Fahrens finden. So heißt es etwa in einem Kapitel zum maschinellen Sehen in einem ingenieurwissenschaftlichen Handbuch zu Fahrerassistenzsystemen aus dem Jahr 2015:

»Während höhere Lebewesen auch zuvor unbekannte Umgebungen nahezu ausnahmslos und mit verblüffender Leichtigkeit visuell wahrnehmen und diese Wahrnehmung erfolgreich zur Navigation nutzen, ist das Wahrnehmungsvermögen maschineller Bildsensoren bislang auf eng begrenzte Domänen beschränkt. Selbst mit dem dadurch formulierbaren Vorwissen ist maschinelles Sehen der menschlichen Leistungsfähigkeit derzeit noch weit unterlegen.«⁷⁹

Zum Zweiten ist die Beobachtung entscheidend, dass sich in der Forschung und Entwicklung zum maschinellen Sehen die Vorstellung vom menschlichen Sehen als einer weitgehend von den anderen Sinnen getrennten und von der Verstandestätigkeit isolierten Aktivität hartnäckig hält. Diese Vorstellung unterläuft das genannte Zitat allerdings, da dort neben dem Vergleich menschlichen und maschinellen Vermögens die enge Verbindung von Sensorik und Motorik zum Ausdruck kommt, wenn von der entscheidenden Rolle des Sehens für die räumliche Orientierung und die Bewegung im Raum gesprochen wird. In anderen Kontexten wird das Sehen jedoch weder im Zusammenspiel mit anderen Sinnesaktivitäten konzipiert, noch in einem Leib verortet. Allenfalls attestiert man dem Sehen eine Verbindung zum Gehirn, dessen Funktionen allerdings nicht genauer erklärt werden. So zeigt etwa ein Schaubild im bereits genannten Handbuch *Technische Bildverarbeitung – Maschinelles Sehen* eine schematische Zeichnung des Auges, die mit der Darstellung des Sehnervs endet und über einen Pfeil weiter auf das »Gehirn« verweist (siehe Abb. 3.5).⁸⁰

Doch besteht auch hier ein Bewusstsein für die multimodale Wahrnehmung, die sogar als Herausforderung für den technischen Nachbau erachtet wird. So heißt es weiter unten im begleitenden Text:

79 Christoph Stiller, Alexander Bachmann und Andreas Geiger, »Maschinelles Sehen«, in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, Hg. Herrmann Winner et al. (Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015), 370.
80 Siehe Massen, »Sehen, Erkennen, Entscheiden«, 8.

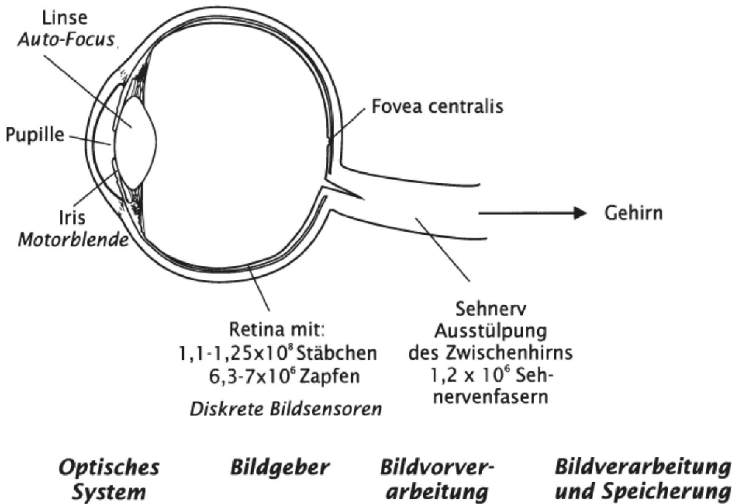


Abb. 3.5: »Das biologische Sehsystem des Menschen und die technischen Imitate«

Quelle: Bernd Jähne et al. (Hg.), *Technische Bildverarbeitung – Maschinelles Sehen* (Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1995), 8.

»Es ist auch fraglich, ob bei einem so multisensoriell ausgelegten System wie dem Menschen eine Trennung der Informationsverarbeitung nach Informationstypen (auditiv, taktil, visuell, olfaktorisch) sinnvoll ist oder ob nicht eine globale, einheitliche Form der Abspeicherung und der Verarbeitung gewählt wurde. Die physiologischen Daten der einzelnen Hirnregionen deuten darauf hin. Neueste Entwicklungen sog. »multisensorieller« Kameras, welche zu jedem Bildpunkt mehrere physikalisch verschiedene Signale liefern, zeigen in die gleiche Richtung.«⁸¹

Und zum Dritten wird das Sehen als losgelöst vom Interpretieren konzipiert. Damit setzen sich die ingenieurwissenschaftlichen Ansätze zum maschinellen Sehen deutlich ab von der langen Tradition des europäischen Denkens, die das Sehen und die Erkenntnis aufs Engste miteinander verbindet, wie sie in den Eingangspassagen dieses Kapitels skizziert wurde. Die Wahrnehmungspraxis der Bilder, die mittels bildgebender Verfahren erzeugt werden, schließt jedoch an diese Tradition an. Im Unterschied zum maschinellen Sehen fungiert der Detektor im Mikroskop-System als ein Instrument zur Erhebung von Messdaten, die auf die *Interpretation* durch menschliche Beob-

⁸¹ Ebd., 18.

achtende angewiesen sind. In der Wahrnehmung der Lebendzellfilme, so soll in der nachfolgenden Analyse aufgewiesen werden, verbinden sich Sehen und Denken über das Gestalterkennen miteinander, eine visuell-kognitive Fähigkeit, die in der zellbiologischen Forschungspraxis als unerlässlich gilt und die Voraussetzung für die Interpretation bildet.

3.3.1 »Anschauliches Denken« und »geschultes Urteil«

Rudolf Arnheim, der sich aus psychologischer Perspektive eingehend mit der Wahrnehmung visueller Darstellungsformen auseinandergesetzt hat, hat diese Fähigkeit bereits im Jahr 1972 mit dem Begriff des ›anschaulichen Denkens‹ belegt. Im Begriff des anschaulichen Denkens verdichtete Arnheim, der die Gestaltpsychologie für ästhetische Fragen geöffnet hat, den unauflöselichen Zusammenschluss von Sehen und Denken, allerdings ohne die sich im Anschauungsbegriff manifestierende Hierarchie zwischen der Sinnes- und der Geistesschau fortzuschreiben.

Arnheim leitet seine Überlegungen zum anschaulichen Denken aus den Betrachtungen zum Verhältnis von Sehen und Denken her, wie sie in den verschiedenen Strömungen der Philosophie der klassischen Antike und von den englischen, schottischen und irischen Sensualisten angestellt und diskutiert wurden, und berücksichtigt Konzeptionen des Sehens, wie sie die Sinnesphysiologie im neunzehnten Jahrhundert und später die Psychologie und die Kunstgeschichte entwickelten. Wenn Arnheim schreibt: »Anschauen ist anschauliches Denken«⁸² – im englischsprachigen Original heißt es: »Visual perception is visual thinking«⁸³ –, so formuliert er in diesen Worten den Gedanken, dass die visuelle Wahrnehmung, das Sehen, das sich auf Objekte in der Welt richtet, und die geistige Tätigkeit, das Denken, das mit abstrakten Begriffen arbeitet, als unauflöselich miteinander verbundene Fähigkeiten gelten müssen. Erkennen ist für Arnheim nichts rein Kognitives, sondern umfasst auch die Sinneswahrnehmung, das Gedächtnis und das Lernen.⁸⁴ Das Sehen konzipiert er als einen aktiven Prozess des Auffassens, dessen Ergebnis sich im beständigen Abgleich mit dem Gesehenen fortwährend neu formiert, neu justiert, neu kalibriert, verfeinert und einem umfassenderen

82 Arnheim, *Anschauliches Denken*, 24.

83 Arnheim, *Visual Thinking*, 14.

84 Siehe Arnheim, *Anschauliches Denken*, 24.

Verständnis zustrebt. Die Aufmerksamkeit lenkt den Blick und bestimmt, worauf sich der Fokus der Wahrnehmung richtet. Das Sehen vermag zwischen einer weit geöffneten, umfassenden Schau und einer pointiert fokussierten Sicht zu alternieren.⁸⁵

Arnheims Beschreibung des Sehens trifft auf die Interpretationsleistung zu, die Zellforscher*innen erbringen, wenn sie das Bild eines mikroskopischen Phänomens deuten, das über den Computerbildschirm ausgegeben wird. Im *Gestalterkennen* und in der Interpretation, die mit jenem Wahrnehmungsprozess verflochten ist, in dem sich ein mentales Bild des Untersuchungsgegenstands aus verschiedenen Ansichten, Einstellungsgrößen und Darstellungsformen zusammenfügt, scheint das spezifisch Menschliche der Sehleistung in der gegenwärtigen Mikroskopie zu liegen.

Wie das Daten-Sehen als anschauliches Denken praktiziert wird, soll im Folgenden an einem Beispiel aus der gegenwärtigen Lebendzellmikroskopie aufgezeigt werden. Die technische Anordnung der Geräte und die vielfältigen automatisierten Umwandlungsschritte, die von den lebenden Zellen zu den sichtbaren Bildern führen, wurden im ersten und zweiten Kapitel bereits eingehend beschrieben und ausführlich diskutiert. Die folgende Analyse verschiebt den Fokus von der Bildherstellung auf die Bildwahrnehmung und orientiert sich an den Überlegungen zum anschaulichen Denken, wie Arnheim sie in den 1960er-Jahren anhand psychologischer Experimente zur visuellen Wahrnehmung von Zeichnungen, schematischen Darstellungen und abstrakten Schaubildern entwickelte. Wenngleich Arnheim vor allem an Fragen der Kunstbetrachtung interessiert war, so erschließen seine wahrnehmungstheoretischen Überlegungen, wie im Folgenden deutlich werden wird, auch das Problem der Gestalterkennung in den Darstellungsformen, die mithilfe bildgebender Verfahren in den Naturwissenschaften erzeugt und im Kontext von Fachpublikationen und wissenschaftlichen Vorträgen als Anschauungsobjekte gebraucht werden.

Die Zellbiologin Jennifer Lippincott-Schwartz, deren Team zum Zellstoffwechsel forscht, veranschaulicht in der Schlüsselsequenz in der Mitte des zweiten Teils ihres Videovortrags mit dem Titel »Breakthroughs in Intracellular Fluorescent Imaging« ihre Hypothese zum Aufbau und Zerfall des Golgi-Apparates⁸⁶, einer zellulären Feinstruktur, die am Zellstoffwechsel

85 Siehe ebd., 25.

86 Siehe Jennifer Lippincott-Schwartz, »Breakthroughs in Intracellular Fluorescent Imaging, Part 2: Using Photobleaching and Photoactivation to Study the Endomembrane System«, aufgezeich-

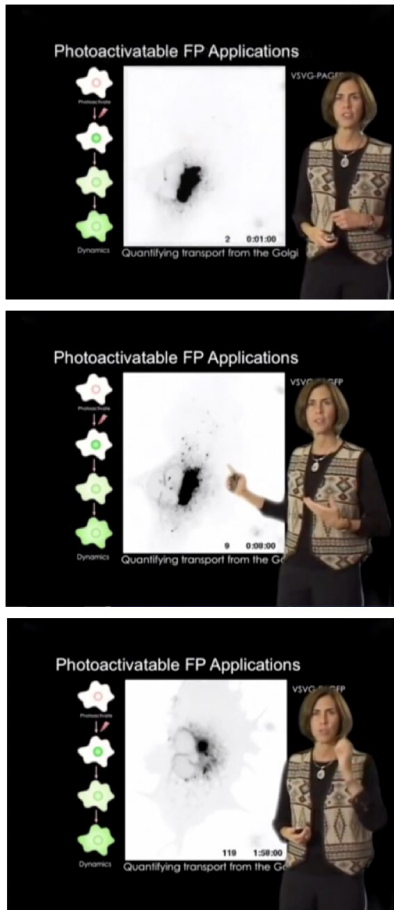


Abb. 3.6: Die Zellbiologin Jennifer Lippincott-Schwartz demonstriert anschauliches Denken.
 Quelle: Jennifer Lippincott-Schwartz, »Breakthroughs in Intracellular Fluorescent Imaging, Part 2: Using Photobleaching and Photoactivation to Study the Endomembrane System«, aufgezeichnet im Oktober 2009 für iBiology, Videovortrag, 35:27, <https://www.ibiology.org/cell-biology/intracellular-fluorescent-imaging/#part-2>.

beteiligt ist, anhand einer Kombination verschiedener Darstellungsformen wie Diagrammen, Zeichnungen, Animationen und Lebendzellfilmen. Das erste Kapitel hat bereits einen Einblick in die Forschung des Teams um Lippincott-Schwartz zu Strukturen und Dynamik des peripheren endoplasmatischen Retikulums gegeben. Die Forschung, die Lippincott-Schwartz in dem im Folgenden diskutierten Vortrag präsentiert, fußt auf der Hypothese, dass der Golgi-Apparat die fettaffinen Proteine, die durch ihn hindurchströmen und zu seiner Struktur und Dynamik beitragen, nicht *kontinuierlich* ausstößt und in Richtung der Zellmembrane aussendet, sobald sie seine äußerste Schicht erreicht haben, sondern dass sich die Proteine vielmehr während ihres Verbleibs im Golgi-Apparat in die Randbereiche des Organells bewegen, die ebenfalls eine hohe Fettaffinität aufweisen, und dort *stoßweise* abgesondert werden.

Die Bewegungen von Proteinen durch den Golgi-Apparat erklärt Lippincott-Schwartz, indem sie auf mehrere Lebendzellfilme verweist, die die Bewegungen von Organellen und Molekülen im Inneren der Zelle visualisieren. Die Kommentare von Lippincott-Schwartz zu den Filmen verdeutlichen, wie sie ihr geschultes Urteilsvermögen einsetzt und den Blick der Zuschauenden lenkt. Geführt von den Worten und Gesten der Zellbiologin gelangen Zuschauende von einem vagen Seheindruck zu einer bewussten Wahrnehmung einzelner Organellen und Moleküle und vollziehen so einen bedeutsamen Ablauf im Inneren der Zelle nach.

Den Film, der die Stoffwechselprozesse am Golgi-Apparat anhand von beschleunigten Einzelbildern sichtbar macht, zeigt Lippincott-Schwartz als Loop drei Mal direkt nacheinander. Während der Film abläuft, erklärt sie, was auf den Bildern zu sehen ist. Ihre Erklärung, zusammen mit dem wiederholten Sichten des Films, bewirkt, dass sich in der Vorstellung der Zuschauenden ein bedeutungsvolles Bild formt und stabilisiert. Beim ersten Sichten wird lediglich eine schwarze Figur vor einem hellen Hintergrund erkennbar, die schwarze Punkte ausstößt während sie sich vom linken unteren Bildrand zur Bildmitte hinbewegt, wo sie sich zusammenzieht (siehe Abb. 3.6). Die schwarze Figur verbleibt während des gesamten Films in unmittelbarer Nachbarschaft von zwei hellgrauen, klar abgegrenzten blasenartigen Formen in der Mitte einer amorphen, sie vollständig umschließenden hellgrauen Figur. Während der dritten Wiederholung und mit Lippincott-

Schwartz' Erklärungen im Hinterkopf formt sich ein bedeutungsvolles Bild in der Vorstellung der Zuschauenden. Jetzt verstehen sie, dass es sich bei der hellgrauen Figur um das Bild einer Zelle handelt. Die schwarzen Punkte und Flächen können nun als Moleküle identifiziert werden, die sich vom Golgi-Apparat aus hin zur Zellmembran bewegen.

Damit dieser Prozess überhaupt gesehen werden kann, werden die Lipidmoleküle in einer Zellprobe mit dem fluoreszierenden Protein GFP (*Green Fluorescent Protein*) markiert und mithilfe von Licht zur Fluoreszenz angeregt. Der japanische Biochemiker Osamu Shimomura (1928–2018)⁸⁷ entdeckte eine Variante von GFP im Jahr 1962 in der Quallenart *Aequorea victoria*⁸⁸ und isolierte das Protein. In den 1990er-Jahren klonierte Martin Chalfie die DNA-Sequenz von GFP und exprimierte sie heterolog, das heißt, er vervielfältigte die relevanten Moleküle der DNA der Qualle und synthetisierte die Proteine in einem anderen Organismus und zwar im Fadenwurm *Caenorhabditis elegans*, einem transparenten Modellorganismus. Dabei bezog er sich auf die vorgängige Forschung zur Expression, das heißt zur Proteinsynthese, von GFP im Darmbakterium *Escherichia coli*.⁸⁹ Die Isolierung und Expression von GFP verhalf der zellbiologischen Forschung zu einem erheblichen Entwicklungsschub, da das Protein es ermöglicht, einzelne Organellen und Moleküle innerhalb von Zellen in distinkten Farben sichtbar zu machen.⁹⁰

Lippincott-Schwartz verwendet ein spezielles, nämlich ein fotoaktivierbares GFP, das im Grundzustand dunkel ist und erst durch die Bestrahlung mit Licht mit einer bestimmten Wellenlänge dazu gebracht wird, Photonen zu emittieren, sprich, zu leuchten. Dies nutzt die Zellbiologin dazu, um eine bestimmte Region in der Zelle zu einem bestimmten Zeitpunkt hervorzuheben und die Bewegung der markierten Proteine in der Zelle über einen ausgewählten Zeitraum zu beobachten. Die Anzahl der Photonen misst sie zu

87 Osamu Shimomura erhielt im Jahr 2008 gemeinsam mit den US-amerikanischen Zellbiologen Martin Chalfie und Roger Y. Tsien (1952–2016) den Nobelpreis für Chemie für seine Verdienste um die Entdeckung und Weiterentwicklung des grün fluoreszierenden Proteins. Siehe »The Nobel Prize in Chemistry 2008«, The Nobel Prize, zuletzt geprüft: 14. September 2021, <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2008/summary/>.

88 In der Quallenart *Aequorea victoria* wird das Photoprotein Aequorin durch chemische Biolumineszenz zur Fluoreszenz angeregt und erzeugt ein blaues Leuchten.

89 Siehe Martin Chalfie, »GFP: Lighting up Life«, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, Nr. 25 (23. Juni 2009), www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0904061106.

90 Zur Geschichte und Relevanz von GFP für die Zell- und Molekularbiologie siehe den Videovortrag von Roger Tsien, »Fluorescent Proteins and the Story Behind GFP«, aufgenommen im Mai 2012 für *iBiology*, Videovortrag, 34:36, <https://www.ibiology.org/talks/fluorescent-proteins/>.

verschiedenen Zeitpunkten am Detektor und wandelt sie in Binärcode um, aus dem der Computer eine Bildfolge errechnet, die zu dem Zeitrasterfilm arrangiert wird, den Lippincott-Schwartz in ihrem Vortrag vorführt.⁹¹ Die Photonenaktivierung ermöglicht es, die Marker zu einem bestimmten Zeitpunkt »anzuschalten«⁹² und auf diese Weise die Bewegungen ausgewählter Moleküle in gut aufgelösten Aufnahmen festzuhalten.

Ähnlich wie in den filmischen Verfahren zur Analyse der Bewegungsabläufe von Fabrikarbeiter*innen aus den 1910er-Jahren⁹³, die heute in abgewandelter Form in der Unterhaltungsindustrie als Motion-Capture-Verfahren zur Übertragung der Bewegungen des Schauspielers*innenkörpers auf den Körper einer animierten Filmfigur angewendet werden, verfolgt dieses Trackingverfahren, allerdings auf der Mikroebene, die Bewegungsabläufe von Lichtpunkten. Ziel ist es, Bewegungsmuster von einzelnen Molekülen zu identifizieren, die in der zeitlich verdichteten Wiedergabe der Bewegungsabläufe der markierten Punkte erkennbar werden. Lippincott-Schwartz betont und demonstriert über den Verweis auf die sichtbar gemachten Bewegungsmuster und -abläufe, dass der Lebendzellefilm entscheidende Informationen über die Kinetik der Proteine liefert, die in den Golgi-Apparat ein- und ausströmen. Die fachkundige Erklärung der Zellbiologin, die den Blick lenkt, Seheindrücke mit Begriffen belegt und Bewegungsmuster heraushebt, schult den Blick der Zuschauenden, leitet sie zum anschaulichen Denken an und wird sie, ab einem gewissen Erfahrungsstand, in die Lage versetzen, selbst ein sachkundiges Urteil zu fällen.

Das Beispiel verdeutlicht, dass die Rezeption wissenschaftlicher Darstellungen in der gegenwärtigen Zellbiologie im Modus der fachlich geschulten Wahrnehmung erfolgt. Vertreter*innen ganz unterschiedlicher Disziplinen haben diesen spezifischen Wahrnehmungsmodus charakterisiert. Der

91 Die Darstellung des komplexen Mess- und Bildgebungsverfahrens muss hier stark verkürzt ausfallen. Eine genaue Erklärung des Verfahrens findet sich bereits im ersten Kapitel (siehe I.1.2).

92 Fachleute sprechen von »switching on/off molecules«, als würde es sich um Schalter handeln.

93 Siehe Frank und Lillian Gilbreth, *Applied Motion Study* (New York: Sturgis and Walton, 1917). Für eine Diskussion zur Anwendung der Techniken der Bewegungsanalyse, wie sie in der naturwissenschaftlichen Praxis und industriellen Fertigung entwickelt wurden, auf den frühen Animationsfilm siehe Alla Gadassik, »Assembling Movement: Scientific Motion Analysis and Studio Animation Practice«, in »Science/Animation«, Hg. Olivia Banner und Kirsten Osther, Themenheft, *Discourse: Journal for Theoretical Studies in Media and Culture* 37, Nr. 3 (Herbst 2015). <https://www.muse.jhu.edu/article/613645>.

polnische Mikrobiologe, Immunologe und Erkenntnistheoretiker Ludwik Fleck hat bereits im Jahr 1935 darauf hingewiesen, dass fachliche Seh- und Interpretationsgemeinschaften – oder »Denkkollektive«, wie er sie nennt – einen gemeinsamen »Denkstil« entwickeln, der sich über eine spezifische Schulung der Wahrnehmung und Deutung des Wahrgenommenen etabliert und auszeichnet. Fleck schreibt: »Wir haben den Denkstil als Bereitschaft für gerichtetes Wahrnehmen und entsprechendes Verarbeiten des Wahrgenommenen definiert.«⁹⁴ Der US-amerikanische Kulturanthropologe Charles Goodwin spricht von »[...] professional vision, which consists of socially organized ways of seeing and understanding events that are answerable to the distinctive interests of a particular social group«⁹⁵. Die Wissenschaftsforscherin Martina Merz und die Kunsthistorikerin Inge Hinterwaldner bezeichnen diese und ähnliche Wahrnehmungs- und Interpretationsweisen als »sozial organisierte[n] Formen des Sehens und Verstehens [...], die auf die jeweils besonderen Anforderungen und Erkenntnisinteressen eines Forschungsfeldes abgestimmt sind [...]«⁹⁶.

Lorraine Daston und Peter Galison nennen diesen fachlichen Stil zu sehen das »geschulte Urteil« und bezeichnen damit einen »vom Urteil gesteuerten Blick als Ziel einer wissenschaftlichen Sehweise«⁹⁷, die die menschliche Interpretationsleistung betont und sich ausdrücklich von der »mechanischen Objektivität«, das heißt, dem Glauben an das Objektivitätsversprechen der automatisierten Bildgebung, absetzt. Diese Wahrnehmungsmodalität, die sich in den exakten Wissenschaften zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts herauszubilden beginnt und sich in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts festigt, zielt auf die fachkundige Interpretation jener Bilder ab, die vermittels technischer Instrumente hergestellt wurden. Als ausschlaggebend für die Etablierung dieses neuen wissenschaftlichen Ideals erachten Daston und Galison das Eingeständnis von Radiologen wie Rudolf Grashey (1876–1950), dass es angesichts der im Jahr 1905 existierenden, überwältigenden Bilderflut in der Medizin unmöglich geworden sei, »das Nor-

94 Ludwik Fleck, *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache: Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv* [i.O. 1935] (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1980), 187.

95 Charles Goodwin, »Professional Vision«, *American Anthropologist*, n. R., 96, Nr. 3 (September 1994): 606, <https://doi.org/10.1525/aa.1994.96.3.02a00100>.

96 Martina Merz und Inge Hinterwaldner, »Neue Bilder, Modelle und Simulationen: Zwischen Repräsentativität und Produktivität«, in *Handbuch Wissenschaftssoziologie*, Hg. Sabine Maasen et al. (Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2012), 308.

97 Daston und Galison, *Objektivität*, 329.

male gegen das Pathologische abzugrenzen«⁹⁸. Als einen zweiten Grund für die Verschiebung vom Ideal der mechanischen Objektivität zum Ideal des geschulten Urteils führen sie die Entwicklung von vielfältigen »Modellen des Unbewussten« in den »Wissenschaften des Geistes«⁹⁹ an. Anders als in jenen Praktiken, die auf mechanische Objektivität abzielten, gewann die

»Interpretation wissenschaftlicher Bilder [...] ihre Kraft nicht aus der Mühe hinter der Automatisierung, der mechanischen Aufzeichnung oder absoluten Selbstbeherrschung, sondern aus der fachgemäßen Schulung des Auges, die sich an einer historisch spezifischen Sichtweise orientierte. Wissenschaftliches Sehen war eine »empirische Kunst« geworden.«¹⁰⁰

Über diese fachkundige Art zu sehen, die sich in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts in der Rezeption von Visualisierungen herausbildete, die mittels der bildgebenden Verfahren der Naturwissenschaften erzeugt wurden, führen die Naturwissenschaften und die Geisteswissenschaften im deutschsprachigen Raum seit geraumer Zeit einen Austausch über die Spartengrenzen hinweg.¹⁰¹

Das geschulte Urteil »ergänzte die Psychologie der Mustererkennung der Nutzer«¹⁰², wie Daston und Galison hervorheben, ohne jedoch explizit auf Arnheim zu verweisen, der seine Überlegungen zur Gestalterkennung maßgeblich in den 1960er-Jahren entwickelte, das heißt in jener Zeitperiode, in der sich das geschulte Urteil Daston und Galison zufolge als wissenschaftliches Ideal etablierte. Den Rezipierenden jener Bilder, die mittels bildgebender Verfahren erzeugt wurden, übertrugen die Fachleute bereits in den 1940er-Jahren vermehrt Verantwortung. Daston und Galison verdeutlichen diese Entwicklung anhand der Erläuterungen zum *Atlas typischer Nebelkammerbilder*, den die deutschen Kernphysiker Wolfgang Gentner, Heinz Maier-

98 Ebd., 327.

99 Ebd., 332.

100 Ebd., 351. Diese Einsicht formulierte Peter Galison bereits in einem Aufsatz aus dem Jahr 1998.

Siehe Peter Galison, »Judgment Against Objectivity«, in *Picturing Science, Producing Art*, Hg. Caroline A. Jones und ders. (New York und London: Routledge, 1998).

101 Beispielhaft genannt seien hier drei Sammelbände, die natur- und geisteswissenschaftliche Positionen zur Rezeption und Interpretation der Bilder der Naturwissenschaften in einen Dialog miteinander setzen: Bettina Heintz und Jörg Huber (Hg.), *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten* (Zürich: Edition Voldemeer, 2001); Martina Heßler (Hg.), *Konstruierte Sichtbarkeiten: Wissenschafts- und Technikbilder seit der Frühen Neuzeit* (München: Fink, 2006); Dimitri Liebsch und Nicola Mößner (Hg.), *Visualisierung und Erkenntnis: Bildverstehen und Bildverwenden in Natur- und Geisteswissenschaften* (Köln: Herbert von Halem Verlag, 2012).

102 Daston und Galison, *Objektivität*, 334.

Leibniz und Walther Bothe im Jahr 1940 erstellten,¹⁰³ und kommentieren: »Die Physiker hofften, daß diese ›typischen‹ Bilder zusammengenommen im Denken ihrer Leser Muster bilden würden.«¹⁰⁴ Selbst wenn hier das Vertrauen auf das Vermögen der menschlichen Wahrnehmung und Mustererkennung betont wird, so schließt das geschulte Urteil den Instrumentengebrauch doch keineswegs aus. Vielmehr gingen fachkundiges Sehen und Instrumentengebrauch Hand in Hand:

»Die Wissenschaftler, die mechanische Objektivität nicht für ausreichend hielten, verzichteten jedoch kaum auf Maschinen: Im Gegenteil, gerade besonders verfeinerte Instrumente [...] waren [...] Schauplatz der größten Unzufriedenheit mit rigiden Aufzeichnungen. *Geschultes Urteil* galt zunehmend als notwendige Ergänzung aller Bilder, die Maschinen herstellen konnten.«¹⁰⁵

3.3.2 »Extrasensorische« Bildgebung und phänomenologische Hermeneutik

Im Unterschied zu Daston und Galison, die auf dem Zusammenwirken von technischen Instrumenten und menschlichem Urteilsvermögen insistieren, wertet der US-amerikanische Technikphilosoph Don Ihde – ähnlich wie die Mikrofotografen in den 1860er-Jahren und die Ingenieure in der Gegenwart – die Leistung der Instrumente gegenüber der menschlichen Leistung deutlich auf. Ihde verfolgt ein ungewöhnliches hermeneutisches Programm und behauptet, die Naturwissenschaften würden ähnlich wie die Geisteswissenschaften hermeneutisch, kurz gesagt interpretierend, vorgehen.¹⁰⁶ Er bricht mit dem Verständnis, die Naturwissenschaften zielten darauf ab, zu erklären, während die Geisteswissenschaften anstrebten, zu verstehen.

Ihde setzt sich zudem mit dem ungebrochenen Vertrauen auseinander, dass Naturwissenschaftler*innen dem Sehen und den Visualisierungen entgegenbringen. Die Bildgebung mithilfe verfeinerter Instrumenten in den Naturwissenschaften bezeichnet er als »extrasensorische Bildgebung« (»›extrasensory‹ imaging«)¹⁰⁷. Den Instrumentengebrauch definiert er als

103 Siehe Wolfgang Gentner, Heinz Maier-Leibniz und Walther Bothe, *Atlas typischer Nebelkammerbilder* (Berlin: Springer, 1940).

104 Daston und Galison, *Objektivität*, 334.

105 Ebd., 333, Hervorhebung im Original.

106 Siehe Ihde, *Postphenomenology and Technoscience*, 63–64.

107 Ebd., 57.

notwendige Bedingung der wissenschaftlichen Praxis. Diese Aufwertung der Instrumente bringt er auf die knappe Formel: »no instruments, no science«¹⁰⁸.

Im Gegensatz zur Würdigung der Instrumentenleistung bei Ihde macht sich die aktuellste astrophysikalische Forschung der NASA allerdings gerade wieder die menschliche Fähigkeit, Bewegungen zu sehen, zunutze, wenn sie etwa Amateurastronom*innen einbindet, um aus großen Datenmengen jene Segmente herauszufiltern, in denen Bewegungen erkennbar werden. Das von der NASA finanzierte Projekt »Backyard Worlds: Planet 9« zielt auf die Entdeckung sogenannter Brauner Zwerge ab, das heißt massearmer Himmelskörper in der Nähe des Planeten Neptun.¹⁰⁹ Das Projekt wird von Astrophysiker*innen an renommierten US-amerikanischen Universitäten getragen und beteiligt Amateurastronom*innen am Forschungsprozess, die ihrerseits mitunter als Ko-Autor*innen von Fachpublikationen auftreten.¹¹⁰ Astrophysiker*innen erkennen heutzutage an, dass Hochleistungsteleskope wie das Hubble oder das Spitzer es nicht mit menschlichen Beobachtenden aufnehmen können, wenn es um das Bewegungssehen geht.

Das ortsverteilte Team greift auf die »Mark One Eyeball«-Methode¹¹¹ zurück, eine Vorgehensweise des optischen Tracking, die das US-amerikanische Militär seit den 1950er-Jahren anwendet¹¹² und die mittels der ersten Einschätzung, ungefähren Abschätzung und visuellen Überprüfung durch menschliche Beobachtende aus großen Datenmengen relevante Informationen herausfiltert. Das *Oxford English Dictionary* hebt im Eintrag zum Verb »eyeball« die Inaugenscheinnahme als Leistungsvermögen der menschlichen Wahrnehmung gegenüber der Messleistung der Instrumente

108 Ebd.

109 Siehe »Backyard Worlds: Planet 9«, Zooniverse, zuletzt geprüft: 6. April 2021, <https://www.zooniverse.org/projects/marckuchner/backyard-worlds-planet-9/about/research>.

110 Siehe etwa die schwedischen, australischen und russischen Ko-Autor*innen in Marc J. Kuchner et al., »The First Brown Dwarf Discovered by the Backyard Worlds: Planet 9 Citizen Science Project«, *The Astrophysical Journal Letters* 841, Nr. 2 (1. Juni 2017), <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa7200>.

111 Siehe »Amateur astronomers use the ›mark one eyeball‹ to find brown dwarf stars«, Quirks and Quarks, CBC Radio, zuletzt geändert am 5. Februar 2021, <https://www.cbc.ca/radio/quirks/feb-6-covid-treatments-what-have-we-learned-breakups-change-language-algae-blooms-on-greenland-and-more-1.5901648/amateur-astronomers-use-the-mark-one-eyeball-to-find-brown-dwarf-stars-1.5901651>.

112 Siehe Wikipedia, »Visual inspection«, zuletzt geändert am 10. März 2021, https://en.wikipedia.org/wiki/Visual_inspection.

hervor.¹¹³ Das *OED* weist zudem auf die Bedeutung des Begriffs »mark« als Warenzeichen hin, das zur Identifikation von verschiedenen Versionen eines Produkts desselben Typs gebraucht wird. Die Bezeichnung »mark I« bedeutet eine Auszeichnung und gilt als Gütesiegel.¹¹⁴ Mit dem Ausdruck »mark one eyeball« wird also die hohe Qualität des menschlichen Sehens hervorgehoben und darauf hingewiesen, dass das menschliche Sehen, selbst wenn seine technischen Imitate es andauernd zu verbessern suchten, weiterhin gleichsam als Modell oder Prototyp fungiert.

Ihde geht allerdings in eine andere Richtung und schreibt den Instrumenten nicht allein das Vermögen zu, Daten über Untersuchungsgegenstände zu erzeugen, die sich der unvermittelten menschlichen Wahrnehmung entziehen. Er geht sogar noch einen Schritt weiter und attestiert den Instrumenten die Fähigkeit, die erzeugten Daten in eine Form zu *übersetzen*, die der menschlichen Wahrnehmung zugänglich ist. Ihde führt das Beispiel der sensorvermittelten Detektion von Emissionen in der Astrophysik an, die jenseits der Grenzen des optischen Spektrums liegen. Er schreibt:

»The emission patterns, with intensities and shapes, are now *translated by the instrument* into bodily perceivable images, perceived and ›read‹ by the observer-scientist. What I am calling *translation* is a technological transformation of a phenomenon into a readable image. This is one analog to a hermeneutic process, except in this case it is a *material* hermeneutic process, not one limited to textual or linguistic phenomena. Second, because it is perceivable – usually in science’s favored visualist modes – it also is available to the gestalt capacities of human vision, which can ›see at a glance‹ the patterns displayed. In this sense, it is a *phenomenological* hermeneutic.«¹¹⁵

113 *Oxford English Dictionary*, s.v. »eyeball, v.«, zuletzt geändert im Dezember 2019, <https://www.oed.com/view/Entry/67302?isAdvanced=false&result=2&rskey=vNb7jf&>. Dort heißt es in der dritten Definition: »To make a visual inspection or assessment of; to measure by sight alone, without the use of an instrument or other guide; to estimate by eye.«

114 Siehe *Oxford English Dictionary*, s.v. »mark, n.I«, dritte Ausgabe, online veröffentlicht im Dezember 2020, <https://www.oed.com/view/Entry/114169?isAdvanced=false&result=1&rskey=upHfB2&>. Die fünfzehnte Definition lautet: »In earlier use: a particular make, design, or size of an article (originally identified by the maker with a particular device, stamp, etc.) Now chiefly (frequently as *Mark* followed by a numeral, abbreviated *Mk.*): a version or model of a manufactured product, representing a particular stage in its design and development; frequently *figurative* Mark I, n. *colloquial* first class.« Auf die Hervorhebungen im Fettdruck im Original wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

115 Ihde, *Postphenomenology and Technoscience*, 56, Hervorhebung im Original.

Die Übersetzungsleistung der Instrumente bezeichnet Ihde als »phänomenologische Hermeneutik«¹¹⁶. Während Ihdes Ansatz, die Hermeneutik, die Phänomenologie und den Gestaltbegriff für die Wissenschaftsforschung fruchtbar zu machen, zu begrüßen ist, so stellt sein Verständnis der apparativen Bildgebung als Interpretationsleistung der Instrumente eine Herausforderung nicht allein für das Selbstverständnis der Naturwissenschaften – die sich mit wenigen Ausnahmen traditionell als eine auf das Erklären und nicht auf das Verstehen abzielende Wissenschaftssparte begreifen –, sondern auch für jene Zugangsweisen der Wissenschaftsgeschichte dar, die gerade im Vermögen zur Interpretation das spezifisch Menschliche erkennen. Dieser Zugang – wie ihn beispielsweise Daston und Galison vertreten – erscheint als unvereinbar mit Ihdes Idee des interpretierenden Instruments.

Mit Blick auf die Charakterisierung des Daten-Sehens, um die es in diesem Abschnitt geht, kann Ihde insofern gefolgt werden, als er mit Recht herausstellt, dass die Instrumente in computergestützten bildgebenden Verfahren maßgeblich am Erkenntnisprozess beteiligt sind, da sie Bilder erzeugen, in denen die Forschenden Muster, oder, in anderen Worten, Gestalten erkennen können. Doch ob man die Leistung, die die Instrumente erbringen, als eine *Übersetzung*, also als eine genuin hermeneutische Tätigkeit, bezeichnen will, sei zur Disposition gestellt. Zutreffender erscheint es, von einer *Umwandlung* zu sprechen. Hans-Jörg Rheinberger hat die Instrumentenleistung einmal als »Transposition«, als Umschrift in ein anderes Darstellungsregister, bezeichnet.¹¹⁷ Der Begriff der Transposition beschreibt die vielfältigen Umwandlungsschritte, die durchlaufen werden müssen, um den mikroskopischen Gegenstand in eine Visualisierung zu überführen, besser als der Begriff der Übersetzung es vermag. Photonen werden angeregt, Ladung wird in Spannung umgewandelt, die ihrerseits in digitale Zahlen umgesetzt wird, welche am Bildschirm als unterschiedliche Darstellungsformen sichtbar gemacht werden. Die Transformationskette zwischen Gegenstand und Bild, die im ersten Kapitel präzise beschrieben und im Lichte medienwissen-

116 Im gleichen Atemzug spricht er zudem von »materieller Hermeneutik« (»material hermeneutics«). Elf Jahre zuvor nannte er seinen Ansatz noch »Wahrnehmungshermeneutik« (»perceptual hermeneutics«). Don Ihde, *Expanding Hermeneutics: Visualism in Science* (Evanston, Illinois: Northwestern University Press, 1998), 159.

117 Siehe Hans-Jörg Rheinberger, »Transpositions: From Traces through Data to Models and Simulations«, in *Transpositions: Aesthetico-Epistemic Operators in Artistic Research*, Hg. Michael Schwab (Leuven: Leuven University Press, 2018).

schaftlicher Positionen zur Analog-Digital-Umwandlung eingehend diskutiert wurde, als eine Abfolge von *Übersetzungsleistungen* zu begreifen, würde den Zwischenstadien in der Kette einen unangemessen definitiven Charakter zubilligen. Bei den Zwischenstadien handelt es sich keinesfalls um fertige »Texte«, sondern vielmehr um flüchtige Durchgangsstadien in einer langen Transformationskette, die zu Darstellungsformen führen, die ihrerseits weiterverarbeitet und wiederum in andere Darstellungsformen umgewandelt werden.

Dabei erschließen sich die bildlichen und diagrammatischen Repräsentationen für die Interpretation erheblich leichter als die numerischen Darstellungsformen. Aus der Erfahrung und Übung wissen Forschende, was spezifische Veränderungen in den bildlich dargestellten innerzellulären Strukturen bedeuten und was spezifische Verlaufskurven aussagen. Hierdurch können sie einschätzen, ob das Ergebnis des Experiments die zuvor aufgestellte Hypothese bestätigt oder widerlegt. Das heißt, Forschende deuten die bildlichen und diagrammatischen Darstellungsformen mit Rückbezug auf sedimentierte Wissensbestände, über den Rückgriff auf Erfahrungswissen.

3.4 Komparative Betrachtung der Modalitäten des mikroskopischen Sehens

Im Unterschied zum apparativen Sehen in der Mikrofotografie, das seine Bestimmung im Mehr-Sehen fand, fordert das Daten-Sehen von den Forschenden, anders zu sehen, und zwar in doppelter Hinsicht: anders als im Alltag und anders als die Apparatur, die aufzeichnet und vermisst. In deutlichem Kontrast zum Mehr-Sehen, wie es die Mikrofotografie ermöglichte, ist das Daten-Sehen ein interpretierendes Sehen, ein fachlich geschultes Wahrnehmen, das auf das Erkennen von Sinn und Bedeutung abzielt und nicht allein auf die Herstellung von Beweisstücken und Arbeitsobjekten.

Die Interpretation muss sich an den erhobenen Daten und an den erzeugten Visualisierungen überprüfen lassen und mit den Mess- und Bilddaten übereinstimmen, so dass die Daten und die Bilder einen Sinn erhalten und die Interpretation zugleich untermauern. Während der mit dem Mikroskop kombinierte Detektor Momente fixiert, die Abläufe dokumentieren, und der Computer Daten speichert, verarbeitet und in numerischer,

diagrammatischer und bildlicher Form am Bildschirm ausgibt, obliegt es den Forschenden, die sichtbar gemachten Strukturen und Prozesse zu deuten, das heißt, die Visualisierungen der Daten zu interpretieren und für die Forschungsfrage relevante Schlussfolgerungen zu ziehen. Weder imitiert noch ersetzt die Apparatur die menschliche Wahrnehmungsleistung; vielmehr werden die vielfältigen apparativen Umwandlungsleistungen zur Voraussetzung der menschlichen Wahrnehmung und Interpretation. In anderen Worten, das Daten-Sehen ist eine technisch voraussetzungsreiche, von der computergestützten Bilderzeugung abhängige, fachlich geschulte Sehmodalität. Im Unterschied zum maschinellen Sehen ist das Daten-Sehen in erster Linie ein Gestaltsehen. Das Gefüge der optisch-algorithmischen Medientechniken, die Experimentalanordnungen in der heutigen Lebendzellmikroskopie ausmachen, gewährleistet die Umwandlung von Messdaten in bildliche Darstellungsformen, die allerdings erst das geschulte menschliche Auge als eine spezifische Gestalt erkennen und die erst der fachlich geschulte menschliche Verstand sinnvoll interpretieren kann.

In der Mikroskopie setzt die computergestützte Bilderzeugung eine spezifische neue Form der Subjektivität frei, die ihre Bestimmung in der fachkundigen Dateninterpretation findet. Im Gegensatz zur mikrofotografischen Praxis im neunzehnten Jahrhundert, die das menschliche Sehen marginalisierte, ist das interpretierende, an den Konventionen der Fachgemeinschaft geschulte Sehen in der gegenwärtigen Mikroskopiepraxis schlechterdings erforderlich. Anders als in der Mikrofotografie, wo das Auge angesichts der erdrückenden Überlegenheit der Apparatur als defizitäres Organ zurücktrat, findet das ›denkende Auge‹ im Daten-Sehen als interpretierendes Agens eine neue Aufgabe. Im Daten-Sehen erweitert sich die menschliche Sinneswahrnehmung über die arbeitsteilige Kooperation mit einem heterogenen Arrangement technischer Geräte, die vermittels von Gesetzmäßigkeiten operieren, die sich weder auf sinnesphysiologische Funktionsweisen allein noch auf optische Gesetze allein reduzieren lassen.

Frühe Mikroskopiker wie Robert Hooke sahen das Mikroskop als ein Instrument zur Ausweitung des menschlichen Sehvermögens an, als ein künstliches Organ, das die Unzulänglichkeiten des menschlichen Auges kompensierte. Spätestens seit der Entwicklung der Mikrofotografie in den 1860er-Jahren konzeptualisierten Mikroskopiker ihre Instrumente als technische Imitation und Verbesserung einzelner Elemente des menschlichen Auges. In Robert Kochs Überlegungen zur Mikrofotografie etwa verband sich die Vorstellung von der fotografischen Platte als einer tech-

nischen Nachbildung der menschlichen Netzhaut mit der Vorstellung der überlegenen Leistungsfähigkeit optischer Instrumente, gegenüber deren Vermögen die menschliche Sehleistung als defizitär abfiel. Galten Hooke die menschlichen Sinne noch als primärer Zugangsweg zu Naturphänomenen – wenngleich er ihr Leistungsvermögen als steigerungsfähig ansah, und zwar vermittels von technischen Instrumenten –, so bargen bei Koch allein die Apparate das Versprechen, die natürliche Welt eingehend zu erschließen. Während bei Hooke der menschliche Beobachter im Zentrum stand, rückte der Beobachter zweihundert Jahre später bei Koch angesichts des Glaubens an die unerreichbare Überlegenheit der Apparatur in eine marginale Position. Erst im zwanzigsten Jahrhundert setzte sich das Verständnis durch, dass die geschulte Urteilskraft des menschlichen Beobachters die mechanische Objektivität der Apparatur komplementieren müsse. Die mikroskopische Apparatur wurde nun nicht länger als Nachbau und technische Verbesserung von einzelnen Bestandteilen des menschlichen Auges beurteilt. Vielmehr überwand nun die menschlichen und die apparativen Leistungen die Begrenzungen der jeweils anderen und erweiterten deren spezifische Vermögen.

Bislang ist deutlich geworden, dass sich die Transformation des Sehens in der Mikroskopie in den vergangenen vierhundert Jahren in Vor-, Rück- und Seitenschritten vollzog und dabei immer wieder neue, überraschende Formen annahm: Von der einseitigen Erweiterung des Leistungsvermögens des menschlichen Auges durch die ersten zusammengesetzten Mikroskope entwickelte sich das mikroskopische Sehen hin zu der Imitation, der Optimierung und dem – nicht allein metaphorischen – Ersatz der menschlichen Sehleistung durch die fotografische Platte in der Mikrofotografie. Erst in der computergestützten Mikroskopie kommt es zu einer wechselseitigen Kontiguitätsbeziehung zwischen den Beobachtenden und den Instrumenten. Die bildgebende Apparatur erschließt dem menschlichen Sensorium das unvermittelt Unzugängliche und die menschliche Sinneswahrnehmung als verkörperte Geistestätigkeit überführt die apparativ generierten Datenvisualisierungen in einen übergeordneten Sinnzusammenhang.

Offen geblieben in der Diskussion der Transformationen des mikroskopischen Sehens in diesem Kapitel ist die Frage nach der *affektiven* Beteiligung der Sehenden. Ausgangspunkt der Diskussion war die Konzeption des Sehens als eines bevorzugten Zugangs zum Wissen, als eines Leitmotivs der westlichen Episteme. Folglich wurde bislang lediglich die evidenzstiftende Dimension des Sehens berücksichtigt. Die affektive Dimension des Sehens

ist in diesem Kapitel unberücksichtigt geblieben. Doch Seheindrücke – die Seheindrücke in der naturwissenschaftlichen Praxis eingeschlossen – sprechen Betrachtende nicht allein kognitiv an, sondern involvieren sie auch affektiv. Hier sei noch einmal an das strukturelle Ziel dieses zweiten Teilabschnitts des vorliegenden Buches erinnert, das darin besteht, eine medienästhetisch ausgerichtete Medienepistemologie zu konturieren. Dieses Ziel macht es erforderlich, die Frage nach der medientechnischen Rekonfiguration der menschlichen Sinneswahrnehmung durch die Mikroskopie unter Berücksichtigung der affektiven Adressierung und Involvierung der Forschenden zu vertiefen.

4. Der affektive Surplus mikroskopischer Bildwelten

Um zu erörtern, welche affektiven Qualitäten dem mikroskopischen Bild in der Vergangenheit zugeschrieben wurden und gegenwärtig noch immer zugeschrieben werden, komme ich auf den spezifischen naturwissenschaftlichen Diskurs zurück, der gegenwärtig an der Schnittstelle zwischen Zellbiologie und Mikroskopie geführt wird, und zeige über Rückbezüge zur geisteswissenschaftlichen Forschung zu ausgewählten Mikroskopiediskursen der Vergangenheit Verbindungslinien zu diesen historisch älteren Diskursen auf. Diese rahmen die Mikroskopie als Affektpraxis, eine Rahmung, die, wie ich aufweisen werde, in gegenwärtige Debatten hinein fortwirkt.

Dabei rückt zunächst die Frage in den Mittelpunkt, wie der aktuelle naturwissenschaftliche Diskurs die affektive Dimension mikroskopischer Bildwelten verhandelt. Welches Vokabular hält der gegenwärtige zellbiologische Diskurs in Umlauf, um die Sinnes- und Gefühlseindrücke zu beschreiben, die die technisch vermittelte Begegnung mit dem Mikrokosmos hervorruft? Mit welchen affektiven Registern und ästhetischen Kategorien werden diese Eindrücke in Verbindung gebracht? In einem nächsten Schritt soll es dann um die Frage gehen, in welcher Weise sich die gegenwärtigen verbalen und visuellen Strategien zur Akzentuierung der affektiven Wirkung mikroskopischer Bilder auf ältere Diskurse zurückbeziehen – wie etwa den Diskurs zur frühen Mikroskopie, den Gelehrte wie Antoni van Leeuwenhoek und Robert Hooke prägten, und den Diskurs zur »gelehrten Unterhaltung«, in den die Kunstgeschichte die Mikroskopiepraktiken des bildungsinteressierten Bürgertums im deutschsprachigen Raum und in England in der zweiten Hälfte des achtzehnten Jahrhunderts einordnet.

Die Veränderung des mikroskopischen Sehens und den Wandel des Objektivitätsideals im neunzehnten Jahrhundert habe ich bereits im vori-

gen Kapitel diskutiert. Der technische Nachbau des Auges und das Ideal der »mechanischen Objektivität«, die die Mikroskopiepraxis in dieser Zeit prägten, marginalisierten den Beobachter und bagatellisierten folglich auch die affektive Wirkung der mikroskopischen Bilder. Dies änderte sich um etwa 1900, als Biologen begannen, mit der Mikrokinematografie zu experimentieren, einer Technik, die es ermöglichte, Großaufnahmen einzelner Entwicklungsstadien der Zelle in Bewegung zu versetzen und in der Projektion zu beschleunigen und auf diese Weise zelluläre Entwicklungsprozesse anschaulich zu machen. Damit etablierte die Mikrokinematografie ein technisches Grundprinzip, das in der Lebendzellmikroskopie bis heute fortbesteht.

Die gegenwärtige Lebendzellmikroskopie befördert Erkenntnis, indem sie mikroskopische Phänomene zur Anschauung bringt. Sie ermöglicht Wissen und trägt dazu bei, Hypothesen zu untermauern, indem sie mikroskopische Bewegungen misst und visualisiert. Zugleich eignet Lebendzellfilmen ein affektiver Überschuss. Lebendzellfilme erzeugen, darin vergleichbar mit der Mikrokinematografie, wie sie vor rund hundertzwanzig Jahren entwickelt wurde, und ähnlich wie avancierte Bildschirmtechnologien heute, eine Präsenzerfahrung und lenken die Aufmerksamkeit auf die Frage nach den wirkungsästhetischen Effekten der Vergrößerung und der Bewegung. Um den aktuellen Diskurs zu jenen affektiven Qualitäten, die den Bewegungsbildern des Mikrokosmos im gegenwärtigen naturwissenschaftlichen Diskurs zugeschrieben wird, zu verstehen, werde ich im zweiten Unterkapitel auf den Diskurs zur affektiven Wirkung mikrokinematografischer Aufnahmen zurückgehen, wie ihn bereits die klassische Filmtheorie in den 1920er- und 1930er-Jahren führte und auf den sich jüngere filmwissenschaftliche und wissenschaftsgeschichtliche Positionen zur Wirkungsästhetik des chronofotografischen und mikrokinematografischen Bildes zurückbeziehen.

4.1 Affektrhetorik: Akzentuierung der affektiven Wirkung mikroskopischer Bildwelten in verbalen und visuellen Darstellungsformen

Im ersten Unterkapitel werde ich zunächst die sprachliche Bezugnahme auf affektive Register in der gegenwärtigen Mikroskopiepraxis anhand der Analyse der verbalen und visuellen Rhetorik eines Vortrags des US-amerikani-

schen Zellbiologen Ron Vale aus dem Jahr 2012 untersuchen. Danach werde ich aufweisen, dass die Terminologie des zellbiologischen Diskurses der Gegenwart ein Affektvokabular aufgreift, das bereits die frühe Mikroskopie im letzten Dritten des siebzehnten Jahrhunderts in Umlauf setzte und das in der Amateurmikroskopie des achtzehnten Jahrhunderts weiterhin in Gebrauch blieb und um den Begriff des Erhabenen erweitert wurde. Dabei stellt sich die Frage, was die sprachliche Bezugnahme auf affektive Register für die naturwissenschaftliche Praxis leistete und noch immer leistet. Selbst wenn die Verwendung affektiv aufgeladener Begriffe die Gefahr mit sich bringt, die wissenschaftliche Autorität der Sprechenden und Schreibenden Personen zu untergraben, so vermag der Rekurs auf affektives Erleben jedoch ebenfalls, sofern er als rhetorisches Mittel bewusst und gezielt strategisch eingesetzt wird, die Strahlkraft der naturwissenschaftlichen Forschungspraxis zu erneuern und zu erhöhen. Darüber hinaus erlaubte es die Versprachlichung von Gefühlseindrücken in der Vergangenheit und erlaubt es in der Gegenwart weiterhin, jene Schockwirkung zu benennen und abzumildern, die von der ersten Begegnung mit Dimensionen ausgeht, die sich von der menschlichen Dimension grundlegend unterscheiden. Der Rekurs auf ein affektives Vokabular lenkt die Bewertung dieser Begegnung um, und zwar durch die Ästhetisierung, die er bewirkt, und wertet die mikroskopische Erfahrung auf, indem er es erlaubt, diese Praxis als eine ästhetische Erfahrung zu rahmen. Die Ästhetisierungspotenziale der mikroskopischen Erfahrung, die bereits in den vergangenen Jahrhunderten von Praktizierenden ausgelotet und diskursiviert wurden, schöpft der zellbiologische Diskurs der Gegenwart aus.

4.1.1 Das Magische und das Erhabene als ästhetische Attribute fluoreszenzmikroskopischer Bildwelten im aktuellen zellbiologischen Diskurs

»What the telescope has done for the discovery of the universe, to understand the composition of stars and our origins on scales of up to billions of light-years, the microscope has done for biology on the scale of nanometers to microns.«¹

Mit dem seit der klassischen Antike immer wieder aufs Neue in verschiedenen Kontexten und zu ganz unterschiedlichen Zwecken angestellten Vergleich zwischen dem Unfassbar-Großen und dem Winzig-Kleinen eröffnet der US-amerikanische Zellbiologe Ron Vale den 31 online zugängliche Fachvorträge umfassenden Mikroskopie-Kurs, der sich an fortgeschrittene Studierende, junge Wissenschaftler*innen und Dozierende der Lebenswissenschaften richtet. Zugänglich ist der Kurs frei über eine Webseite, die sich, in Anlehnung an die Namensgebung der tragbaren Personalcomputer der Firma Apple, iBiology nennt. Die Webseite wird von tonangebenden US-amerikanischen und europäischen Stiftungen und Forschungseinrichtungen im Bereich der Lebenswissenschaften unterstützt wie der National Science Foundation, der Lasker Foundation, dem National Institute of General Medical Science, dem Howard Hughes Medical Institute und dem European Molecular Biology Laboratory. Neben dem Mikroskopie-Kurs bietet iBiology Online-Kurse etwa zu den Fachgebieten Biotechnologie und Evolutionsbiologie an.

Über den Vergleich des Vermögens des Teleskops, den Weltraum zu erschließen, mit der Kraft des Mikroskops, das Leben zu erkunden, spannt Vale, Leiter des Vale Labs an der University of San Francisco und seit 2020 leitender Direktor des Janelia Research Campus des Howard Hughes Medical Institute, einer der weltweit führenden Forschungseinrichtungen im Bereich der Zell- und Molekularbiologie, den Bogen zwischen Makrokosmos und Mikrokosmos. Um bei seinem Publikum die Faszination für die Welt des Winzig-Kleinen zu wecken oder erneut wachzurufen, verweist er im Analogieschluss auf die Erforschung des Kosmos. Über diese affektiv aufgelade-

¹ Ron Vale, »Historical Contributions from Light Microscopy. What Can You Learn with a Light Microscope?«, aufgenommen im März 2012 für iBiology, Videovortrag, 19:23, <https://www.ibiology.org/talks/light-microscopy/>.

ne Bezugnahme setzt er den Ton für die Vortragsreihe, die einen strukturierten Einblick in gegenwärtige Verfahren und Techniken der Lichtblattemikroskopie bietet und an der sich international ausgewiesene und an internationalen Spitzeninstitutionen tätige Mikroskopiker*innen beteiligen. Die von Vale initiierte und geleitete Vortragsreihe richtet den Fokus dezidiert auf die Fluoreszenzmikroskopie und bietet ausführliche Erklärungen der technischen Hintergründe der computergestützten Bilderzeugung und Bildanalyse. Ausgewählte Vorträge der Reihe wurden bereits in den vorigen Kapiteln dieses Buches diskutiert.

Begleitet werden Vales einführende Worte von der Projektion eines großformatigen Bildes im Hintergrund des im *medium-long shot* gefilmten Sprechers, das die Begrenzung, die der Kader setzt, zu sprengen scheint (siehe Abb. 4.1). Das projizierte Bild zeigt zunächst eine Galaxie in einer Darstellungsweise, die vielen Zuschauenden vertraut sein dürfte, da es sich um ein für die öffentliche Präsentation gestaltetes Bild handelt, das im Ausgang von den vom Hubble-Weltraumteleskop an die Bodenstation auf der Erde übermittelten Aufnahmen und Daten von weit entfernt liegenden Planeten und Galaxien am Computer synthetisiert und bearbeitet wurde und in verschiedenen Kontexten online und offline weite Verbreitung fand.² Während Vale spricht, verwandelt sich das projizierte Bild der Galaxie mittels einer Überblendung in ein leuchtendes Bild, das zwei Zellen in extremer Vergrößerung und intensiver Farbigkeit vor einem schwarzen Hintergrund zeigt (siehe Abb. 4.1, unteres Bild). Die Inszenierung mikroskopischen Wissens als eines Wissens, das eine ähnliche Faszination birgt wie das Wissen über den Kosmos und das, ähnlich wie die Erforschung des Kosmos, komplexer Messgeräte und Skalierungsverfahren bedarf, wirft die Frage auf, welche Effekte die Vergrößerung auf die menschliche Wahrnehmung hat.

Diese Frage hat Lev Manovich in der Diskussion seiner Eindrücke während einer Probevorführung von iGrid im Jahr 2005 gestellt.³ Bei iGrid handelt es sich um eine Visualisierungstechnologie, die wandfüllende Panorama- und Bewegtbilder in einer Bildauflösung von 4K⁴ über leistungsstarke

2 Die Darstellungskonventionen, die in den Hubble-Bilder aktualisiert werden, wurden bereits im zweiten Kapitel thematisiert.

3 Siehe Lev Manovich, »Scale Effects«, PDF-Datei, 2005, http://manovich.net/content/04-projects/047-scale-effects/44_article_2005.pdf, 4.

4 Der Wikipedia-Eintrag »4K (Bildauflösung)« erklärt: »4K-Auflösung, auch 4K genannt, bezeichnet eine horizontale Bildauflösung in der Größenordnung von 4000 Pixeln.« In Abhängigkeit vom Bildseitenverhältnis bestehen in 4K aufgelöste Bilder aus bis zu 4096 Bildspalten und bis zu



Abb. 4.1: Die Magie des Kosmos und Mikrokosmos

Quelle: Ron Vale, »Historical Contributions from Light Microscopy. What Can You Learn with a Light Microscope?«, aufgenommen im März 2012 für iBiology, Videovortrag, 19:23, <https://www.ibiology.org/talks/light-microscopy/>.

GlASFASERKABELVERBINDUNGEN und mittels ortsverteilter Computernetzwerke interkontinental von Tokio und Amsterdam an das California Institute for Telecommunications and Information Technology an der Universität von San Diego in Echtzeit im Streaming-Verfahren überträgt. Bei einem der übertragenen Bewegtbilder, die Manovich diskutiert, handelt es sich um

3072 Bildzeilen. Wikipedia, »4K (Bildauflösung)«, zuletzt geändert am 8. April 2021, [https://de.wikipedia.org/wiki/4K_\(Bildauflösung\)#cite_note-1](https://de.wikipedia.org/wiki/4K_(Bildauflösung)#cite_note-1).

das Modell eines Mausgehirns, das mithilfe von Verfahren erzeugt wurde, die den in den vorigen Kapiteln beschriebenen fluoreszenzmikroskopischen Bildgebungsverfahren ähneln. Manovich betont die Präsenzerfahrung, die seiner Ansicht nach von den riesigen, hochaufgelösten Panorama- und Bewegtbildern ausgehe.⁵ Die Erfahrung der in Echtzeit übermittelten Präzisionsbilder vergleicht Manovich mit der Erfahrung der öffentlichen Präsentation der ersten Bewegtbilder in einem Pariser Café im Dezember des Jahres 1895.⁶ Die Neuartigkeit und Eindrücklichkeit dieser beiden hundertzehn Jahre auseinanderliegenden kollektiven Rezeptionserfahrungen von Bewegtbildern betonend, bezeichnet Manovich die iGrid-Preview als »Moving Pictures v2.0«⁷. Die Bilder, die das System erzeugt und übermittelt, beschreibt er als »Wunder«, wenn er bemerkt: »All of them look like miracles [...]«⁸

Auf das Wunderbare spielt auch Vale an, wenn er die erste Begegnung mit dem Mikrokosmos, den das Mikroskop erschließt, mit dem Magischen und dem Außerweltlichen in Verbindung bringt, einem Außerweltlichen, das, wie er hervorhebt, die mikroskopische Erfahrung in die sinnlich erfahrbare Welt hineinträgt: »For many kids the most memorable experience and indeed what turns them on to science in the first place is looking through the eyepieces of a microscope and seeing this magical world that was previously invisible to them.«⁹ Bemerkenswerterweise führt Vale hier Magie und Wissenschaft in einem einzigen Satz an und zeichnet damit die Flugbahn vor, die Studierende der Zellbiologie in jenem Prozess durchlaufen, in dem sie von Neulingen zu Fachleuten werden. Während die mikroskopische Welt Neulingen als magische, unzugängliche Welt erscheinen mag, von der ein

5 Siehe Manovich, »Scale Effects«.

6 Für eine kritische Auseinandersetzung mit dem Ursprungsmythos des Kinos, der sich um die Flucht des Publikums als Reaktion auf die angebliche Projektion des Films *L'Arrivée d'un Train en Gare de la Ciotat* der Gebrüder Lumière im Salon Idien des Grand Café im Dezember 1895 entspannt, und der hartnäckigen Tradierung dieses Mythos in der Filmgeschichte, der die Macht des filmischen Bildes mit etablierte, siehe Tom Gunning, »An Aesthetic of Astonishment: Early Film and the (In)Credulous Spectator« [1989], in *Viewing Positions: Ways of Seeing Film*, Hg. Linda Williams (Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1994).

7 Manovich, »Scale Effects«, 6.

8 Ebd., 4. Die Detailfülle, Klarheit und Frische eines Panoramabildes der niederländischen Stadt Delft, das mittels des iGrid-Systems von Amsterdam nach San Diego übertragen wird, veranlasst Manovich dazu, das im 4K-Format aufgelöste Bild in die Tradition der flämischen Malerei des siebzehnten Jahrhunderts zu stellen.

9 Vale, »Historical Contributions from Light Microscopy«.

ganz besonderer Reiz ausgeht und in der unbekannte Gesetze zu gelten scheinen, wissen Fachleute diese Welt rational zu erfassen, ohne dass die mikroskopische Welt jedoch im Zuge ihres Vertraut-Werdens ihre magische Anziehungskraft vollends verlieren würde.

Den engen Zusammenhang von Magie und Wissenschaft hat die US-amerikanische Film- und Medienwissenschaftlerin Vivian Sobchack für Wissenschaftsinszenierungen im Science-Fiction-Film hervorgehoben.¹⁰ Sobchack grenzt das Genre des Science-Fiction-Films vom Genre des Horrorfilms ab, und zwar über die jeweils andere Akzentuierung innerhalb des Verhältnisses von Magie, Wissenschaft und Religion, die diese beiden Genres vornehmen. Sie schreibt:

»It seems not enough to say that the horror film is about magic and religion and the SF film is about science. What is important is to recognise that both genres involve interaction between magic, science, and religion – and the only thing which really separates the genres is the dominant emphasis given to either the sacred or the profane.«¹¹

Neben dem Unterschied hinsichtlich der Akzentuierung benennt Sobchack den Unterschied bezüglich der Tiefe des Einblicks, den Zuschauende in die Hintergründe und Logik der dargestellten Abläufe und Ergebnisse erhalten: »What distinguishes magic from science, the horror film from the SF film, amounts finally to how much we know about the process and the product, how much we are told about the cause and effect.«¹² Sobchack rekurriert hier auf die klassische ethnologische Theorie der Religion, die sich mit der Frage nach den sozialen Funktionen von Magie, Wissenschaft und Religion befasst. Magie, Wissenschaft und Religion, so stellt Sobchack im Anschluss an den polnischen Ethnologen Bronislaw Malinowski (1884–1942) fest, erfüllen das menschliche Bedürfnis, kosmische Fragen verständlich zu beantworten und trachteten danach, den Menschen mit dem Unbekannten zu versöhnen.¹³ Malinowski, der seinerzeit den Funktionalismus vorantrieb, postulierte im Jahr 1925, dass Magie und Wissenschaft ähnliche Ziele verfolgten und dazu ähnliche Methoden anwendeten. Magie und Wissenschaft zielten beide darauf ab, praktische Ziele zu erreichen, gingen theoriegeleitet vor und

10 Siehe Vivian Sobchack, »The Limits of the Genre: Definitions and Themes«, in *Screening Space: The American Science Fiction Film*, 17–63 (New Brunswick: Rutgers University Press, 1980).

11 Sobchack, »The Limits of the Genre«, 58.

12 Ebd., 59.

13 Siehe ebd., 58.

seien für ihre Wirksamkeit auf die genaue Ausführung praktischer Handlungen angewiesen. Er schreibt:

»Magic is akin to science in that it always has a definite aim intimately associated with human instincts, needs, and pursuits. The magic art is directed towards the attainment of practical aims. [...] it is also governed by a theory, by a system of principles which dictate the manner in which the act has to be performed in order to be effective.«¹⁴

Die magische Handlung ähnele dem naturwissenschaftlichen Experiment insofern, als dass sie theoriegeleitet angelegt sei, von Gesetzen bestimmt werde und nach genau festgelegten Regeln ausgeführt werden müsse.

Wenn Vale davon spricht, dass die Begegnung mit der magischen Welt des Winzig-Kleinen, die sich beim Blick ins Mikroskop offenbare, Neulinge für die Wissenschaft begeistere, so spricht er noch einen weiteren Aspekt an, den Malinowski in seiner Definition von Magie heraushob, namentlich das Paradox, dass Nicht-Wissen nicht die Wirksamkeit einer magischen Handlung einschränke. Mit Rückbezug auf die ethnologische Theorie der Religion beschreibt Sobchack dieses Paradox wie folgt: »Magic, then, is the term born from our collective lack of knowledge about something which works anyway.«¹⁵ Und wie schon Malinowski, der auf die Nähe der Magie zum Wunderbaren hinwies, als er formulierte, Magie und Religion existierten beide »[...] in the atmosphere of the miraculous, in a constant revelation of their wonder-working power [...]«¹⁶, stellt auch Vale den Bezug zum Wunderbaren und Unerklärlichen her, wenn er den ersten Gefühlseindruck, den die Begegnung mit der mikroskopischen Welt hervorruft, mit dem Begriff »amazement«¹⁷ belegt.

Das prägende Aha-Erlebnis, das der erste Blick in ein Mikroskop ermöglicht, vergleicht Vale weiterhin mit jenem wissenschaftshistorischen Schlüsselmoment im Jahr 1675, als dem niederländischen Instrumentenbauer, Naturforscher und Mikroskopiker Antoni van Leeuwenhoek die erste klare Sicht auf die Mikroorganismen in einem Tropfen Teichwasser vermittels des von ihm just entwickelten einfachen Lichtmikroskops gelang. Diesen Vergleich erweitert Vale um ein Expeditions- und Explorationsnarrativ, wenn er dem Blick ins Okular das Vermögen zuschreibt, einen »sense

14 Bronislaw Malinowski, *Magic, Science and Religion and Other Essays* (Glencoe, Illinois: The Free Press, 1948), 66.

15 Sobchack, »The Limits of the Genre«, 60.

16 Malinowski, *Magic, Science and Religion*, 67–68.

17 Vale, »Historical Contributions from Light Microscopy«.

of discovery and amazement« zu vermitteln, und damit die Betrachtenden gleichsam als Pionier*innen situiert. Über diese Wortwahl bezieht sich Vale implizit auf das Erzählmuster der Entdeckungsreise, das der Science-Fiction-Film *Fantastic Voyage* (USA, 1966, Regie: Richard Fleischer) für die Erkundung des innerkörperlichen Raums etablierte,¹⁸ und auf das etwa die Bildwelten der virtuellen Endoskopie explizit Bezug nehmen.¹⁹

Des Weiteren ruft Vale über den Begriff »amazement« die ästhetische Kategorie des Erhabenen (»the sublime«) auf. Seit Thomas Addison den vom antiken Dichtungstheoretiker Longinos, des bislang nicht identifizierten Verfassers der Schrift *Peri hypsous* (»Über das Erhabene«), vermutlich bereits im ersten nachchristlichen Jahrhundert eingeführten Begriff des Erhabenen im Jahr 1712 erneut aufgriff²⁰ und der britische Staatsmann und Philosoph Edmund Burke (1729–1797)²¹ und der deutsche Philosoph Immanuel Kant (1724–1804)²² den Begriff des Erhabenen in den Jahren 1757 und 1764 weiterentwickelten und philosophisch fundierten, wird dieses ästhetische Register immer wieder aufs Neue zur Beschreibung der überwältigenden und Ehrfurcht einflößenden Begegnung mit den unermesslichen Weiten des Weltraums und der gleichermaßen grenzenlos erscheinenden und in Erstaunen versetzenden Begegnung mit der Winzigkeit des Mikrokosmos herangezogen.

Die Aktualisierung des Erhabenen zeigt sich etwa in den Inszenierungen des Weltraums in Spezialeffekte-Sequenzen im Science-Fiction-Film und in den populären Bildwelten, die darauf abzielen, einem breiten Publikum einen Eindruck des Alls zu vermitteln, wie die Medienwissenschaft und die

18 Für eine Analyse der Verflechtung spiritueller Dimensionen mit technokratischen Imaginationen, die sie im Narrativ des, wie sie es nennt, »Biotourismus« verdichtet sieht und die sie im Film *Fantastic Voyage* identifiziert, siehe Kim Sawchuck, »Biotourism, *Fantastic Voyage*, and Sublime Inner Space«, in *Wild Science: Reading Feminism, Medicine and the Media*, Hg. Janine Marchessault und Kim Sawchuck (London und New York: Routledge, 2000).

19 Zur prägenden Rolle des Films *Fantastic Voyage* für die Bildwelten der virtuellen Endoskopie siehe Sven Stollfuß, *Digitale Körperinnenwelten: Endoskopische 3D-Animationen zwischen Medizin und Populärkultur* (Marburg: Schüren, 2014).

20 Siehe Thomas Addison, »ohne Titel«, *Spectator*, Nr. 420 (2. Juli 1712), zitiert nach Andrew Wilton, *Turner and the Sublime* (Chicago: University of Chicago Press, 1980), 11.

21 Siehe Edmund Burke, *A Philosophical Enquiry into the Origin of our Ideas of the Sublime and Beautiful*, herausgegeben, eingeleitet und annotiert von Adam Phillips (Oxford: Oxford University Press, 1990).

22 Siehe Immanuel Kant, *Kritik der Urteilskraft* in *Bibliothek der Philosophie: Schriften zur Ästhetik und Naturphilosophie*, Werke III (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1996).

Kunstgeschichte verschiedentlich aufgewiesen haben. Der US-amerikanische Medienwissenschaftler Scott Bukatman hat anhand einer Analyse der Funktion der visuellen Spezialeffekte, die der US-amerikanische Spezialeffekte-Künstler Douglas Trumbull für die Stargate-Sequenz im dritten Teil des Science-Fiction-Klassikers *2001: A Space Odyssey* (USA/UK, 1968, Regie: Stanley Kubrick) entwarf und umsetzte, aufgezeigt, wie die ästhetische Kategorie des Erhabenen in den 1960er-Jahren wiederkehrt, einer Zeit, die, wie Bukatman betont, die Entwicklung einer Haltung gegenüber neuen Technologien dezidiert herausforderte.²³ Die US-amerikanische Kunsthistorikerin Elizabeth Kessler hat in ihrer im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit bereits erwähnten Analyse der kunsthistorischen Vorbilder der Bildwelten, die aus den Daten, die das Hubble-Weltraumteleskop erhebt, generiert und gestaltet werden, den Rückbezug der gegenwärtigen Bildschöpfungen auf das Erhabene herausgearbeitet und den Begriff des »astronomischen Erhabenen« (»the astronomical sublime«) eingeführt.²⁴ Das Pendant in den Bildwelten der Mikrokinematografie hat der US-amerikanische Filmhistoriker Scott Curtis identifiziert, und zwar, indem er die Effekte der Skalensprünge,

23 Siehe Scott Bukatman, »The Artificial Infinite: On Special Effects and the Sublime«, in *Matters of Gravity: Special Effects and Supermen in the 20th Century* (Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2003). Für eine affirmativ-kritische Auseinandersetzung mit Bukatmans Position siehe Sawchuck, »Biotourism«, 19–20. Für eine Betrachtung des Erhabenen als Dreh- und Angelpunkt des Mythos der Digitalisierung siehe Vincent Mosco, *The Digital Sublime: Myth, Power, and Cyberspace* (Cambridge, Massachusetts und London, England: MIT Press, 2004). Zur These des Erhabenen als strukturgebendes Register von Technikfantasien vom Mittelalter bis in die 1930er-Jahre siehe Minsoo Kang, *Sublime Dreams of Living Machines: The Automaton in the European Imagination* (Cambridge, Massachusetts und London, England: Harvard University Press, 2011). Zur Relevanz des Erhabenen als einer rhetorischen Schlüsselfigur in populärwissenschaftlichen Veröffentlichungen siehe Alan G. Gross, *The Scientific Sublime: Popular Science Unravels the Mysteries of the Universe* (Oxford: Oxford University Press, 2018). Dagegen identifiziert Lev Manovich in der Computerkunst – er spricht von »data visualization art« – um das Jahr 2000 herum eine Tendenz des »Anti-Sublimen«. Das Projekt der Visualisierung großer Datenmengen in der Kunst vergleicht er mit der Praktik der Datenvisualisierung in der modernen Wissenschaft. Siehe Lev Manovich, »Data Visualization as New Abstraction and Anti-Sublime«, PDF-Datei, 2002, <http://manovich.net/index.php/projects/data-visualisation-as-new-abstraction-and-anti-sublime>. Dort heißt es: »If Romantic artists thought of certain phenomena and effects as un-representable, as something which goes beyond the limits of human senses and reason, data visualization artists aim at precisely the opposite: to map such phenomena into a representation whose scale is comparable to the scales of human perception and cognition.« Ebd., 8.

24 Siehe Elizabeth Kessler, *Picturing the Cosmos: Hubble Space Telescope Images and the Astronomical Sublime* (Minneapolis: The University of Minnesota Press, 2012).

die das Hauptmerkmal des Experimentalfilmklassikers *Powers of Ten* (USA, 1977, Regie: Charles und Ray Eames) darstellen und die Curtis als schwindelerregend beschreibt, mit den verbalen Beschreibungen der Begegnungen mit dem sich bewegenden Mikrokosmos durch die frühen Mikrokinematografen und ihre in der Unterhaltungsindustrie tätigen Zeitgenossen in Verbindung bringt, die mikrokinematografische Filme in ihre Unterhaltungsprogramme aufnahmen.²⁵

Der Aufbau und die Inszenierung des Auftakts von Vales Vortrag sowie seine Wortwahl verweben das Unterhaltende und das Ernsthafte. Rhetorisch geschickt verbindet Vale über die Kombination von Worten und Bildern Affekt und Erkenntnis miteinander und nutzt die affektive Wirkung der gesprochenen Worte und projizierten Bilder, um im Publikum einen Wissensdrang anzuregen. Über die Zusammenführung von Wissensvermittlung und Unterhaltung, wie Vale sie betreibt, steht sein Vortrag in einer langen Tradition der öffentlichen Aufführung von Wissen und der Inszenierung von Wissenschaft als performativer Praxis.

Das Thema der Aufführung von Wissenschaft als performativer Praxis fand in der Wissenschaftsgeschichte vielfach Beachtung. Jan Golinski etwa erörterte die Frage, wie über die Demonstration der Experimente mit dem selbstleuchtenden Element Phosphor vor Publikum durch Mitglieder der im Jahr 1660 gegründeten Royal Society in den letzten vier Dekaden des siebzehnten Jahrhunderts der Status der damals neuen experimentellen Philosophie verhandelt wurde.²⁶ Golinski stellt bereits für die Demonstration der Phosphoreszenz die Ambivalenz heraus, die sich aus den geradezu wundersamen und magischen Eigenschaften des damals neu entdeckten Elements ergebe, die der Naturphilosophie zur öffentlichen Anerkennung verhelfen, aber ebenso als Schwachpunkt wahrgenommen werden könne. Golinski schreibt: »Phosphorescence was at the same time a ›wonder‹, an anomalous and possibly magical phenomenon, and potentially a vital resource that might be harnessed to boost the prestige of the new philosophy.«²⁷ Und weiter heißt es: »Phosphorus could be a device for extending the public appreciation of the new experimental philosophy, but it could also

25 Siehe Scott Curtis, »Vergrößerung und das Mikroskopische Erhabene«, aus dem amerikanischen Englisch übersetzt von Berthold Rebhandl, in »Empirie«, Themenheft, *Zeitschrift für Medienwissenschaft* 5 (2011), <https://doi.org/10.25969/mediarep/2624>.

26 Siehe Jan V. Golinski, »A Noble Spectacle: Phosphorus and the Public Cultures of Science in the Early Royal Society«, *Isis* 80, Nr. 1 (1989).

27 Ebd., 11.

become a target for criticism by those who opposed the public status of the new science.«²⁸

Bezieht man diese Einsicht von Golinski auf Vales Präsentationsform zurück, so ergibt sich die Frage, wie die Zellbiologie ihren Status in Wissensinszenierungen verhandelt, die unter Computerbedingungen konzipiert und umgesetzt werden. Bemerkenswert ist, wie in den folgenden Ausführungen noch deutlich werden wird, dass die affektiven Register, die Vale anspricht, keineswegs neu sind, sondern vielmehr auf eine jahrhundertealte Tradition der Mikroskopie als Affektpraxis zurückgehen²⁹, eine Tradition, die allerdings für frühneuzeitliche Mikroskopiker mit einem devoten Szientismus in Verbindung gebracht wurde und im achtzehnten Jahrhundert an amateurwissenschaftlichen Praktiken festgemacht wurde. Vale hingegen setzt die affektiven Register, die in der Mikroskopie in vergangenen Jahrhunderten bereits etabliert wurden, strategisch ein, und zwar, um seinem Vortrag Überzeugungskraft zu verleihen, indem er seine inhaltlichen Ausführungen mit den Zielen der klassischen Rhetorik in Einklang bringt: »den Verstand lehren (docere), das Gemüt bewegen (movere), den Sinnen schmeicheln (delectare)«³⁰. Effektiv kombiniert Vale die Informationsvermittlung mit der affektiven und sinnlichen Ansprache des Publikums.

Der britische Wissenschaftshistoriker Simon Schaffer untersuchte, welche Rolle den öffentlichen Vorträgen von Vertretern der experimentellen Naturphilosophie in den letzten zwei Jahrzehnten des achtzehnten Jahrhunderts in Großbritannien und Frankreich bei der Verhandlung des Status der Naturphilosophie zukam und erörterte, wie die Vorträge auf politische Einflussnahme abzielten.³¹ Schaffer liest die Vorträge als performative Praktiken und berücksichtigt besonders die Frage der Rezeption der Vorträge als kulturelles und klassenbasiertes Phänomen, wenn er die Frage diskutiert, wie diese Wissenschaftsinszenierungen für die gesellschaftliche

28 Ebd.

29 Der Physiker und Wegbereiter der Strukturbiologie John Desmond Bernal hat aufgewiesen, dass Teleskop und Mikroskop in den ersten zwei Jahrhunderten nach ihrer Entwicklung primär zur Erbauung und Unterhaltung sowie zur Veranschaulichung philosophischer Überlegungen gebraucht und kaum als wissenschaftliche Instrumente verwendet wurden. Siehe John Desmond Bernal, *Science in History*, Band 2, *The Scientific and Industrial Revolutions* (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1971), 464–469.

30 Herrmann Schlüter, *Grundkurs der Rhetorik*, 7. Auflage (München: Deutscher Taschenbuch Verlag, 1981), 22.

31 Siehe Simon Schaffer, »Natural Philosophy and Public Spectacle in the Eighteenth Century«, *History of Science* xxi (1983).

Oberschicht – Schaffer bezieht sich auf den Begriff des »theatre of the upper class«³² – ihr Publikum formten³³ und über die Wissenschaftsinszenierung übergreifende moralische Fragen verhandelten.³⁴ Der britische Wissenschaftshistoriker Iwan Rhys Morus erweiterte den Untersuchungszeitraum und betrachtete die Inszenierungs- und Aufführungspraktiken von Wissenschaft als öffentliches Spektakel vom späten achtzehnten bis ins frühe zwanzigste Jahrhundert in London.³⁵ Morus beachtet dabei ganz besonders Medien- und Inszenierungstechniken wie das Panorama und die *Laterna Magica* und diskutiert in Anlehnung an Jonathan Crary, wie diese Techniken das Sehen veränderten. Aus wissenschaftssoziologischer Perspektive befasste sich Bruno Latour mit den rhetorischen und performativen Strategien, die der Chemiker und Mikrobiologe Louis Pasteurs (1822–1895) in einem öffentlichen Vortrag im Jahr 1864 an der Sorbonne einsetzte, um seine Position in dem Streit mit dem Mediziner, Botaniker und Zoologen Félix Pouchet (1800–1872) zu untermauern, der um die Frage kreiste, ob Leben spontan aus unbelebter Materie entstehen könne.³⁶ Pasteur gibt Regieanweisungen (»Bitte löschen Sie alles Licht.«), projiziert Mikrografien (»Herr Dubosq, projizieren Sie die Mikrographie [...]«) und stellt offene Fragen: »Was folgt aus diesem so einfachen, doch für die Frage, die uns beschäftigt, so schwerwiegenden Versuch?«³⁷. Er spricht die Zuhörenden direkt an und demonstriert vor den Augen des versammelten Publikums, wie Materie – in diesem Fall handelt es sich um Quecksilber und Staubteilchen – reagiert.

Ähnlich wie die von der Wissenschaftsgeschichte untersuchten historischen Persönlichkeiten in ihren Vorträgen *spricht* Vale nicht allein vom Stauen und Entdeckungsdrang, sondern ruft bei seinen Zuhörenden darüber hinaus vielmehr eben jene affektive Grundgestimmtheit hervor, die er der ersten gelingenden Seherfahrung am Mikroskop zuschreibt, und regt auf diese Weise bei seinem Publikum den Wunsch an, sich eingehender mit der

32 Ebd., 2.

33 Auf die wechselseitige Konstitution der Naturwissenschaften und ihrer jeweiligen Öffentlichkeiten mit einem besonderen Fokus auf der Partizipation richtet sich der Aufsatz von Bernadette Bensaude-Vincent, »A Historical Perspective on Science and Its ›Others«, *Isis* 100, Nr. 2 (Juni 2009).

34 Siehe Schaffer, »Natural Philosophy and Public Spectacle«, 2.

35 Siehe Iwan Rhys Morus, »Seeing and Believing Science«, *Isis* 97, Nr. 1 (März 2006).

36 Siehe Bruno Latour, »Pasteur und Pouchet: Die Heterogenese der Wissenschaftsgeschichte«, in *Elemente einer Geschichte der Wissenschaften*, Hg. Michel Serres (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2002), 752–758 und 780–781.

37 Latour, »Pasteur und Pouchet«, 752, Hervorhebungen im Original.

mikroskopischen Welt zu befassen. Dabei spielen neben den Worten, die er wählt, die Bilder, die er vorführt, eine maßgebliche Rolle. Über die leuchtend eingefärbten Bilder von mikroskopischen Ultrastrukturen und innerzellulärer Dynamik (siehe Abb. 4.2), die Vale auf der bildfüllenden Projektionsfläche präsentiert, inszeniert er die Arbeit am Mikroskop als eine eindrucksvolle ästhetische Erfahrung. Die affektive Involvierung der Zuschauenden verstärkt Vale noch durch seine körperliche Performanz, etwa wenn er über deiktische Gesten auf einen spezifischen Vorgang im Bild hinweist oder aus dem Bildkader heraustritt und den Blick auf eine Reihe von hochauflösenden Standbildern freigibt, die innerzelluläre Strukturen in fluoreszierenden Farben vor einem dunklen Bildhintergrund als ästhetisch reizvolle Meisterwerke inszenieren. Die Bilder laufen sodann, scheinbar ganz ohne Vales Zutun, in Form einer Diashow ab, die von virtuoson Cello- und Klaviersoli begleitet wird. Die Meisterschaft, die in der eingespielten Musik anklingt, unterstreicht die Kunstfertigkeit, die bei der Erzeugung der vorgeführten Bilder zum Einsatz kommt.

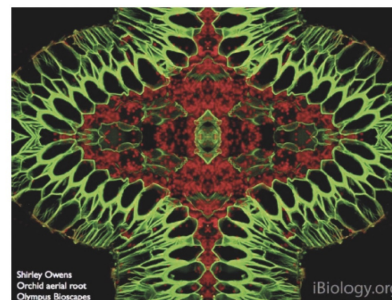
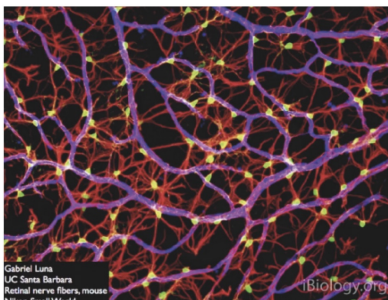
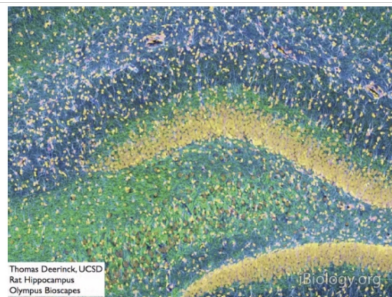
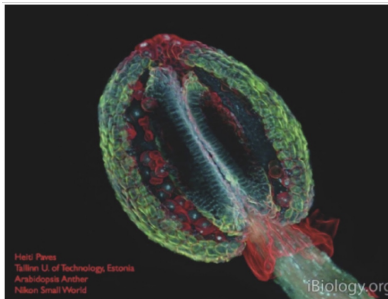


Abb. 4.2: Screenshots aus Ron Vales Videovortrag »Historical Contributions from Light Microscopy«
Quelle: Vale, »Historical Contributions from Light Microscopy«.

In seinem Kommentar zur Diashow lenkt Vale das Augenmerk nicht allein auf die Schönheit der am Mikroskop erzeugten Bilder, sondern thematisiert vor allem den Unterschied zwischen stillen und bewegten Bildern, wenn er sagt: »Not only does the microscope make these beautiful static images, but if you put a CCD camera on a microscope, it can take action movies of life.«³⁸ Für den Lebendzellularfilm stellt Vale hier ausdrücklich den Bezug zum populären Genre des Actionfilms her und hebt damit das Thema der Bewegung hervor. Auf dieses Thema, das Theoretiker*innen des frühen Kinos bereits in den 1920er- und 1930er-Jahren beschäftigte und bis heute weiterhin beschäftigt, komme ich im Verlauf des Kapitels noch zurück. Bevor ich mich den damit angesprochenen wirkungsästhetischen Fragen des Bewegtbildes erneut zuwende, möchte ich jedoch zunächst noch ein letztes Mal historisch etwas weiter zurückgehen und aufzeigen, dass sich die Verbindung von Affekt und Erkenntnis, die Vale dem fluoreszenzmikroskopischen Bild zuschreibt, bis zu den Anfängen der Mikroskopiepraxis in der Frühen Neuzeit zurückverfolgen lässt.

4.1.2 Mikroskopie als Affektpraxis im frühneuzeitlichen Diskurs

Die Mikroskopiepraxis wurde in den vergangenen Jahrhunderten von einer affektiven Unterströmung getragen, die diese Praxis immer wieder aufs Neue mit dem Bereich der Unterhaltung verband, zu dem Fachleute auf Abstand gingen, zu dem sie jedoch auch immer wieder Bezüge herstellten und noch immer herstellen, etwa wenn sie mit der breiteren Öffentlichkeit in einen Austausch treten oder wenn sie Neulinge an ihr Fach heranzuführen. Die Spur des affektiven Zugangs zum mikroskopischen Bild beginnt bereits bei Leeuwenhoek und Hooke und lässt sich in der Amateurmikroskopie des achtzehnten und neunzehnten Jahrhunderts weiterverfolgen.

Der französische Historiker Jules Michelet (1798–1874) kontrastierte im Jahr 1858 in seiner Monografie *L'Insect* die affektiven Grundgestimmtheiten

³⁸ Vale, »Historical Contributions from Light Microscopy«. Die Verbindung von Erkenntnis und Affekt in der Vermittlung von Wissen über Biologie und Mikroskopie ist Ron Vales Markenzeichen. Auf der Webseite des Vale Lab findet sich der Hinweis, dass Ron Vale derzeit eine Lehrbuchalternative für die gymnasiale Oberstufe und für Selbstlernende entwickelt, die biologisches Wissen nicht als Tatsachwissen zum auswendig Lernen, sondern in Form von Entdeckungsgeschichten vermitteln will. Siehe »Vale Lab«, Vale Lab, zuletzt geprüft: 2. September 2021, <https://valelab.ucsf.edu/>.

miteinander, die von der Begegnung mit dem Kosmos und dem Mikrokosmos bei den Astronomen und Mikroskopikern der Frühen Neuzeit hervorgerufen wurden. Während sich bei Galileo Galilei angesichts der Harmonie des Himmels ein Hochgefühl einstellte, begegnete der niederländische Anatom, Naturforscher und Zeitgenosse Leeuwenhoeks Jan Swammerdam (1637–1680) dem Mikrokosmos mit Bestürzung. Michelet konstatiert:

»Galilei empfindet vor dem Unendlichen des Himmels, wo alles harmonisch und wunderbar berechnet erscheint, mehr Freude als Staunen; er verkündet Europa die Sache in der heitersten Schreibart. Swammerdam scheint vor dem Unendlichen der mikroskopischen Welt von Schrecken ergriffen zu sein. Er weicht vor dem Abgrunde der im Kampf begriffenen, sich selbst verschlingenden Natur zurück! Er geräth [sic] in Verwirrung; er scheint zu fürchten, daß alle seine Begriffe, sein ganzer Glaube dadurch erschüttert werden.«³⁹

Der französische Wissenschaftsphilosoph und Ästhetiker Gaston Bachelard (1884–1962) kommentiert diese Passage bei Michelet im Jahr 1938, indem er »die recht seltsame affektive Bewertung« heraushebt,

»mit der wir Erscheinungen belegen, die sich plötzlich weit von unseren vertrauten Größenordnungen auftun. Die Demut, die vorwissenschaftliche Autoren und die populärwissenschaftliche Autoren unserer Zeit so häufig an den Tag legen, ist ein deutlicher Hinweis auf einen Widerstand, die gewohnte Größenordnung zu verlassen.«⁴⁰

Bachelard erklärt dieses Problem sodann in den Naturwissenschaften seiner Zeit für überwunden, merkt jedoch an, dass die Herausforderung, von der menschlichen Größenordnung Abstand zu nehmen, in der naturwissenschaftlichen Ausbildung fortbestehe.⁴¹

Die Abscheu, die Swammerdam beim Anblick mikroskopisch vergrößelter Insekten empfindet, unterscheidet sich von Leeuwenhoeks Reaktion auf den Mikrokosmos, die von Begeisterung und Faszination getragen wurde. In seinen Briefen aus den Jahren 1680 bis 1699 offenbarte Leeuwenhoek, der seine Arbeit am Mikroskop als Amateur begann, seit 1673 mit der Royal Society korrespondierte und 1680 als Mitglied aufgenommen wurde, die »Faszination, die sphärische, spiegelnde oder durchsichtige Gegenstände auf den Be-

39 Jules Michelet, *L'Insecte* (Paris: L. Hachette, 1858), zitiert nach Gaston Bachelard, *Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes: Beitrag zu einer Psychoanalyse der objektiven Erkenntnis* [i.O. 1938], aus dem Französischen übersetzt von Michael Bischoff, mit einer Einleitung von Wolf Lepenies (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1987), 325.

40 Bachelard, *Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes*, 325.

41 Siehe ebd., 325–326.

trachter ausübten«⁴², das Staunen, das ihn immer wieder aufs Neue überkam, wenn er ins Mikroskop blickte und das unvergleichliche Vergnügen, das ihm seine Beobachtungen am Mikroskop bereiteten. Überschwänglich formuliert er die mikroskopische Schaulust, der er sich wieder und wieder hingibt: »Das Vergnügen, das ich daran nahm, war so groß, dass ich nicht glauben kann, irgendein anderes irdisches Ereignis oder Schauspiel, sei es in der Kunst oder der Natur, könnte meinen Augen mehr Vergnügen bereiten [...]«. ⁴³ Während er in seinen Briefen seine starken affektiven Reaktionen auf die mikroskopischen Ansichten pulsierenden Blutes beschrieb, die ihn anhaltend vollständig absorbierten, ⁴⁴ war er in seinen mikroskopischen Studien jedoch um eine »abstrahierende Sichtweise« bemüht (siehe Abb. 4.3), »die das Gesehene in elementare Bausteine zerlegt und quantifizierbare Maßstäbe bereitstellt«⁴⁵.

Die Skepsis gegenüber der subjektiven Involvierung in die Forschungspraxis, die an den nüchternen Zeichnungen deutlich wird, die Leeuwenhoek bei einem namentlich unbekanntem Zeichner in Auftrag gab, wurzelt in der Anerkennung der Fehlbarkeit der Sinne, die sich in der Frühen Neuzeit als Pendant zum Instrumentengebrauch in den sich etablierenden experimentellen Naturwissenschaften herausbildete. Mit Bezug auf Robert Hookes Ausführungen zur Erweiterung der Sinne und des Bereichs des Sichtbaren durch technische Instrumente im Vorwort der *Micrographia*, die sie in Hookes Äußerung »There is a new visible World discovered.«⁴⁶ verdichtet sehen, schlussfolgern die Wissenschaftshistoriker Steven Shapin und Simon Schaffer:

42 Karin Leonhard, »Blut sehen«, in *Transfusionen: Blutbilder und Biopolitik in der Neuzeit*, Hg. Anja Lauper (Zürich: Diaphanes, 2005), 124.

43 Antoni van Leeuwenhoek, Brief Nr. 204 (119) vom 25. September 1699, adressiert an die Royal Society, in *Alle de Brieven van Antoni van Leeuwenhoek: De volledige werken van Van Leeuwenhoek, uitgegeven en toegelicht onder de Auspiciën van de Leeuwenhoek-Commissie der Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen* [Niederländisch – Englisch], hg. unter Schirmherrschaft der Leeuwenhoek-Gesellschaft der Königlichen Niederländischen Akademie der Wissenschaften und Künste, Band 12 (1696–1699), Hg. L. C. Palm (Lisse: Swets & Zeitlinger, 1989), 348, zitiert nach der Übersetzung des Zitats aus dem Niederländischen in Leonhard, »Blut sehen«, 125.

44 Siehe Leonhard, »Blut sehen«, 123–126.

45 Ebd., 125.

46 Robert Hooke, *Micrographia, or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses with Observations and Inquiries Thereupon* (London: Jo. Martyn und Ja. Allestry, Drucker der Royal Society, 1665), »The Preface«, sig a2.

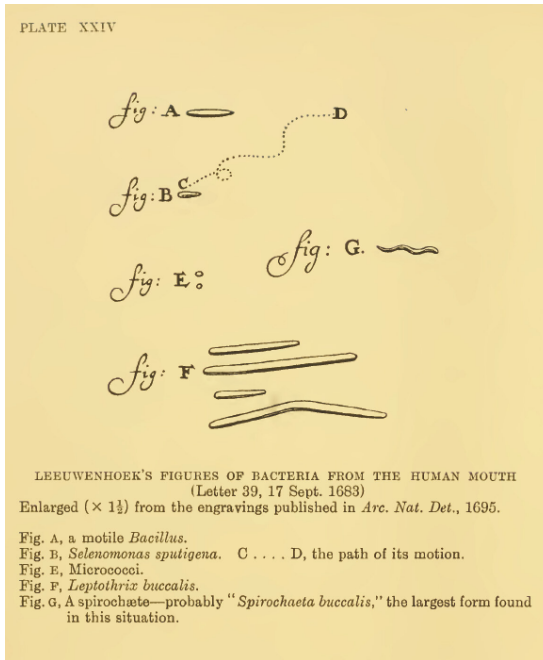


Abb. 4.3: Bakterien im Zahnbelag, vergrößerter Wiederabdruck eines Kupferstichs nach einer Zeichnung im Auftrag Antoni van Leeuwenhoeks

Quelle: Clifford Dobell, *Antony van Leeuwenhoek and his »Little Animals«, Being Some Account of the Father of Protozoology and Bacteriology and his Multifarious Discoveries in these Disciplines, Collected, Translated and Edited from his Printed Works, Unpublished Manuscripts, and Contemporary Records* (New York: Harcourt, Brace, 1932), 238.

»This new visible world indicated not only the potential of scientific instruments to enhance the senses; it also served as a warning that the senses were inherently fallible and required such assistance as the experimental philosopher could offer.«⁴⁷

Frühneuzeitliche Forscher wie Leeuwenhoek, die den emotionalen Regungen, die der Blick ins Mikroskop weckte, lebhaften sprachlichen Ausdruck verliehen, standen vor der Herausforderung, sich an das mechanistische Ideal der Naturphilosophie anzupassen, um von der Fachgemeinschaft

⁴⁷ Steven Shapin und Simon Schaffer, *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life*, einschließlich einer Übersetzung von Thomas Hobbes *Dialogus Physicus de Natura Aeris* von Simon Schaffer (Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1985), 37.

ernst genommen zu werden. Während Leeuwenhoek seine Seheindrücke am Mikroskop in eine bildhafte Sprache kleidete, produzierte er in den Zeichnungen und Kupferstichen, die er anfertigen ließ, ein »gestanztes, binär codiertes Bild« und kam damit der Anforderung nach, das »phänomenale Seherlebnis« »von jedem sensuellen Pathos«⁴⁸ zu bereinigen, das seit der Etablierung des cartesianischen Ideals im siebzehnten Jahrhundert als fehl am Platz erachtet wurde. Während frühe Mikroskopiker wie Leeuwenhoek in der visuellen Repräsentation darauf zielten, Abstand von ihren Untersuchungsobjekten zu nehmen, zu denen Mikroorganismen, Insekten, Fische und Krustentiere zählten, und über die bildliche Darstellung ihrer Seheindrücke eine Rationalisierung anstrebten, kaschierten sie damit die tiefe Erschütterung und anhaltende Faszination, die von der Begegnung mit dem Mikrokosmos ausging.

In Robert Hookes *Micrographia* hingegen wird der intensive Affekteindruck, wie ihn der Mikrokosmos heraufbeschwor, nicht so sehr über die poetische Sprache transportiert, sondern vielmehr in den bildlichen Darstellungen verdichtet. Hookes dem englischen König gewidmetes und breit rezipiertes Werk beeindruckte Lesende mit detailreichen Kupferstichen, die Seheindrücke, die Hooke bei der Arbeit am Mikroskop empfing, in bildliche Darstellungen übersetzten.⁴⁹ Einige der in der *Micrographia* abgedruckten Kupferstiche wie etwa die Darstellung der vergrößerten Ansicht eines Flohs (siehe Abb. 4.4) sprengten gar das Format der Buchseite und mussten beim Blättern durch das Buch ausgefaltet werden, so dass das Blatt deutlich über die Buchseiten hinausragte.

Die außerordentlich detailreiche visuelle Darstellung vermittelte Erkenntnisse über Formen und Strukturen des Körperbaus des Flohs. Die materielle Präsentation der Darstellung auf einem übergroßen Faltblatt machte das Vermögen des Mikroskops greifbar, die Untersuchungsgegenstände zu vergrößern. Die Praxis des Ausfaltens involvierte Lesende optisch und haptisch und inszenierte die Erfahrung am Mikroskop als eine Praxis, die optische und haptische Zugangsweisen zur Welt des Winzig-Kleinen kombiniert.

48 Leonhard, »Blut sehen«, 133.

49 Zur Vermittlungsleistung der Kupferstiche in Hookes *Micrographia* und ihrer maßgeblichen Rolle für die Reform des Sehens siehe Angela Fischel, »Sehen, Darstellen, Beschreiben: Mikroskopische Beobachtung in den Kupferstichen der *Micrographia*«, *Kunsttexte.de: E-Journal für Kunst- und Bildgeschichte*, Nr. 1 (2002). <https://doi.org/10.18452/6907>.

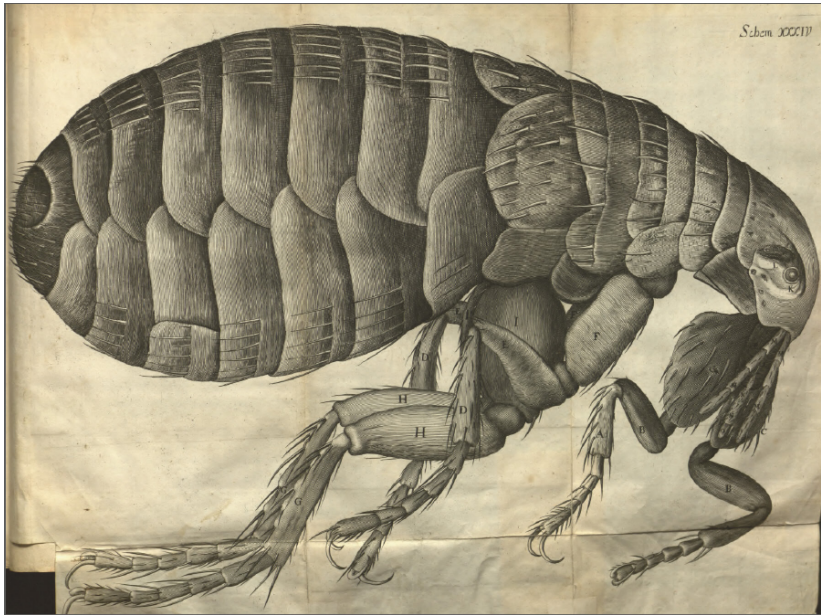


Abb. 4.4: Kupferstich der vergrößerten Ansicht eines Flohs

Quelle: Hooke, *Micrographia*, 211.

4.1.3 »[T]he Wonders of the Minute Creation«: Amateurmikroskopie im achtzehnten Jahrhundert als »gelehrte Unterhaltung«

Mit ausgelöst durch die breite Rezeption der *Micrographia* entwickelte sich in den 1730er- bis 1760er-Jahren in England und im deutschsprachigen Raum unter den sogenannten Virtuosi und Dilettanti – den bildungshungrigen, wissenschaftlich interessierten bürgerlichen Schichten – eine Begeisterung für die Mikroskopie. Die US-amerikanische Kunsthistorikerin Barbara Maria Stafford hat die Mikroskopiepraxis als nützlichen Zeitvertreib der feinen Leute identifiziert und im Kontext der »artful science«⁵⁰ verortet, der »gelehrten Unterhaltung«, jener besonderen Mischung aus Bildung und Unterhaltung, die sich in der Zeit der Aufklärung in den privilegierten Schichten großer Beliebtheit erfreute. Diese Mode manifestierte sich in einer ganz eigenen Medienkultur. Mikroskopierbücher, wie etwa *The Microscope Made Ea-*

50 Barbara Maria Stafford, *Artful Science: Enlightenment, Entertainment, and the Eclipse of Visual Education* (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1994).

sy⁵¹ von 1743 und das Instruktionsbuch *Employment for the Microscope*⁵² von 1753, die der britische Dichter und Naturforscher Henry Baker (1698–1774) verfasste, erklärten einem interessierten Laienpublikum die Funktionsweise des Mikroskops, informierten und reflektierten über die Entdeckungen (»discoveries«) der Mikroskopie und boten Anleitung für eigene Experimente.

Die deutsche Kunsthistorikerin Angela Fischel erläutert, dass die Rezeption der beiden von Baker verfassten Mikroskopierbücher durch die Dilettanti im Kontext eines spezifischen Bildungsideals stand, das auf die Sensibilisierung abzielte,⁵³ das heißt, eine Schärfung der sinnlichen Wahrnehmung und der seelischen Empfindsamkeit. Fischel schreibt: »Das Besondere an diesem Bildungsideal liegt unter anderem darin, daß sich Vergnügen oder intellektuelle Lust an der Erkenntnis und die Aufnahme von Information nicht widersprechen. Vielmehr bedingen sich Wissensfreude und Wissenschaft sogar [...]«⁵⁴ Pointiert zum Ausdruck komme dieser affektiv begründete Zugang zum Wissen in der ästhetischen Theorie Edmund Burkes, einem Zeitgenossen Bakers, »die ästhetische Wahrnehmung mit Erkenntnis koppelt«⁵⁵. Bei Baker und bei Burke, so Fischel, »gleichet das Erkenntnismodell einem System aus affektiven Reaktionen als Resonanzen auf visuelle Eindrücke«⁵⁶.

Baker betonte denn auch in seinen verbalen Beschreibungen die starken Gefühlseindrücke, die der Blick ins Mikroskop hervorruft, und stellt ganz besonders das Vergnügen (»pleasure«), das Genießen (»enjoyment«) und das Glück (»happiness«)⁵⁷ heraus. Bereits der erste Passus des langen Untertitels von *The Microscope Made Easy* rahmte das Mikroskopieren als eine für Neugier-

51 Henry Baker, *The Microscope Made Easy* (London: R. Dodsley, 1743).

52 Henry Baker, *Employment for the Microscope* (London: R. Dodsley, 1753).

53 Siehe Angela Fischel, »Optik und Utopie: Mikroskopische Bilder als Argument im 18. Jahrhundert«, in *Visuelle Argumentationen, die Mysterien der Repräsentation und die Berechenbarkeit der Welt*, Hg. Horst Bredekamp und Pablo Schneider (München: Fink, 2006), 260. Zum Bildungsideal der Sinnes-, Gefühls- und Verstandesschulung zu Zeiten der französischen Aufklärung im Anschluss an die englischen Empiristen siehe die detaillierte Studie der US-amerikanischen Wissenschaftshistorikerin Jessica Riskin, *Science in the Age of Sensibility: The Sentimental Empiricists of the French Enlightenment* (Chicago: University of Chicago Press, 2002).

54 Fischel, »Optik und Utopie«, 261.

55 Ebd., 263.

56 Ebd.

57 Ebd., 262.

rige erlernbare kulturelle Praxis, die das Wunderbare erfahrbar macht. Dort heißt es:

»The Microscope made easy, Or, the Nature, Uses, and Magnifying Powers of the Kinds of Microscopes Described, Calculated, and Explained: for the Instruction of such, particularly, as desire to search into the Wonders of the minute Creation, tho' they are not acquainted with Optics.«⁵⁸

Bemerkenswert ist gleich im Untertitel der Verweis auf das Wunder. Das Buch richtete sich an all jene Nicht-Fachleute, die »die Wunder des Winzig-Kleinen zu erkunden begehren«, und verspricht die für den Zugang zu diesen Wundern nötige Unterweisung. Die Wissenschaftshistorikerinnen Lorraine Daston und Katharine Park haben den Status des Naturwunders – als Gegenstand der Naturphilosophie – und der Verwunderung – als wissenschaftliche Grundhaltung – in der Naturphilosophie vom Mittelalter bis in die Zeit des Barock untersucht und den Abschied von beidem um 1750 aufgewiesen.⁵⁹ Die Autorinnen heben die Verflechtung von Affekt und Verstand im Selbstverständnis der Forschenden vom Mittelalter bis zur Mitte des achtzehnten Jahrhunderts hervor, ein Verständnis, das in der Doppelbedeutung des Begriffs »wonder« – als Substantiv »Wunder« und als Verb »wundern« – zum Ausdruck komme. Sie schreiben: »As theorized by medieval und early modern intellectuals, wonder was a cognitive passion, as much about knowing as about feeling.«⁶⁰

Edmund Burke bemerkte im Jahr 1757 in seinen Ausführungen zum Erhabenen, die die wiederaufflammende Diskussion dieses Begriffs in der zweiten Hälfte des achtzehnten Jahrhunderts anregen, dass die Gefühle des Staunens und der Ehrfurcht, die von dem Erlebnis riesiger Gebäude und grenzenlos erscheinender Landschaften hervorgerufen würden, auch von der Begegnung mit der Welt des Winzig-Kleinen geweckt werden können:

»As the great extreme of dimension is sublime, so the last extreme of littleness is in some measure sublime likewise; when we attend to the infinite divisibility of matter, when we

58 Henry Baker, *The Microscope*.

59 Siehe Lorraine Daston und Katharine Park, *Wonders and the Order of Nature (1150–1750)* (New York: Zone Books, 1998). Aus einer medienkulturwissenschaftlichen Perspektive hat Natascha Adamowsky anhand der Epistemologie und Erfahrung des Fliegens aufgewiesen, dass das Wundernarrativ bis in die 1910er-Jahre fortwirkt und sich mit der technischen Entwicklung verwebt. Siehe Natascha Adamowsky, *Das Wunder in der Moderne. Eine andere Kulturgeschichte des Fliegens* (München: Fink, 2010).

60 Ebd., 14.

pursue animal life into these excessively small, and yet organized beings, that escape the nicest inquisition of the sense, when we push our discoveries yet downward, and consider those creatures so many degrees yet smaller, and the still diminishing scale of existence, in tracing which the imagination is lost as well as the sense, we become amazed and confounded at the wonders of minuteness; nor can we distinguish in its effect this extreme of littleness from the vast itself.«⁶¹

Burke beschreibt die Erfahrung der Welt des Winzig-Kleinen, die sich sowohl der sinnlichen Wahrnehmung als auch der Einbildungskraft entziehe, als eine schwindelerregende Entdeckungsreise in die Tiefenstrukturen der Materie. Burkes Überlegungen umfassen die Begegnung mit der belebten und der unbelebten Materie, mit winzigen Tieren und Mikroorganismen. Die Erfahrung des Mikroskopischen, so behauptet Burke, sei vergleichbar mit der Erfahrung des Kosmischen: Die Wunder der Winzigkeit versetzten Beobachtende ebenso in Erstaunen und Verwirrung wie die Begegnung mit dem Riesigen.

Wie oben bereits ausgeführt, nuanciert Gaston Bachelard diese Beobachtung von Burke, wenn er im Jahr 1938 schreibt:

»Wir müssen im übrigen recht unterschiedliche affektive Tönungen zwischen den Mediationen zu den beiden Unendlichkeitsbereichen hervorheben. Als die beiden Bereiche durch die Entdeckung von Teleskop und Mikroskop erweitert wurden, bestand auf Seiten des unendlich Kleinen die größere Schwierigkeit, wieder zur Ruhe zu finden.«⁶²

Dieser Beobachtung Bachelards scheint die Vielfalt der »affektiven Tönungen« recht zu geben, die in den ersten rund einhundert Jahren der Geschichte der Mikroskopie der Erfahrung der mikroskopischen Welt zugeschrieben wurden. Während Swammerdam das Grauen hervorhob, das ihn beim Anblick von Mikroorganismen überkam, und Burke das Gefühl der Ehrfurcht betonte, das die Begegnung mit dem Mikrokosmos in ihm wachrief, stellten Mikroskopierbücher aus dem Rokoko im deutschsprachigen Raum – möglicherweise im Anschluss an Leeuwenhoek – das Vergnügen heraus, das die Welt des Winzig-Kleinen den Betrachtenden bereite. Werke wie die *Mikroskopischen Gemüths- und Augenergötzungen* von Martin Frobenius Ledermüller (1719–1769) aus den Jahren 1760 bis 1762, die *Insecten-Belustigungen* von August Johann Rösel von Rosenhof (1705–1759), die in den Jahren 1736 bis 1752 erschienen, und *Das Neueste aus dem Reich der Pflanzen*

61 Burke, *A Philosophical Enquiry*, 66.

62 Bachelard, *Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes*, 324–325.

aus dem Jahr 1764 von Wilhelm Friedrich Freiherr von Gleichen-Russwurm (1717–1783) richteten sich an eine gebildete Leserschaft, die gleichermaßen unterhalten wie unterwiesen werden wollte.⁶³ Bereits der Titel des Buches von Ledermüller adressierte die Empfindsamkeit der Leserschaft und betonte das gefühlsmäßige und sinnliche Vergnügen, zu dem das Mikroskop verhelfen sollte. Der Titel der Monatsschrift Rösels von Rosenhofs stellte die Kurzweil in den Mittelpunkt, die die gelehrte Unterhaltung versprach, und unterstrich das Amusement, das die mikroskopische Welt den Betrachtenden verschaffe. Der Untertitel der Schrift des Freiherrn von Gleichen, *Mikroskopische Untersuchungen und Beobachtungen der geheimen Zeugungstheile der Pflanzen in ihren Blüten*, lockte die Lesenden mit dem Versprechen der Enthüllung des Verborgenen und leicht Anzughlichen.

Zu diesem reichen Affektdiskurs, der sich um die Gegenstände der mikroskopischen Betrachtung entspann, trat in den 1850er-Jahren ein Diskurs der Faszination⁶⁴, der sich auf die technischen Objekte richtete, die zum Studium des Mikrokosmos entwickelt wurden. Der deutsche Anglist Hans Ulrich Seeber hat in seinen ästhetisch ausgerichteten Überlegungen zum Faszinationsbegriff auf die vielfach gelagerte »produktive Ambivalenz« des Begriffs aufmerksam gemacht und das Verständnis der Faszination als eine Form der »gesteigerten Aufmerksamkeit«⁶⁵ hervorgehoben, das heißt, die »volle Konzentration auf den Gegenstand der Wahrnehmung«⁶⁶. Seeber betont auch die enge Verbindung von Faszination und Verlebendigung:

63 Siehe Janina Wellmann, »Bewegung an der Wand: Zur Aufführung von Organismen mit dem Sonnenmikroskop«, in *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 14: *Scientific Fiction: Inszenierungen der Wissenschaft zwischen Film, Fakt und Fiktion*, Hg. Luisa Feiersinger (Berlin: De Gruyter, 2018), 10.

64 Für einen systematischen Überblick über die Bedeutungsgeschichte des Faszinationsbegriffs siehe Andreas Degen, »Concepts of Fascination, from Democritus to Kant«, *Journal of the History of Ideas* 73, Nr. 3 (Juli 2012). Für einen Überblick über die vielfachen Berührungspunkte zwischen der Geschichte des Faszinationsbegriffs und der Geschichte der sinnlichen Wahrnehmung und ihrer Neuausrichtung durch Bildschirmmedien siehe Steven Connor, »Fascination, Skin and the Screen«, *Critical Quarterly* 40, Nr. 1 (1998). Für eine explizit medienkulturwissenschaftliche Annäherung an den Faszinationsbegriff siehe Brigitte Weingart, »Faszinieren«, in *Historisches Wörterbuch des Mediengebrauchs*, Hg. Heiko Christians, Matthias Bickenbach und Nikolaus Wegmann (Köln, Weimar, Wien: Böhlau, 2015).

65 Hans Ulrich Seeber, »Ästhetik der Faszination? Überlegungen und Beispiele«, *Anglia: Journal for English Philology* 128, Nr. 2 (2010): 200. Das Verständnis von Faszination als gesteigerte Aufmerksamkeit setzt im philosophischen Diskurs in der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts an. Siehe Degen, »Concepts of Fascination«, 372.

66 Seeber, »Ästhetik der Faszination?«, 203.

»Faszination, könnte man sagen, enthält das Versprechen der offen oder insgeheim ersehnten physischen und seelisch-geistigen Revitalisierung [...].«⁶⁷ Die deutsche Medienkulturwissenschaftlerin Brigitte Weingart befreit die Faszination in ihrer Untersuchung der Genealogie, Poetik und Medienästhetik des Begriffs als eine Form der gesteigerten Aufmerksamkeit und zugleich als eine Erstarrung, die im Effekt einer Verzauberung eintritt, ein paradoxer Zustand, der als eine emotionale Antwort auf das Unerwartete zu werten sei, das die bisherige Erfahrung übersteigt und den Verstand herausfordert. Sie weist auf die Nähe des Begriffs der Faszination zu den Begriffen des Wunderbaren und des Staunens hin:

»As a reaction to the unexpected, it is this moment of epistemic crisis that fascination shares with the long-established concept of *admiratio*. As late as the eighteenth century, *admiratio* (which of course contains the Latin noun *mirum* for ›miracle‹ and ›marvel‹) referred not only to admiration (*Be-wunderung*), but also to amazement, surprise, and wonder (*Ver-wunderung*) – and thus to the whole range of emotional reactions to that which appeared to be ›miraculous‹ (*das Wunderbare*).«⁶⁸

Im England der 1850er-Jahre bildete sich unter Mikrobiologen ein Diskurs heraus, der die Transparenz feierte – eine Faszination, die bereits bei Leeuwenhoek anklang – und zugleich die Vermittlungsleistung des Mikroskops herunterspielte. Der Diskurs zur Transparenz im neunzehnten Jahrhundert wendete die negative Bewertung der Transparenz durch Mikroskopiker*innen wie Robert Hooke und Margaret Cavendish (1623–1673) im siebzehnten Jahrhundert ins Positive.⁶⁹ Während Cavendish das verzernte, übertrieben vergrößerte Bild, das sich dem Auge im Mikroskop darbot, noch als trügerisch und mehrdeutig empfand,⁷⁰ erregten die Klarheit, das Durchscheinende und das Kristalline der unter dem Mikroskop betrachteten Objekte um 1850 die Faszination der Mikrobiologen.⁷¹ Die gläsernen Paraphernalien der

67 Ebd., 199.

68 Brigitte Weingart, »Contact at a Distance: The Topology of Fascination«, in *Rethinking Emotion: Interiority and Exteriority in Premodern, Modern, and Contemporary Thought*, Hg. Rüdiger Campe und Julia Weber (Berlin: De Gruyter, 2014), 72. Siehe auch Brigitte Weingart, »Blick zurück: Faszination als ›Augenzauber‹«, in »*Es trübt mein Auge sich in Glück und Licht*«: *Über den Blick in der Literatur*, Festschrift für Helmut J. Schneider zum 65. Geburtstag, Hg. Kenneth S. Calhoun et al. (Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2010).

69 Siehe Isobel Armstrong, »The Microscope: Mediations of the Sub-Visible World«, in *Transactions and Encounters: Science and Culture in the Nineteenth Century*, Hg. Roger Luckhurst und Josephine McDonagh (Manchester: Manchester University Press, 2002), 32–33.

70 Siehe Armstrong, »The Microscope«, 32–33.

71 Siehe ebd., 32.

Mikroskopiepraxis wie Linsen, Glascontainer und Objektträger reizten die Sinneslust.⁷² Im Unterschied zum Teleskop, das versprach, die räumliche Distanz zwischen Beobachtendem und Beobachtetem zu verringern, eröffnete das Mikroskop den Blick auf eine sinnliche und durchscheinende Mikrowelt, die verhiess, das Geheimnis des Lebens zu enthüllen, wie die britische Literatur- und Kulturwissenschaftlerin Isobel Armstrong heraushebt, wenn sie schreibt: »Pullulating and diaphanous, the world of the microscope seemed to offer up the secret of the origin of life in a way that the telescope did not.«⁷³

Aus dem Blick gerieten dabei die Vermittlungsleistung und die Prothesenhaftigkeit des Mikroskops, wie Armstrong anmerkt: »Mediation was either ignored or uneasily repressed. But the less directly it was confronted, the more the status of observation became problematical.«⁷⁴ Die Problematisierung des Sehvorgangs sowohl des Beobachters als auch des Mikroskops als prothetischer Apparatur blieb jedoch aus. Armstrong beschreibt ein Spannungsverhältnis zwischen der Illusion des unvermittelten Blicks und der Unumgänglichkeit der Dokumentation und der Vermittlung der Seheindrücke im Medium der Zeichnung.

Den amateurwissenschaftlichen Diskurs der 1730er- bis 1760-Jahre und den Diskurs der Transparenz in den 1850er-Jahren bestimmte ein affektiver Zugang zur Mikroskopie und zu den Objekten des Mikrokosmos. Der Affekt, der von der Welt des Winzig-Kleinen ausgeht, wurde in so unterschiedlichen Registern gefasst wie dem Wunderbaren, dem Monströsen, dem Erhabenen, dem Amüsanten und dem Faszinierenden. Im Vordergrund der gelehrten Unterhaltung, zu der das Mikroskop verhalf, stand der sinnliche Zugang zu einer verborgenen Welt. Bemerkenswert erscheint allerdings, dass die wegweisenden Erkenntnisse, die zur Begründung der Disziplin der Zellbiologie führten, erst am Ende dieser Periode gewonnen wurden, und zwar in den Jahren 1838 und 1839 durch den Botaniker Matthias Schleiden (1804–1881) und den Anatomen und Physiologen Theodor Schwann (1810–1882). Die affektive Rezeption mikroskopischer Bilder durch ein Laienpublikum ging anscheinend mit einer Stagnation der Entwicklung der zu wissenschaftlichen Zwecken betriebenen Mikroskopie im achtzehnten Jahrhundert einher.⁷⁵ So existierten beispielsweise für Mikroskope bis in die 1830er-Jahre keine allge-

72 Siehe ebd., 33.

73 Ebd., 31.

74 Ebd., 33.

75 Siehe Fischel, »Optik und Utopie«, 256.

meingültigen Standards, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwerte.⁷⁶

War die affektive Involvierung mit den Gegenständen der Erkenntnis in den ersten rund 270 Jahren der Geschichte der Mikroskopie wenigen Gelehrten sowie den gebildeten und vermögenden Schichten vorbehalten, so kann mit dem Aufkommen der optischen Massenmedien wie dem Film und später dem Fernsehen eine Demokratisierung mikroskopischer Praktiken beobachtet werden. Ausschlaggebend waren hierfür allerdings nicht allein medientechnische Entwicklungen. Kulturelle Entwicklungen wie etwa die Arbeiter*innenbildung spielten gleichfalls eine maßgebliche Rolle. Die Hobby-Mikroskopie war zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts in England keine alleinige Aktivität der Mittel- und Oberklasse mehr. Vielmehr erfolgte in den 1910er-Jahren eine Demokratisierung der Mikroskopie. Im Zuge der Arbeiter*innenbildung in England diffundierte das Hobby der Mikroskopie in die Arbeiterklasse. Der *Quekett Microscopical Club* (QMC) etwa, der Amateurmikroskopiker*innen in London ein Forum bot, richtete sich an Arbeiter*innen und Handwerker*innen.⁷⁷

4.2 Affizierungstechniken: Mikrokinematografie als Forschungsmedium und »Cinema of Attractions«

Wie verändert sich der affektive Zugang zur Begegnung mit dem Mikrokosmos durch die Entwicklung von mikroskopischen Bewegtbildtechniken zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts? Welche Rolle spielen Techniken wie Vergrößerung und Zeitraffer in Verbindung mit fotografischen Verfahren der Bildaufzeichnung für die Rezeption mikroskopischer Bildwelten? Im Folgenden sollen die Formen der affektiven Involvierung der Betrachtenden jener Bilder ausgelotet werden, die mit dem technischen Verfahren der Mikrokinematografie erzeugt wurden, einer Technik, die zu Zeiten des frühen Kinos (1895–1913) entwickelt wurde. Die Mikrokinematografie kombinierte eine Filmkamera mit einem Mikroskop und ermöglichte es auf diese

⁷⁶ Siehe Stefan Ditzen, »Zeichnen am Fenster zum Mikrokosmos – Technik als Einigungshilfe auf Bilder«, in *The Picture's Image. Wissenschaftliche Visualisierung als Komposit*, Hg. Inge Hinterwaldner und Markus Buschhaus (München: Fink, 2006).

⁷⁷ Siehe Timothy Boon, *Films of Fact: A History of Science in Documentary Films and Television* (London: Wallflower, 2008), 21.

Weise, die Bewegungen von Zellen und Mikroorganismen in ihrem zeitlichen Verlauf aufzuzeichnen und in Form von projizierten Bewegtbildern wiederzugeben.

Die entscheidende Neuerung gegenüber einem Verfahren wie der Mikrofotografie bestand darin, dass die Mikrokinematografie es erlaubte, den Mikrokosmos als eine Dimension in Bewegung darzustellen und Abläufe anschaulich zu machen. Gegenüber Projektionen mit dem Sonnenmikroskop, bei denen die Formen, Strukturen und Bewegungen, die das Mikroskop erkennbar machte, auf einen Schirm projiziert wurden, bot die Mikrokinematografie den Vorteil, die Aufnahmen zu konservieren. Während die Projektionen mit dem Sonnenmikroskop flüchtig waren und, darin theatralen Aufführungen vergleichbar, auf die ›leibliche Kopräsenz‹⁷⁸ der mikroskopischen Akteure und ihres Publikums angewiesen waren, ließ es die Mikrokinematografie zu, die Bilder zu fixieren und an einem anderen Ort zur Aufführung zu bringen. Des Weiteren gestattete es die Mikrokinematografie, die Dauer der Projektionszeit von der Dauer der Aufnahmezeit zu entkoppeln und die Aufnahmen in der Projektion vermittels Zeitraffer zu beschleunigen.

Vergrößerung und Zeitraffer sind dabei allerdings nicht allein als Techniken zu werten, die winzig kleine Phänomene in den Bereich des Sichtbaren überführen und das unvermittelt Unanschauliche zur Anschauung bringen. Diese Techniken der Versinnlichung des unvermittelt Unzugänglichen, so meine These, zeichnen sich vielmehr durch einen affektiven Surplus aus. Diesen affektiven Überschuss, den Vergrößerung und Zeitraffer erzeugen, erkannten bereits die frühen Filmtheoretiker*innen und die ersten Naturwissenschaftler, die mit Bewegtbildtechniken experimentierten. Einige Naturwissenschaftler machten sich die spektakuläre Wirkung der Bilder, die sie in ihren Laboren erzeugten, in öffentlichen Vorführungen zunutze, um das Publikum zu unterhalten und für die Wissenschaft zu begeistern oder um ihren Hypothesen Nachdruck zu verleihen. Und Schausteller*innen integrierten mikrokinematografische Aufnahmen in ihre Unterhaltungsprogramme.

78 Zum Begriff der leiblichen Kopräsenz von Schauspielenden und Zuschauenden als Kennzeichen des Performativen siehe Erika Fischer-Lichte, *Ästhetik des Performativen* (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2004).

4.2.1 Attraktion und Epistemophilie im frühen Kino

Die Projektion von naturwissenschaftlichen Bildern, die einen Eindruck eines kontinuierlichen Bewegungsablaufs vermittelten, fand um 1900 nicht allein im Labor statt, sondern ereignete sich darüber hinaus auch in einem sozialen Rahmen, der als ein Kontext der bildenden Unterhaltung beschrieben werden kann. Der Edinburger Hals-Nasen-Ohrenarzt und Chirurg John Macintyre schuf im Jahr 1897 mit dem Röntgenfilm, der einen Froschschenkel in der Flexionsbewegung zeigt, eine frühe medizinische Stop-Motion-Animation. Unter seinem Röntgengerät fertigte Macintyre eine Reihe von Standbildern von den Segmenten der Bewegung eines Froschkniees an, fügte die Einzelbilder zusammen und projizierte sie, um die Bewegung lebendig erscheinen zu lassen. Sein Publikum fand diese röntgenbildbasierte Stop-Motion-Animation erstmals am 16. Juni 1897 auf der »Ladies' Night« der Royal Society in Glasgow.⁷⁹ Die US-amerikanische Kunstwissenschaftlerin⁸⁰ Lisa Cartwright hat in ihrer wegweisenden Untersuchung zum Kino als Forschungsinstrument der Medizin aufgewiesen, dass es bei dem Gebrauch des Bewegtbildes in solchen Experimenten weniger um eine Sichtbarmachung des Unsichtbaren ging – wie es beispielsweise der französische Filmkritiker André Bazin im Jahr 1947 für den Wissenschaftsfilm behauptete⁸¹ –, sondern vielmehr um eine kinematografische Erweiterung des menschlichen Sensoriums oder sogar seinen Ersatz⁸². Medizinische Filmexperimente wie dieses, die Visualisierungstechniken der Medizin in Anspruch nahmen, erwiesen sich als anschlussfähig für die populäre Kultur des Spektakels.⁸³ Cartwrights Beobachtung spricht dafür, bildgebende Verfahren wie die Röntgenkinematografie in einen Diskurs der »mechanischen Objektivität« einzuordnen, wie er im zweiten Kapitel dieses Buches angesprochen wurde. Cartwrights Einschätzung deutet zudem darauf hin,

79 Siehe »The Royal Society Conversazione« (19. Juni 1897), *The Lancet*: 1706.

80 Cartwright hat eine Professur für »Visual Arts« an der University of California in San Diego inne.

Mit der Bezeichnung von Cartwright als Kunstwissenschaftlerin sollen die hier irreführende Bezeichnung »Bildwissenschaftlerin« und die zu enge Bezeichnung »Kunsthistorikerin« vermieden werden.

81 Siehe André Bazin, »Science Film: Accidental Beauty« [i.O. 1947], in *Science is Fiction: The Films of Jean Painlevé*, Hg. Andy Masaki Bellows, Marina McDougall und Brigitte Berg, aus dem Französischen übersetzt von Jeanine Herman (Cambridge, Massachusetts: Bricco Press, 2000), 145.

82 Siehe Lisa Cartwright, *Screening the Body: Tracing Medicine's Visual Culture* (Minneapolis: University of Minnesota Press, 1995), 23.

83 Siehe Ebd., 22.

dass in der naturwissenschaftlichen Forschung um 1900, die mit Bewegtbildern arbeitete, die Empirie der Anschauung zentral blieb und sich zugleich die Skepsis gegenüber der unvermittelten sinnlichen Erkenntnis und das Vertrauen auf die Erkenntnis durch technische Instrumente, eine Haltung, die in den empirischen Naturwissenschaften der Frühen Neuzeit etabliert wurde, fortschrieb.

Das Verhältnis von Unterhaltung und Unterweisung, von Attraktion und Epistemophilie, wie es in dem Beispiel der Röntgenkinematografie thematisiert wird, bildet einen Fokus der Diskussion zum frühen Kino. Im Kontext der populären Kultur des Spektakels der 1900er-Jahre wurden Filme, die mikrokinematografische Aufnahmen zeigten, als Einschub zwischen Kabarettnummern aufgeführt. Erstmals zu Gesicht bekam ein Laienpublikum mikrokinematografische Bilder im August 1903 in der Alhambra Music Hall am Leicester Square in London. Der britische Film- und Fernsehhistoriker Timothy Boon beschreibt dieses Ereignis folgendermaßen:

»Attendees saw, in the midst of novelty acts including Servais Le Roy and his famous illusion ›Asrah, the Floating Princess‹, a programme of new kinematograph films introduced by their author, Francis Martin Duncan, produced using a device with the impossible Edwardian title the ›Urban-Duncan Micro-Bioscope‹. The novelty of the one-minute film *Cheese Mites*, which was the sensation of the programme, was in attaching a kinematograph camera to a microscope and thus producing giant moving pictures of microscopic creatures. This was typical of nineteenth- and early twentieth-century popular entertainments, which featured sensational performances playing to what Tom Gunning has called the ›aesthetics of astonishment‹.«⁸⁴

Der US-amerikanische Filmhistoriker Tom Gunning ordnet Filme wie *Cheese Mites* wie auch wissenschaftliche Experimentalfilme und Filme zur Wissenschaftspopularisierung, die bildenden Aktualitäten (»educational actualities«), in die Rubrik des »cinema of attractions« ein, eines Kinos der Attraktionen, das die Anziehungskraft, die vom Ekligem und latent Gefährlichen ausgeht, bewusst zur Unterhaltung des Publikums einsetzte. Gunning schreibt:

»[A] popular and longlasting genre of the cinema of attractions consisted of educational actualities (such as Charles Urban's *Unseen World* series beginning in 1903), which presented magnified images of cheese mites, spiders and water fleas.«⁸⁵

84 Timothy Boon, »Science, Society, and Documentary«, in *The Documentary Film Book*, Hg. Brian Winston (London: Palgrave Macmillan, 2013), 320–321.

85 Gunning, »Aesthetic of Astonishment«, 124.

Das Kino der Attraktionen und sein Hang zur spektakulären Zurschau-
stellung und direkten Involvierung der Zuschauenden war, wie Gunning
betont, häufig auch ein Kino der Liebe zur Erkenntnis.⁸⁶ Bereits das frühe
Kino etablierte neben der kommerziellen Produktion und Rezeption von
Filmen ein Repertoire von Themen, die dem Bildungskanon angehörten.
Zudem bespielte das frühe Kino auch Rezeptionskontexte, die dezidiert
als Bildungsorte gerahmt wurden.⁸⁷ Maßgeblich für die Bildungsorien-
tierung des frühen Kinos war der Diskurs zum Anschauungsunterricht,
der die sinnliche Involvierung der Lernenden einforderte und für die Ent-
wicklung eines umfassenden Verständnisses des Gegenstands nutzte, das
eine kognitive Herangehensweise mit sinnlichen und affektiven Zugängen
verband.⁸⁸

Filmschaffende, die diesen Diskurs aufgriffen, schrieben ›animierten
Bildern‹ ein hohes Potenzial für die Anregung des Denkens zu. Kinopio-
nier*innen wie William Kennedy Laurie Dickson (1860–1935), der Assistent
von Thomas Edison, und seine Koautorin und Schwester, die Schriftstelle-
rin, Komponistin und Pianistin Antonia Dickson (1854–1903), begeisterten
sich für ein bildendes Kino. Einerseits lobten sie die Objektivität des Films
– die sich aus dem Zusammenspiel von Mechanik und Optik ergebe –,
andererseits vertrauten sie auf die affektive Kraft, Intensität und sensori-
sche Unmittelbarkeit des damals neuen Mediums. Sie feierten das Kino als
eine Technologie der Verlebendigung – eine Vorstellung, die sich während
der Anfänge des Kinos in Ausdrücken wie »zum Leben erweckte Bilder«
(›vitalized pictures‹) »lebendige Bilder« (›living pictures‹) und »animierte
Fotografie« (›animated photography‹) niederschlug – und kontrastierten
die Vitalität der bewegten Bilder mit den trockenen und, wie sie es nennen,
irreführenden Darstellungen in Lehrbüchern und Zeitungen.⁸⁹

86 Siehe Tom Gunning, »In Your Face: Physiognomy, Photography, and the Gnostic Mission of Early Film«, in *The Mind of Modernism: Medicine, Psychology, and the Cultural Arts in Europe and America, 1880–1940*, Hg. Mark S. Micale (Stanford: Stanford University Press, 2004).

87 Siehe Oliver Gaycken, »The Cinema of the Future: Visions of the Medium as Modern Educator, 1895–1910«, in *Learning with the Lights Off: Educational Film in the United States*, Hg. Devin Orgeron, Marsha Orgeron und Dan Streible (Oxford: Oxford University Press, 2012), 69.

88 Zur Geschichte des Anschauungsunterrichts und seinen Bezügen zum wissenschaftlichen Film siehe James Leo Cahill, »Forgetting Lessons: Jean Painlevé's Cinematic Gay Science«, *Journal of Visual Culture* 11, Nr. 3 (2012), <https://doi.org/10.1177/1470412912455616>.

89 Siehe William Kennedy Laurie Dickson und Antonia Dickson, *History of the Kinetograph, Kinetoscope and Kinetophonograph* (New York: Albert Bunn, 1895, Faksimile-Ausg., New York: Museum of

Das In-Eins-Setzen der Bewegung – des Bildes und im Bild – und des Lebens findet sich auch in einer Passage eines Aufsatzes von Georges Demenÿ (1850–1917), des wissenschaftlichen Assistenten des französischen Physiologen Étienne-Jules Marey aus dem Jahr 1892, verfasst für die Zeitschrift *La Nature*. Dort heißt es:

»Die Zukunft wird die unbewegliche Photographie, die in ihrem Rahmen eingesperrt ist, durch das bewegte Portrait ersetzen, dem mit einer Kurbeldrehung das Leben zurückgegeben werden kann. [...] Wir werden in Zukunft mehr tun, als nur [das Gesicht] zu analysieren; wir werden es ins Leben zurückbringen.«⁹⁰

In Demenÿs Worten artikuliert sich eine Hoffnung auf das Vermögen des Films, seine Gegenstände nicht nur aufzuzeichnen, sondern sie vielmehr zu verlebendigen. Zum Thema der Verlebendigung, das Demenÿ und die Dicksons ansprechen, existierte um 1900 ein reger Diskurs, zu dem die Biologie, die Philosophie und die Filmwissenschaft beitrugen.⁹¹

4.2.2 Bewegung, Verlebendigung, Quantifizierung

Physiologen und Biologen entwickelten und gebrauchten in ihren Forschungen seit den 1850er-Jahren, das heißt rund vier Dekaden vor der ersten öffentlichen Filmvorführung, technische Verfahren zur Bewegungsaufzeichnung wie die Kymographie und die Chronofotografie. Marey und der französische Mikroskopbauer und -sammler Alfred Nacet (1831–1908) experimentierten bereits im Jahr 1891 mit der Mikrokinematografie. Die optischen Apparaturen zur Bewegungsaufzeichnung, die Physiologen wie Marey entwickelten, gelten als entscheidende Wegbereiter für die Entwicklung des Ki-

Modern Art, 2000), 51–52, zitiert in Gaycken, »The Cinema of the Future«, 70–71. Die Zitation bezieht sich auf die Faksimile-Ausgabe.

⁹⁰ Georges Demenÿ, »Les Photographies Parlantes«, *La Nature*, Nr. 985 (16. April 1892): 315, zitiert in Mary Ann Doane, »Zeitlichkeit, Speicherung, Lesbarkeit: Freud, Marey und der Film« [i.O. 2002], in *Lebendige Zeit: Wissenskulturen im Werden*, Hg. Henning Schmidgen, aus dem amerikanischen Englisch übersetzt von Gustav Roßler (Berlin: Kadmos, 2005), 306.

⁹¹ Für zwei jüngere filmwissenschaftliche Positionen, die den Verlebendigungsdiskurs reflektieren, siehe Chris Tedjasukmana, *Mechanische Verlebendigung: Ästhetische Erfahrung im Kino* (Paderborn: Fink, 2014), und Inga Pollmann, *Cinematic Vitalism: Film Theory and the Question of Life* (Amsterdam: Amsterdam University Press, 2018).

nematographen.⁹² Und Naturwissenschaftler nutzten seit der Entwicklung der Kinematografie das Vermögen des Films, der von Anbeginn als ein Experiment mit der Manipulation von Zeit verstanden wurde, um naturwissenschaftliche Experimente aufzuzeichnen und Bewegungsabläufe zu analysieren.⁹³ Die US-amerikanische Wissenschaftshistorikerin Hannah Landecker hat die These untermauert, dass die Darstellungsformen des Lebendigen in der Geschichte der Zellforschung zwischen statischen und dynamischen Modi hin- und herpendelten.⁹⁴

Der französische Mikrobiologe und Pionier der Mikrokinematografie Jean Comandon (1877–1970) verwendete in seinen Versuchen zur Erforschung des Syphilis-Erregers in den Jahren 1903 bis 1905 ein apparatives Arrangement, das ein Mikroskop in einem Inkubator, zwei Chronometer, einen Motor und eine Filmkamera kombinierte.⁹⁵ Mithilfe dieser Apparatur gelang es Comandon, die charakteristischen Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen des Syphilis-Erregers zu erkennen, zu dokumentieren und zu demonstrieren. Der US-amerikanische Literaturwissenschaftler Oliver Gaycken, der zum frühen wissenschaftlichen Film gearbeitet hat, weist auf, dass die Kombination aus Bewegungsanalyse und Bewegungsmessung die Arbeiten Comandons in die Tradition der Visualisierung stellt, wie Marey sie etablierte.⁹⁶ Comandon zeichnete nicht allein die Bewegung von Mikroorganismen und Partikeln auf, sondern maß auch ihre Anzahl und ihr Tempo. In die mithilfe des Kinematographen fixierten Bilder der am Ultramikroskop untersuchten Präparate trug Comandon Skalen ein, die Größenordnungen im Bereich eines hundertstel Millimeters zeigten, und überlagerte die Bilder mit dem Schatten eines Uhrpendels, das die Sekunden anzeigte.⁹⁷

Heutzutage findet die These, dass sich das Kino aus den naturwissenschaftlichen Visualisierungspraktiken heraus entwickelt hat und nicht etwa

92 Siehe dazu etwa die detailreiche filmhistorische Studie von Vittorio Tosi, *Cinema Before Cinema: The Origins of Scientific Cinematography* [i.O. 1984], aus dem Italienischen übersetzt von Sergio Angelini (London: British Universities Film and Video Council, 2005).

93 Siehe Hannah Landecker, »Cellular Features: Microcinematography and Film Theory«, *Critical Inquiry* 31, Nr. 4 (Sommer 2005), <https://doi.org/10.1086/444519> und dies., »Microcinematography and the History of Science and Film«, *Isis* 97, Nr. 1 (März 2006), <https://doi.org/10.1086/501105>.

94 Siehe Hannah Landecker, »Seeing Things: From Microcinematography to Live Cell Imaging«, *Nature Methods* 6, Nr. 10 (2009), <https://doi.org/10.1038/nmeth1009-707>.

95 Siehe Landecker, »Cellular Features«, 909 und 913.

96 Siehe Oliver Gaycken, *Devices of Curiosity: Early Cinema and Popular Science* (New York: Oxford University Press, 2015), 94.

97 Siehe ebd.

aus der Unterhaltungskultur entstanden ist, in der Filmwissenschaft breite Akzeptanz. Als eine weithin akzeptierte Erklärung dafür, dass sich die Bewegungsaufzeichnung im Feld der Wissenschaft vom Unterhaltungskino abspaltete, gilt Mareys eingestandene Gleichgültigkeit gegenüber der Reproduktion von Bewegung in der Form, in der das Auge sie wahrnimmt.⁹⁸ Das Vermögen der Kinematografie – im Unterschied zur Chronofotografie –, Bewegung zu synthetisieren, die Illusion einer kontinuierlichen Bewegung in der Projektion zu schaffen und auf diese Weise einen Realitätseindruck zu erzeugen, gehörte nicht zu Mareys vorrangigen Zielen. Während die Repräsentation von *Dauer* mittels einer Serie statischer Aufnahmen den Zweck erfüllte, lebendige Bewegung zu messen und zu kontrollieren, unterlief die Repräsentation von *Bewegung* Mareys Methode, das Bewegungsdifferential zwischen zwei Standbildern zu ermitteln.⁹⁹

Cartwright zufolge zeichneten sich die chronofotografischen Bewegungsstudien durch einen »relentlessly analytical and quantitative gaze«¹⁰⁰ aus, eine Wahrnehmungsmodalität, die sie an den technisch vermittelten Sehweisen der Physiologie und Medizin des neunzehnten Jahrhunderts festmacht. Cartwright bezieht sich auf das Konzept des »medizinischen Blicks« der pathologischen Anatomie des achtzehnten und frühen neunzehnten Jahrhunderts, wie es der französische Historiker und Philosoph Michel Foucault (1926–1984) entwickelte und den dieser 1963 als eine »technique of the corpse«¹⁰¹ beschrieb. Dieser Wahrnehmungsmodalität, die auf den toten Körper gerichtet war, setze das frühe Kino, so Cartwright, einen »vivifying physiological gaze«¹⁰² entgegen, »rendering life an elusive and seductive object of scientific conquest«¹⁰³.

Mit Rückbezug auf Cartwright hat die US-amerikanische Film- und Medienwissenschaftlerin Mary Ann Doane in ihren Ausführungen zu Fragen der Zeitlichkeit in der chronofotografischen Bildgebung, wie Marey sie maßgeblich mitentwickelte, auf die »allgemeine[...] Bewegung innerhalb

98 Siehe Marta Braun, *Picturing Time: The Work of Etienne-Jules Marey* (Chicago: University of Chicago Press, 1992), 150–151. Die Studie von Marta Braun zum Problem der Repräsentation der Zeit bei Marey gilt als Klassiker in der filmhistorischen Forschung zur Chronofotografie.

99 Siehe Cartwright, *Screening the Body*, 38.

100 Ebd., xiii.

101 Ebd. Cartwright zitiert Michel Foucault, *The Birth of the Clinic: An Archaeology of Medical Perception* [i.O. 1963], aus dem Französischen übersetzt von A.M. Sheridan (New York: Random House, 1975), 141.

102 Cartwright, *Screening the Body*, xiii.

103 Ebd.

der Physiologie in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts« hingewiesen, »die damit beschäftigt war, einen Lebensbegriff zu entwickeln, der der Moderne entsprach – einen Begriff von Leben als Bewegung, Prozeß, Veränderung«¹⁰⁴. Im Rahmen ihrer grundlegenden Überlegungen zu Zeitlichkeit und Moderne und der Rolle des Films bezieht sich Doane auf Marey, der betonte, dass »die Bewegung das offensichtlichste Merkmal des Lebens ist; sie manifestiert sich in allen Funktionen; sie ist sogar das Wesen mehrerer von ihnen«¹⁰⁵. Um die Bewegung des Lebens zu analysieren, unternahm die Physiologie paradoxerweise »einen konzertierten, wenn nicht gar obsessiven Versuch, den Augenblick zu isolieren und zu analysieren, eine unsichtbare Zeit optisch lesbar zu machen«¹⁰⁶. Hier deutet sich bereits eine Rationalisierung von Bewegungsabläufen und eine Parzellierung und Objektivierung der Zeit an. »Mareys Traum,« so Doane weiter, »bestand darin, die Zeit aufzuteilen, sie in solcher Weise aufzusplittern, daß sie darstellbar wurde. Bewegung blieb dabei der klarste Ausdruck von Dauer«¹⁰⁷. Doane weist auch auf die Unvermeidlichkeit des Scheiterns der Repräsentation von Zeit in Mareys Projekt hin, wenn sie schreibt:

»Etienne-Jules Marey [...] verwendete die neuesten Techniken der sequentiellen Photographie (und nahm damit, den meisten historischen Darstellungen zufolge, den Film vorweg), um eine objektive Zeitlichkeit zu erfassen und zu messen, die dennoch stets der Repräsentation zu entgehen schien.«¹⁰⁸

Ein Pendant zu dieser Tendenz zur Objektivierung und Quantifizierung von Zeitlichkeit, auf die Marey abzielte, bildete der Diskurs zur affektiven Wirkung des Bewegtbildes.

4.2.3 Zeitraffer und Vergrößerung als Affizierungstechniken: Zur affektiven Wirkung des Bewegtbildes in der Theorie des frühen Kinos

In den 1920er- und 1930er-Jahren schrieb die Filmtheorie den beschleunigt und vergrößert dargestellten organischen und anorganischen Phänomenen

104 Doane, »Zeitlichkeit, Speicherung, Lesbarkeit«, 292.

105 Ebd. Doane zitiert hier Etienne-Jules Marey, *La Machine Animale: Locomotion Terrestre et Aérienne* (Paris: Librairie Germer Baillière, 1873), 26.

106 Doane, »Zeitlichkeit, Speicherung, Lesbarkeit«, 292.

107 Ebd., 293.

108 Ebd., 282.

und Prozessen das Vermögen des Affektausdrucks zu. Die Verlebendigung des Untersuchungsgegenstands, wie sie mit dem Bewegtbild in Verbindung gebracht wurde, manifestierte sich als vitaler Impuls bei den Zuschauenden, wie die Reaktionen der Mikrokinematografen, der Schausteller*innen, die mikrokinematografische Filme in ihre Unterhaltungsprogramme aufnahmen, und der Filmtheoretiker*innen der klassischen Periode verdeutlichen. So nennt Comandon die Bilder der sich bewegenden Syphilis-Spirochäte, deren Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen er mittels der mikrokinematografischen Aufnahmen, die er anfertigte, identifizierte, »eine veritable üble Alptraumvision, die sich im fieberhaften Herumschwänzeln dieser Organismen mit ihren fantastischen Formen zeigt«¹⁰⁹. Und die Schausteller*innen W.K.L. und Antonia Dickson beschleicht lustvolles Grauen angesichts der mikrokinematografischen Aufnahmen, die Interaktionen zwischen roten Blutkörperchen und Bakterien zur Anschauung bringen:

»Man findet kaum Worte für den grauenvollen Anblick und für die unbeschreibliche Schnelligkeit der wütenden Bewegungen. Monster gehen in blinden und kaum unterscheidbaren Angriffen aufeinander los, Gliedmaßen werden abgetrennt, blutige Globuli werden aufgerissen, ganze Bataillone verschwinden aus dem Blick.«¹¹⁰

Es nimmt kaum Wunder, dass das Geschwisterduo Dickson, das im Unterhaltungsbereich tätig war, die affektiven Dimensionen der sichtbar gemachten Abläufe hervorhebt und das Gesehene dramatisiert. Erstaunlicher ist die wertende Beschreibung des Mediziners Comandon. Aus den Kommentaren von Comandon und den Dicksons folgert der US-amerikanische Filmhistoriker Scott Curtis: »Die Mikrokinematografie wird zum *cinema of attractions* schlechthin: eine Darstellung, die zugleich schreckenerregend und fesselnd ist.«¹¹¹ Den widersprüchlichen Affekteindruck, den die Kombination von Mikrokinematografie und Zeitraffertechnik herausbringt und der sich aus der filmischen Beschleunigung von Zellenbewegungen ergibt, die zu langsam sind, als dass sie der unvermittelten menschlichen Wahrnehmung zugänglich wären, beschreibt Curtis folgendermaßen:

109 Jean Comandon, »Micrographie: Cinématographie des Microbes«, *Bulletin de la Société d'Encouragement Pour l'Industrie Nationale* 113, Nr. 3 (1910): 328, zitiert in Curtis, »Vergrößerung«, 103, nach der englischen Übersetzung aus dem Französischen in Oliver Gaycken, »The Swarming of Life: Moving Images, Education, and Views through the Microscope«, *Science in Context* 24, Nr. 3 (2011): 376, <https://doi.org/10.1017/S0269889711000159>.

110 Dickson und Dickson, *History of the Kinetograph*, 42–43, zitiert in Curtis, »Vergrößerung«, 103.

111 Curtis, »Vergrößerung«, 104, Hervorhebung im Original.

»Diese Filme vom Leben der Zellen enthalten also ein faszinierendes Paradox: dass eine so kleine Welt ›kosmische‹ Dimensionen und Implikationen haben kann; dass eine filmische Aufzeichnung von erdgeschichtlich langsamer Zellenzeit, in den kleinsten möglichen Abständen aufgenommen, zu dem Eindruck einer fast schon beängstigenden Beschleunigung des Lebens führen kann.«¹¹²

Curtis stellt die Frage, weshalb Forschende und Cinephile der frühen Mikrokinematografie Wirkungen zuschreiben, die an das Wunderbare grenzen. Als Antwort auf diese Frage schlägt er vor, die professionelle und populäre Rezeption der wissenschaftlichen Kinematografie über das Konzept des Erhabenen zu erschließen. Das »mikroskopische Erhabene«, wie Curtis es nennt, bezeichnet ein Gefühl, das vergrößerte und beschleunigte Bilder bei ihren Betrachtenden hervorrufen:

»Das eigentliche Erhabene liegt [...] in der Verbindung von Vergrößerung und Bewegung. [...] Das, was die Wissenschaftler und den Schausteller gleichermaßen erschauern lässt, ist das von der Vergrößerung hervorgerufene Gefühl unbegrenzter Tiefe in Verbindung mit dem Gefühl unbegrenzter Weite außerhalb des Bildrahmens, das durch die Bewegung innerhalb desselben impliziert ist.«¹¹³

Einen ähnlich intensiven Affekteindruck, wie ihn Curtis bei Rezipierenden früher mikrokinematografischer Aufnahmen identifiziert, schreibt die klassische Filmtheorie Zeitrafferaufnahmen von Naturphänomenen zu. Auch wenn es sich bei diesen Aufnahmen nicht ausschließlich um mikrokinematografische Filme handelt und das Thema der Manipulation des Raums in der Diskussion hinter das Thema der Manipulation der Zeit zurücktritt, so ist es doch notwendig, sich mit diesen Aufnahmen in einem Exkurs zu befassen, um das Spektrum der Affekte, die mit der filmischen Beschleunigung und Verlangsamung einhergehen, zu verdeutlichen.

Ganz besonders vernehmlich klingt die Vielfalt der Affekte in den Worten an, die Rudolf Arnheim für die Beschreibung seiner Begegnung mit beschleunigten Aufnahmen der Bewegungen von Pflanzen wählte, wie sie der *Blumenwunder*-Film (Deutschland, 1922–1925, Regie: Max Reichmann) der I.G. Farben ermöglichte (siehe Abb. 4.5). In schwärmerischem Ton bemerkte Arnheim im Jahr 1932, dass die Zeitrafferkinematografie den Gesichtsausdruck und die emotionalen Regungen der Pflanzen sichtbar mache. Da aus Arnheims Kommentar eine Begeisterung und ein Über-

112 Ebd., 103.

113 Ebd., 104.

schwung spricht, der verdeutlicht, welchen Reiz Zeitrifferaufnahmen von Naturphänomenen in den frühen 1930er-Jahren auf ihre Betrachtenden ausgeübt haben, soll er hier ausführlich zitiert werden:

»Bei den Aufnahmen zum ›Blumenwunder‹-Film der I.G. Farben, der in nichts andern [sic] bestand als in Zeitrifferaufnahmen von Pflanzen und der dabei sicherlich der aufregendste, phantastischste und schönste Film ist, der je gedreht wurde – bei diesen Aufnahmen hat sich herausgestellt, daß die Pflanzen eine Mimik haben, die wir nicht sehen, weil sie mit zu langsamen Zeiten rechnet, die aber sichtbar wird, wenn man Zeitrifferaufnahmen verwendet. Die wiegenden, rhythmischen Atmungsbewegungen der Blätter, der erregte Tanz der Blätter um die Blüte, die fast obszön wirkende Hingabe, mit der eine Blüte sich öffnet – die Pflanzen waren plötzlich lebendig geworden und zeigten Ausdrucksbewegungen von genau derselben Art, wie man sie von Menschen und Tieren kennt. Wie eine emporkletternde Pflanze ängstlich tastend, unsicher, nach Halt sucht, wenn ihre Ranken sich an einem Gitter hochwinden, wie eine welkende Kaktusblüte fast mit einem Seufzer den Kopf neigt und zusammenknickt – es war die unheimliche Entdeckung einer neuen lebendigen Welt in einem Bezirk, aus dem man zwar wußte, daß dort Leben zu Hause sei, es aber niemals ›in Tätigkeit‹ hatte sehen dürfen. Und die Einreihung der Pflanzen in die Welt der lebendigen Wesen war auf einmal anschaulich vollzogen, man sah: es herrschte überall dasselbe Prinzip, dasselbe Verhalten, dieselben Schwierigkeiten, dieselben Ziele!«¹¹⁴

In seinem Überschwang vermenschlicht Arnheim die zur Schau gestellten Pflanzen und schreibt ihnen das Vermögen zu, Affekte zum Ausdruck zu bringen. Arnheim beschreibt zudem seine eigene affektive Reaktion auf den *Blumenwunder*-Film. Die Affizierung der Zuschauenden und das Wahrnehmen der zur Schau gestellten Affekte des dargestellten Gegenübers gehen in dieser Passage Hand in Hand. Über eine Synchronisierung der Affekte der Wahrnehmenden und der Affekte des Wahrgenommenen wird die Trennung zwischen der Innen- und Außenwelt der Betrachtenden aufgehoben. Die Zuschauenden fühlen sich in die dargestellten Pflanzen ein.

In Arnheims Beschreibung seines Eindrucks des *Blumenwunder*-Films avanciert der Affekt zu einem Gütekriterium für das Lebendige schlechthin. Arnheims Worte bezeugen, dass er das Lebendige als das Tätige ansieht, wie es bereits bei Theodor Lipps anklingt (siehe fünftes Kapitel). Der *Blumenwunder*-Film vermittelt für Arnheim die Erkenntnis eines vitalen Prinzips, das er allen Lebewesen zuschreibt.

114 Rudolf Arnheim, *Film als Kunst* [1932], mit einem Nachwort von Karl Prümm und zeitgenössischen Rezensionen (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2002), 117.



Abb. 4.5: Bildfolge aus dem Film *Das Blumenwunder* (Deutschland, 1922–1925, Regie: Max Reichmann)
 Quelle: »Das Blumenwunder«, Arte Edition, zuletzt geprüft: 13. Februar 2023, <https://www.arte-edition.de/item/3008.html>.

Ähnlich wie in den Beschreibungen der frühen Mikroskopiker und der Amateurmikroskopiker*innen in den 1750er- und 1760er-Jahren mischen sich auch in Arnheims Beschreibung vielfältige und teils widersprüchliche affektive Register: Vom Unheimlichen bis zum Erotischen lässt Arnheim ganz verschiedene affektive Tonalitäten anklingen. Diese Affekte erwachsen im Falle der Rezeption des *Blumenwunder*-Films allerdings nicht allein aus der Vergrößerung, sondern müssen darüber hinaus auch als ein Effekt der beschleunigt dargestellten Bewegung gelten, wie der Film sie leistet.

Die mexikanisch-US-amerikanische Wissenschaftshistorikerin Jimena Canales hat argumentiert, dass die frühe Kinematografie und ihre Techniken zur Manipulation der Zeit als Mittel zur Etablierung der Unterscheidung zwischen Lebewesen und toter Materie eingesetzt wurden.¹¹⁵ Einige Phänomene unterliefen diese Trennung jedoch hartnäckig. Anorganische Substanzen wie Kristalle oder Eisblumen beispielsweise, wenn sie mittels Zeitraffertechnik aufgenommen und projiziert werden, können im Prozess des Wachstums beobachtet werden und erwecken den Anschein von Lebendigkeit.

Die Experimente mit Beschleunigung und Vergrößerung im frühen Wissenschaftsfilm wurden zum Ausgangspunkt für ein Nachdenken über die technischen Möglichkeiten und philosophischen Begleiterscheinungen des neuen Mediums Film, das ein Durchgraben der visuellen Schichten – ein »digging through the visual planes«¹¹⁶, wie die französische Filmemacherin und Filmtheoretikerin Germaine Dulac (1882–1942) es nannte – ermöglichte.¹¹⁷ Und dem deutsch-jüdischen Philosophen und Kulturkritiker

115 Siehe Jimena Canales, »Dead and Alive: Micro-Cinematography between Physics and Biology«, *Configurations* 23, Nr. 2 (2015).

116 Germaine Dulac, »Visual and Anti-Visual Films« [i.O. 1928], aus dem Französischen übersetzt von Robert Lamberton, in *The Avant-Garde Film: A Reader of Theory and Criticism*, Hg. A. Sitney (New York: New York University Press, 1978), 31.

117 Siehe Landecker, »Microcinematography«, 128.

Walter Benjamin (1892–1940) ging es um das Mikroskopische, als er dem Kino attestierte, eine radikal andere Weltsicht zu ermöglichen. Als Benjamin das Konzept des »Optisch-Unbewussten« in die Diskussion um Film und Fotografie in den 1930er-Jahren einführte, bezog er sich auf organisches Gewebe, welches seiner Ansicht nach enger mit der Kamera verwandt sei als Landschaften oder Portraits: Organisches Gewebe sei von dieser »zweiten Natur«, die allein die Kamera erfassen und vermitteln könne. Im Jahr 1931 schrieb Benjamin:

»Es ist ja eine andere Natur, welche zur Kamera als welche zum Auge spricht; anders vor allem so, daß an die Stelle eines vom Menschen mit Bewusstsein durchwirkten Raums ein unbewußt durchwirkter tritt. [...] Die Photographie mit ihren Hilfsmitteln: Zeitlupen, Vergrößerungen erschließt sie ihm. Von diesem Optisch-Unbewußten erfährt er erst durch sie, wie von dem Triebhaft-Unbewußten durch die Psychoanalyse. Strukturbeschaffenheiten, Zellgewebe, mit denen Technik, Medizin zu rechnen pflegen — all dieses ist der Kamera ursprünglich verwandter als die stimmungsvolle Landschaft oder das seelenvolle Portrait.«¹¹⁸

Benjamin bezieht sich hier nicht allein auf das Vermögen bewegter Bilder, dasjenige sichtbar zu machen, welches im Körperinneren verborgen oder zu klein für die technisch unvermittelte menschliche Wahrnehmung ist. Die Kamera überführe das Verborgene nicht einfach in die Sichtbarkeit. Vielmehr bringe der Film mithilfe von Techniken wie Vergrößerung und Beschleunigung unbewusste Strukturen ans Licht. Zum Konzept des »Optisch-Unbewussten« führt Benjamin im *Kunstwerk*-Aufsatz aus:

»Unter der Großaufnahme dehnt sich der Raum, unter der Zeitlupe die Bewegung. Und so wenig es bei der Vergrößerung sich um eine bloße Verdeutlichung dessen handelt, was man ›ohnehin‹ undeutlich sieht, sondern vielmehr völlig neue Strukturbildungen der Materie zum Vorschein kommen, so wenig bringt die Zeitlupe nur bekannte Bewegungsmotive zum Vorschein, sondern sie entdeckt in diesen bekannten ganz unbekannte, ›die gar nicht als Verlangsamungen schneller Bewegungen sondern als eigentümlich gleitende, schwebende, überirdische wirken.« So wird handgreiflich, daß es eine andere Natur ist, die zu der Kamera als die zum Auge spricht. Anders vor allem dadurch, daß an die Stelle eines vom Menschen mit Bewußtsein durchwirkten Raums ein unbewußt durchwirkter tritt.«¹¹⁹

118 Walter Benjamin, »Kleine Geschichte der Photographie« [1931], in *Aura und Reflexion. Schriften zur Ästhetik und Kunstphilosophie* (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1991), 371.

119 541 Walter Benjamin, »Das Kunstwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbarkeit. Dritte Fassung«, in *Gesammelte Schriften*, Hg. Rolf Tiedemann und Hermann Schweppenhäuser unter

Der in die USA emigrierte deutsche Filmtheoretiker Siegfried Kracauer (1889–1966) sprach in seinen umfassenden, im Jahr 1960 publizierten Überlegungen zur Ästhetik des Films das Verhältnis zwischen dem Film und den Naturwissenschaften an. Kracauer nennt die Konzentration auf das Winzig-Kleine und die Methode des Zergliederns als Scharniere zwischen den beiden Bereichen. Bemerkenswert ist, dass bereits Kracauer auf das Vermögen des Films hinweist, die Zuschauenden für die Energien, die sich im Winzig-Kleinen verdichten, zu öffnen, wenn er schreibt: »In seinem Bemühen ums Kleine ist der Film den Naturwissenschaften vergleichbar. Wie sie zerlegt er materielle Phänomene in winzige Partikel und macht uns dadurch für die ungeheuren, in den mikroskopischen Konfigurationen der Materie aufgestauten Kräfte empfänglich.«¹²⁰ Die filmische Manipulation von Raum und Zeit rücke die »Realität einer anderen Dimension«¹²¹ ins Blickfeld.

Die Formulierung »Realität einer anderen Dimension« entlehnt Kracauer von dem polnisch-französischen Filmregisseur und Filmtheoretiker Jean Epstein (1897–1953) und meint damit die Dimensionen des Winzig-Kleinen, des Unfassbar-Schnellen und des Unendlich-Langsamem, wie sie naturwissenschaftliche Aufzeichnungsverfahren wie die Mikrokinematografie und die Zeitlupen- und Zeitraffertechniken zugänglich machen. Epstein schrieb im Jahr 1935 im Rahmen seiner Überlegungen zum Konzept der »photogénie«, das die mediale und ästhetische Spezifik des Films über die Vergrößerung und die Bewegung bestimmt: »Zeitlupe und Zeitraffer offenbaren [...] eine Welt, in der es zwischen den einzelnen Bereichen der Natur keine Grenzen mehr gibt. Alles lebt. Die Kristalle wachsen, Stück um Stück, vereinigen sich in sanfter Sympathie.«¹²²

Die Vergrößerung und ganz besonders die Großaufnahme des menschlichen Gesichts fungiert für Epstein als Affektverstärker; sie richtet die

Mitwirkung von Theodor W. Adorno und Gershom Scholem, Band 1: Abhandlungen (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1991), 500. Die zitierte Passage entlehnt Benjamin von Arnheim.

120 Siegfried Kracauer, *Theorie des Films: Die Errettung der äußeren Wirklichkeit* [i.O. 1960], mit einem Anhang, »Marseiller Entwurf«, zu einer Theorie des Films, Hg. Inka Müller-Bach, vom Verfasser revidierte Übersetzung von Friedrich Walter und Ruth Zollschan (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2005), 97.

121 Ebd., 102.

122 Jean Epstein, »Photogénie des Unwägbar« [i.O. 1935], aus dem Französischen übersetzt von Ralph Eue, in *Bonjour Cinéma und andere Schriften zum Kino*, Hg. Nicole Brenez und Ralph Eue (Wien: SYNEMA, 2008), 76.

Affekte der Betrachtenden neu aus. Neben dem Vermögen, die Handlung dramatisch zuzuspitzen, und dem Vermögen, die Aufmerksamkeit zu begrenzen und auszurichten, verändere die Großaufnahme die Gefühle der Betrachtenden: »The close-up is an intensifying agent because of its size alone. [...] [M]agnification acts on one's feelings more to transform than to confirm them, and personally, it makes me uneasy.«¹²³ Epstein zufolge spricht die filmische Aufzeichnung der Kopfhaltung und der Bewegungen der Gesichtsmuskeln der Schauspielenden die Gefühle der Zuschauenden nicht allein an, sondern lenkt die Gefühle darüber hinaus in eine andere Richtung. Diese Gefühlslenkung, wie sie die Großaufnahme des menschlichen Gesichts bewirkt, erlebte Epstein gleichermaßen als fesselnd wie auch als verstörend.

Im Anschluss an Epsteins Überlegungen zur »photogénie« hat Scott Curtis darauf hingewiesen, dass frühe mikrokinematografische Filme zugleich Informationen lieferten und »die Kraft [hatten], den Betrachter zu bewegen«¹²⁴. Wie Curtis herausgearbeitet hat, transportiert die Vergrößerung (»magnification«), wie das Mikroskop und die Mikrokinematografie sie ermöglichen, die Betrachtenden in eine andere Dimension, und zwar, indem sie eine scheinbare Bewegung impliziert. Die Vergrößerung mache zudem den Konflikt zwischen der Begrenztheit der menschlichen Sinneswahrnehmung und der Grenzenlosigkeit plastisch.¹²⁵ Die Mikroskopie als Vergrößerungstechnik stelle die Beobachtenden vor die Herausforderung, die eigene Existenz in der makrokosmischen Dimension und den Blick in die mikroskopische Dimension, wie ihn die Mikroskopie gewährt, miteinander in Einklang zu bringen. Betrachtende erlebten eine Dissoziation zwischen den zwei verschiedenen Größenordnungen und müssten zwischen den Dimensionen lavieren.¹²⁶ Die Erfahrung des Hin- und Herschwingens zwischen den Dimensionen beschreibt Curtis als schwindelerregend und betont, »dass Vergrößerung eine Form des Erhabenen ist«¹²⁷.

Das Problem der Distanzierung von der gewohnten, menschlichen Größenordnung hat bereits Bachelard in seinen Überlegungen zum »Erkenntnishindernis« angesprochen, wenn er schreibt:

123 Jean Epstein, »Magnification and Other Writings« [i.O. 1921], aus dem Französischen übersetzt von Stuart Liebman, *October* 3 (Frühling 1977): 13.

124 Curtis, »Vergrößerung«, 100.

125 Siehe ebd., 98.

126 Siehe ebd., 103.

127 Ebd., 98.

»Durch das ganze 17. und 18. Jahrhundert hindurch hat sich mit den mikroskopischen Entdeckungen am anderen Ende der Erscheinungen das gleiche Problem gestellt. In unserer Zeit sind die Brüche in der Größenordnung lediglich hervorgehoben worden. Das philosophische Problem ist jedoch immer das gleiche geblieben: wie kann man den Menschen zwingen, von den gewohnten Größen, *seinen* eigenen Größen zu abstrahieren: wie kann man ihn dazu zwingen, die Größe in ihrer Relativität zur Meßmethode zu denken; kurz gesagt also: wie läßt sich in klare diskursive Form bringen, was sich in der unmittelbarsten Anschauung darbietet.«¹²⁸

Ein ähnliches Problem hat Scott Bukatman im Ergebnis seiner Untersuchung der Konsequenzen des technologischen Wandels für die Wahrnehmung an den Medienumbrüchen zu Zeiten der Aufklärung und der Postmoderne herausgehoben. Bukatman rückt den ambivalenten Status der Technologie ins Zentrum seiner Überlegung zum, wie er es nennt, »künstlichen Unendlichen« (»artificial infinite«)¹²⁹. Er schreibt: »It is technology that inspires the sensations characteristic of sublimity; therefore, it is technology that alludes to the limits of human definition and comprehension.«¹³⁰ Gerade weil die Technologie auf die Begrenztheit des menschlichen Erkenntnisvermögens anspiele, rufe sie erhabene Empfindungen hervor.

Meine Ausführungen haben gezeigt, dass, obwohl das Wissenschaftsideal der »mechanischen Objektivität« zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts noch immer bestimmend war, mikrokinematografische Aufnahmen mit den hier genannten und historisch aufgeschlüsselten Affekten aufgeladen waren. Die vielfältigen affektiven Register haben bis in die Diskussion um die gegenwärtigen Lebendzellbilder Bestand und entfalten ihre Wirksamkeit. Da es sich um Effekte der formalen Eigenschaften des Bewegtbildes handelt, gilt dies unabhängig vom jeweiligen Gegenstand beziehungsweise Bildinhalt. Nur indem diese affektive Aufladung nicht verdrängt, sondern anerkannt und reflektiert wird, indem also die ästhetische Komponente wissenschaftlicher Bilder beschrieben und analysiert wird, wird sie nicht als »Kontamination« wirksam und schürt als solche kein Misstrauen gegen bildgebende Verfahren, sondern wird als legitimer Bestandteil der Bildwelten der gegenwärtigen Zellbiologie verhandelbar. Derart kontextualisiert lässt sich die genuine Wissensinformation entsprechend von der ästhetischen Erfahrung getrennt oder mit ihr gemeinsam beschreiben und kann ihren wissen-

128 Bachelard, *Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes*, 307, Hervorhebung im Original.

129 Bukatman, »The Artificial Infinite«, 93.

130 Ebd., 82.

schaftlichen Anspruch in Reflexion dieses Verhältnisses vollumfänglich behaupten. Angesichts der um sich greifenden Wissenschaftsskepsis wird der differenzierte Umgang mit dem affektiven Gehalt wissenschaftlicher Bilder auch zu einem Instrument der Selbstbehauptung wissenschaftlichen Erkennens und seiner gesellschaftlichen Relevanz.

5. Die ästhetische Erfahrung des Lebendzellfilms

Die Frage, wie sich Forschende an den Filmen, wie sie die computergestützte Lebendzellmikroskopie gegenwärtig erzeugt, affektiv beteiligen, verweist zurück auf die Lebendigkeit der Materie, die die Zellbiologie untersucht, und auf die Spezifität des Bewegtbildes, vermittels dessen diese Disziplin das zelluläre Leben erforscht. Während die Bewegungen von Mikroorganismen und ganzen Zellen in den vergangenen Jahrhunderten über den Blick ins Mikroskop bereits sichtbar gemacht werden konnten und die Bewegungen lebender Zellen seit der Entwicklung der Mikrokinematografie in der ersten Dekade des zwanzigsten Jahrhunderts mittels einer Kamera am Mikroskop aufgezeichnet und in variabler Geschwindigkeit abgespielt werden können, so führen uns doch erst Lebendzellfilme seit ungefähr 1980 die Vorgänge im innerzellulären und molekularen Bereich vor Augen. Die Entwicklung der Videomikroskopie im Jahr 1981, die Einführung digitaler Kameras und vor allem digitaler Detektoren in die computergestützte Mikroskopiepraxis zusammen mit der Verfeinerung licht- und fluoreszenzmikroskopischer Verfahren ermöglichten die Aufzeichnung innerzellulärer und später auch molekularer Dynamik und die Sichtbarmachung von spezifischen Abläufen im Zellinneren in Form von Bewegtbildern.

Für die Analyse der Rezeptionshaltungen, die Betrachtende den Lebendzellfilmen gegenüber einnehmen, die mithilfe dieser Verfahren hergestellt werden, ergeben sich daraus die Fragen, wie nicht allein die lebenden Zellen unter dem Mikroskop – deren inneren Abläufe sich der mikroskopisch erweiterten menschlichen Wahrnehmung aufgrund ihrer Langsamkeit entziehen –, sondern vor allem ihre zeitlich verdichtete filmische Darstellung die Forschenden vor dem Bildschirm adressieren und nicht nur kognitiv involvieren, sondern auch affektiv ansprechen, und welche Konsequenzen sich hieraus für die Rolle der Beobachtenden innerhalb der medialen Gesamt-

anordnung ergeben. Hinsichtlich des Objektivitätsideals der naturwissenschaftlichen Praxis wirft dies zudem die Frage auf, wie sich affektive und analytische Zugangsweisen in der Mikroskopiepraxis zueinander verhalten. Und nicht zuletzt ergeben sich aus diesen Überlegungen die Fragen, wie die Lebendzellmikroskopie das beobachtende Subjekt und das beobachtete Objekt zueinander positioniert und welche Formen der Reflexivität der eigenen Situierung der Blick auf lebende Zellen am Bildschirm einleitet.

Argumentiert wird, dass eine affektive Beteiligung der Forschenden an den Visualisierungen sich bewegender Zellen, Organellen und Moleküle durch den medientechnisch erweiterten Blick auf die Mikrobewegungen des Lebendigen die Aufmerksamkeit der Forschenden reflexiv auf ihre eigene Lebendigkeit zurücklenkt, einschließlich sich daraus ableitender existentieller wie philosophischer Dimensionen der *conditio humana*. Ganz besonders der Affekt, der von der Beobachtung der lebendigen Materie in Bewegung ausgeht, stellt einen Rückbezug zur Leiblichkeit der Beobachtenden her und macht das Phänomen der Lebendigkeit reflexiv bewusst, und zwar in ganz ähnlicher Weise wie Galileis Himmelsbeobachtungen den irdischen Standpunkt reflexiv bewusst machten, mitsamt der sich daraus ergebenden weitreichenden Konsequenzen für die Konzeption der Stellung der Erde im Sonnensystem. In anderen Worten, die Betrachtenden erfassen die Visualisierungen nicht ausschließlich kognitiv und ziehen sie nicht bloß zur Untermuerung von Hypothesen heran. Vielmehr nehmen sie darüber hinaus affektiv Anteil an den Farben, Formen und Bewegungen, wie sie der Lebendzellfilm zur Anschauung bringt. Die Bewegtheit der Bilder, so die These, macht die Lebendigkeit der Zellen erfahrbar und verweist im Umkehrschluss auf deren zeitliche Bedingtheit und damit auf deren Sterblichkeit. In dieser These artikuliert sich ein Wechsel des Bezugsrahmens: Der Lebendzellfilm wird nicht allein als epistemisches Objekt sondern zugleich auch als ästhetisches Objekt rezipiert, und zwar nicht durch eine Veränderung des Rezeptionskontexts wie etwa der Verschiebung vom Laboratorium ins Museum, sondern aufgrund des Tatbestands, dass das epistemische Objekt über ästhetische Qualitäten verfügt, die bereits in dessen Herstellungskontext, dem Labor, oder im fachlichen Aufführungskontext, der Fachtagung oder dem Hörsaal, ihre Wirkung entfalten.

Ausgangspunkte der nachfolgenden Argumentation sind die Überlegungen zum Affekt aus der monistischen Philosophie der 1670er-Jahre, die Reflexionen zum Begriff der ›Einfühlung‹ in der Psychologie und ästhetischen Theorie der 1900er-Jahre und zum Begriff der ›Vitalkraft‹ in der vitalistischen

Philosophie aus der gleichen Zeit sowie die Wiederbelebung der Einsichten, die aus diesen Forschungsrichtungen hervorgingen, in der Film-, Medien-, und Kulturwissenschaft seit den 1990er-Jahren. Der monistische Ansatz betont die Steigerung und Verminderung des körperlichen und geistigen Vermögens durch die Affizierung. Die Einfühlungsästhetik hebt die Empathie als eine Form der Verbindung zu belebten und unbelebten Objekten hervor. Der Vitalismus akzentuiert die vitale Kraft der Materie. Diese drei Ansätze werden im Folgenden zu einem analytischen Rahmen zusammengeführt, der es erlaubt, Lebendzellfilme unter wirkungsästhetischen Gesichtspunkten zu analysieren und anhand zweier Fallbeispiele aufzuweisen, wie die Filme eine Resonanz in den Betrachtenden hervorrufen.

5.1 Zur Wirkungsästhetik des Bewegtbildes

Bevor ich die Linien der Theorie nachzeichne, die für die hier entfaltete Argumentation formgebend sind, und die wesentlichen Begriffe kläre, die die Analyse anleiten sollen, sei die Herausforderung angesprochen, die mit der Lektüre eines epistemischen Objekts als ästhetisches Objekt einhergeht. Die Kunstgeschichte im deutschsprachigen Raum hat diese Herausforderung in ihren verschiedenen Zugängen zu den Bildern der Naturwissenschaften reflektiert. Eine der Ikonologie verpflichtete kunsthistorische Zugangsweise ordnet die Bilder, die in der naturwissenschaftlichen Praxis erzeugt werden, in Darstellungstraditionen ein. Matthias Bruhn etwa diskutiert Zeichnungen und computergenerierte Darstellungen von Zellen mit Sicht auf Form- und Gestaltungsentscheidungen und im Hinblick auf die Wechselwirkungen mit zeitgenössischer Metaphorik.¹ Die Stilgeschichte wissenschaftlicher Bilder ziele darauf ab, »die Komplexität der Erkenntnis im naturwissenschaftlichen Bereich zu erhöhen«, wie Horst Bredekamp es formuliert hat, und beabsichtige, die Konstruktion eines Gegenstandes vermittels von Bildern aufzuweisen und die Naturwissenschaften dazu anzuregen, »die Komplexität, Schönheit und Anarchie von Bildern als ei-

¹ Siehe Matthias Bruhn, »Zellbilder: Eine Kunstgeschichte der Wissenschaft«, in *Das Technische Bild: Kompendium zu einer Stilgeschichte wissenschaftlicher Bilder*, Hg. Horst Bredekamp, Birgit Schneider und Vera Dünkel (Berlin: Akademie Verlag, 2008).

genständige Größe in ihr Kalkül mit einzubeziehen«². Berücksichtigt diese Tradition durchaus den epistemischen Status wissenschaftlicher Bilder, so betrachtet und untersucht sie wissenschaftliche Bilder doch in erster Linie als ästhetische Objekte.

Neben diesem ikonologischen oder stilgeschichtlichen Ansatz existiert noch ein weiterer kunsthistorischer Zugang zu den Bildern der Naturwissenschaften. Dieser Zugang zielt darauf ab, die Besonderheiten der Bilder der Naturwissenschaften, der Architektur und der Kunst in Abgrenzung von den jeweils anderen Bildtypen zu bestimmen. So konstatiert etwa Gottfried Boehm:

»Nichts spricht dafür, dass zum Beispiel Röntgenaufnahmen Kunstwerke sind, auch wenn sich verschiedene historische Stile an ihnen unterscheiden lassen. Viel dagegen spricht dafür, die bildnerischen Strategien, wie sie durch veränderte Apparate erzeugt wurden, zu unterscheiden.«³

Damit wird das Augenmerk auf die Herstellungsweisen gelenkt. Boehm schlägt vor, »Kriterien dafür zu entwickeln, wie Bilder funktionieren, wenn es um anatomische Darstellungen, um Entwurfsskizzen oder um Gemälde des gleichen Sachverhalts geht«⁴. Damit nimmt Boehm eine Kritik vorweg, die die Kunsthistorikerin Gabriele Werner wenig später formulierte, als sie die Gültigkeit der Bildtheorien, wie Gottfried Boehm und W.J.T. Mitchell sie entwickelten, für naturwissenschaftliche Bilder überprüfte und zu dem Schluss kam, dass sich diese Ansätze als »wenig nützlich« für die Analyse naturwissenschaftlicher Bilder erwiesen, da sie weder die unterschiedlichen Funktionen von Visualisierungen – Werner nennt Funktionen wie Werkzeug, Lehrmittel, Werbung, Kunststück, Dokument, Zeugnis oder Vermittlungsobjekt – bedächten noch die Gebrauchskontexte berück-

2 Horst Bredekamp et al., »Bildbeschreibungen: Eine Stilgeschichte technischer Bilder? Ein Interview mit Horst Bredekamp«, in *Das Technische Bild*, 47. In diesem Interview setzt sich Bredekamp mit der Kritik an einer Stilgeschichte naturwissenschaftlicher Bilder auseinander, wie sie der Wissenschaftshistoriker Michael Hagner fünf Jahre zuvor formulierte. Siehe *Bildwelten des Wissens*, »Interview: Bildunterschätzung – Bildüberschätzung. Ein Gespräch der ›Bildwelten des Wissens‹ mit Michael Hagner«, in *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 1,1: *Bilder in Prozessen*, Hg. Horst Bredekamp und Gabriele Werner (Berlin: Akademie Verlag, 2003), 110.

3 Gottfried Boehm, »Zwischen Auge und Hand: Bilder als Instrumente der Erkenntnis«, in *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, Hg. Bettina Heinz und Jörg Huber (Zürich: Edition Voldemeer, 2001), 44.

4 Ebd.

sichtigten oder das Vermögen der Visualisierungen, Welten zu erzeugen, reflektierten.⁵

Im Unterschied zu diesen kunstgeschichtlichen Zugängen zu naturwissenschaftlichen Bildern soll in der nachfolgenden Analyse ein dezidiert medienästhetischer Zugang expliziert werden, der an die Diskussion zur Wirkungs- und Rezeptionsweise von Bewegtbildern, wie sie von der Filmwissenschaft angestoßen wurde, anschließt und der sich auf Ansätze aus der Affekttheorie und der Einfühlungsästhetik zurückbezieht.

Tom Gunning hebt die Bewegungsillusion, die die ersten öffentlich vorgeführten Filme erzeugten, als entscheidend für die affektive Beteiligung der Zuschauenden am Geschehen auf der Leinwand heraus. Die Faszination, die Zuschauende in den ersten Jahren des Kinos erlebten, ging laut Gunning nicht von der Lebensähnlichkeit des Dargestellten aus, sondern von der Bewegung der Bilder und von ihrer kontinuierlichen Verwandlung. Er schreibt: »Rather than mistaking the image for reality, the spectator is astonished by its transformation through the new illusion of projected motion.«⁶ Gunning verschiebt den Fokus von der Realitätsnähe auf die Bewegungsillusion und damit auf die formalen Eigenschaften des Bewegtbildes. Die Bewegungsillusion gilt der Filmwissenschaft noch heute als wichtigstes wirkungsästhetisches Merkmal des Films, die nicht allein die Einbildungskraft anregt, sondern darüber hinaus die kontinuierliche Veränderung des Wahrgenommenen hervorhebt.

Der belgische Wahrnehmungspsychologe Albert Michotte van den Berck (1881–1965), Mitbegründer der französischen *Filmologie*-Bewegung in den Nachkriegsjahren, hob bereits 1948 hervor, das Bewusstsein der Zuschauenden, eine Illusion zu erleben, schmälere die Eindringlichkeit der Filmwahrnehmung nicht. Bei Michotte heißt es:

5 Siehe Gabriele Werner, »Bilddiskurse: Kritische Überlegungen zur Frage, ob es eine allgemeine Bildtheorie des naturwissenschaftlichen Bildes geben kann«, in *Das Technische Bild*, 32, siehe auch ebd., 30–31.

6 Tom Gunning, »Aesthetic of Astonishment: Early Film and the Incredulous Spectator« [1989], in *Viewing Positions: Ways of Seeing Film*, Hg. Linda Williams (Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1994), 118.

»[M]an kann nicht genügend auf der Tatsache beharren, dass die scheinbare Realität (diejenige der Bewegung im Kino) durch das Wissen, ›dass es sich nur um eine Illusion handelt‹, nicht im geringsten beeinträchtigt oder modifiziert wird.«⁷

Mit dem Begriff des »Realitätseindrucks« bezeichnet Michotte die Effektivität der Filmwahrnehmung, die unabhängig von dem Tatbestand sei, dass Zuschauende mit einer Folge unbewegter Bilder konfrontiert werden, die sie jedoch als bewegte Bilder wahrnehmen,⁸ und die sie dazu anregen, sich in die Filmhandlung einzufühlen.⁹

Der filmwissenschaftliche Fachbegriff der »Illusionsbildung« oder »Illudierung«, wie ihn die Filmwissenschaftlerin Gertrud Koch und die Philosophin Christiane Voss etabliert haben, bezeichnet das Paradox der Filmerfahrung, in der das Wissen um die Illusionserfahrung das Vergnügen am Zusehen keineswegs herabmindert. Die Illusionsbildung, wie sie das Bewegtbild ermöglicht, macht die Wirkungsästhetik des Films im Gegenteil vielmehr geradezu aus.¹⁰ Die Autorinnen betonen ganz besonders die Relevanz der Dynamik für die Ästhetik des Films: »Im Blick auf Film kollabiert die alte Struktur ästhetischer Kontemplation zugunsten eines dynamischen Erfahrungstypus von Film, in dessen Vollzug sich zugleich erst dessen Ästhetik als eine der Illusionsbildung konstituiert.«¹¹

5.2 Belebung und Betäubung in Affekttheorie und Einfühlungsästhetik

Damit ist bereits die Frage nach der Wirkung von Bewegtbildern angesprochen. Offen geblieben ist allerdings noch die entscheidende Frage, wie

7 Albert Michotte van den Berck, »Der Realitätscharakter der filmischen Projektion« [i.O. 1948], aus dem Französischen übersetzt von Vinzenz Hediger, in »Digitales Kino/Filmologie und Psychologie«, Themenheft, *Montage A/V* 12, Nr. 1 (2003): 112, <https://doi.org/10.25969/mediarep/152>.

8 Siehe ebd.

9 Siehe Albert Michotte van den Berck, »Die emotionale Teilnahme des Zuschauers am Geschehen auf der Leinwand« [i.O. 1953], aus dem Französischen von Vinzenz Hediger, in »Digitales Kino/Filmologie und Psychologie«, Themenheft, *Montage A/V* 12, Nr. 1 (2003): 126, <https://doi.org/10.25969/mediarep/154>.

10 Siehe Gertrud Koch und Christiane Voss, »... kraft der Illusion«, in ... *kraft der Illusion*, Hg. dies. (München: Fink, 2006), 8–9. Gertrud Koch hat ihre Überlegungen zur Illusionserzeugung ausgeführt in *Die Wiederkehr der Illusion: Der Film und die Kunst der Gegenwart* (Berlin: Suhrkamp, 2016).

11 Koch und Voss, »... kraft der Illusion«, 9.

sich dieser Vorgang, in dem Betrachtende durch die Bewegungsillusion affektiv involviert werden, sprachlich fassen lässt. Diese Frage erweist sich vor allem dann als maßgebend, wenn man über die Analyse eines Affektvokabulars, wie sie im vorigen Kapitel ausgeführt wurde, hinausgehen und die spezifische Ästhetik des Bewegtbildes mitberücksichtigen möchte. Wie die Analyse im vorigen Kapitel verdeutlicht hat, wird im gegenwärtigen zellbiologischen Diskurs davon gesprochen, dass Bewegtbilder von Zellen Rezipierende, ganz besonders unerfahrene Rezipierende, in Staunen versetzen, sie in ihren Bann schlagen und bei ihnen bisweilen sogar ein Gefühl der Ehrfurcht auslösen. Wie weiterhin aufgewiesen wurde, veranlasste der Eindruck, den die Begegnung mit dem Mikrokosmos hervorrief, Mikroskopiker*innen in der Vergangenheit immer wieder dazu, diese Erfahrung mit so widersprüchlichen Begriffen wie dem Wunderbaren, der Faszination und dem Schreckenerregenden zu belegen, die wiederholt mit der ästhetischen Kategorie des Erhabenen in Verbindung gebracht wurden. Um weitere Dimensionen der ästhetischen Erfahrung des Mikrokosmos herauszuheben, soll hier die Wirkung der Lebezellfilme auf die Betrachtenden ausgehend von den Begriffen der ›Resonanz‹, der ›Einfühlung‹ und der ›Vitalkraft‹, wie die Affekttheorie, die Einfühlungsästhetik und der Vitalismus sie zur Verfügung stellen, untersucht werden.

5.2.1 Affekt als Resonanzphänomen, Medium und Vitalkraft

Der niederländische Philosoph Baruch de Spinoza, der sein Geld als Linsenschleifer verdiente, nachdem ihn die jüdische Gemeinde Amsterdams exkommuniziert hatte, bezeichnete in seiner nicht-dichotom, sondern monistisch angelegten *Ethik* im Jahr 1677 – also zwölf Jahre nachdem Hookes *Micrographia* erschienen war – den Affekt als eine Kraft, die das Vermögen des Körpers steigern oder herabmindern und die der aktiven Gestaltung bedürfe. Im dritten Teilabschnitt der *Ethik* mit dem Titel »Von dem Ursprung und der Natur der Affekte« schlug Spinoza die folgende Definition vor: »Unter Affekt verstehe ich die Affektionen des Körpers, durch die die Wirkungskraft des Körpers vermehrt oder vermindert, gefördert oder gehemmt wird, und zugleich die Ideen dieser Affektionen.«¹² Spinoza macht hier auf die aktivie-

12 Baruch de Spinoza, *Ethik* [i.O. 1677], aus dem Lateinischen übersetzt von Otto Baensch (Leipzig: Verlag der Dürr'schen Buchhandlung, 1905), 100.

renden und passivierenden Auswirkungen des Affekts auf den Körper aufmerksam und umfasst zudem die Vorstellungen und Begriffe, die körperliche Empfindungen im Geist hervorrufen. In der Sprache der heutigen Kognitionspsychologie würde man sagen, Spinoza verweist auf die Verbindung zwischen Affekt und Kognition und weist darauf hin, dass Affekte auf mentale Repräsentationen und kognitive Prozesse zurückwirken.

Anders als viele seiner Zeitgenossen, ganz besonders René Descartes, die auf einer dezidierten Trennung zwischen Körper und Geist beharren, betont Spinoza die Effekte körperlicher Regungen auf die Verstandestätigkeit. Darüber hinaus unterstreicht er, dass wir Affekte auslösen und erleiden, oder, in anderen Worten, dass wir Affekte in unserer Innen- und Außenwelt erzeugen und zugleich affektive Impulse von unserer Umwelt empfangen. In seinen Überlegungen zum aktivierenden und passivierenden Potenzial von Affekten unterscheidet er zwischen Affekt und Leidenschaft: Während der Affekt das Subjekt ermächtigt, wird es durch die Leidenschaft entmachtet. Spinoza schreibt: »Wenn wir daher von einer dieser Affektionen die adäquate Ursache sein können, dann verstehe ich unter dem Affekt eine Handlung, im anderen Falle eine Leidenschaft.«¹³ Spinoza unterstreicht die Handlungsfähigkeit, die aus dem affektiven Reiz erwachsen kann, und hebt die Notwendigkeit hervor, die Affekte aktiv zu gestalten. Im weiteren Textverlauf akzentuiert er den engen Zusammenhang zwischen dem Körper und der Wahrnehmung, wenn er von der Steigerung des Wahrnehmungsvermögens durch die positive affektive Ausrichtung des Körpers spricht: »Je fähiger der Körper [...] gemacht wird, desto fähiger wird [...] die Seele zum Wahrnehmen gemacht [...]«¹⁴

Spinozas Überlegungen erweisen sich als wegbereitend für das gegenwärtige Verständnis des Affekts, das der US-amerikanische Kommunikationswissenschaftler Gregory J. Seigworth und die australische Psychologin Melissa Gregg in der Einleitung ihres gemeinsam herausgegebenen und breit rezipierten *Affect Theory Reader* entwickeln. Seigworth und Gregg bieten dort die folgende Definition an:

13 Ebd.

14 Ebd., 207. Kurz zuvor heißt es ausführlicher zum Zusammenhang von Affizierung und Nützlichkeit: »Das, was den menschlichen Körper so beeinflusst, daß er auf mannigfache Weisen affiziert werden kann, oder was ihn fähig macht, äußere Körper auf mannigfache Weisen zu affizieren, ist dem Menschen nützlich; und um so nützlicher, je fähiger dadurch der Körper gemacht wird, auf mannigfache Weisen sowohl affiziert zu werden, als auch andere Körper zu affizieren. Dagegen ist das schädlich, was den Körper hierzu minder fähig macht.« Ebd., 206–207.

»Affect arises in the midst of *in-between-ness*: in the capacities to act and be acted upon. [...] affect is found in those intensities that pass body to body (human, nonhuman, part-body, and otherwise), in those resonances that circulate about, between, and sometimes stick to bodies and worlds, *and* in the very passages or variations between these intensities and resonances themselves. Affect, at its most anthropomorphic, is the name we give to those forces – visceral forces beneath, alongside, or generally *other than* conscious knowing, vital forces insisting beyond emotion – that can serve to drive us toward movement, toward thought [...].«¹⁵

Seigworth und Gregg folgen Spinoza, wenn sie die aktivierende und passivierende Wirkung des Affekts ansprechen und den Affekt als die Steigerung und Verminderung von Handlungsfähigkeit konzipieren. Bei ihnen findet sich zudem die Überzeugung Spinozas wieder, dass der Affekt zwischen der Innen- und der Außenwelt vermittelt. Im Unterschied zu Spinoza, der dem Affekt das Vermögen absprach, zur Erkenntnis zu befähigen – das Denken, so Spinoza, habe »Gott zur Ursache«¹⁶ –, stellen Seigworth und Gregg in ihrer Ausweitung des Spinozistischen Ansatzes heraus, dass der Affekt durchaus zum Denken anregen könne.

Seigworth und Gregg sprechen vom Affekt als einem Resonanzphänomen; sie beschreiben den Affekt als eine Kraft, die zwischen Körpern untereinander sowie zwischen Körpern und ihren Umwelten kursiert, ihren Widerhall in ihnen findet, auf diese einwirkt, sie miteinander verbindet und trennt. Damit heben sie die Medialität des Affekts hervor. Der Affekt bewegt sich, Seigworth und Gregg zufolge, im »Dazwischen«. Dies korrespondiert mit dem Gedanken des deutschen Philosophen Dieter Mersch, »dass Medien buchstäblich ›dazwischen‹ treten und Instanzen der Übermittlung, Darstellung, Verbreitung, des Austauschs und der Wiederholung bilden«¹⁷. Den bemerkenswerten Zwischenstatus des Mediums hatte Mersch über die Existenz eines »Anderen«, eines Nicht-Selbst bestimmt: »Es gibt Medien, weil es Alterität gibt. Alterität meint ein ›Anderes‹, das sich dem Zugriff zunächst verweigert, das eines Dritten bedarf, um seine Vermittlung [...] zu garantieren.«¹⁸ In der Weiterführung der Überlegungen von Seigworth und Gregg zum Affekt als einem Resonanzphänomen in Verbindung mit Merschs Über-

15 Gregory J. Seigworth und Melissa Gregg, »An Inventory of Shimmers«, in *The Affect Theory Reader*, Hg. Melissa Gregg und Gregory J. Seigworth (Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2010), 1, Hervorhebungen im Original.

16 Spinoza, *Ethik*, 102.

17 Dieter Mersch, *Medientheorie zur Einführung* (Hamburg: Junius, 2006), 9.

18 Ebd.

legungen zu Medien als Schwelleninstanzen deutet sich bereits der Gedanke an, dass der Affekt als Vermittler fungiert, der das Selbst über die Begegnung mit dem Anderen erfahrbar macht.

Seigworth und Gregg definieren den Affekt als Vitalkräfte, als »vital forces«, und als leibliche Kräfte, »visceral forces«¹⁹. Über den Begriff der »Vitalkräfte« rückt der affekttheoretische Ansatz, wie Seigworth und Gregg ihn vorschlagen, in die Nähe zur vitalistischen Philosophie. Die vitalistische Philosophie, eine Denkrichtung, die die Lebenskraft alles Lebendigen herausstellte und die sich im neunzehnten Jahrhundert scharf vom Mechanismus abgrenzte, erfuhr in der Lebensphilosophie zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts eine Renaissance. Mit Rückbezug auf das aristotelische Konzept der Entelechie – der Vorstellung, das jedem Ding eine evolutive und teleologische Kraft innewohnt – schreibt diese Strömung der kontinentaleuropäischen Philosophie der Materie vitale Kraft zu.

Das Konzept der ›Vitalkraft‹ deutete sich bereits in der Mitte des neunzehnten Jahrhunderts an, und zwar in der von dem britischen Naturforscher Charles Darwin (1808–1882) formulierten Einsicht, dass alle Lebewesen miteinander verbunden seien – Darwin leitete diese Einsicht aus der Beobachtung makroskopischer Formen her –, und artikulierte sich erneut in der Erkenntnis, dass alle Zellen aus Zellen entstünden, eine Einsicht, die für die sich seit Rudolf Virchow etablierende Zellforschung maßgeblich war und es noch immer ist. Rudolf Virchow formulierte im Jahr 1855 den Grundsatz der Zelltheorie, *omnis cellula e cellula*, der bedeutet, dass jede Zelle aus einer Zelle entsteht.²⁰ Wegweisend für diese Erkenntnis waren die Einsichten des Botanikers Matthias Jacob Schleiden (1804–1881) und des Zoologen Theodor Schwann (1810–1882) in die zelluläre Entwicklung, die die beiden Forscher ausgehend von ihrem Studium der Mikroanatomie von Pflanzen (Schleiden)²¹ und Tieren (Schwann)²² in den Jahren 1838 und 1839 formulierten.

19 Seigworth und Gregg, »Inventory of Shimmers«, 1.

20 Siehe Rudolf Virchow, »Cellular-Pathologie«, *Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medizin* 8 (1855): 5.

21 Siehe Matthias Schleiden, »Beiträge zur Phytogenesis«, in *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medizin* (1838). Als Herausgeber des *Archivs* zeichnet der im dritten Kapitel bereits erwähnte Anatom und Physiologe Johannes Müller.

22 Siehe Theodor Schwann, *Mikroskopische Untersuchungen über die Übereinstimmung in der Struktur und dem Wachsthum der Thiere und Pflanzen* (Berlin: Verlag der Sander'schen Buchhandlung, 1839).

Seit ungefähr zehn Jahren erfährt der Vitalismus in einer Strömung der materialistischen Philosophie neuerliche Beachtung und gewinnt im Gewand eines vitalen Materialismus erneut an Strahlkraft. So entwickelte etwa die US-amerikanische Politikwissenschaftlerin Jane Bennett ihren vitalen Materialismus über die Auseinandersetzung mit den vitalistischen Philosophien Henri Bergsons (1859–1941) und Hans Drieschs (1867–1941), die sich an der Wende vom neunzehnten zum zwanzigsten Jahrhundert etablierten. Den vitalen Materialismus Drieschs begreift Bennett als eine Spielart des Materialismus, die der Materie vitale Kraft zuschreibt und – im Anschluss an die Lebensphilosophie Bergsons und den Begriff des Werdens – anerkennt, dass Materie in einem anhaltenden Prozess der Verdichtung und Auflösung begriffen ist und sich permanent im Fluss befindet, ja dieser Fluss *ist*. Bennett formuliert diesen Gedanken wie folgt:

»[M]ateriality« is a flow, an indivisible continuum of becomings whose protean elements are not only exquisitely imbricated in a flowing environment but also *are* that very flow. Extensive and intensive forms swirl around and become an open and living whole [...].²³

Damit deutet sich bei Bennett bereits ein ontologischer Gedanke an, der für die Analyse der Lebendzellfilme im folgenden Unterkapitel wichtig werden wird: Moleküle und Zellen *sind* der Fluss lebendiger Materie. Und im Rückschluss auf uns als Betrachtende dieser Filme bedeutet dies, da auch wir als Organismen aus Zellen und Molekülen bestehen, die sich unablässig bewegen und verändern, dass wir der Fluss lebendiger Materie *sind*.

Mit Rückbezug auf Driesch, der seine philosophischen Überlegungen aus seiner biologischen Praxis herleitete, begreift Bennett Materie nicht als tot, sondern als ein vielgestaltiges aktives Prinzip. Den Übergang vom Vitalismus zum vitalen Materialismus bei Driesch situiert Bennett am Ende von Drieschs *History and Theory of Vitalism*²⁴. Dort vollziehe Driesch eine Kehrtwende und weise den Gegensatz von Leben und Materie zurück, auf den er seine frühere Argumentation aufgebaut hatte. Bennett schreibt:

²³ Jane Bennett, *Vibrant Matter: A Political Ecology of Things* (Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2010), 92.

²⁴ Siehe Hans Driesch, *The History and Theory of Vitalism* [i.O. 1905], autorisierte Übersetzung aus dem Deutschen von C. K. Ogden, überarbeitet und teilweise für die englische Ausgabe neugeschrieben vom Autor (London: Macmillan, 1914).

»The universe, he [Driesch – B.P.] ultimately concludes, is not dead matter sometimes supplemented with organic life, but one big organism, »a *something in evolution*. All natural becoming is like one great embryology.« Every thing is entelechial, life-ly, vitalistic.«²⁵

Der vitale Materialismus, den Bennett vorschlägt und den sie bereits bei Driesch angelegt sieht, erkennt eine unbestimmte Vitalität in der Welt an, ohne dass er auf die christlichen Vorstellungen einer Seele und eines Gottes, auf das mechanistische Prinzip der Zweckgerichtetheit oder auf die problematische Idee, Vitalität sei ungleich unter den Menschen verteilt, zurückgreifen müsse. Mit Rückbezug auf die Einsicht des deutschen Philosophen und Theologen Johann Gottfried Herder (1744–1803) in die pulsierende Vitalität der Materie, in der zahllose lebendige und vielgestaltige Kräfte arbeiteten, postuliert Bennett

»The vital materialist affirms a figure of matter as an active principle, and a universe of the lively materiality that is always in various states of congealment and diffusion, materialities that are active and creative without needing to be experienced or conceived as partaking in divinity or purposiveness.«²⁶

Die Aktivität und Generativität der lebendigen Materie, von der Bennett hier spricht, deutet bereits an, was die Lebendzellfilme, die im letzten Abschnitt dieses Kapitels Gegenstand der Analyse sein werden, plastisch machen: die anhaltenden Prozesse der Erstarrung und Ausbreitung der zellulären Materie, ihre Verdichtung und Ausdehnung, ihre Formation, Deformation, Reformation und Transformation.

5.2.2 Einfühlung, multimodale Wahrnehmung, Affektlenkung

Den Begriff der »Kraft«, wie ihn der Vitalismus hervorhob, und das Phänomen der affektiven Resonanz, wie es bei Spinoza anklingt, behandelte auch der deutsche Philosoph und Psychologe Theodor Lipps (1851–1914) zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts, allerdings primär im Hinblick auf die Frage nach der Ästhetik, die Lipps als ein Gebiet der Psychologie beanspruchte. Mit Rückbezug auf die deutsche Philosophie der Romantik, die sich bereits der Frage widmete, wie wir uns in die Objekte der natürlichen Welt einfühlen können, entwickelte Lipps zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts, also na-

²⁵ Bennett, *Vibrant Matter*, 89, Hervorhebung im Original.

²⁶ Ebd.

hezu zeitgleich mit der öffentlichen Verbreitung des Films, eine Theorie der Einfühlung. In seinen Überlegungen zur Einfühlungsästhetik im Jahr 1903 konstatierte er: »Insofern kann die Ästhetik bezeichnet werden als eine Disziplin der angewandten Psychologie.«²⁷

Lipps zufolge fühlten wir uns in ein Gegenüber ein, indem wir uns in es hineinprojizierten und es motorisch und gedanklich nachahmten. Das menschliche Einfühlungsvermögen beschränke sich allerdings nicht allein auf die Mimesis von Mitmenschen oder Lebewesen im Allgemeinen, sondern könne auch unbelebte Objekte zum Gegenstand haben. Lipps beschreibt drei Formen der Einfühlung. Die erste Form nennt er »Natureinfühlung« – wobei er diese Form der Einfühlung nicht auf Naturphänomene wie Landschaften beschränkt, sondern auch grafische Darstellungsformen wie die Linie und architektonische Elemente wie die dorische Säule einschließt; als zweite Form der Einfühlung nennt er die »sinnliche Erscheinung des Menschen« und als dritte Form die Einfühlung in Kunstwerke.²⁸

Die film- und medienwissenschaftliche Forschung hat den Begriff der »Einfühlung« am Ende des zwanzigsten Jahrhunderts wieder aufgegriffen und ihn auf die Filmerfahrung neuausgerichtet.²⁹ Der Bezug zwischen der Einfühlungsästhetik und der Filmrezeption ist vielfach hergestellt worden, allerdings vornehmlich mit Blick auf die Frage nach den Modalitäten der Rezeption fiktionaler Filme und hinsichtlich der Einfühlung in fiktionale Charaktere.³⁰ Der an der Universität Kopenhagen tätige Psychologe Ed Tan gibt bereits einen Hinweis auf die Einfühlung in unbelebte Objekte, wenn er darauf aufmerksam macht, dass die Einfühlung in Kamerabewegungen,

27 Theodor Lipps, *Grundlegung der Ästhetik* (Hamburg und Leipzig: Voss, 1903), I. Siehe dazu auch Barck et al., »Ästhetik/ästhetisch«, 389.

28 Siehe Theodor Lipps, »Einfühlung und ästhetischer Genuß«, in *Theodor Lipps. Schriften zur Einfühlung. Mit einer Einleitung und Anmerkungen*, Hg. Faustino Fabbianelli, 229–243 (Baden-Baden: Ergon, 2018).

29 Siehe Robin Curtis und Gertrud Koch, *Einfühlung: Zu Geschichte und Gegenwart eines ästhetischen Konzepts* (München: Fink, 2008). Siehe darin ganz besonders den historischen Überblickstext zum Einfühlungsbegriff von Robin Curtis, »Einführung in die Einfühlung«. Siehe auch Murray Smith, *Engaging Characters: Fiction, Emotion, and the Cinema* (Oxford: Oxford University Press, 1995); Ed S. Tan, *Emotion and the Structure of Narrative Film* [1996] (Mahwah, N.J.: Erlbaum, 2011); Joachim Paech, »Dispositionen der Einfühlung. Anmerkungen zum Einfluß der Einfühlungs-Ästhetik des 19. Jahrhunderts auf die Theorie des Kinofilms«, in: *Der Film in der Geschichte: Dokumentation der GFF-Tagung*, Hg. Knut Hieckethier et al. (Berlin: Edition Sigma, 1997).

30 Siehe etwa Smith, *Engaging Characters*, 99; Christiane Voss, »Fiktionale Immersion«, *Montage AV* 17, Nr. 2 (2008), <https://doi.org/10.25969/mediarep/301>.

Objekte auf der Leinwand, die Montage oder die Musik von der Konzentration auf die Filmhandlung ablenken könne.³¹ Einige wenige Arbeiten haben die Rolle der Einfühlung für die Rezeption des Experimentalfilms und der Bewegtbilder der Naturwissenschaften untersucht. Die kanadisch-deutsche Kultur- und Medienwissenschaftlerin Robin Curtis etwa greift das Problem der Einfühlung in die Materie auf, ganz besonders auch in die unbelebte Materie, wie es bereits bei Lipps angelegt ist, und diskutiert die Frage der Einfühlung in Farben, Formen und abstrakte Bewegungen im amerikanischen Avantgarde-Film des späten zwanzigsten Jahrhunderts³² sowie in den Visualisierungen des Körperinneren, wie sie das *Visible Human Project* für Studierende der Medizin in den 1990er-Jahren verfügbar gemacht hat.³³ Darüber hinaus stellt sie ganz dezidiert den Bezug zwischen der Einfühlung und der multimodalen Wahrnehmung her³⁴, ein Gesichtspunkt, der für die hier entwickelte Argumentation zentral ist.

Curtis führt die Überlegungen zur Einfühlung als Mimikry der körperlichen und inneren Bewegungen eines Gegenübers bei Lipps und die Gedanken zur Aufmerksamkeit als intersubjektivem Wahrnehmungsmodus zwischen Bild und Betrachter, wie sie der österreichische Kunsthistoriker Alois Riegl (1858–1905) nahezu zeitgleich mit Lipps entwickelt und mit dem Begriff der »haptischen Visualität« belegt hat, zusammen und verbindet diese beiden Ansätze aus der Wiener Ästhetik der 1900er-Jahre mit den Überlegungen der US-amerikanischen Film- und Medienwissenschaftlerin Vivian Sobchack zur Filmphänomenologie aus den 1990er-Jahren.³⁵ Alle drei Ansätze

31 Hier mache sich der Film in seiner Funktion als »artefact« bemerkbar und betone einen Aspekt, dem Tan die Funktion des Films als »fictional world« gegenüberstellt. Siehe Tan, *Emotion and the Structure of Narrative Film*, 154.

32 Siehe Robin Curtis, »Immersion und Einfühlung: Zwischen Repräsentationalität und Materialität bewegter Bilder«, *Montage AV* 17, 2 (2008): 105, <https://doi.org/10.25969/mediarep/465>. Christine Brinckmann betrachtet den Film der deutschen Avantgarde in der Weimarer Zeit im Lichte der Einfühlungsästhetik und diskutiert ganz besonders die Einfühlung in abstrakte Formen. Siehe Christine N. Brinckmann, »Abstraktion und »Einfühlung« im deutschen Avantgarde-Film der 20er Jahre«, in: *Die anthropomorphe Kamera und andere Schriften zur filmischen Narration*, Hg. Mariann Lewinsky und Alexandra Schneider (Zürich: Chronos, 1997).

33 Siehe Robin Curtis, »Compression/Repression: Distinguishing Between the Animate and the Inanimate«, in *Bilder animierter Bewegung / Images of Animate Movement*, Hg. Sigrid Leyssen und Pirkko Rathgeber (München: Fink, 2013).

34 Siehe Robin Curtis, *Conscientious Viscerality: The Autobiographical Stance in German Film and Video* (Berlin: Gebrüder Mann Verlag/Edition Imorde, 2006), 61–68; dies., »Einführung in die Einfühlung«, 15.

35 Siehe Curtis, *Conscientious Viscerality*, 61–68.

ze, so weist Curtis auf, haben das Verständnis einer dezidiert multimodalen und verkörperten Wahrnehmung gemeinsam, die die Basis darstellt für den reziproken Austausch mit einem unbelebten, aber nichtsdestoweniger materiellen Gegenüber: dem Film.³⁶ Über die Einfühlung in den Film selbst wird dieser zu einem Gegenüber eigenen Rechts, und zwar zu einem explizit leiblichen Gegenüber, das Zuschauenden ihre eigene Leiblichkeit reflexiv bewusst macht. Curtis führt aus:

»Indeed, one feels a reciprocal attentiveness, an intersubjectivity with the film itself, as a body separate from one's own, with which one interacts. As a medium capable of offering a particular set of corporeal sensations, such as the haptic, the kinaesthetic, and the proprioceptive, film leads the viewer back to those perceptions that are essential to her own sense of being an embodied subject.«³⁷

Der Film, so erläutert Curtis, lenke die Aufmerksamkeit auf die Leiblichkeit und die multimodale Wahrnehmung. Die Filmerfahrung, wie Curtis im Anschluss an Sobchack betont, bestehe weniger in der Auseinandersetzung mit der Erfahrung Filmschaffender, sondern vielmehr in der Einfühlung in die Erfahrung und Wahrnehmung des Films selbst, einem Gegenüber, das die Zuschauenden direkt anspreche und ihnen nicht allein visuelle und auditive Erfahrungen anbiete, sondern vermittelt dieser Erfahrungen in zweiter Ordnung auch Empfindungen der Haut, des Gleichgewichts und der Bewegung ermögliche.

Diese Einsichten in die wesentliche Rolle, die der multimodalen Wahrnehmung in der Filmerfahrung zukommt, deuten sich bereits bei Lipps an, wenn er darauf aufmerksam macht, dass visuelle Eindrücke eng verbunden sind mit innerer Bewegung. Lipps betont, dass es sich bei den Bewegungen, die wir Objekten in der Außenwelt zuschreiben, um unsere eigenen inneren Bewegungen handelt:

36 Sobchack spricht vom Körper des Films («film's body») und betont die Materialität dieses nicht-menschlichen Körpers, wenn sie schreibt: »[T]he term *film's body* [...] is meant to be empirical, not metaphoric[...].« Vivian Sobchack, *The Address of the Eye: A Phenomenology of Film Experience* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1992), xviii. Sobchack führt aus: »[E]ven as human bodies engage the film's body in an always correlated activity (whether of filmmaking or spectating), the film's material body also always engages us in its possibilities as a nonhuman lived-body. In the sense, [...] the embodied film exists not as a prosthetic device but rather, to use Donna Haraway's characterization, as a «cyborg» – an other body that signifies possibility and liberation from the disfigured bodies some of us presently live.« Ebd., 162–163. Sobchack bezieht sich hier auf Donna Haraway, »A Manifesto for Cyborgs«, *Socialist Review* 80 (1985).

37 Curtis, *Conscientious Viscerality*, 68.

»Solcher Einfühlung gebe ich schon im gemeinen Leben Ausdruck, indem ich von der Linie selbst sage, sie strecke, biege sich, woge auf und ab, begrenze sich; und vom Rhythmus: es sei in ihm ein Fortstreben und Zurückhalten, Spannungen und Lösung usw. Dies alles ist meine Tätigkeit, meine lebendige innere Bewegung; aber eben objektiviert.«³⁸

In den folgenden Einzelanalysen wird deutlich werden, dass gerade diese Rückbezüglichkeit der Wahrnehmung von Objekten in der Außenwelt auf die innere Bewegung der Wahrnehmenden ausschlaggebend ist für die affektive Beteiligung der Betrachtenden von Lebendzellfilmen am Geschehen auf dem Bildschirm.

Diese Teilhabe läuft bei Lipps allerdings nicht allein über die affektive Beteiligung ab. Vielmehr werden die Dinge erst über das kognitive Erfassen vollends angeeignet, wie Lipps betont, wenn er schreibt:

»Indem ich die Dinge verstandesmäßig auffasse, durchdringe ich sie notwendig mit solchem Streben, solcher Tätigkeit, solcher Kraft. Als vom Verstand aufgefaßte, tragen sie Dergleichen als eine Seite ihres Wesens in sich. Es liegt in ihnen, sofern sie »meine« Gegenstände sind, dies Stück von mir.«³⁹

Ähnlich wie Spinoza trennt Lipps den Affekt nicht vom Verstand, sondern betont vielmehr den Übergang von der affektiven Hingabe an das Gegenüber zu seinem kognitiv-reflexiven Erfassen, der für sein Durchdringen als unerlässlich gelten müsse.

Lipps unterscheidet den Begriff der Kraft, wie er ihn verwendet, von dem »geläuterten Kraftbegriff der Naturwissenschaft«⁴⁰, das heißt von der Vorstellung, Kraft sei messbar und berechenbar, und weist darauf hin, dass sich auch der Naturwissenschaftler nicht der Erfahrung der Kraft als »etwas Eigentümliches, ein von den Dingen verschiedenes Reales, das in den Dingen wohnt oder sitzt, und nach Betätigung verlangt«⁴¹, entziehen könne. Damit macht er auf die doppelte Zugangsweise aufmerksam, über die sich Naturwissenschaftler ihren Untersuchungsobjekten nähern: Das wissenschaftlich geschulte Verständnis und das affektive Miterleben schließen sich nicht gegenseitig aus, sondern reichern einander im Gegenteil gegenseitig an.

Die Überlegungen zur Einfühlung, wie Lipps sie anstellte, haben mit den Überlegungen zur Affizierung bei Spinoza und zur affektiven Resonanz bei

38 Theodor Lipps, *Leitfaden der Psychologie*, 2. Auflage (Leipzig: Engelmann, 1906), 225.

39 Lipps, »Einfühlung und ästhetischer Genuß«, 237.

40 Theodor Lipps, »Einfühlung, Mensch und Naturdinge«, in *Theodor Lipps. Schriften zur Einfühlung*, 51–142 (Baden-Baden: Ergon, 2018), 105.

41 Ebd.

Seigworth und Gregg die Betonung der aktivierenden oder passivierenden Effekte der Begegnung mit einem Gegenüber gemeinsam. Die Vitalkraft, die der Affekt zu steigern oder zu vermindern vermag, und die Intensität, die aus der Steigerung des körperlichen und geistigen Vermögens durch den Affekt Seigworth und Gregg zufolge erwächst, spricht auch Lipps in seinen Überlegungen zur Einfühlung in die »Naturkräfte« an. Er schreibt: »[W]as die Wirkung der Kräfte erfährt, verhält sich ›leidend‹. Zugleich übt es vielleicht wiederum eine ›Gegentätigkeit‹.«⁴² Die betäubenden und anregenden Potenziale der Einfühlung in Formen und Rhythmen unterstreicht Lipps an anderer Stelle, wenn er beobachtet:

»In allem solchen eingefühlten Tun aber fühle ich mich zugleich affektiv irgendwie bestimmt, mehr oder minder kraftvoll, frei, leicht, sicher, vielleicht spielend; oder bemüht, gehalten; schließlich auch stolz, kühn, trotzig, oder das Gegenteil.«⁴³

Neben der Betonung der vitalisierenden und betäubenden Kraft, findet sich auch der Gedanke der engen Verbindung von Affekten und geistigen Prozessen bereits bei Spinoza, ein Gedanke, der später bei Lipps wieder auftaucht. Beide Denker betonen die Notwendigkeit der Affektlenkung⁴⁴ durch den Verstand. Spinoza zufolge müsse einer Abhängigkeit von den Affekten entgegengewirkt werden. Dies wird sehr deutlich an der Kernaussage des vierten Teilabschnitts der *Ethik*. Dort heißt es gleich im ersten Satz: »Die menschliche Ohnmacht, die Affekte zu meistern und zu hemmen, nenne ich Knechtschaft [...].«⁴⁵ Ähnlich wie Spinoza konzipiert auch

42 Ebd., 104.

43 Theodor Lipps, »Einfühlung als Erkenntnisquelle«, in *Theodor Lipps. Schriften zur Einfühlung*, 355–373, hier 359.

44 Ein anders gelagertes Verständnis des Begriffs der Affektlenkung als Vermögen des Films findet sich in Jens Eder, »Affektlenkung im Film: Das Beispiel *Triumph des Willens*«, in *Mediale Emotionen: Zur Lenkung von Gefühlen durch Bild und Sound*, Hg. Oliver Grau und Andreas Keil (Frankfurt am Main: Fischer, 2005). Eder schlägt dort ein Modell dafür vor, wie die Evokation und Steuerung der Gefühle der Zuschauenden durch das Medium Film analysiert werden kann und spricht die wichtige Frage nach der Versprachlichung von Gefühlseindrücken an.

45 Spinoza, *Ethik*, 171. Mit dieser Formulierung begibt sich Spinoza in die Nähe zu einer Tradition der Dämonisierung des Affekts. Die Philosophin Michaela Ott hat die Dämonologie als »eine historisch frühe Symbolisierung von Vorgängen der Affizierung« gedeutet. Siehe Michaela Ott, *Affizierung: Zu einer ästhetisch-epistemischen Figur* (München: Textem, 2010), 43. Der Medien- und Kulturwissenschaftler Bernd Bösel schließt hier an und konturiert das »dämonologische Verfügungsregime« des Affekts. Bösel versteht Dämonologien als »handlungsanleitende Modelle« zur Affektlenkung, deren Gebrauch er von der griechischen Antike über die Renaissance bis in die Gegenwart aufweist. Siehe Bernd Bösel, *Die Plastizität der Gefühle: Das affektive Leben zwischen Psy-*

Lipps den Verstand als Korrektiv zur Einfühlung. »Wahrheit« oder »Wirklichkeitserkenntnis«⁴⁶ kann Lipps zufolge lediglich dann gelingen, wenn die Wahrnehmungsergebnisse, die über die Einfühlung erzielt werden, mittels der Vernunft überprüft und, falls notwendig, korrigiert werden.⁴⁷

5.2.3 Affekt, Emotion, Kognition

Affekt und Vernunft, die bei Spinoza und Lipps nicht ohne einander auskamen, werden in der gegenwärtigen medienkulturwissenschaftlichen Theorie und Analyse entflochten. Vivian Sobchack verweist mit Blick auf die gegenwärtige Beschäftigung mit der Leiblichkeit als Zugang zur Film-erfahrung auf das Problem, dass die Kognition als ein wichtiger Aspekt der Leiblichkeit ausgeblendet werde. Sie sagt: »What seems to have happened is that the fascination with embodiment has substituted affect for consciousness.«⁴⁸

In der von der Kybernetik angeregten kognitiven Psychologie der 1960er-Jahre ist ebenfalls eine Abtrennung des Affekts von der Kognition zu beobachten. Die US-amerikanische Wissenschaftshistorikerin Ruth Leys, die physiologische und psychologische Expertise in ihre wissenschaftshistorische Forschung einbringt, und die aus dieser Perspektive die gegenwärtige Konjunktur des Affektbegriffs kritisch reflektiert, hat dieses Problem für die Affektforschung in der Psychologie identifiziert, wie sie Silvan S. Tomkins (1911–1991) und sein Nachfolger Paul Ekman betrieben haben und wie Ekman sie noch immer betreibt.⁴⁹ Leys weist auf, dass Tomkins und Ekman – die Leys als Vertreter des dominanten »Basic Emotions paradigm«

chotechnik und Ereignis (Frankfurt am Main und New York: Campus, 2021), 79, siehe insbesondere ebd., 79–88.

46 Lipps, »Einfühlung als Erkenntnisquelle«, 367.

47 Siehe ebd.

48 Julian Hanich, »The Journeys of a Film Phenomenologist: An Interview with Vivian Sobchack on Being and Becoming«, *NECSUS: European Journal of Media Studies* 6, Nr. 2 (2017): 13, <https://doi.org/10.25969/mediarep/3397>.

49 Siehe Ruth Leys, »The Turn to Affect: A Critique«, *Critical Inquiry* 37, Nr. 3 (Frühling 2011). Leys bezieht sich auf Silvan S. Tomkins, *Affect, Imagery, Consciousness*, 2 Bände (New York: Springer, 1962–1963). Diese und andere Schlüsselpositionen der psychologischen Emotionsforschung hat Leys in einer Monografie detailliert dargestellt und im Hinblick auf die Frage nach dem Verhältnis von Affekt und Intention, von Emotion und Bedeutung diskutiert. Siehe Ruth Leys, *The Ascent of Affect: Genealogy and Critique* (Chicago: University of Chicago Press, 2017).

bezeichnet, einem Ansatz, der sieben Basisemotionen identifiziert, die mit ›positiven und ›negativen Affekten‹ in Verbindung gebracht werden – von der nicht ganz unproblematischen Annahme ausgingen, affektive Prozesse träten unabhängig von Intention und Bedeutung auf. Bei Leys heißt es:

»According to that paradigm, our basic emotions do not involve cognitions or beliefs about the objects in our world. Rather, they are rapid, phylogenetically old, automatic responses of the organism that have evolved for survival purposes and lack the cognitive characteristics of the higher-order mental processes.«⁵⁰

Eingang in die Medientheorie fand das Verständnis vom Affekt als ein Empfinden, das unterhalb der Wahrnehmungsschwelle abläuft und das von einem minimalen, aber dennoch wichtigen Intervall bestimmt wird, das es vom Bewusstsein abtrennt, über die Arbeiten von Brian Massumi in den 1990er-Jahren. Der kanadische Philosoph hat in dem für die jüngere medienwissenschaftliche Affektforschung maßgeblichen Aufsatz »The Autonomy of Affect«⁵¹ nicht nur auf der klaren Trennung zwischen Affekt und Kognition bestanden, sondern auch auf der Unterscheidung von Affekt und Emotion beharrt, einer Unterscheidung, die er an der Versprachlichung und Subjektivierung festmacht. Während meine Argumentation im vorliegenden Buch die Trennung von Affekt und Kognition hinterfragt, ist Massumis Unterscheidung zwischen Affekt und Emotion für meine Analyse insofern entscheidend, als sich diese auf die affektive Involvierung in Bewegtbilder, jedoch ausdrücklich nicht auf emotionale Reaktionen darauf richtet.

Massumi versteht ›Emotion‹ als etwas, das im Subjekt abgeschlossen sei, wohingegen ›Affekt‹ über das Subjekt hinausgehe. Er betont die »[...] irreducibly bodily and autonomic nature of affect«⁵². Im Unterschied dazu beschreibt er »emotion« wie folgt: »[E]motion is a subjective content, the socio-linguistic fixing of the quality of an experience which is from that point onward defined as personal.«⁵³ Der Affekt, so stellt Massumi heraus, bewegt uns unterhalb unserer Wahrnehmungsschwelle. Mit dem Begriff der Emotion bezeichnet er die Aneignung des Affekts und Versprachlichung durch das Subjekt, die es ermöglicht, eine Erfahrung mit Bedeutung zu belegen und sie mitteilbar zu machen. Während Massumi den Affekt als eine Kraft oder Intensität konzipiert, die durch das Subjekt hindurchströmt, fasst er die

50 Leys, »The Turn to Affect«, 437.

51 Siehe Brian Massumi, »The Autonomy of Affect«, in *Cultural Critique* 31 (Herbst 1995).

52 Ebd., 89.

53 Ebd., 88.

Emotion als eine Erfahrung auf, die sich das Subjekt durch Benennung zu eigen macht. Den Affekt begreift er als das sich der Subjektivierung entziehende vorsprachliche Berührt-Werden eines empfindungsfähigen Körpers – ein Vermögen, das Brian Massumi mit dem Begriff der Autonomie des Affekts bezeichnet.

Das Intervall zwischen dem affektiven Berührt-Werden und dem reflexiven Sich-Bewusst-Werden der inneren Berührung diskutiert Massumi mit Rückbezug auf die kommunikationswissenschaftliche Forschung zur »missing half-second«⁵⁴. Bereits die Sinnesphysiologie der 1850er-Jahre definierte den Affekt als »nicht wahrnehmbare[...] (aber messbare[...]) Zeitverschiebung zwischen Nervenreizung und Wahrnehmung«⁵⁵. Diese Konzeption des Affekts findet sich etwa bei Hermann von Helmholtz, wenngleich Helmholtz den Begriff ›Affekt‹ nicht verwendet, sondern seine naturwissenschaftlichen Beobachtungen vielmehr nutzt, um eine »sinnesphysiologische Perspektive auf die Ästhetik«⁵⁶ zu entwerfen. Helmholtz' Lehre von den nichtbewussten Wahrnehmungen wurde zum Ausgangspunkt für eine Ästhetik, die sich als ein Studium der sinnlichen Wahrnehmung begriff und die sich von der philosophischen Definition der Ästhetik als eines auf die Kunstbetrachtung ausgerichteten Gebietes absetzte. Helmholtz' Perspektive »markiert die erste eigentlich moderne *asthetische* Transformation ihres Begriffs«⁵⁷. Als Haupt-

54 Massumi geht von den medienpädagogischen Studien der deutschen Kommunikationswissenschaftlerin Hertha Sturm und ihrem Team zur »fehlenden halben Sekunde« aus, womit sie jenes Intervall bezeichnen, das das affektive Erleben vom bewussten Denken abtrennt. Siehe Hertha Sturm und Hans Bonfadelli (Hg.), *Wie Kinder mit dem Fernsehen umgehen: Nutzen und Wirkung eines Mediums* (Stuttgart: Klett-Cotta, 1979), und Herta Sturm und Christine Altstötter-Gleich, *Fernsehdiktate: Die Veränderung von Gedanken und Gefühlen. Ergebnisse und Folgerungen für eine rezipientenorientierte Mediendramaturgie* (Gütersloh: Bertelsmann, 1991). Massumi entfaltet seine Überlegungen zum Affekt im Anschluss an Positionen der kontinentaleuropäischen Philosophie wie sie Spinoza, Bergson, Deleuze und Simondon vertreten. Das Vorgehen Massumis muss für die sich in den 1990er-Jahren im deutschsprachigen Raum formierende Medienwissenschaft nicht zuletzt deswegen anregend gewesen sein, weil er das Ergebnis einer empirischen Studie im Rahmen post-strukturalistischer Denkansätze diskutierte.

55 Karlheinz Barck, Jörg Heiningner und Dieter Kliche, »Ästhetik/ästhetisch«, in *Ästhetische Grundbegriffe*, Studienausgabe, Band 1, Hg. Karlheinz Barck et al. (Stuttgart: J.B. Metzler, 2010), 389.

56 Ebd.

57 Ebd. Barck bezieht sich auf Hermann von Helmholtz, »Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Nervenreizung«, in: *Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin* (21. Januar 1850): 14–15 und Otto-Joachim Grüsser, »Hermann von Helmholtz und die Physiologie des Sehorganges«, in *Hermann von Helmholtz. Vorträge eines Heidelberger Symposiums anlässlich des einhundertsten Todestages*, Hg. W. U. Eckart und K. Volkert (Pfaffenweiler: Centaurus, 1996).

unterscheidung bei Helmholtz muss die Differenz zwischen nichtbewusster Wahrnehmung und bewusster Wahrnehmung gelten.

Massumi, der sich nicht auf Helmholtz bezieht, wertet das Intervall zwischen nichtbewusster und bewusster Wahrnehmung, zwischen Vergangenheit und Zukunft, in dem kein gegenwärtiger Moment wahrgenommen werden könne, um und zwar »als positives Ereignis«, das, wie die österreichische Medien- und Kulturwissenschaftlerin Marie-Luise Angerer in ihrer Nachzeichnung und Neubewertung der Theoriegeschichte des Affektbegriffs hervorhebt, »statt eines Mangels eine Überfülle« eröffne, »in der zuviel passiert«⁵⁸. Angerer geht in ihren Überlegungen zu Affekt und Zeitlichkeit auf das Intervall zwischen nichtbewusster Affizierung und bewusster Wahrnehmung ein. Massumis Adaption der Ideen Spinozas und Bergsons zum Affekt kommentiert sie dabei wie folgt: »In diesen Bestimmungen des Körpers bzw. des Affekts liegt der Fokus auf der Zeit und der Dauer bzw. auf einer momentanen Suspension derselben.«⁵⁹

Die Überfülle, die Angerer hervorhebt, das heißt der Möglichkeitsraum, der sich zwischen nichtbewusstem Berührt-Werden und bewusstem Wahrnehmen auftut, sowie Massumis Verweis auf das Prozessuale des affektiven Erlebens, das die deutsche Philosophin, Film- und Kulturwissenschaftlerin Michaela Ott in ihrer Massumi-Lektüre betont hat⁶⁰, erweisen sich als vielversprechend für ein Verständnis des Verhältnisses der affektiven Unterströmungen naturwissenschaftlicher Bewegtbilder und ihrem erkenntnisleitenden Vermögen. Die affektive Involvierung der Betrachtenden, die die Begegnung mit Visualisierungen lebender Zellen auslöst, verändert sich über die Zeit und wird in etwas Anderes überführt, namentlich in ein Erkennen der innerzellulären Strukturen und Prozesse, das zum Aufbau eines Wissensbestands weiterführt. Die affektive Involvierung fungiert als Einstieg in ein Wissensfeld und befördert anhaltend die kontinuierliche Erweiterung des Wissens. Dabei handelt es sich allerdings nicht um einen linearen Prozess, in dem der naive Affekt dem überlegenen Wissen weicht. Der Affekt ist auch nicht lediglich ein Mittel zum Zweck. Vielmehr bleibt die affektive Involvierung der Forschenden dauerhaft bestehen und verwebt sich im Erkenntnis-

58 Marie-Luise Angerer, *Vom Begehren nach dem Affekt* (Zürich und Berlin: Diaphanes, 2007), 66. Angerer hebt das folgende Zitat hervor: »[P]astnesses opening into a future, but with no present to speak of. For the present is lost with the missing half-second, passing too quickly to be perceived, too quickly, actually, to have happened.« Massumi, »The Autonomy of Affect«, 91.

59 Angerer, *Vom Begehren*, 66.

60 Siehe Ott, *Affizierung*, 17.

prozess mit dem Wissen. Dies lässt sich etwa an den Präsentationsformen und -techniken ablesen, die zur Vermittlung von zellbiologischem Wissen eingesetzt werden.

5.3 Reflexivität der Beobachtung

Für das Verständnis der ästhetischen Erfahrung von Lebendzellfilmen erweist sich die Diskussion des Verhältnisses von psycho-physiologischer und kognitiver Tätigkeit, wie sie in den skizzierten Theoriedebatten geführt wird, insofern als vielversprechend, da hier Überlegungen formuliert werden, die es erlauben, die Tendenz zur Affektunterdrückung und inneren Distanzierung in der naturwissenschaftlichen Praxis noch einmal genauer zu überprüfen. Damit ist die Frage angesprochen, in welches Verhältnis die Beobachtung der Bewegungen, die allzeit, das heißt auch im Moment der Beobachtung, in den Körperzellen der Beobachtenden ablaufen, die Beobachtenden zu ihren Untersuchungsgegenständen setzt und wie sie sie zu sich selbst positioniert. Auf welche Weise initiiert die Beobachtung von sichtbar gemachten zellulären und molekularen Bewegungen, die andauernd im Körperinneren vor sich gehen, eine – instrumentell vermittelte – Selbstbeobachtung? Ein Effekt der Apparatur oder ein Aspekt des »Medien-Werdens« des Mikroskops, um auf das übergreifende Ziel dieses Teilabschnitts zurückzukommen, besteht darin, so wird hier argumentiert, dass dieses in Verbindung mit den Verfahren der computergestützten Bildgebung Prozesse vor Augen führt, die in allen tierischen Zellen – menschliche Zellen eingeschlossen – allzeit ablaufen und, einem Verfremdungseffekt vergleichbar, eine Reflexion über die Auswirkungen des Umstands einleiten, dass auch die Körper der Beobachtenden aus Zellen bestehen, deren Bestandteile permanent in Bewegung, Aktivität und Umgestaltung begriffen sind.

Damit zelluläre und subzelluläre Dynamik plastisch gemacht werden kann, ist die Darstellung von Abläufen mittels *bewegter* Bildsequenzen unerlässlich. Anschaulich gemacht wird die zelluläre Dynamik etwa in videomikroskopischen Aufnahmen, die zeigen, wie sich Zellen teilen, in Lebendzellfilmen, die mithilfe gegenwärtiger Mikroskop-Systeme generiert werden und die erkennbar machen, wie eine Vielzahl von Muskelzellen zusammenarbeiten, um die Pumpbewegung des Herzens aufrechtzuerhalten, oder die anschaulich machen, wie Signale zwischen Nervenzellen

übertragen werden und Aktivierungsmuster auslösen. Greifbar gemacht wird die Dynamik des innerzellulären Bereichs in Lebendzellfilmen, die veranschaulichen, wie Organellen sich ausweiten und wieder zusammenziehen – wie beispielsweise das periphere endoplasmatische Retikulum in dem Fallbeispiel, das im ersten Kapitel diskutiert wurde – oder wie Bestandteile von Organellen wie dem Golgi-Apparat zerfallen und sich erneut zusammensetzen.

5.3.1 Die Dynamik innerzellulärer Ultrastrukturen sichtbar machen

Die Visualisierung der Dynamik der sichtbar gemachten lebenden Zellen stellen Zellbiolog*innen und Mikroskopiker*innen als ein besonderes Vermögen der Fluoreszenzmikroskopie heraus. Beispielsweise nennt die an der Universität Harvard tätige Chemikerin und Physikerin Xiaowei Zhuang in ihrem Videovortrag zur hochauflösenden Mikroskopie die Möglichkeit, die Dynamik in lebenden Zellen zu beobachten, als einen von drei Vorzügen, die die Fluoreszenzmikroskopie gegenüber der Elektronenmikroskopie biete.⁶¹ Die Fluoreszenzmikroskopie erlaubt die sehr präzise Lokalisierung der Moleküle und die Sichtbarmachung von Bewegung, Wandel und Dynamik von Zellen. Mithilfe der Fluoreszenzmikroskopie ist es möglich, verschiedene molekulare Prozesse und genetische Produkte innerhalb der Zelle gleichzeitig und in hoher Auflösung zu sehen und in Kombination mit Lebendzelltechniken in Echtzeit zu untersuchen.⁶²

Der Leiter des Bildgebungszentrums an der Universität Rostock, Dieter G. Weiss, hebt in seiner Darstellung der Veränderung der Sehweisen in der Zellbiologie durch neue Mikroskopieverfahren zwei Zäsuren heraus. Diese Zäsuren bezeichnet Weiss in Anlehnung an den US-amerikanischen Physiker, Wissenschaftsphilosophen und Wissenschaftshistoriker Thomas S. Kuhn (1922–1996) als »Paradigmenwechsel« in der Geschichte der Zellbiologie, das heißt, als eine »völlige[...] Umkehr der Denkweisen«⁶³. Als ein

61 Siehe Xiaowei Zhuang, »Super-Resolution Fluorescence Microscopy«, aufgenommen im Juli 2011 für *iBiology*, Videovortrag, 1:18:17, <https://www.iBiology.org/biophysics/super-resolution/>.

62 Ebd.

63 Dieter G. Weiss, »Das neue Bild der Zelle: Wechsel der Sichtweisen in der Zellbiologie durch neue Mikroskopieverfahren«, in *Visualisierung und Erkenntnis: Bildverstehen und Bildverwenden in Natur- und Geisteswissenschaften*, Hg. Dimitri Liebsch und Nicola Mößner (Köln: Herbert von Halem Verlag, 2012), 324. Kuhn beschreibt die Konsequenzen eines Paradigmawechsels – einer komplexen

erster Paradigmenwechsel habe die Einsicht zu gelten, dass es Zellen gibt, die durch die Entwicklung früherer Mikroskope im siebzehnten Jahrhundert ermöglicht wurde. Einen zweiten Paradigmenwechsel stelle die Erkenntnis der Dynamik zellulärer Ultrastrukturen dar. Ausschlaggebend für die Verschiebung weg von statischen und hin zu dynamischen Verfahren zur Visualisierung der Strukturen der Zellproteine und des Zellskeletts war Weiss zufolge die Entwicklung der Videomikroskopie, einer Technik, die ab dem Jahr 1981 zur Elektronenmikroskopie hinzutrat und die Verfahren der Lichtblattmikroskopie um die zeitliche Dimension erweiterte. Während die Elektronenmikroskopie seit den 1940er-Jahren mittels der Vermessung toter Zellen Erkenntnisse über die Beschaffenheit des Zellskeletts und der Proteine im Inneren der Zelle lieferte, ermöglichte es die Videomikroskopie, die Dynamik dieser Strukturen in lebenden Zellen zu erforschen.⁶⁴

Bemerkenswert ist, dass Weiss die Visualisierung von innerzellulärer *Dynamik* als einen der zwei wichtigsten Entwicklungsschübe in der Geschichte der Zellbiologie heraushebt. Beachtlich ist weiterhin, dass er ein Bewegtbildverfahren – die Videomikroskopie – als den wichtigsten Impulsgeber der Zellforschung in den vergangenen vierhundert Jahren nennt. Wenngleich bereits im neunzehnten Jahrhundert die Bewegungen

Gemengelage aus der Entwicklung neuer Apparaturen, anderer Untersuchungsgegenstände und veränderter Sehweisen – folgendermaßen: »Wenn der Wissenschaftshistoriker die Ergebnisse der früheren Forschung vom Standpunkt der zeitgenössischen Geschichtsschreibung aus untersucht, könnte sich ihm der Gedanke aufdrängen, daß bei einem Paradigmawechsel die Welt sich ebenfalls verändert. Unter der Führung eines neuen Paradigmas verwenden die Wissenschaftler neue Apparate und sehen sich nach neuen Dingen um. Und was noch wichtiger ist, während der Revolutionen sehen die Wissenschaftler neue und andere Dinge, wenn sie mit bekannten Apparaten sich an Stellen umsehen, die sie vorher schon einmal untersucht hatten. Es ist fast, als wäre die Fachgemeinschaft plötzlich auf einen anderen Planeten versetzt worden, wo vertraute Gegenstände in einem neuen Licht erscheinen und auch unbekannte sich hinzugesellen.« Thomas S. Kuhn, *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* [i.O. 1962], zweite revidierte und um das Postskriptum von 1969 erweiterte Auflage, Revision der Übersetzung aus dem Englischen von Hermann Vetter (Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1986), 123.

⁶⁴ Siehe Weiss, »Das neue Bild der Zelle«, 323–324. Um die Bedeutsamkeit der Videomikroskopie für das mikroskopische Sehen hervorzuheben, bezieht sich Weiss auf die Arbeiten des Biophysikers Watt W. Webb und des Zellbiologen David M. Shotton. Webb gilt als Erfinder der Multiphotonen-Fluoreszenzmikroskopie. Siehe W.W. Webb, »Light Microscopy: A Modern Renaissance«, *Annals of the New York Academy of Science* 483 (Dezember 1986), <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1986.tb34547.x>, und D.M. Shotton, »The Current Renaissance in Light Microscopy I: Dynamic Studies of Living Cells by Video Enhanced Contrast Microscopy«, *Proceedings of the Royal Microscopical Society* 22, Nr. 1 (1987). Siehe auch Dieter G. Weiss, »Video Enhanced Contrast Microscopy«, in *Cell Biology: A Laboratory Handbook*, Hg. Julio E. Celis, 3. Auflage (San Diego: Academic Press, 1998).

größerer Zellelemente wie der Chromosomen sowie die Mitose am Mikroskop beobachtet werden konnten und bereits in den 1900er-Jahren die Mikrokinematografie zur Aufzeichnung und Analyse der Bewegung von Körperzellen und von Bakterien eingesetzt wurde, so führte doch, wie Weiss argumentiert, erst die Videomikroskopie in den frühen 1980er-Jahren zu einem grundlegend neuen Verständnis der Zelle: Das Leben im Zellinneren geriet als ein hochgradig dynamisches Zusammenwirken komplexer Abläufe in den Blick.

Ein Standardwerk zur Molekularbiologie der Zelle, *Molecular Biology of the Cell*⁶⁵, untermauert die Ausführungen von Zhuang und Weiss: In dem Handbuch, das Fachwissen zur Visualisierung innerzellulärer Ultrastrukturen und ihrer Dynamik in kanonischer Form zusammenfasst, gliedert sich das neunte Kapitel in die zwei Unterkapitel »Looking at Cells in the Light Microscope« und »Looking at Cells in the Electron Microscope«. Das Handbuch stellt den Blick auf die Dynamik im Zellinneren, wie ihn die Lichtmikroskopie ermöglicht, dem Blick auf die statischen Zellstrukturen gegenüber, die sich in toten Proben mithilfe der Elektronenmikroskopie erkennen lassen.

5.3.2 Entwicklung und Endlichkeit: Photonenanregung und Phototoxizität in Visualisierungen der Embryogenese

Ein Beispiel, das die vitale Dynamik zellulärer Materie besonders bildhaft vor Augen führt, ist die Visualisierung der Entwicklung des Zebrafischembryos mithilfe der computergestützten Lichtblattmikroskopie in Form eines Lebendzellfilms, der die ersten 24 Stunden der embryonalen Entwicklung auf einen Zeitraum von 50 Sekunden verdichtet darstellt.⁶⁶ Dieses Beispiel eignet sich womöglich gerade deswegen ganz besonders gut zur Untermauerung der These, dass die Kombination eines lebendigen Untersuchungsgegenstands mit einem Bewegtbildverfahren die Betrachtung

65 Siehe Bruce Alberts et al., »Visualizing Cells«, in *Molecular Biology of the Cell*, 6. Auflage, 529–564 (New York: Garland Science, 2015).

66 Siehe Philipp J. Keller et al., »Reconstruction of Zebrafish Early Embryonic Development by Scanned Light Sheet Microscopy«, *Science*, neue Reihe, 322, Nr. 5904 (14. November 2008): Movie 2: DSLM Multi-View Time-Lapse Recording of Zebrafish Embryonic Development, <https://doi.org/10.1126/science.1162493>, Daten hinterlegt am EMBL, Digital Embryo Movies, zuletzt geprüft: 17. August 2021, <https://www.embl.de/digitalembryo/fish.html#Movies>.

tenden intellektuell wie affektiv involviert, da der Film einen Prozess des Werdens veranschaulicht, der im zeitlichen Verlauf, dessen Darstellung das Bewegtbild ermöglicht, besonders deutlich hervortritt. Der Film zeigt, wie sich aus einem amorphen Zellhaufen die klar erkennbaren Strukturen eines Kopfes und einer Wirbelsäule herausbilden. Dabei kommt der Bewegung der lebendigen Zellen, die der Film pointiert, eine wesentliche Rolle zu. Zum einen hebt der Film die Bewegung als entscheidendes Prinzip für das Wachstum und die Formbildung hervor. Zum anderen ermöglichen die sichtbar gemachten Bewegungsabläufe den Betrachtenden, sich ein dynamisches Bild vom Entwicklungsprozess des Embryos zu machen – ein geistiges Vorstellungsbild, das von der vor Augen stehenden visuellen Darstellung eines emergenten Prozesses hervorgerufen wird. Die anschauliche Bewegung der Zellen leitet einen Reflexionsprozess über die Lebenskraft als Vermögen zur Entwicklung und Ausdifferenzierung des Lebendigen ein und wirft Fragen zu dem Herstellungsprozess der Bilder auf, die diesen andernfalls im Verborgenen ablaufenden Entwicklungsvorgang in die Sichtbarkeit überführen.

Schaut man sich die fachliche Diskussion genauer an, die den Herstellungsprozess der Lebezellfilme reflektiert, die die embryonale Entwicklung sichtbar machen, so wird deutlich, dass dort die aktivierenden und passivierenden Potenziale des Affekts über Reflexionen zur Methode der Photonenanregung und zum Problem der Phototoxizität thematisiert werden. Damit die Zellen Licht abgeben können, werden sie mit fluoreszierenden Proteinen markiert, die im Verlauf des Experiments durch den Beschuss der Probe mit hohen Lichtquanten auf ein höheres Energieniveau angehoben werden. Dieses Verfahren wird als Photonenanregung bezeichnet. Ein Nebeneffekt des Beschusses der Probe ist die Schädigung des bestrahlten Gewebes, in diesem Fall des Embryos. Diese Gewebeschädigung wird unter dem Begriff der Phototoxizität verhandelt. Für die hier entwickelten Überlegungen zur Aktivierung und Passivierung von Körpern ist die Phototoxizität als ein Effekt der Photonenanregung insofern relevant, weil eine Steigerung des Energieniveaus der Photonen und die dadurch ermöglichte Aktivierung der Betrachtenden zugleich auf lange Sicht eine Passivierung des Untersuchungsgegenstands bewirkt und zu einer Verminderung seiner Lebenskraft führt. Das ermöglichende und aktivierende Potenzial auf Seiten der Instrumente und der Beobachtenden kann nur um den Preis einer Deaktivierung des Untersuchungsgegenstandes voll ausgeschöpft werden.

Das Fallbeispiel gehört dem Forschungskontext zur Embryonalentwicklung an, wie sie am European Molecular Biology Laboratory (EMBL) in Heidelberg und am Janelia Research Campus im US-Bundesstaat Virginia betrieben wird. Der Forschungskontext wurde im zweiten Kapitel bereits eingehend beschrieben. Hier sei lediglich daran erinnert, dass die dortigen Teams die embryonale Entwicklung von durchscheinenden Modellorganismen wie dem Zebrafisch, *Danio rerio*, dem transgenen japanischen Reisfisch, *Medaka*, und der schwarzäugigen Taufliege, *Drosophila melanogaster* beobachten. Lebendzellfilme, die das Team am EMBL im Jahr 2004 als Belegmaterial zu einem Fachartikel veröffentlichte, machen die sich als Bewegung manifestierenden Vitalfunktionen des Fisches und den Prozess der embryonalen Entwicklung der Fliege sichtbar. Das heißt, die Filme zeigen das schlagende Herz des *Medaka* in Echtzeit und die ersten 16 Stunden im Leben eines Embryos der Taufliege in hoher zeitlicher Verdichtung.⁶⁷

In den folgenden vier Jahren entwickelte das Forschungsteam um den physikalischen Biologen und Fluoreszenzmikroskopiker Ernst Stelzer die Auflösung und Geschwindigkeit seines Instrumentariums kontinuierlich weiter und publizierte im Jahr 2008 in der Fachzeitschrift *Science* einen Artikel, der die Entwicklungsprozesse des Zebrafischembryos diskutiert. Die Visualisierungsformen, die im Artikel diskutiert werden, und einer der Filme, der der Online-Fassung des Artikels beigegeben ist, wurden im zweiten Kapitel bereits analysiert (siehe 2.3.1 und 2.3.2). Hier soll das Augenmerk auf einen weiteren Film gelenkt werden, der zeigt, wie sich aus einem amorphen Zellhaufen innerhalb von 24 Stunden die klar erkennbare Gestalt eines Wirbeltieres herausbildet. Von besonderer Relevanz für die hier entwickelte Argumentation ist dabei das Verfahren der Photonenanregung, das diesen Prozess sichtbar macht, zugleich aber die empfindliche lebendige Probe schädigen kann, sowie der Diskurs zur Fragilität, den die Biophysik mit Bezug auf ihre Untersuchungsgegenstände führt.

Der Film veranschaulicht die Teilung und Bewegung von Zellen in der Blastula und die Formbildung der Wirbelsäulen- und Kopfstruktur eines Zebrafischembryos.⁶⁸ In zwei nebeneinander angeordneten runden Bildern,

67 Siehe Jan Huisken et al., »Optical Sectioning Deep inside Live Embryos by Selective Plane Illumination Microscopy«, *Science*, neue Reihe, 305, Nr. 5686 (13. August 2004): Movie S4, 1100035s4.mov und Movie S5, 1100035s5.mov (nur Online), zuletzt geprüft: 31. August 2021, <https://doi.org/10.1126/science.1100035>. »Movie S4« zeigt das schlagende Herz des *Medaka* neben dem Muster eines EKG. »Movie S5« visualisiert die Embryogenese der *Drosophila*.

68 Siehe Keller et al., »Zebrafish Early Embryonic Development«: Movie 2.

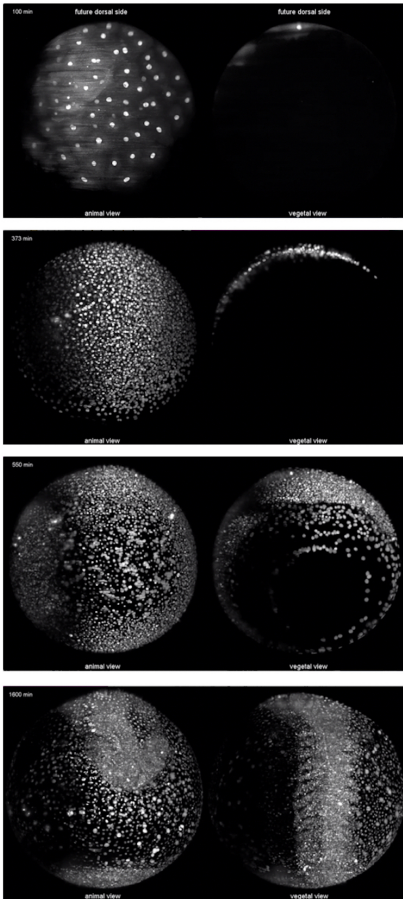


Abb. 5.1: Screenshots aus einem Lebendzellfilm, die verschiedene Stadien der ersten 24 Stunden der embryonalen Entwicklung des Zebrafisches zeigen

Quelle: Philipp J. Keller et al., »Reconstruction of Zebrafish Early Embryonic Development by Scanned Light Sheet Microscopy«, *Science, neue Reihe*, 322, Nr. 5904 (14. November 2008): Movie 2: DSLM Multi-View Time-Lapse Recording of Zebrafish Embryonic Development, <https://doi.org/10.1126/science.1162493>, Daten hinterlegt am EMBL, Digital Embryo Movies, zuletzt geprüft: 17. August 2021, <https://www.embl.de/digitalembryo/fish.html#Movies>.

die aus einander gegenüberliegenden Perspektiven aufgenommen wurden, präsentiert der Film zwei Ansichten einer Kugelstruktur (siehe die Bildfolge in Abb. 5.1). Auf den Bildern sind Zellen zu sehen, die sich vermehren. Die Zellkerne sind als leuchtende helle Punkte vor einem schwarzen Hintergrund dargestellt. Generiert wurden die Bilder vermittels von Detektoren, die sich an den beiden Enden der gedachten Achse befanden, die durch den Embryo verläuft. Diese Achse wird als Animal-Vegetative Eipolarität bezeichnet. Das linke der beiden Bewegtbilder ist daher mit der Bezeichnung »animal view« gekennzeichnet, und stellt die Ansicht desjenigen Pols dar, an dem sich die Zellen sehr schnell teilen. Das rechte Bild wird als »vegetal view« etikettiert und zeigt die Ansicht des gegenüberliegenden Pols, der dem Dottersack am nächsten liegt und den die sich teilenden Zellen erst etwa in der 350sten Minute der Aufnahmezeit zu umspannen beginnen. Die Vermehrung der Zellen beginnt am animalen Pol. Sukzessive breiten sich die Zellen auch über den vegetalen Pol aus. Etwa ab der 800sten Minute beginnt die Struktur eines Fischkopfes am animalen Pol und die Struktur einer Wirbelsäule am vegetalen Pol hervorzutreten, zunächst als diffuse Form, die sich im weiteren Verlauf immer deutlicher abzeichnet.

Damit der Entwicklungsprozess beobachtet werden konnte, wurde ein Verfahren angewendet, das als Photonenanregung (*photon excitation*) bezeichnet wird, das bedeutet die – kurzzeitige – Steigerung des Energieniveaus ausgewählter Photonen.⁶⁹ Dazu wurden ausgewählte Bestandteile der lebenden embryonalen Zellen mit dem fluoreszierenden Protein GFP markiert. Die Photonen in den fluoreszierenden Proteinen wurden »angeregt« und gaben im Verlauf des Experiments die zugeführte Energie in Form von Licht wieder ab. Das Licht durchlief mehrere Umwandlungsschritte und erzeugte zuletzt die hellen Strukturen im Lebendzellularfilm.

Als Kehrseite der Photonenanregung gilt die Belastung und Schädigung der Proben durch hohe Lichtquanten. Die Phototoxizität heben Mikroskopiker*innen immer wieder als ein zentrales Problem der laserinduzierten Photonenanregung in der konfokalen Fluoreszenzmikroskopie heraus.⁷⁰

69 Zu den Einzelheiten des Verfahrens der Photonenanregung mithilfe von Lasern, das zu einer Steigerung des Energieniveaus führt und die Voraussetzung für die Photonendetektierung bildet, siehe Kurt Thorn, »Two-Photon Microscopy«, aufgenommen im April 2012 für *iBiology*, Videovortrag, 31:14, <https://www.ibiology.org/talks/two-photon-microscopy/>.

70 Siehe etwa Monya Baker, »Cellular Imaging: Taking a Long, Hard Look«, *Nature* 466, Nr. 7310 (26. August 2010): 1139; J.M. Murray, »Confocal Microscopy, Deconvolution, and Structured Illumination Methods«, in *Live Cell Imaging: A Laboratory Manual*, Hg. Robert D. Goldman (Cold Spring Har-

Demgegenüber betonen sie häufig die geringfügigere Belastung der Probe als einen der entscheidenden Vorzüge der Lichtblattfluoreszenzmikroskopie, die es ermögele, lebende Zellen und sogar ganze Organismen unter dem Mikroskop zu beobachten ohne diese nachhaltig zu schädigen, da hier distinkte, klar definierte Schärfeebenen mit Laserlicht angeregt werden und nicht, wie im Falle der konfokalen Mikroskopie, auch die kegelförmigen Bereiche oberhalb und unterhalb der Schärfebene.⁷¹ Innerhalb der Fachgemeinschaft der Mikroskopiker*innen findet ein reflexiver Diskurs über die Schädigung der Proben durch die temporäre Anhebung des Energieniveaus der Probe im Experiment statt. Der Fachbegriff lautet »fluorescence lifetime imaging microscopy« oder Fluoreszenzlebensdauer-Mikroskopie, eine Bezeichnung, die eine physikalische Eigenschaft eines Fluorophors wie GFP, namentlich dessen Leuchtkapazität, hervorhebt. Dabei wirkt die Beeinträchtigung der Leuchtkapazität der fluoreszierenden Proteine, etwa durch zu hohe Mengen von Laserlicht, zurück auf die Lebensdauer der Zellen.

Das Problem der Phototoxizität macht auf die Empfindlichkeit der Proben aufmerksam und verweist auf die Endlichkeit aller lebendigen Materie, welche auch die Rezipierenden einschließt. Das Problem stellt sich ganz besonders bei der Langzeitbeobachtung von lebenden Zellen, deren Ergebnisse in Form von Lebendzellfilmen festgehalten werden, einem Bewegtbildverfahren, dem eine zeitliche Dimension eingeschrieben ist und das damit notwendig die Erkundung der Bedingtheit und Endlichkeit allen Lebens, auch und gerade des menschlichen, den Betrachtenden über die ästhetische Erfahrung vor Augen führt.

bor: Cold Spring Laboratory Press, 2010); Zhuang, »Super-Resolution Fluorescence Microscopy«; Ernst H.K. Stelzer, »Light-Sheet Fluorescence Microscopy for Quantitative Biology«, *Nature Methods* 12, Nr. 1 (30. Dezember 2014), <https://doi.org/10.1038/nmeth.3219>.

71 Anders als bei der konfokalen Mikroskopie, die einzelne Punkte der Probe scannt und dasselbe Objektiv für die Beleuchtung und für die Detektierung von Fluoreszenz verwendet, werden in der selektiven Lichtblattmikroskopie einzelne Schichten der Probe nacheinander von der Seite aus beleuchtet. Der Detektor, der das abgestrahlte Licht auffängt, befindet sich in einem rechten Winkel zu dieser Schicht. So beschreibt es Philipp Keller in einem Interview mit dem *HHMI Bulletin*, der Fachpublikation des Howard Hughes Medical Institutes. Siehe Christine Suh, »Movie Magic«, *HHMI Bulletin* (November 2010): 32. Die Entkoppelung von Beleuchtung und Detektierung reduziere die Strahlenbelastung der Probe erheblich, wie die Autoren des *Science*-Artikels zum optischen Schneiden herausstellen. Siehe Huisken et al., »Optical Sectioning«. Für eine genaue Beschreibung des Verfahrens siehe Philipp J. Keller, »In vivo Imaging of Zebrafish Embryogenesis«, *Methods* 62, Nr. 3 (2013): 268–278, <https://doi.org/10.1016/j.jymeth.2013.03.015>.

5.3.3 Einfühlung und affektive Involvierung als reflexive Rückbezüge auf die eigene Lebendigkeit

Damit ist die Frage angesprochen, wie sich Rezipierende in die Bewegtbilder des lebendigen Grundstoffs von Menschen, Tieren und Pflanzen einfühlen, die der Lebendzellularfilm als sichtbare Formen, Farben und Bewegungen zur Anschauung bringt. Diese Frage soll im Folgenden anhand der Rezeption der Bilder jener molekularer Dynamiken diskutiert werden, die in jeder Körperzelle in einem lebendigen Körper allgegenwärtig ablaufen. Anschließend an die im ersten Kapitel beschriebene Forschung des Teams um Jennifer Lippincott-Schwartz am Howard Hughes Medical Institute sei hier ein weiteres Beispiel aus der Forschung zum Zellstoffwechsel angeführt, an der Lippincott-Schwartz beteiligt ist.

Das Beispiel bringt uns von der organismischen Ebene, auf der wir uns mit dem Embryo-Beispiel bewegt haben, auf die innerzelluläre Ebene: Gegenstand der Untersuchung und der Darstellung ist im folgenden Beispiel nicht länger die Dynamik einer Vielzahl von embryonalen Stammzellen, die sich im Verlauf des Experiments funktional ausdifferenzieren, sondern die Dynamik des Transports von Proteinen im Zellinneren. Ging es gerade noch um die Dynamik der Materie im multizellulären und organismischen Bereich, so wird gleich deutlich werden, wie sich die Lebendigkeit der Materie im molekularen Bereich als Bewegung manifestiert. Während die Embryonalentwicklung einen Prozess darstellt, der ontogenetisch in der Vergangenheit der Beobachtenden ablief, machen die Lebendzellularfilme, die innerzelluläre Dynamik visualisieren, Abläufe plastisch, die sich im Hier und Jetzt ereignen. Die Tilgung des Zeitdifferenzials – das, was wir sehen, geschieht in diesem Moment in jeder Zelle unserer Körper – pointiert die Reflexivität der Bezugnahme auf die Bilder.

Bevor die Effekte der Vergrößerung und der Bildbeschleunigung angesprochen und die Formen der affektiven Beteiligung an der Bewegung und der Lebendigkeit der dargestellten Organellen und Moleküle herausgehoben werden, sollen die Ziele der Forschung kurz skizziert werden, in deren Rahmen die zu diskutierenden Filme entstanden sind. In einer Reihe von Experimenten untersuchte ein ortsverteiltes US-amerikanisches Forschungsteam die Biosynthese, Proteinfaltung und Qualitätskontrolle von Prokollagen – einer Vorstufe des Proteins Kollagen, das die Knochen und das Binde-

gewebe stabilisiert – in den knochenbildenden Zellen der Maus.⁷² Fokus der Forschung waren die Stoffwechselfprozesse, die zwischen dem endoplasmatischen Retikulum und dem Golgi-Apparat ablaufen. Transportproteine befördern Prokollagen entlang der Mikrotubuli – der röhrenförmigen Bestandteile des Zellskeletts – in einer Richtung vom endoplasmatischen Retikulum zum Golgi-Apparat. Die Bewegungen der mit fluoreszierenden Markern gekennzeichneten Transportproteine werden in fünfzehn sehr kurzen Lebendzellfilmen mit einer Laufzeit von fünf bis 20 Sekunden sichtbar gemacht, die dem Fachartikel beigegeben wurden, welcher die Forschungsergebnisse präsentiert. Die folgende Abbildung 5.2 zeigt exemplarisch ein Detail aus einem dieser Filme.⁷³

Die Filme machen die Dynamik innerzellulären Lebens plastisch. Selbst wenn die am Fluoreszenzmikroskop aufgenommenen Bilder in den resultierenden Filmen um ein Vielfaches beschleunigt wurden und die visualisierten Prozesse in Echtzeit in einigen Fällen drei Mal, in anderen Fällen sogar 75 Mal langsamer ablaufen, so vermitteln die Filme doch einen guten Eindruck von der unablässigen Bewegungsdynamik im Inneren der Zelle, die sich, wie die Filme ebenfalls deutlich machen, vor dem Hintergrund unbeweglicher Zellbestandteile entfaltet. Hinzu kommt, dass mit zunehmender Vergrößerung auch diese Dynamik zunimmt. So wirken die Molekülbewegungen in dem Bildausschnitt, der aus der Aufnahme herausgegriffen und in abermaliger Vergrößerung oben rechts in die Abbildung eingefügt wurde, greifbarer, vielfältiger und schneller als die Molekülbewegungen in der Aufnahme der gesamten Zelle.

Vor Augen halten müssen wir uns darüber hinaus, dass hier lediglich die Bewegungen eines einzigen Proteintypus sichtbar gemacht wurden und zahllose weitere Proteintypen, die ebenfalls ständig in Bewegung sind, in der Visualisierung unsichtbar bleiben. Doch bereits an den Proteinen *eines* Typs lässt sich erkennen, dass allein zwischen dem endoplasmatischen Retikulum und dem Golgi-Apparat ein anhaltender und äußerst reger Aus-

72 Die Forschungsergebnisse wurden veröffentlicht in Shakib Omari et al., »Mechanisms of Procollagen and HSP47 Sorting during ER-to-Golgi Trafficking«, *Matrix Biology* 93 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.matbio.2020.06.002>.

73 Der Screenshot vermittelt lediglich einen ersten Eindruck. Erst die Filme machen die innerzelluläre Dynamik plastisch. Die Lebendzellfilme können unter dem folgenden Link abgerufen werden: Omari et al., »Mechanisms of Procollagen and HSP47 Sorting«, <https://doi.org/10.1016/j.matbio.2020.06.002>. Die Aspekte, die in der hier entwickelten Argumentation herausgehoben werden, sind in dem ersten, fünften und elften Film ganz besonders deutlich erkennbar.

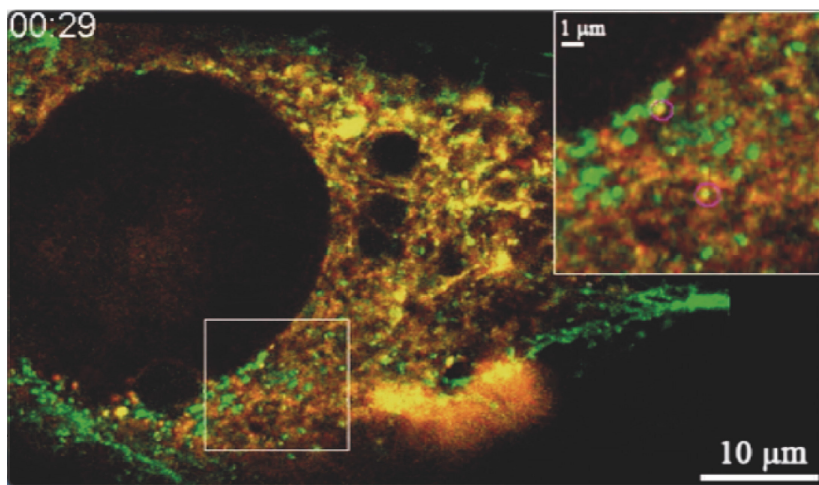


Abb. 5.2: Screenshot von einer der drei Ansichten, die die Bewegung von Prokollagen-Proteinen zwischen dem Golgi-Apparat und dem endoplasmatischen Retikulum sichtbar machen

Quelle: Shakib Omari et al., »Mechanisms of Procollagen and HSP47 Sorting during ER-to-Golgi Trafficking«, *Matrix Biology* 93 (2020): Video 5 (nur Online), <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0945053X20300676-mmc5.mp4>.

tausch von lebendiger Mikromaterie stattfindet. Lediglich erahnen lassen die Filme, wie viele Bewegungen im Inneren einer Zelle tatsächlich zeitgleich ablaufen.

Bereits bei Lipps findet sich ein ausgeprägter Sinn für die Dynamik des Lebens. Er beschreibt den aktiven, intentionalen Akt der Einfühlung folgendermaßen:

»Denn was ich einfühle, ist ganz allgemein Leben. Und Leben ist Kraft, inneres Arbeiten, Streben und Vollbringen. Leben ist mit einem Worte: Thätigkeit; frei dahinfließende oder gehemmte; leichte oder bemühte; in sich einstimmige oder in sich gegensätzliche; sich spannende und sich lösende; in einem Punkt konzentrierte oder in mannichfachen Lebensbethätigungen auseinandergehende und in ihnen ›sich verlierende.«⁷⁴

Lipps meint hier mit »Leben« das menschliche Handeln, das die innere wie äußere Bewegung und das Erleben des eigenen Körpers umfasst. Robin Curtis hat in dem oben bereits erwähnten Überblickstext zum Einfühlungsbegriff das Zitat von Lipps folgendermaßen kommentiert: »Mit diesen Beschreibungen [...] verweist Lipps auf eine Lebenskraft, die überall in der

⁷⁴ Lipps, »Einfühlung und ästhetischer Genuß«, 229.

Welt erkannt werden kann, die aber keinesfalls zwangsläufig oder automatisch zu einer Einfühlung führt.«⁷⁵ Anders als der Affekt, der präreflexiv arbeitet und unterhalb der Wahrnehmungsschwelle wirkt, aber nichtsdestotrotz die Wahrnehmung und das Denken beeinflusst, ist die Einfühlung »ein aktiver, intentionaler Akt, ein Erlebnis der Vitalität des Selbst, die in den Dingen der Welt in objektivierter Form zu fühlen ist«⁷⁶. Ähnlich wie positive Affekte das Vermögen des Körpers steigern, führt allerdings auch die Einfühlung, wie Curtis in ihrer Lipps-Lektüre deutlich macht, zu einer »Verlebendigung«⁷⁷, die aus der Teilhabe an jener Kraft resultiert, die vom eingefühlten Objekt ausgeht. Lipps hatte nicht »das Leben selbst«, wie es die Zellbiologie erforscht, im Sinn. Und doch erhalten seine Worte eine überraschende neue Bedeutung, wenn wir sie mit Bezug auf die soeben beschriebenen Lebendzellfilme lesen. Was die Filme greifbar machen ist die Lebenskraft selbst, die in mikroskopischer Dimension dahinströmt und pulsiert.

Mit Rückbezug auf Lipps' Einfühlungsbegriff, Spinozas Affektbegriff und Drieschs vitalistische Philosophie sowie die Rezeption dieser drei Positionen in der gegenwärtigen geistes- und sozialwissenschaftlichen Auseinandersetzung mit Fragen nach der Vitalität der Materie wurde in diesem Kapitel bislang aufgewiesen, wie der Blick auf belebte Materie als bewegte Materie in computergenerierten Lebendzellfilmen – sei es auf die Formierung eines Zebrafischembryos oder die Proteinbewegungen entlang von Mikrotubuli – nicht allein Erkenntnisprozesse in Gang setzt, sondern die Grundfunktionen des Lebens selbst ästhetisch erfahrbar macht.

5.3.4 Beobachtung als Selbstbeobachtung

Die Beobachtung der Bewegungen im Inneren lebendiger Zellen wirft die Frage nach der Rückbezüglichkeit der Beobachtung am Fluoreszenzmikroskop auf. Das Verhältnis zwischen dem beobachtenden Subjekt und dem beobachteten Objekt thematisiert Joseph Vogl in seiner zweiten medienästhetischen These, in der er »die Herstellung einer grundlegenden

75 Curtis, »Einführung in die Einfühlung«, 16–17.

76 Ebd., 17.

77 Ebd.

Selbstreferenz⁷⁸ als Bedingung für das Medien-Werden eines Instruments bestimmt. Bezüglich des Subjekt-Objekt-Verhältnisses konstatiert Vogl die »Konditionalisierung des Beobachtens selbst«, die er in dem von ihm gewählten Beispiel der Himmelsbeobachtung als »Fernrohr-Effekt«⁷⁹ bezeichnet. Das heißt, das beobachtende Subjekt muss die Relativität seines Standortes und die damit verbundene Relation zu seinen Untersuchungsgegenständen – dem Mond, den Sternen und Planeten im Falle Galileis, den Vogl diskutiert – mitbedenken, oder in Vogls Worten: »Der Blick durch das Fernrohr lokalisiert mit seinem Objekt zugleich den Beobachter [...]«⁸⁰ Die grundlegende Selbstreferenz, so führt er aus, werde über eine Schauanordnung etabliert, in der sich die Beobachtung als Selbstbeobachtung vollziehe:

»Der neue Himmel ist nicht nur eine Konstellation, d.h. ein Gefüge von Planeten und Sternen, die sich im neuen Universum (bzw. Pluriversum) verteilen, sondern vor allem auch eine Konstellation von Blicken, ein System aus einander überkreuzenden Beobachtungen [...]. Und das heißt: Wer mit Galilei durchs Fernrohr in den Himmel blickt, sieht zugleich auf sich selbst zurück; Sehen ist Sich-Selbst-Sehen, Beobachtung ist Selbstbeobachtung, Verorten ist Sich-Selbst-Verorten. Dieses Fernrohr – und das wäre ein weiterer Aspekt seines Medien-Werdens – vollzieht eine Welterzeugung durch die Einrichtung einer konstitutiven Selbstreferenz.«⁸¹

Aus den Überlegungen Vogls zum rückbezüglichen Verhältnis zwischen Subjekt und Objekt der Beobachtung ergibt sich für die Mikroskopie die Frage, welche Art von Welt- und Selbstverhältnis das Mikroskop und, in Verlängerung dessen, das Daten-Sehen erzeugt. Begünstigt die Konstellation der mikroskopischen Beobachtung eine Perspektive des Losgelöst-Seins vom Untersuchungsgegenstand, eine Sicht, die von außen auf ein Objekt blickt und eine klare Trennung zwischen untersuchendem Subjekt und untersuchtem Objekt herbeiführt; oder ermöglicht die mikroskopische Beobachtung vielmehr eine besondere Form der Einfühlung?

Bereits die frühe Mikroskopie konfrontierte ihre Praktiker mit der Frage nach dem Verhältnis zwischen beobachtendem Subjekt und beobachtetem Objekt. Der niederländische Mikroskopiker Antoni van Leeuwenhoek etwa,

78 Vogl, »Medien-Werden«, 116.

79 Ebd., 117. Den Fernrohr-Effekt leitet Vogl aus dem Aufbau des *Sidereus Nuncius* ab. Er substantiiert seine Interpretation durch ein *close reading* der Formulierungen Galileis, die dieser für seine Mondbeobachtung und für die Deutung seiner Beobachtung wählt.

80 Ebd., 116.

81 Ebd., 117–118.

der als ein Vorreiter der praktischen Mikroskopie gilt, versuchte den Selbstbezug herzustellen, indem er sich zum Untersuchungsobjekt machte. Leeuwenhoek untersuchte Abstriche aus seiner Mundhöhle unter dem Mikroskop und erkannte, dass Mikroorganismen in seinem Zahnbelag existierten, die er als »Thierchen« (*Dierchen*) bezeichnete. In einem Brief vom 12. September 1683 an die Royal Society beschreibt Leeuwenhoek die Veränderung des Erlebens seines eigenen Körpers durch den Anblick der Kleinstlebewesen in seinem Zahnbelag, indem er zunächst eine Alltagsbeobachtung, das Zähneputzen, beschreibt und diese sogleich mit einer wissenschaftlichen Beobachtung kontrastiert:

»Meine Gewohnheit ist, des Morgens die Zähne mit Salz abzureiben, dann den Mund mit Wasser auszuspülen und wenn ich gegessen habe, die Backzähne [sic] wiederholt mit dem Zahnstocher zu reinigen, sowie mit einem Tuch stark abzureiben, wodurch meine Back- und anderen Zähne so sauber und weiss bleiben, wie sie nur wenige Leute von meinen Jahren besitzen [...]. Trotzdem sind meine Zähne nicht so rein, dass nicht (wenn ich dieselben mit dem Mikroskop untersuchte) dennoch zwischen einigen der Back- und Vorderzähne ein wenig weisse Materie von der Dicke eines Mehlanfluges sitzen bleibt oder wächst. Obschon ich bei der Untersuchung derselben Eigenbewegung darin nicht erkennen konnte, glaubte ich doch, dass lebende Thierchen darinnen wären.«⁸²

Dieses Zitat verdeutlicht, dass Leeuwenhoek durch den Blick auf Bestandteile seines Körpers im Mikroskop sich selbst neu und anders wahrnahm. Die vertraute Mundhöhle, die im Alltag als Gegenstand der täglichen Hygiene seine Aufmerksamkeit beanspruchte, wurde durch den Blick ins Mikroskop zu einer fremden Umwelt, in der sich Kleinstlebewesen tummeln. Ähnlich wie in der frühen Mikroskopie, die, wie etwa bei Leeuwenhoek, einen reflexiven Rückbezug auf den Beobachter etablierte und sein Selbstverständnis als eines von anderen Lebewesen klar abgegrenzten Subjekts in Frage stellte, wird das Mikroskop in der Lebendzellmikroskopie erneut zu einem Medium der Selbstbeobachtung und zwar über die affektive Involvierung der Beobachtenden in die zellulären und molekularen Bewegungen.

Vergleichbar mit Galilei, der sich bei seinen fernrohrgestützten Himmelsbeobachtungen seines eigenen Standpunkts auf der Erde reflexiv bewusst wurde, positioniert die Schauanordnung der Lebendzellmikroskopie die Beobachtenden in Relation zu ihren Untersuchungsgegenständen strukturell neu, und zwar gedanklich wie medial. Die Lebendzellmikro-

⁸² Zitiert nach Julius Richard Petri, *Das Mikroskop: Von seinen Anfängen bis zur jetzigen Vervollkommnung für alle Freunde dieses Instruments* (Berlin: Schoetz, 1896), 31.

skopie verweist nicht nur reflexiv auf die Lebendigkeit der Beobachtenden zurück, sondern problematisiert zudem über die affektive Involvierung deren Position innerhalb der medialen Anordnung und wirft, indem sie die Endlichkeit des eigenen und anderen Lebens bewusst macht, die ethische Frage nach dem Verhältnis zu *allem* Lebenden auf. Diese Fragen ergeben sich aus dem Tatbestand, dass die Beobachtenden konstitutiver Teil der Versuchsanordnung *selbst* sind. Sie können sich nicht herausnehmen und eine Außenposition beziehen. Vielmehr sind sie Beobachtende und Beobachtetes zugleich. Die mediale Anordnung unterläuft somit Konzeptionen, die das Subjekt und Objekt der Beobachtung in einem binären oder bipolaren Verhältnis fixieren wollen und bringt ein doppeltes, beobachtendes und beobachtetes Selbst hervor, das zur selben Anordnung gehört und seinen jeweils anderen Aspekt ein- und umschließt. Darin besteht ein konstitutives Merkmal des Mikroskops als eines Mediums, das eine Welt erzeugt, deren Beobachtung das Selbst der Beobachtenden mit umgreift.

Schlussbemerkungen

Wissenschaftliche Bilder, so hat dieses Buch gezeigt, befördern nicht allein die Erkenntnisgewinnung, sondern eignen darüber hinaus einen affektiven Surplus und ästhetischen Gehalt. Nur wenn die beiden letztgenannten Dimensionen anerkannt und mitberücksichtigt werden, kann vermieden werden, dass sie als subjektive Einfärbung eines objektiven Wissens eingeschätzt werden. Erst die Beschreibung, Analyse und Interpretation der Wahrnehmung von Bewegtbildern des Mikrokosmos im Modus des Ästhetischen ermöglicht die umfassende Würdigung der Erkenntnisleistung, die diese Bilder unterstützen, und leitet eine weiterführende Reflexion über die Position der Beobachtenden in der medialen Gesamtanordnung ein.

Wie meine Ausführungen verdeutlicht haben, reicht es nicht aus, allein die technischen Verfahrensweisen, vermöge derer naturwissenschaftliche Bilder hergestellt werden, zu untersuchen und die Formen des Weltbezugs zu erforschen. Vielmehr gilt es darüber hinaus die Wechselwirkungen der Medientechniken und der spezifischen Ästhetik von deren anschaulichen Resultaten zu beleuchten. Wenngleich sich ein grundlegendes Verständnis der technischen Verfahrensweisen als unumgänglich erweist und aus einem solchen Verständnis Einsichten gewonnen werden können, die den medienwissenschaftlichen Theoriediskurs bereichern, so entfaltet die Kenntnis der Techniken erst dann vollumfänglich ihr Potenzial, wenn sie in Wechselwirkung mit ästhetischen Dimensionen untersucht werden, die, wie meine Argumentation gezeigt hat, sich nicht in der Analyse der Bildgestaltung erschöpfen, sondern ihre gesamte Tragweite nur erkennen lassen, wenn epistemische und affektive Register mitberücksichtigt und in ihrer Bezogenheit aufeinander erörtert werden.

Ich habe demonstriert, welche Ergebnisse sich mithilfe einer Methodenkombination erzielen lassen, die Einblicke, die in einer Laborstudie

gewonnen wurden, in die Bewegtbildanalyse einbringt und die Resultate im Lichte medientheoretischer und medienästhetischer Diskurse reflektiert. Über eine von der Wissenschaftsanthropologie inspirierte Hospitation in einem naturwissenschaftlichen Bildungs- und Forschungszentrum konnte ich mir ein grundlegendes Verständnis gegenwärtiger Visualisierungstechniken erschließen und auf diese Weise zu einer Einschätzung des fachimmanenten Bedeutungsgeflechts multimedialer Darstellungsformen in der heutigen Zellbiologie gelangen. Diese praxeologische Komponente meines Vorgehens ermöglichte mir die komparative Analyse unterschiedlicher Methodiken geistes-, sozial- und naturwissenschaftlichen Forschens und ermöglichte einen weiterführenden Reflexionsprozess über das medienkulturwissenschaftliche Methodenspektrum.

Selbst durch die Erfahrungen dieser Arbeit positiv bestärkt, hoffe ich auf die Zukunftsfähigkeit des hier entwickelten, spartenübergreifenden Forschungsansatzes. Im Idealfall können Elemente dieses Ansatzes vorbildhaft sein für die Möglichkeiten medienkulturwissenschaftlicher Beschreibung, Analyse und Interpretation der bildgebenden Verfahren der Naturwissenschaften. Wünschenswert wäre die zukünftige Anwendung, Überprüfung und Erweiterung der in dem vorliegenden Buch entwickelten Methode auf andere bildgebende Verfahren, wie sie etwa in der Medizin, den Neurowissenschaften und in Astrophysik, Teilchenphysik und Klimaforschung zum Einsatz kommen. Vielversprechend erscheint zudem, den Ansatz auszuweiten und die Bildkulturen und Datenpraktiken der Zellbiologie noch eingehender zu erforschen, indem weitere Bildgebungstechniken wie beispielsweise die Computersimulation im Bereich der molekularen Modellierung einbezogen werden.

Die Verflechtung von epistemischen und ästhetischen Dimensionen, wie sie hier anhand von Forschungsfilmen herausgearbeitet wurde, könnte sicherlich gewinnbringend weitergeführt werden und zwar über die Untersuchung der Frage, wie naturwissenschaftliches Fachwissen in populäre Genres wie den populärwissenschaftlichen Dokumentarfilm, das Erklärvideo und den Science-Fiction-Film diffundiert. Als ein weiteres Untersuchungsfeld, in das die hier entwickelten Überlegungen eingebracht werden könnten, wäre die Forschung zur Medienkunst zu nennen, ein Gebiet, das mit Techniken der Bildherstellung und Modalitäten der Bildwahrnehmung experimentiert, naturwissenschaftliches Wissen reflektiert und in einen breiteren kulturellen Bezugsrahmen stellt.

Die kunsthistorische Forschung zu den Bildwelten der Naturwissenschaften mögen die angestellten Überlegungen zum Datenbild als einer Spielart des erkenntnisleitenden Bewegtbildes und seiner Rezeption sowie die aufgewiesenen Bezüge zwischen den vergangenen und gegenwärtigen Bildkulturen der Mikroskopie, den historischen und aktuellen Modalitäten des mikroskopischen Sehens und den damit verbundenen Affektdiskursen anregen. Für die Wissenschaftsgeschichte mag die Überprüfung der von Lorraine Daston und Peter Galison entwickelten Überlegungen zum Wandel des Objektivitätsideals anhand der diskutierten Einzelfälle von Interesse sein sowie die Ausweitung der existierenden Forschung zur Geschichte der Zellbiologie in die Gegenwart. Den Science and Technology Studies gibt die hier diskutierte Forschung hoffentlich dahingehend Impulse, wie multimediale Forschungsgegenstände mitberücksichtigt werden können und wie ihr eigener Diskurs an den medientechnischen und medienästhetischen Theoriediskurs angebunden werden kann. Für die Zellbiologie und die angrenzenden Disziplinen wird der Zugewinn meiner Forschung hoffentlich darin bestehen, eine ungewohnte und bereichernde Perspektive auf die eigenen Bild- und Datenpraktiken einzunehmen und über das Einnehmen einer solchen Perspektive der eigenen Erkenntnispraxis eine weitere Dimension hinzuzufügen.

Mit dem Beispiel spartenübergreifenden Forschens, dessen Ergebnisse mit diesem Buch vorliegen, möchte ich dazu anregen, über die eigenen Fachgrenzen hinaus zu blicken, Berührungspunkte zu überwinden und sich aktiv an einem Dialog nicht allein zwischen den Disziplinen, sondern auch zwischen den Wissenschaftssparten zu beteiligen. Eine offene und neugierige Haltung gegenüber den Erkenntnisinteressen und Arbeitsweisen anderer Disziplinen sollte meines Erachtens schon früh in der akademischen Ausbildung gefördert werden, da auf diese Weise die Reflexion der Möglichkeiten und Grenzen der eigenen Disziplin angeregt wird und so entsprechende Impulse in die Gesellschaft zurückwirken können. Immer komplexere globale Herausforderungen erfordern einen reflexiven spartenübergreifenden Diskurs und systemische, fachübergreifende Lösungen, die nur durch multidisziplinäre Ansätze gefunden werden können.

Dank

Die ersten Ideen zur Forschung, die diesem Buch zugrunde liegt, konnte ich bereits während meiner Tätigkeit als Assistant Professor am Department for Media and Cultural Studies an der Universität Utrecht in den Niederlanden entwickeln. Ganz besonders danke ich meinen dortigen Kolleg*innen Rosmarie Buikema, Frank Kessler und Kathrin Thiele für den Austausch und den Glauben an mein Projekt in einem frühen Stadium. Nach dem Wechsel an das Institut für Medien- und Kulturwissenschaft der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf haben vor allem die lebhaften und kontroversen Diskussionen mit Robin Curtis die Schärfung der Forschungsperspektive, die Ideenentwicklung und ihre praxeologische Umsetzung nachhaltig befördert. Fünf Monate verbrachte ich am Forschungszentrum Jülich und am Center for Advanced Imaging der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, um die bildgebenden Verfahren der Zellbiologie kennenzulernen und mit Zellforscher*innen über ihre Perspektiven auf die Bilder, die sie herstellen, zu sprechen. Ganz besonders Stefanie Weidtkamp-Peters, die Leiterin des Center for Advanced Imaging, und Yvonne Stahl stellten nicht nur großzügig ihre Zeit für den fakultätsübergreifenden Dialog zur Verfügung, sondern eröffneten mir darüber hinaus aufschlussreiche Einblicke in Seh- und Denkweisen jenseits der Geisteswissenschaften. Yvonne Stahl begleitete meine Forschungsarbeit bis zum finalen Stadium, wirkte in der Habilitationskommission mit und gab mir entscheidende Rückmeldungen zu den technischen Passagen des vorliegenden Buches.

Einen für mich bedeutsamen Reflexionsraum für die Erfahrungen, die ich im Labor sammeln konnte, und ihre Relevanz für den medienwissenschaftlichen Diskurs boten der kontinuierliche Austausch mit Kolleg*innen aus der Medienwissenschaft und den naturwissenschaftlich-technischen Fächern im europäischen Netzwerk zum Neuen Materialismus (COST Ac-

tion IS1307). Wesentliche Impulse gaben insbesondere Liv Hausken, Aurora Hoel und Sigrid Schmitz. Der kollegiale Austausch auf internationalen Fachtagungen wie den Jahrestagungen der Society for Cinema and Media Studies und des European Network for Cinema und Media Studies hat den Gedankenprozess erheblich vorangebracht. Für ihre Anregungen danke ich ganz besonders Suzanne Buchan, Scott Curtis, Alla Gadassik, Laura U. Marks, Vivian Sobchack, Tess Takahashi und Michael Zryd sowie Cormac Dean, Tomáš Dvořák und Jussi Parikka. Weiter schärfen konnte ich meine Argumentation über den Austausch im Rahmen der Workshops der AG Medienästhetik der Gesellschaft für Medienwissenschaft. Natascha Adamowsky, Christiane Heibach, Peter Mattusek und Jörg Sternagel gilt mein Dank für den anregenden Dialog.

Ein zweimonatiger Forschungsaufenthalt am Institut für Geschlechterforschung, Tema Genus, der Universität Linköping in Schweden ermöglichte mir einzelne Bezüge zwischen den Gender Studies und den Lebenswissenschaften zu erforschen. Ich danke ganz besonders Cecilia Åsberg, Magdalena Górska, Edyta Just, Tara Mehrabi, Marietta Radomska, Margrit Schildrick, Wibke Straube und Jami Weinstein für die Gespräche und Gastfreundschaft. In Deutschland konnte ich meine Ideen wiederholt im medienkulturwissenschaftlichen Habilitierenden-Kolloquium der Universitäten Düsseldorf und Bochum erproben. Für die einblickreichen Responzen zu den Vorüberlegungen zu einzelnen Kapiteln danke ich ganz besonders Maren Butte, Rupert Gaderer, Maren Haffke, Elisa Linseisen, Jessica Nitsche und Wim Peters. Einen weiteren Diskussionsraum eröffneten meine Seminarveranstaltungen, die ich in dieser Zeit an der Schnittstelle von Medienkulturwissenschaft, Science and Technology Studies, Filmwissenschaft und Gender Studies anlegte. Mein Dank gilt all denjenigen Bachelor- und Masterstudierenden, die mich auf der geistigen Reise über die »Kluft zwischen den zwei Kulturen« hinweg begleitet haben. Im letzten Jahr vor der Fertigstellung der Schrift erwies sich der fachliche Austausch mit Silke Schicktanz und Dominik Schrey zu einzelnen Kapiteln für die Schärfung meiner Argumentation als ausschlaggebend.

Meinem Lektor, Hannes Klug, gilt mein besonderer Dank nicht nur für die genaue Lektüre, sondern auch für das Mitvollziehen des Gedankengangs in der Schreibphase und die konstruktiven Vorschläge, die die Klarheit der Argumentation deutlich befördert haben. Für ihren unermüdlichen Einsatz danke ich sehr herzlich meinen Hilfskräften Laura Vogelhöfer, die mir bei der Literaturbeschaffung und Erstellung einer Rohfassung der Bibliografie

half, und Jan Knöferl, der mich bei der Finalisierung der Bibliografie unterstützte.

Eine leicht abweichende Fassung des vorliegenden Buches wurde am 14. Juni 2022 als schriftliche Habilitationsleistung im Rahmen des Habilitationsverfahrens zur Erlangung der Lehrbefähigung für die Fächer Medienwissenschaft und Medienkulturwissenschaft an der Philosophischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf angenommen. Ich danke meinen Gutachterinnen Robin Curtis, Astrid Deuber-Mankowsky und Angela Krewani für die durchweg einsichtsreiche, mitunter kritische und allzeit anregende Würdigung meines interdisziplinären Ansatzes. Den Mitgliedern des Habilitationsausschusses der Philosophischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität, ganz besonders Achim Landwehr und Dirk Matejovski, danke ich für den zügigen Fortgang des Habilitationsverfahrens.

Meinem Lektor beim Campus-Verlag, Malte Schefer, gilt mein herzlicher Dank für die sachkundige Unterstützung während des gesamten Herstellungsprozesses. Der Open-Access-Publikationsfonds der Universität Freiburg hat die Veröffentlichung des vorliegenden Buches großzügig unterstützt. Besonders bedanken möchte ich mich bei Jan Werner vom Dezernat Medienbearbeitung der Universitätsbibliothek Freiburg, der eine dezidierte Haltung zum Open-Access-Publikationsformat vorantrieb.

Im Voraus danke ich all denjenigen Kolleg*innen und Studierenden, die dieses Buch lesen werden und sich dadurch in ihrem Denken angeregt fühlen mögen. Ich hoffe darauf, dass dieses Buch weiterhin einen anhaltenden Dialog zwischen den Disziplinen befördern wird.

Freiburg, im April 2023

Abbildungen

| | | |
|-----------|---|-----|
| Abb. 1.1 | Vergleich zwischen einem Phasenkontrastbild (c) und einem Bild, das mithilfe des Differentiellen Interferenzkontrastverfahrens erzeugt wurde (d) | 45 |
| Abb. 1.2 | Visualisierung der Ergebnisse eines Experiments in der hochauflösenden Mikroskopie | 53 |
| Abb. 1.3 | Konfokalmikroskop-System | 54 |
| Abb. 1.4 | Quantifizierung innerzellulärer Vorgänge in der computergestützten Mikroskopie | 64 |
| Abb. 1.5 | Mareys Anordnung zur Messung des Pulsschlags (links) und die sphygmografisch erzeugten Spuren des Pulsschlags (rechts) | 65 |
| Abb. 2.1 | Zwei Beispiele für Mareys chronofotografische Aufnahmen eines Läufers (links) und eines Elefanten in Bewegung (rechts) aus den Jahren 1883 und 1887 | 78 |
| Abb. 2.2 | Der Bioinformatiker Nico Stuurmann erklärt den Unterschied zwischen dem »repräsentationalen Bild« und dem »tatsächlichen Bild«... | 81 |
| Abb. 2.3 | Eine gegenwärtige Visualisierung des Adlernebels und ihr kunsthistorisches Vorbild | 85 |
| Abb. 2.4 | Visualisierung des Danielson-Kraters auf dem Planeten Mars | 86 |
| Abb. 2.5 | Robert Koch, Sporen-Aufnahmen | 88 |
| Abb. 2.6 | Virusdarstellungen in einem aktuellen medizinischen Lehrbuch | 89 |
| Abb. 2.7 | Standbilder aus zwei Forschungsfilmen, die verschiedene Entwicklungsstadien des Zebrafischembryos zeigen | 99 |
| Abb. 2.8 | Drei Bildserien, die den Entwicklungsprozess des Embryos der Taufeliege visualisieren | 102 |
| Abb. 2.9 | Cover der fünften Schwedischen Ausgabe des Fotobands <i>Ett Barn Blir Till</i> von Lennart Nilsson und Linda Forsell | 106 |
| Abb. 2.10 | Embryomodell aus Wachs im Metallgestell, ca. 1902 | 107 |
| Abb. 2.11 | Integration von Bildern in eine Aussage | 115 |
| Abb. 3.1 | Illustration der Theorie des Netzhautbildes | 148 |
| Abb. 3.2 | Charles-Wheatstone-Stereoskop, Holzschnitt, ca. 1840 (unbekannter Autor)..... | 152 |

| | | |
|----------|--|-----|
| Abb. 3.3 | Das Mikroskop als künstliches Organ und als Sinneserweiterung bei Hooke, 1665 | 159 |
| Abb. 3.4 | Beneckes fotografischer Apparat, 1868 | 162 |
| Abb. 3.5 | »Das biologische Sehsystem des Menschen und die technischen Imitate« | 168 |
| Abb. 3.6 | Die Zellbiologin Jennifer Lippincott-Schwartz demonstriert anschauliches Denken. | 171 |
| Abb. 4.1 | Die Magie des Kosmos und Mikrokosmos | 190 |
| Abb. 4.2 | Screenshots aus Ron Vales Videovortrag »Historical Contributions from Light Microscopy« | 199 |
| Abb. 4.3 | Bakterien im Zahnbelag, vergrößerter Wiederabdruck eines Kupferstichs nach einer Zeichnung im Auftrag Antoni van Leeuwenhoeks | 203 |
| Abb. 4.4 | Kupferstich der vergrößerten Ansicht eines Flohs | 205 |
| Abb. 4.5 | Bildfolge aus dem Film <i>Das Blumenwunder</i> (Deutschland, 1922–1925, Regie: Max Reichmann) | 224 |
| Abb. 5.1 | Screenshots aus einem Lebendzellularfilm, die verschiedene Stadien der ersten 24 Stunden der embryonalen Entwicklung des Zebrafischs zeigen . | 258 |
| Abb. 5.2 | Screenshot von einer der drei Ansichten, die die Bewegung von Prokollagen-Proteinen zwischen dem Golgi-Apparat und dem endoplasmatischen Retikulum sichtbar machen | 263 |

Literatur und Medien

- Adamowsky, Natascha. *Das Wunder in der Moderne. Eine andere Kulturgeschichte des Fliegens*. München: Fink, 2010.
- Addison, Thomas. »Ohne Titel«. *Spectator*, Nr. 420 (2. Juli 1712).
- Adelmann, Ralf. »Orbits: Visuelle Modellierungen der Marsoberfläche am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt«. In ders., Jan Frercks, Martina Hefßler und Jochen Hennig, *Datenbilder: Zur digitalen Bildpraxis in den Naturwissenschaften*, 23–64. Bielefeld: Transcript, 2009.
- Adelmann, Ralf, Jan Frercks, Martina Hefßler und Jochen Hennig. »Dank«. In *Datenbilder: Zur digitalen Bildpraxis in den Naturwissenschaften*, 7–9. Bielefeld: Transcript, 2009.
- »Einleitung: Datenbilder und Bildpraxen«. In *Datenbilder: Zur digitalen Bildpraxis in den Naturwissenschaften*, 10–20. Bielefeld: Transcript, 2009.
- Alberts, Bruce. »Molecular Biology of the Cell«. Zuletzt geändert: 12. September 2016. <https://brucealberts.ucsf.edu/current-projects/molecular-biology-of-the-cell/>.
- Alexander Johnson, Julian Lewis, David Morgan, Martin Raff, Keith Roberts und Peter Walter. *Molecular Biology of the Cell*, 6. Auflage. New York: Garland Science, 2015.
- Alpers, Svetlana. *The Art of Describing: Dutch Art in the Seventeenth Century*. Chicago: University of Chicago Press, 1983.
- *Kunst als Beschreibung: Holländische Malerei des 17. Jahrhunderts*. Aus dem amerikanischen Englisch von Hans Udo Davitt. Mit einem Vorwort von Wolfgang Kemp. Köln: DuMont, 1985.
- Anderson, Nancy und Michael Dietrich (Hg.). *The Educated Eye: Visual Culture and Pedagogy in the Life Sciences*. Lebanon, New Hampshire: Dartmouth College Press, 2012.
- Angerer, Marie-Luise. *Vom Begehren nach dem Affekt*. Zürich und Berlin: Diaphanes, 2007.
- »Die »Biomediale Schwelle«: Medientechnologien und Affekt«. In *Situiertes Wissen und Regionale Epistemologie: Zur Aktualität Georges Canguilhems und Donna J. Haraways*, hg. v. Astrid Deuber-Mankowsky und Christoph F.E. Holzhey, 203–222. Wien und Berlin: Turia und Kant, 2013.
- Armstrong, Isobel. »The Microscope: Mediations of the Sub-Visible World«. In *Transactions and Encounters: Science and Culture in the Nineteenth Century*, hg. v. Roger Luckhurst und Josephine McDonagh, 30–54. Manchester: Manchester University Press, 2002.

- Arnheim, Rudolf. *Visual Thinking*. Berkeley, Los Angeles und London, England: University of California Press, 1969.
- *Anschauliches Denken: Zur Einheit von Bild und Begriff*. Aus dem amerikanischen Englisch übersetzt vom Verfasser. Köln: DuMont, 2001.
- *Film als Kunst* [1932]. Wiederabgedruckt mit einem Nachwort von Karl Prümm und zeitgenössischen Rezensionen. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2002.
- Bachelard, Gaston. *Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes: Beitrag zu einer Psychoanalyse der objektiven Erkenntnis* [i.O. 1938]. Aus dem Französischen von Michael Bischoff, mit einer Einleitung von Wolf Lepenies. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1987.
- Bacon, Francis. *Novum Organum Scientiarum*. London: John Bill, 1620.
- Baker, Henry. *The Microscope Made Easy*. London: R. Dodsley, 1743.
- *Employment for the Microscope*. London: R. Dodsley, 1753.
- Baker, Monya. »Cellular Imaging: Taking a Long, Hard Look«. *Nature* 466, Nr. 7310 (26. August 2010): 1137–1140. <https://doi.org/10.1038/4661137a>.
- Barck, Karlheinz, Jörg Heininger und Dieter Kliche. »Ästhetik/ästhetisch«. In *Ästhetische Grundbegriffe*, Studienausgabe, Band 1, hg. v. Karlheinz Barck, Martin Fontius, Dieter Schlenstedt, Burkhard Steinwachs und Friedrich Wolfzettel, 308–399. Stuttgart: J.B. Metzler, 2010.
- Barker, Jennifer. *The Tactile Eye: Touch and the Cinematic Experience*. Berkeley: University of California Press, 2009.
- Barthes, Roland. *Die helle Kammer: Bemerkungen zur Photographie* [i.O. 1980]. Aus dem Französischen übersetzt von Dietrich Leube. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1985.
- Batchen, Geoffrey. »On Post-Photography«. *Afterimage* 20, Nr. 3 (1992): 17.
- »Phantasms: Digital Imaging and the Death of Photography«. *Aperture* 136 (1994): 47–50.
- Bazin, André. »Science Film: Accidental Beauty« [i.O. 1947]. In *Science is Fiction: The Films of Jean Painlevé*, hg. v. Andy Masaki Bellows, Marina McDougall und Brigitte Berg, aus dem Französischen übersetzt von Jeanine Herman, 144–147. Cambridge, Massachusetts: Bricco Press, 2000.
- »Ontologie des photographischen Bildes« [i.O. 1945]. In *Was ist Film?*, hg. v. Robert Fischer, aus dem Französischen von Robert Fischer und Anna Düpee, mit einem Vorwort von Tom Tykwer und einer Einleitung von François Truffaut, 43–49. Berlin: Alexander Verlag, 2004.
- Benecke, Berthold. *Die Photographie als Hilfsmittel mikroskopischer Forschung*. Braunschweig: Friedrich Vieweg, 1868.
- Benjamin, Walter. »Das Kunstwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbarkeit. Dritte Fassung«. In *Gesammelte Schriften*, hg. v. Rolf Tiedemann und Hermann Schweppenhäuser unter Mitwirkung von Theodor W. Adorno und Gershom Scholem, 471–508, Band 1: Abhandlungen. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1991.
- »Kleine Geschichte der Photographie« [1931]. In *Aura und Reflexion. Schriften zur Ästhetik und Kunstphilosophie*, ausgewählt und mit einem Nachwort von Hartmut Böhme und Yvonne Ehrenspeck, 353–377. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1991.
- Bennett, Jane. *Vibrant Matter: A Political Ecology of Things*. Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2010.

- Bensaude-Vincent, Bernadette. »A Historical Perspective on Science and Its ›Others‹«. *Isis* 100, Nr. 2 (Juni 2009): 359–368.
- Bernal, John Desmond. *Science in History*, Band 2, *The Scientific and Industrial Revolutions*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1971.
- Bildwelten des Wissens. »Interview: Bildunterschätzung – Bildüberschätzung. Ein Gespräch der ›Bildwelten des Wissens‹ mit Michael Hagner«. In *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 1,1: *Bilder in Prozessen*, 104–111 (Berlin: Akademie Verlag, 2003).
- Blumenberg, Hans. »Das Fernrohr und die Ohnmacht der Wahrheit«. In Galileo Galilei, *Sidereus Nuncius: Nachricht von neuen Sternen*, hg. und eingeleitet von Hans Blumenberg, 1. Auflage, 7–73. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1965.
- Boehm, Gottfried. »Sehen: Hermeneutische Reflexionen«. In *Kritik des Sehens*, hg. v. Ralf Konersmann, 272–298. Leipzig: Reclam, 1997.
- »Zwischen Auge und Hand: Bilder als Instrumente der Erkenntnis«. In *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, hg. v. Bettina Heinz und Jörg Huber, 43–54. Zürich: Edition Voldemeer, 2001.
- Bösel, Bernd. *Die Plastizität der Gefühle: Das affektive Leben zwischen Psychotechnik und Ereignis*. Frankfurt am Main und New York: Campus, 2021.
- Bolz, Norbert. *Theorie der neuen Medien*. München: Fink, 1990.
- *Eine kurze Geschichte des Scheins*. München: Fink, 1991.
- Boon, Timothy. *Films of Fact: A History of Science in Documentary Films and Television*. London: Wallflower, 2008.
- »Science, Society and Documentary«. In *The Documentary Film Book*, hg. v. Brian Winston, 320–327. London: British Film Institute, 2013.
- Borck, Cornelius. »Die Unhintergebarkeit des Bildschirms: Beobachtungen zur Rolle von Bildtechniken in den präsentierten Wissenschaften«. In *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, hg. v. Bettina Heintz und Jörg Huber, 383–394. Zürich: Edition Voldemeer, 2001.
- Brain, Robert. »The Graphic Method: Inscription, Visualization, and Measurement in Nineteenth-Century Science and Culture«. Dissertationsschrift, University of California, 1996.
- *The Pulse of Modernism: Physiological Aesthetics in Fin-de-Siècle Europe*. Seattle und London: University of Washington Press, 2015.
- Braun, Marta. *Picturing Time: The Work of Etienne-Jules Marey (1830–1904)*. Chicago: University of Chicago Press, 1992.
- Bredenkamp, Horst, Angela Fischel, Birgit Schneider und Gabriele Werner. »Bildwelten des Wissens«. In *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 1,1: *Bilder in Prozessen*, hg. v. Horst Bredenkamp und Gabriele Werner, 9–20 (Berlin: Akademie Verlag, 2003).
- »Bildbeschreibungen: Eine Stilgeschichte technischer Bilder? Ein Interview mit Horst Bredenkamp«. In *Das Technische Bild: Kompendium zu einer Stilgeschichte wissenschaftlicher Bilder*, hg. v. Horst Bredenkamp, Birgit Schneider und Vera Dünkel, 36–47. Berlin: Akademie Verlag, 2008.

- Breibach, Olaf. »Representation of the Microcosm – The Claim for Objectivity in 19th Century Scientific Microphotography«. *Journal of the History of Biology* 35, Nr. 2 (2002): 221–250. <https://doi.org/10.1023/A:1016044427910>.
- »Naturbilder und Bildmodelle: Zur Bildwelt der Wissenschaft«. In *The Picture's Image: Wissenschaftliche Visualisierung als Komposit*, hg. v. Inge Hinterwaldner und Markus Buschhaus, 23–43. München: Fink, 2006.
- Brennan, Teresa. *The Transmission of Affect*. Ithaca, New York und London, England: Cornell University Press, 2004.
- Brinckmann, Christine N. »Abstraktion« und »Einführung« im deutschen Avantgarde-Film der 20er Jahre«. In *Die anthropomorphe Kamera und andere Schriften zur filmischen Narration*, hg. v. Mariann Lewinsky und Alexandra Schneider, 246–274. Zürich: Chronos, 1997.
- Brons, Franziska. »Das Versprechen der Retina: Zur Mikrofotografie Robert Kochs«. In *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 2,2: *Instrumente des Sehens*, hg. v. Angela Fischel, 19–28. Berlin: Akademie Verlag, 2004.
- »Kochs Kosmos«. In *Mikrofotografie – Schönheit jenseits des Sichtbaren*, hg. v. Ludger Derenthal und Christiane Stahl, 25–32. Ostfildern: Hatje Cantz, 2010. Veröffentlicht in Verbindung mit einer gleichnamigen Ausstellung, organisiert und präsentiert vom Museum für Fotografie, Staatliche Museen zu Berlin in Kooperation mit der Alfred Erhardt Stiftung Berlin, 1. Oktober 2010 – 9. Januar 2011.
- Bruhn, Matthias. »Zellbilder: Eine Kunstgeschichte der Wissenschaft«. In *Das Technische Bild: Kompendium zu einer Stilgeschichte wissenschaftlicher Bilder*, hg. v. Horst Bredekamp, Birgit Schneider und Vera Dünkel, 54–65. Berlin: Akademie Verlag, 2008.
- Bryson, Norman. *Looking at the Overlooked: Four Essays on Still Life Painting*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1990.
- Bukatman, Scott. »The Artificial Infinite: On Special Effects and the Sublime«. In *Matters of Gravity: Special Effects and Supermen in the 20th Century*, 81–110. Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2003.
- Buklijas, Tatjana und Nick Hopwood. »Remodelling: Publishing in Wax and Print«. Making Visible Embryos. Zuletzt geprüft: 22. September 2021. http://www.sites.hps.cam.ac.uk/visibleembryos/s5_3.html.
- Burke, Edmund. *A Philosophical Enquiry into the Origin of our Ideas of the Sublime and Beautiful* [i.O. 1757]. Herausgegeben, eingeleitet und annotiert von Adam Phillips. Oxford: Oxford University Press, 1990.
- Burri, Regula Valérie. »Doing Images: Zur soziotechnischen Fabrikation visueller Erkenntnis in der Medizin«. In *Mit dem Auge denken. Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, hg. v. Bettina Heintz und Jörg Huber, 277–303. Zürich: Edition Voldemeer, 2001.
- und Joseph Dumit. »Social Studies of Scientific Imaging and Visualization«. In *Handbook of Science and Technology Studies*, 3. Auflage, hg. v. Edward J. Hackett, Olga Amsterdamska, Michael Lynch und Judy Wajcman, 297–317. Cambridge, Massachusetts und London, England: MIT Press, 2008.

- Cahill, James Leo. »Forgetting Lessons: Jean Painlevé's Cinematic Gay Science«. *Journal of Visual Culture* 11, Nr. 3 (2012): 258–287.
- Canales, Jimena. »Dead and Alive: Micro-Cinematography between Physics and Biology«. *Configurations* 23, Nr. 2 (2015): 235–251.
- Canguilhem, Georges. »Aspekte des Vitalismus« [1946]. In *Die Erkenntnis des Lebenden* [i.O. 1965]. Aus dem Französischen übersetzt von Till Bardoux, Maria Muhle und Francesca Raimondi, 149–181. Berlin: August Verlag, 2009.
- Cartwright, Lisa. *Screening the Body: Tracing Medicine's Visual Culture*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1995.
- »A Cultural Anatomy of the Visible Human Project«. In *The Visible Woman: Imaging Technologies, Gender, and Science*, hg. v. Paula Treichler, Lisa Cartwright und Constance Penley, 21–43. New York: New York University Press, 1998.
- Carusi, Annamaria, Blanca Rodriguez und Kevin Burrage. »Model Systems in Computational Systems Biology«. In *Computer Simulations and the Changing Face of Scientific Experimentation*, hg. v. Juan M. Durán und Eckhart Arnold, 118–144. Cambridge, England: Cambridge Scholars Publishing, 2013.
- Casetti, Francesco. *The Lumiere Galaxy: 7 Key Words for a Cinema to Come*. New York: Columbia University Press, 2015.
- CBC Radio. Quirks and Quarks. »Amateur Astronomers Use the ›Mark One Eyeball‹ to Find Brown Dwarf Stars«. Zuletzt geändert am 5. Februar 2021. <https://www.cbc.ca/radio/quirks/feb-6-covid-treatments-what-have-we-learned-breakups-change-language-algae-blooms-on-greenland-and-more-1.5901648/amateur-astronomers-use-the-mark-one-eyeball-to-find-brown-dwarf-stars-1.5901651>.
- Chalfie, Martin. »GFP: Lighting up Life«. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, Nr. 25 (23. Juni 2009): 10073–10080. <https://www.pnas.org/content/pnas/106/25/10073.full.pdf>.
- Comandon, Jean. »Micrographie: Cinématographie des Microbes«. *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale* 113, Nr. 3 (1910): 318–328.
- Connor, Steven. »Fascination, Skin and the Screen«. *Critical Quarterly* 40, Nr. 1 (1998): 9–24.
- Coopmans, Catelijne, Janet Vertesi, Michael E. Lynch und Steve Woolgar (Hg.). *Representation in Scientific Practice Revisited*. Cambridge, Massachusetts und London, England: MIT Press, 2014.
- Cowdry, Edmund Vincent (Hg.). *General Cytology: A Textbook of Cellular Structure and Function for Students of Biology and Medicine* [1924]. Chicago: The University of Chicago Press, 2014.
- Cowie, Elizabeth. *Recording Reality, Desiring the Real*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 2011.
- Crary, Jonathan. »Modernizing Vision«. In *Vision and Visuality*, hg. v. Hal Foster, 29–50. Seattle: Bay Press, 1988.
- »Techniques of the Observer«. *October* 45 (Sommer 1988): 3–35.
- *Techniques of the Observer: On Vision and Modernity in the Nineteenth Century*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1990.

- *Techniken des Betrachters: Sehen und Moderne im 19. Jahrhundert*. Aus dem amerikanischen Englisch übersetzt von Anne Vonderstein. Dresden und Basel: Verlag der Kunst, 1996.
- Cromey, Douglas W. »Avoiding Twisted Pixels: Ethical Guidelines for the Appropriate Use and Manipulation of Scientific Digital Images«. *Science Engineering Ethics* 16, Nr. 4 (Dezember 2010): 639–667. <https://doi.org/10.1007/s11948-010-9201-y>.
- »Digital Images Are Data: And Should Be Treated as Such«. In *Cell Imaging Techniques: Methods and Protocols*, 2. Auflage, hg. v. Douglas J. Taatjes und Jürgen Roth, 1–27. Totowa, New Jersey: Springer, 2013. https://doi.org/10.1007/978-1-62703-056-4_1.
- Cubitt, Sean. *Digital Aesthetics*. London: Sage Publications, 1998.
- Cuntz, Michael, Barbara Nitsche, Isabell Otto und Marc Spaniol (Hg.). *Die Listen der Evidenz*. Köln: DuMont, 2006.
- Curtis, Robin. *Conscientious Viscerality: The Autobiographical Stance in German Film and Video*. Berlin: Gebrüder Mann Verlag/Edition Imorde, 2006.
- »Immersion und Einfühlung: Zwischen Repräsentationalität und Materialität bewegter Bilder«. In »Immersion«, Themenheft, *Montage A/V* 17, Nr. 2 (2008): 89–107. <https://doi.org/10.25969/mediarep/465>.
- »Einführung in die Einfühlung«. In *Einfühlung: Zu Geschichte und Gegenwart eines ästhetischen Konzepts*, hg. v. Robin Curtis und Gertrud Koch, 11–30. München: Fink, 2009.
- »Compression/Repression: Distinguishing Between the Animate and the Inanimate«. In *Bilder animierter Bewegung / Images of Animate Movement*, hg. v. Sigrid Leyssen und Pirkko Rathgeber, 113–134. Eikones-Reihe. München: Fink, 2013.
- und Gertrud Koch. *Einfühlung: Zu Geschichte und Gegenwart eines ästhetischen Konzepts*. München: Fink, 2008.
- Marc Glöde und Gertrud Koch (Hg.). *Synästhesie-Effekte: Zur Intermodalität der ästhetischen Wahrnehmung*. München: Fink, 2010.
- Curtis, Scott. »Dissecting the Medical Training Film«. In *Beyond the Screen: Institutions, Networks and Publics of Early Cinema*, hg. v. Marta Braun, Charlie Keil, Rob King, Paul Moore und Louis Pelletier, 161–167. Bloomington, Indiana: Indiana University Press, 2008.
- »Vergrößerung und das Mikroskopische Erhabene«. Aus dem amerikanischen Englisch übersetzt von Berthold Rebhandl. In »Empirie«, Themenheft, *Zeitschrift für Medienwissenschaft* 5 (2011): 97–110. <https://doi.org/10.25969/mediarep/2624>.
- »Science Lessons«. *Film History* 25, Nr. 1–2 (2013): 45–54. <https://doi.org/10.2979/filmhistory.25.1-2.45>.
- *The Shape of Spectatorship: Art, Science and Early Cinema*. New York: Columbia University Press, 2015.
- »Grob und glatt: Über eine relationale Theorie des wissenschaftlichen Animationsfilms«. In *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 14: *Scientific Fiction. Inszenierungen der Wissenschaft zwischen Film, Fakt und Fiktion*, hg. v. Luisa Feiersinger, 30–40. Berlin: De Gruyter, 2018.
- Darwin, Charles. *The Expression of Emotions in Man and Animals* [1872]. Chicago: University of Chicago Press, 1965.
- Daston, Lorraine und Peter Galison. »The Image of Objectivity«. In »Seeing Science«, Themenheft, *Representations* 40 (Herbst 1992): 81–128.

- und Peter Galison. *Objectivity*. New York: Zone Books, 2007.
- und Peter Galison. *Objektivität*. Aus dem amerikanischen Englisch von Christa Krüger. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2007.
- und Katharine Park. *Wonders and the Order of Nature (1150–1750)*. New York: Zone Books, 1998.
- de Chadarevian, Soraya. »Die ›Methode der Kurven‹ in der Physiologie zwischen 1850 und 1900«. In *Die Experimentalisierung des Lebens: Experimentalsysteme in den biologischen Wissenschaften 1850/1950*, hg. v. Hans-Jörg Rheinberger und Michael Hagner, 28–49. Berlin: Akademie Verlag, 1993.
- *Designs for Life: Molecular Biology after World War II*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2002.
- »Portrait of a Discovery: Watson, Crick, and the Double Helix«, *Isis* 94, Nr. 1 (März 2003): 90–105. <https://doi.org/10.1086/376100>.
- und Nick Hopwood (Hg.). *Models: The Third Dimension of Science*. Stanford: Stanford University Press, 2004.
- Degen, Andreas. »Concepts of Fascination, from Democritus to Kant«. *Journal of the History of Ideas* 73, Nr. 3 (Juli 2012): 371–393.
- de Landa, Manuel. *War in the Age of Intelligent Machines*. New York: Zone Books, 1991.
- Demeny, Georges. »Les Photographies Parlantes«. *La Nature*, Nr. 985 (16. April 1892): 311–315.
- Descartes, René. *Discours de la Méthode pour bien Conduire la Raison, et Chercher la Vérité dans les Sciences. Plus la Dioptrique. Les Météores et la Géométrie*. Leiden: Ian Maire, 1637.
- Deuber-Mankowsky, Astrid. »Kritik des Anthropozentrismus und die Politik des Lebens bei Canguilhem und Haraway«. In *Situiertes Wissen und Regionale Epistemologie: Zur Aktualität Georges Canguilhems und Donna J. Haraways*, hg. v. ders. und Christoph F.E. Holzhey, 105–120. Wien und Berlin: Turia und Kant, 2013.
- »Gutachten über die Habilitationsschrift von Dr. Bettina Papenburg zum Thema Vitalitätseffekte: Erkenntnis und Affekt in der Medienkultur der Zellbiologie«, Ruhr-Universität Bochum, 17.03.2022.
- Dickson, William Kennedy Laurie, und Antonia Dickson. *History of the Kinetograph, Kinetoscope and Kinetophonograph*. New York: Albert Bunn, 1895. Faksimile-Ausgabe. New York: Museum of Modern Art, 2000.
- Dilthey, Wilhelm. *Einleitung in die Geisteswissenschaften: Versuch einer Grundlegung für das Studium der Gesellschaft und Geschichte* [1883], *Gesammelte Schriften*, erster Band, 5. unveränderte Auflage. Stuttgart: Teubner, 1962.
- Ditzen, Stefan. »Zeichnen am Fenster zum Mikrokosmos – Technik als Einigungshilfe auf Bilder«. In *The Picture's Image: Wissenschaftliche Visualisierung als Komposit*, hg. v. Inge Hinterwaldner und Markus Buschhaus, 129–142. München: Fink, 2006.
- Doane, Mary Ann. *The Emergence of Cinematic Time: Modernity, Contingency, The Archive*. Cambridge, Massachusetts und London: Harvard University Press, 2002.
- »Zeitlichkeit, Speicherung, Lesbarkeit: Freud, Marey und der Film« [i.O. 2002]. Aus dem amerikanischen Englisch übersetzt von Gustav Roßler. In *Lebendige Zeit: Wissenskulturen im Werden*, hg. v. Henning Schmidgen, 280–313. Berlin: Kadmos, 2005.

- »Indexicality: Trace and Sign: Introduction«. *Differences: A Journal of Feminist Cultural Studies* 18, Nr. 1 (2007): 1–6. <https://doi.org/10.1215/10407391-2006-020>.
- »The Indexical and the Concept of Medium Specificity«. *Differences: A Journal of Feminist Cultural Studies* 18, Nr. 1 (2007): 128–152. <https://doi.org/10.1215/10407391-2006-025>.
- Dobell, Clifford. *Antony van Leeuwenhoek and his »Little Animals«, Being Some Account of the Father of Protozoology and Bacteriology and his Multifarious Discoveries in these Disciplines, Collected, Translated and Edited from his Printed Works, Unpublished Manuscripts, and Contemporary Records* (New York: Harcourt, Brace, 1932).
- Driesch, Hans. *The History and Theory of Vitalism* [i.O. 1905]. Autorisierte Übersetzung aus dem Deutschen von C. K. Ogden, überarbeitet und teilweise für die englische Ausgabe neugeschrieben vom Autor. London: Macmillan, 1914.
- Duden, Barbara. *Der Frauenleib als öffentlicher Ort: Vom Mißbrauch des Begriffs Leben*. Hamburg: Luchterhand, 1991.
- Dufhues, Stefanie. *Fotografie konstruierter Sichtbarkeiten: Bildpraxis der Mikrofotografie von den ersten Versuchen bis ins frühe 20. Jahrhundert*. München: Fink, 2020.
- Dulac, Germaines. »Visual and Anti-Visual Films« [i.O. 1928]. Aus dem Französischen übersetzt von Robert Lamberton. In *The Avant-Garde Film: A Reader of Theory and Criticism*, hg. v. P. Adams Sitney, 31–35. New York: New York University Press, 1978.
- Dumit, Joseph. *Picturing Personhood: Brain Scans and Biomedical Identity*. Princeton: Princeton University Press, 2004.
- Eames, Charley und Ray, Regie. *Powers of Ten*. 1977.
- Eco, Umberto. *Einführung in die Semiotik* [i.O. 1968]. Aus dem Italienischen übersetzt von Jürgen Trabant. München: Fink, 1972.
- Eder, Jens. »Affektlenkung im Film: Das Beispiel *Triumph des Willens*«. In *Mediale Emotionen: Zur Lenkung von Gefühlen durch Bild und Sound*, hg. v. Oliver Grau und Andreas Keil, 107–132. Frankfurt am Main: Fischer, 2005.
- Edgerton, Samuel Y. *The Renaissance Rediscovery of Linear Perspective*. New York: Basic Books, 1975.
- Engell, Lorenz und Joseph Vogl. »Vorwort«. In *Kursbuch Medienkultur: Die maßgeblichen Theorien von Brecht bis Baudrillard*, hg. v. Claus Pias, Joseph Vogl, Lorenz Engell, Oliver Fahle und Britta Neitzel, 8–13. Stuttgart: DVA, 1999.
- Epstein, Jean. »Photogénie des Unwägbaren« [i.O. 1935]. Aus dem Französischen übersetzt von Ralph Eue. In *Bonjour Cinéma und andere Schriften zum Kino*, hg. v. Nicole Brenez und Ralph Eue, 75–79. Wien: SYNEMA, 2008.
- »Magnification and Other Writings« [i.O. 1921]. Aus dem Französischen übersetzt von Stuart Liebman. *October* 3 (Frühling 1977): 9–25.
- Ernst, Wolfgang. »Den A/D-Umbruch aktiv denken – medienarchäologisch, kulturtechnisch«. In *Analog/Digital – Opposition oder Kontinuum? Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung*, hg. v. Jens Schröter und Alexander Böhnke, 49–65. Bielefeld: Transcript, 2004.
- Felt, Ulrike, Rayvon Fouché, Clark A. Miller und Laurel Smith-Doerr (Hg.). *The Handbook of Science and Technology Studies*, 4. Auflage. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2016.

- Ferencz-Flatz, Christian und Julian Hanich (Hg.). »Film and Phenomenology«. *Studia Phaenomenologica*, Band XVI (2016).
- Fermor, Noel. »The Royal Society of London for Improving Natural Knowledge«. Baco-
nia (Februar 1961). Zuletzt geprüft: 11.05.2021. [http://www.sirbacon.org/royalsociety.
htm](http://www.sirbacon.org/royalsociety.htm).
- Fischel, Angela. »Sehen, Darstellen, Beschreiben: Mikroskopische Beobachtung in den
Kupferstichen der Micrographia«. *Kunsttexte.de: E-Journal für Kunst- und Bildgeschichte*,
Nr. 1 (2002): 1–9. <https://doi.org/10.18452/6907>.
- »Bildtechniken: Mikroskopie in populärwissenschaftlichen Büchern des 17. und 18. Jahr-
hunderts«. In *Sichtbarkeit und Medium: Austausch, Verknüpfung und Differenz naturwissen-
schaftlicher und ästhetischer Bildstrategien*, hg. v. Anja Zimmermann, 19–46. Hamburg:
Hamburg University Press, 2005.
- »Optik und Utopie: Mikroskopische Bilder als Argument im 18. Jahrhundert«. In *Visuelle
Argumentationen: Die Mysterien der Repräsentation und die Berechenbarkeit der Welt*, hg. v.
Horst Bredekamp und Pablo Schneider, 253–266. München: Fink, 2006.
- Fischer-Lichte, Erika. *Ästhetik des Performativen*. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2004.
- Fleck, Ludwik. *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache: Einführung in die
Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv* [i.O. 1935]. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1980.
- Flückiger, Barbara. *Visual Effects: Filmbilder aus dem Computer*. Marburg: Schüren, 2008.
- Folkers, Gerd. »Architektur und Eigenschaften der Moleküle des Lebens«. In *Mit dem Auge
denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, hg. v.
Bettina Heinz und Jörg Huber, 159–171. Zürich: Edition Voldemeer, 2001.
- Foster, Hal (Hg.). *Vision and Visuality*. Seattle: Bay Press, 1988.
- Foucault, Michel. *The Birth of the Clinic: An Archaeology of Medical Perception* [i.O. 1963]. Aus
dem Französischen von A.M. Sheridan. New York: Random House, 1975.
- *Die Ordnung der Dinge* [i.O. 1966]. Aus dem Französischen übersetzt von Ulrich Köppen.
Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2012.
- Fournier, Marian. *The Fabric of Life: Microscopy in the Seventeenth Century*. Baltimore und Lon-
don: Johns Hopkins University Press, 1996.
- Francoeur, Éric. »The Forgotten Tool: The Design and Use of Molecular Models«. *Social Stu-
dies of Science* 27, Nr. 1 (1997): 7–40. <https://doi.org/10.1177/030631297027001002>.
- »Beyond Dematerialization and Inscription: Does the Materiality of Molecular Models
Really Matter?«. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 6, Nr. 1 (2000):
63–84. <http://www.hyle.org/journal/issues/6/francoe.htm>.
- »Cyrus Levinthal, the Kluge and the Origins of Interactive Molecular Graphics«. *Endea-
vour* 26, Nr. 4 (2002): 127–131. [https://doi.org/10.1016/s0160-9327\(02\)01468-0](https://doi.org/10.1016/s0160-9327(02)01468-0).
- Frercks, Jan. »Runs: Computersimulationen des Unsichtbaren am Max-Planck-Institut
für Astrophysik«. In Ralf Adelman, ders., Martina Hefßler und Jochen Hennig, *Daten-
bilder: Zur digitalen Bildpraxis in den Naturwissenschaften*, 65–121. Bielefeld: Transcript,
2009.
- Gadamer, Hans-Georg. *Wahrheit und Methode: Grundzüge einer philosophischen Hermeneutik*,
Gesammelte Werke, Band 1: *Hermeneutik*, 7. durchgesehene Auflage. Tübingen: Mohr
Siebeck, 2010.

- Gadassik, Alla. »Assembling Movement: Scientific Motion Analysis and Studio Animation Practice«. In »Science/Animation«, hg. v. Olivia Banner und Kirsten Ostherr, Themenheft, *Discourse: Journal for Theoretical Studies in Media and Culture* 37, Nr. 3 (Herbst 2015): 269–297. <https://www.muse.jhu.edu/article/613645>.
- Galilei, Galileo. *Sidereus Nuncius: Nachricht von neuen Sternen*, hg. und eingeleitet von Hans Blumenberg, 1. Auflage. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1965.
- Galison, Peter. »Monte Carlo Simulations: Artificial Reality«. In *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics*, 689–780. Chicago: University of Chicago Press, 1997.
- »Judgment Against Objectivity«. In *Picturing Science, Producing Art*, hg. v. Caroline A. Jones und dems., 327–359. New York und London: Routledge, 1998.
- Gallese, Vittorio. »The Roots of Empathy: The Shared Manifold Hypothesis and the Neural Basis of Intersubjectivity«. *Psychopathology* 36 (2003): 171–180.
- Gaudreault, André und Philippe Marion. *The End of Cinema? A Medium in Crisis in the Digital Age* [i.O. 2013]. Aus dem Französischen übersetzt von Timothy Barnard. New York: Columbia University Press, 2015.
- Gaycken, Oliver. »The Swarming of Life: Moving Images, Education, and Views through the Microscope«. *Science in Context* 24, Nr. 3 (2011): 361–380. <https://doi.org/10.1017/S0269889711000159>.
- »Beauty of Chance: Film ist.« *Journal of Visual Culture* 11, Nr. 3 (2012): 307–327. <https://doi.org/10.1177/1470412912455618>.
- »The Cinema of the Future: Visions of the Medium as Modern Educator, 1895–1910«. In *Learning with the Lights Off: Educational Film in the United States*, hg. v. Devin Orgeron, Marsha Orgeron und Dan Streible, 67–86. Oxford: Oxford University Press, 2012.
- *Devices of Curiosity: Early Cinema and Popular Science*. New York: Oxford University Press, 2015.
- Geimer, Peter. »Blow up«. In »Der liebe Gott steckt im Detail: Mikrostrukturen des Wissens«, hg. v. Wolfgang Schäffner, Sigrid Weigel und Thomas Macho, 187–203. München: Fink, 2003.
- Gentner, Wolfgang, Heinz Maier-Leibniz und Walther Bothe. *Atlas typischer Nebelkammerbilder*. Berlin: Springer, 1940.
- Gerlach, Dieter. *Geschichte der Mikroskopie*. Frankfurt am Main: Deutsch, 2009.
- Gerlach, Joseph von. *Die Photographie als Hilfsmittel mikroskopischer Forschung*. Leipzig: Engelmann, 1863.
- Giere, Ronald N. »Visual Models and Scientific Judgment«. In *Picturing Knowledge: Historical and Philosophical Problems Concerning the Use of Art in Science*, hg. v. Brian S. Baigrie, 269–302. Toronto: University of Toronto Press, 1996.
- Gilbreth, Frank und Lilian Gilbreth. *Applied Motion Study*. New York: Sturgis and Walton, 1917.
- Gleichen-Russwurm, Wilhelm Friedrich von. *Das Neueste aus dem Reiche der Pflanzen, oder Mikroskopische Untersuchungen und Beobachtungen der geheimen Zeugungstheile der Pflanzen in ihren Blüten, und der in denselben befindlichen Insekten [...]*, herausgegeben, verlegt und mit den nöthigen in Kupfer gestochenen und illuminierten Abbildungen versehen von Johann Christoph Keller, Maler in Nürnberg. Nürnberg: de Launoy, 1764.

- Golinski, Jan V. »A Noble Spectacle: Phosphorus and the Public Cultures of Science in the Early Royal Society«. *Isis* 80, Nr. 1 (1989): 11–39.
- Gombrich, Ernst H. *Das forschende Auge: Kunstbetrachtung und Naturwahrnehmung*. Frankfurt am Main und New York: Campus, 1994.
- Goodman, Nelson. *Languages of Art: An Approach to a Theory of Symbols*. Indianapolis: Bobbs Merrill, 1968.
- *Sprachen der Kunst: Entwürfe einer Symboltheorie*. Aus dem amerikanischen Englisch übersetzt von Bernd Philipp. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1995
- Goodwin, Charles. »Professional Vision«. *American Anthropologist*, neue Reihe, 96, Nr. 3 (September 1994): 606–633. <https://doi.org/10.1525/aa.1994.96.3.02a00100>.
- Gramelsberger, Gabriele. »Simulation: Analyse der organisationalen Etablierungsbestrebungen der epistemischen Kultur des Simulierens am Beispiel der Klimamodellierung«. In *Organisationen der Forschung: Der Fall der Atmosphärenwissenschaft*, hg. v. Jost Halfmann und Falk Schützenmeister, 30–52. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaft, 2009.
- »The Simulation Approach in Synthetic Biology«. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 44, Nr. 4 (2013): 150–157.
- Greco, Monica. »On the Vitality of Vitalism«. In *Inventive Life: Approaches to the New Vitalism*, hg. v. Mariam Fraser, Sarah Kember und Celia Lury, 48–84. London: Sage, 2006.
- Gronemeyer, Nicole. *Optische Magie: Zur Geschichte der visuellen Medien in der Frühen Neuzeit*. Bielefeld: Transcript, 2004.
- Gross, Alan G. *The Scientific Sublime: Popular Science Unravels the Mysteries of the Universe*. Oxford: Oxford University Press, 2018.
- Grube, Gernot. »Digitale Abbildungen – ihr prekärer Zeichenstatus«. In *Konstruierte Sichtbarkeiten: Wissenschafts- und Technikbilder seit der Frühen Neuzeit*, hg. v. Martina Heßler, 179–195. München: Fink, 2006.
- Grüsser, Otto-Joachim. »Hermann von Helmholtz und die Physiologie des Sehvorganges«. In *Hermann von Helmholtz. Vorträge eines Heidelberger Symposiums anlässlich des einhundertsten Todestages*, hg. v. Wolfgang U. Eckart und Klaus Volkert, 119–176. Pfaffenweiler: Centaurus, 1996.
- Gunning, Tom. »An Aesthetic of Astonishment: Early Film and the (In)Credulous Spectator« [1989]. In *Viewing Positions: Ways of Seeing Film*, hg. v. Linda Williams, 114–133. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1994.
- »In Your Face: Physiognomy, Photography, and the Gnostic Mission of Early Film«. In *The Mind of Modernism: Medicine, Psychology, and the Cultural Arts in Europe and America, 1880–1940*, hg. v. Mark S. Micale, 141–171. Stanford: Stanford University Press, 2004.
- »What's the Point of an Index? Or, Faking Photographs«. *Nordicom Review* 25, Nr. 1–2 (2004): 39–49. <https://doi.org/10.1515/nor-2017-0268>.
- »Moving Away from the Index: Cinema and the Impression of Reality«. *Differences: A Journal of Feminist Cultural Studies* 18, Nr. 1 (2007): 29–52. <https://doi.org/10.1215/10407391-2006-022>.
- Hacking, Ian. *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1983.

- Hagen, Wolfgang. »Die Entropie der Fotografie: Skizzen zur einer Genealogie der digital elektronischen Bildaufzeichnung«. In *Paradigma Fotografie: Fotokritik am Ende des fotografischen Zeitalters*, Band 1, hg. v. Herta Wolf, 195–235. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2002.
- Hagner, Michael. »Ansichten der Wissenschaftsgeschichte«. In *Ansichten der Wissenschaftsgeschichte*, hg. v. dems., 7–39 (Frankfurt am Main: Fischer, 2001).
- Hanich, Julian. »The Journeys of a Film Phenomenologist: An Interview with Vivian Sobchack on Being and Becoming«. *NECSUS: European Journal of Media Studies* 6, Nr. 2 (2017): 5–17. <https://doi.org/10.25969/mediarep/3397>.
- Haraway, Donna. »A Cyborg Manifesto«. *Socialist Review* 80 (1985): 65–107.
- Harrasser, Karin, Helmut Lethen und Elisabeth Timm (Hg.). »Sehnsucht nach Evidenz«, Themenheft, *Zeitschrift für Kulturwissenschaften* 1 (2009).
- Harwood, John T. »Rhetorics and Graphics in *Micrographia*«. In *Robert Hooke: New Studies*, hg. v. Michael Hunter und Simon Schaffer, 119–147. London: Boydell und Brewer, 1989.
- Hausken, Liv. »Introduction«. In *Thinking Media Aesthetics: Media Studies, Film Studies and the Arts*, hg. v. ders., 29–50. Berlin: Peter Lang, 2013.
- Hediger, Vinzenz. »Illusion und Indexikalität: Filmische Illusion im Zeitalter der postphotographischen Photographie«. *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* 54, Nr. 1 (2006): 101–110. <https://doi.org/10.1524/dzph.2006.54.1.101>.
- Heilwagen, Oliver. »Mikrofotografie: Schönheit jenseits des Sichtbaren«. *Kunst und Film*. Veröffentlicht am 2. Oktober 2010. <https://kunstundfilm.de/2010/10/mikrofotografie/>.
- Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. »Olympus Fluoview 1000«. Center for Advanced Imaging. Zuletzt geprüft: 15.10.2021. <https://www.cai.hhu.de/ausruestung/konfokale-systeme/olympus-fluoview-1000-picoquant-flim-6ch>.
- »Zeiss Elyra PS«. Center for Advanced Imaging. Zuletzt geprüft: 15.10.2021. <https://www.cai.hhu.de/ausruestung/superaufloesungs-mikroskope/zeiss-elyra-ps>.
- Heintz, Bettina, und Jörg Huber (Hg.). *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*. Zürich: Edition Voldemeer, 2001.
- Helmholtz, Hermann von. »Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Nervenreizung«. In *Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin* (21. Januar 1850): 14–15.
- Helmreich, Stefan. *Silicon Second Nature: Culturing Artificial Life in a Digital World*. Berkeley: University of California Press, 1998.
- Hennig, Jochen. »Vom Experiment zur Utopie: Bilder in der Nanotechnologie«. In *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 2,2: *Instrumente des Sehens*, hg. v. Angela Fischel, 9–18. Berlin: De Gruyter, 2004.
- »Epistemologie des Schattens«. In Ralf Adelman, Jan Frercks, Martina Heßler und ders. *Datenbilder: Zur digitalen Bildpraxis in den Naturwissenschaften*, 195–207. Bielefeld: Transcript, 2009.
- *Bildpraxis: Visuelle Strategien in der frühen Nanotechnologie*. Bielefeld: Transcript, 2011.
- Hentschel, Klaus. *Visual Cultures in Science and Technology: A Comparative History*. Oxford: Oxford University Press, 2014.

- Heßler, Martina (Hg.). *Konstruierte Sichtbarkeiten: Wissenschafts- und Technikbilder seit der Frühen Neuzeit*. München: Fink, 2006.
- »Von der doppelten Unsichtbarkeit digitaler Bilder«. *Zeitenblicke* 5, Nr. 3 (2006): o.S. <https://doi.org/10.25969/mediarep/4073>.
 - »BilderWissen: Bild- und wissenschaftstheoretische Überlegungen«. In Ralf Adelman, Jan Frercks, dies. und Jochen Hennig, *Datenbilder: Zur digitalen Bildpraxis in den Naturwissenschaften*, 133–161. Bielefeld: Transcript, 2009.
- Hick, Ulrike. *Geschichte der optischen Medien*. München: Fink, 1999.
- Hinterwaldner, Inge. *Das systemische Bild: Ikonizität im Rahmen computerbasierter Echtzeitsimulationen*. München: Fink, 2010.
- Hörl, Erich und Luciana Parisi. »Was heißt Medienästhetik? Ein Gespräch über algorithmische Ästhetik, automatisches Denken und die postkybernetische Logik der Komputation«. In »Medienästhetik«, Themenheft, *Zeitschrift für Medienwissenschaft* 8 (2013): 25–51. <https://doi.org/10.25969/mediarep/696>.
- Holl, Ute. »Neuropathologie als filmische Inszenierung«. In *Konstruierte Sichtbarkeiten: Wissenschafts- und Technikbilder seit der Frühen Neuzeit*, 217–240, hg. v. Martina Heßler. München: Fink, 2006.
- Hooke, Robert. *Micrographia, or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses with Observations and Inquiries Thereupon*. London: Jo. Martyn und Ja. Allestry, Drucker der Royal Society, 1665.
- Hopwood, Nick. *Embryos in Wax: Models from the Ziegler Studio*. Mit einem Wiederabdruck von »Embryological Wax Models« von Friedrich Ziegler. Cambridge, England: Whipple Museum of the History of Science, University of Cambridge, 2002.
- Huisken, Jan, Jim Swoger, Filippo Del Bene, Joachim Wittbrodt und Ernst H.K. Stelzer. »Optical Sectioning Deep Inside Live Embryos by Selective Plane Illumination Microscopy«. *Science*, neue Reihe, 305, Nr. 5686 (13. August 2004): 1007–1009. <https://doi.org/10.1126/science.1100035>.
- »Optical Sectioning Deep inside Live Embryos by Selective Plane Illumination Microscopy«. *Science*, neue Reihe, 305, Nr. 5686 (13. August 2004): Movie S4, 1100035s4.mov (nur Online). Zuletzt geprüft: 31. August 2021. <https://doi.org/10.1126/science.1100035>.
 - »Optical Sectioning Deep inside Live Embryos by Selective Plane Illumination Microscopy«. *Science*, neue Reihe, 305, Nr. 5686 (13. August 2004): Movie S5, 1100035s5.mov (nur Online). Zuletzt geprüft: 31. August 2021. <https://doi.org/10.1126/science.1100035>.
- Ihde, Don. *Expanding Hermeneutics: Visualism in Science*. Evanston, Illinois: Northwestern University Press, 1998.
- *Listening and Voice: Phenomenologies of Sound*. Albany: State University of New York Press, 2007.
 - *Postphenomenology and Technoscience*. The Peking University Lectures. Albany: The State University of New York Press, 2009.

- Jacob, François. *Die Logik des Lebenden: Von der Urzeugung zum genetischen Code* [i.O. 1970]. Aus dem Französischen übersetzt von Jutta und Klaus Scherrer. Frankfurt am Main: Fischer, 1972.
- Jay, Martin. »Scopic Regimes of Modernity«. In *Vision and Visuality*, hg. v. Hal Foster, 3–27. Seattle: Bay Press, 1988.
- *Downcast Eyes: The Denigration of Vision in Twentieth-Century French Thought*. Berkeley: The University of California Press, 1993.
- Jones, Caroline A. und Peter Galison. »Introduction: Picturing Science, Producing Art«. In *Picturing Science, Producing Art*, 1–23. New York: Routledge, 1998.
- (Hg.). *Picturing Science, Producing Art*. New York: Routledge, 1998.
- Jülich, Solveig. »Lennart Nilsson's *A Child Is Born*: The Many Lives of a Best-Selling Pregnancy Advice Book«. In »Publishing for Public Knowledge«, hg. v. Johan Fornäs, Martin Fredriksson, Eva Hemmungs Wirtén und Naomi Stead, Thementeil, *Culture Unbound: Journal of Current Cultural Research* 7, Nr. 4 (2015): 627–648, <https://doi.org/10.3384/cu.2000.1525.1573627>.
- Kang, Minsoo. *Sublime Dreams of Living Machines: The Automaton in the European Imagination*. Cambridge, Massachusetts und London, England: Harvard University Press, 2011.
- Kant, Immanuel. *Kritik der Urteilskraft*. In *Bibliothek der Philosophie: Schriften zur Ästhetik und Naturphilosophie*, Werke III, 479–880. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1996.
- Karp, Gerald, Janet Iwasa und Wallace Marshall. *Karp's Cell and Molecular Biology: Concepts and Experiments*, 8. Auflage. New York: Wiley, 2016.
- Kay, Lily E. *The Molecular Vision of Life: Caltech, the Rockefeller Foundation, and the Rise of the New Biology*. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- Keller, Evelyn Fox. *Refiguring Life: Metaphors of Twentieth-Century Biology*. New York: Columbia University Press, 1995.
- *Making Sense of Life: Explaining Biological Development with Models, Metaphors, and Machines*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 2002.
- Keller, Philipp J. „*In vivo* Imaging of Zebrafish Embryogenesis«. *Methods* 62, Nr. 3 (2013): 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2013.03.015>.
- Keller, Philipp J., Annette D. Schmidt, Joachim Wittbrodt und Ernst H.K. Stelzer. »Reconstruction of Zebrafish Early Embryonic Development by Scanned Light Sheet Microscopy«. *Science*, neue Reihe, 322, Nr. 5904 (14. November 2008): 1065–1069. <https://doi.org/10.1126/science.1162493>.
- »Reconstruction of Zebrafish Early Embryonic Development by Scanned Light Sheet Microscopy«. *Science*, neue Reihe, 322, Nr. 5904 (14. November 2008): Movie 2: DSLM Multi-View Time-Lapse Recording of Zebrafish Embryonic Development. <https://doi.org/10.1126/science.1162493>. Daten hinterlegt am EMBL, Digital Embryo Movies. Zuletzt geprüft: 17. August 2021. <https://www.embl.de/digitalembryo/fish.html#Movies>.
- »Reconstruction of Zebrafish Early Embryonic Development by Scanned Light Sheet Microscopy«. *Science*, neue Reihe, 322, Nr. 5904 (14. November 2008): Movie 9: Global Cell Tracking and Colour-Indexing of Morphogenetic Domains. <https://doi.org/10.1126/science.1162493>. Daten hinterlegt am EMBL, Digital Embryo Movies. Zuletzt geprüft: 17. August 2021. <https://www.embl.de/digitalembryo/fish.html#Movies>.

- »Reconstruction of Zebrafish Early Embryonic Development by Scanned Light Sheet Microscopy«. *Science*, neue Reihe, 322, Nr. 5904 (14. November 2008): Movie 11: Reverse Engineering of Migratory Tracks of Retinal Progenitor Cells. <https://doi.org/10.1126/science.1162493>. Daten hinterlegt am EMBL, Digital Embryo Movies. Zuletzt geprüft: 17. August 2021. <https://www.embl.de/digitalembryo/fish.html#Movies>.
- Keller, Philipp J., Annette D. Schmidt, Anthony Santella, Khaled Khairy, Zhirong Bao, Joachim Wittbrodt und Ernst H.K. Stelzer. »Fast, High-Contrast Imaging of Animal Development with Scanned Light Sheet-Based Structured-Illumination Microscopy«. *Nature Methods* 7, Nr. 8 (August 2010): 637–645. <https://doi.org/10.1038/nmeth.1476>.
- »Fast, High-Contrast Imaging of Animal Development with Scanned Light Sheet-Based Structured-Illumination Microscopy«. *Nature Methods* 7, Nr. 8 (August 2010): Movie 6: The Drosophila Digital Embryo. <https://doi.org/10.1038/nmeth.1476>. Daten hinterlegt am HHMI/Janelia Research Campus, Digital Embryo, Imaging Development with Structured Illumination. Zuletzt geprüft: 17. August 2021. <http://www.digital-embryo.org/>.
- »Fast, High-Contrast Imaging of Animal Development with Scanned Light Sheet-Based Structured-Illumination Microscopy«. *Nature Methods* 7, Nr. 8 (August 2010): Data Set 2: Fused Reconstruction of Early Drosophila Wild-Type Development. <https://doi.org/10.1038/nmeth.1476>. Daten hinterlegt am HHMI/Janelia Research Campus, Digital Embryo, Imaging Development with Structured Illumination. Zuletzt geprüft: 17. August 2021. <http://www.digital-embryo.org/>.
- Kemp, Martin. »Seeing and Picturing: Visual Representation in Twentieth-Century Science«. In *Science in Twentieth Century*, hg. v. John Krige und Dominique Pestre, 361–390. Paris: Harwood Academic Publishers, 1997.
- »Venus's Voyeurs«. *Nature* 393, Nr. 6686 (18. Juni 1998): 633.
- *The Nature Book of Art and Science*. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- Kepler, Johannes. *Ad Vitellionem Paralipomena, Quibus Astronomiae pars Optica Traditur*, hg. v. Walther von Dyck und Max Caspar, Band 2 (München: C.H. Beck, 1937).
- Kessler, Elizabeth. *Picturing the Cosmos: Hubble Space Telescope Images and the Astronomical Sublime*. Minneapolis: The University of Minnesota Press, 2012.
- »The Astronomical Sublime and the American West«. In *Picturing the Cosmos: Hubble Space Telescope Images and the Astronomical Sublime*, 19–68. Minneapolis: The University of Minnesota Press, 2012.
- Kirschner, Marc, John Gerhart und Tim Mitchison. »Molecular ›Vitalism‹«. *Cell* 100 (7. Januar 2000): 79–88.
- Kittler, Friedrich. »Die Stadt ist ein Medium«. In *Geburt einer Hauptstadt*. Band 3: *Am Horizont*, hg. v. Dietmar Steiner und Georg Schöllhammer, 507–531. Wien: Edition Buch-Quadrat, 1988.
- *Draculas Vermächtnis. Technische Schriften*. Leipzig: Reclam, 1993.
- »Geschichte der Kommunikationsmedien«. In *Raum und Verfahren*, hg. v. Jörg Huber und Alois Müller, 169–188. Basel und Frankfurt am Main: Stroemfeld/Roter Stern, 1993.

- »Computergrafik: Eine halbertechnische Einführung«. In *Paradigma Fotografie. Fotokritik am Ende des fotografischen Zeitalters*, Band I, hg. v. Herta Wolf, 178–194. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2002.
- *Optische Medien: Berliner Vorlesung 1999*. Zweite, durchgesehene und um das Vorwort zur russischen Übersetzung erweiterte Ausgabe. Berlin: Merve, 2011.
- Knorr-Cetina, Karin. *The Manufacture of Knowledge: An Essay on the Constructivist and Contextual Nature of Science*. Vorwort von Rom Harré. Oxford: Pergamon Press, 1981.
- »The Fabrication of Facts: Toward a Microsociology of Scientific Knowledge«. In *The Sociology of Knowledge*, hg. v. Nico Stehr und Volker Meja, 223–244. New Brunswick: Transaction Books, 1984.
- »Viskurse« der Physik: Konsensbildung und visuelle Darstellungen«. In *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, hg. v. Bettina Heintz und Jörg Huber, 305–320. Zürich: Edition Voldemeer, 2001.
- Knuuttila, Tarja. »Models, Representation, and Mediation«. *Philosophy of Science* 72, Nr. 5 (Dezember 2005): 1260–1271. <https://doi.org/10.1086/508124>.
- Koch, Gertrud. »Zwischen Raubtier und Chamäleon: Das Schicksal der Filmwissenschaft«. In »Motive«, Themenheft, *Zeitschrift für Medienwissenschaft* 1 (2009): 65–73. <http://doi.org/10.25969/mediarep/2621>.
- *Die Wiederkehr der Illusion: Der Film und die Kunst der Gegenwart*. Berlin: Suhrkamp, 2016.
- und Christiane Voss. »...kraft der Illusion«. In *...kraft der Illusion*, hg. v. dens., 7–13. München: Fink, 2006.
- Koch, Robert. »Zur Untersuchung von pathogenen Organismen«. In *Mittheilungen aus dem Kaiserlichen Gesundheitsamte*, hg. v. Dr. Struck, erster Band, 1–48. Berlin: Norddeutsche Buchdruckerei und Verlagsanstalt, 1881.
- »Verfahren zur Untersuchung, zum Konservieren und Photographieren der Bakterien«. In *Gesammelte Werke von Robert Koch*, hg. v. J. Schwalbe, 27–50. Berlin: Robert-Koch-Institut, 2010. <http://doi.org/10.25646/5065>.
- Kracauer, Siegfried. *Theorie des Films: Die Errettung der äußeren Wirklichkeit* [i.O. 1960]. Mit einem Anhang, »Marseiller Entwurf«, zu einer Theorie des Films, hg. v. Inka Mülder-Bach, vom Verfasser revidierte Übersetzung aus dem amerikanischen Englisch von Friedrich Walter und Ruth Zollschan. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2005.
- Krämer, Sybille. »Kann das ›geistige Auge‹ sehen?«. In *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, hg. v. Bettina Heintz und Jörg Huber, 347–364. Zürich: Edition Voldemeer, 2001.
- Krauss, Rosalind. *The Optical Unconscious*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1993.
- Krewani, Angela. »Überlegungen zum Dispositiv medialer Bildgestaltung in Naturwissenschaft und Medizin.« In »Blickwechsel: Bildpraxis zwischen Wissenschafts- und Populärkultur«, hg. v. Kathrin Friedrich und Sven Stollfuß, Themenheft, *Augen-Blick: Marburger Hefte zur Medienwissenschaft* 50 (2011): 10–23.
- Kubrick, Stanley, Regie. *2001: A Space Odyssey*. 1968.
- Kuchner, Marc J., Jacqueline K. Faherty, Adam C. Schneider, Aaron M. Meisner, Joseph C. Filippazzo, Jonathan Gagné, Laura Trouille, Steven M. Silverberg, Rosa Castro, Bob Fletcher, Khasan Mokaev, and Tamara Stajic. »The First Brown Dwarf Discovered by

- the Backyard Worlds: Planet 9 Citizen Science Project«. *The Astrophysical Journal Letters* 841, Nr. 2 (1. Juni 2017). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa7200>.
- Kuhn, Thomas S. *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* [i.O. 1962]. Zweite revidierte und um das Postskriptum von 1969 erweiterte Auflage, Revision der Übersetzung aus dem Englischen von Hermann Vetter. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1986.
- Landecker, Hannah. »Cellular Features: Microcinematography and Film Theory«. *Critical Inquiry*, Ausgabe 31, Nr. 4 (Sommer 2005): 903–937. <https://doi.org/10.1086/444519>.
- »Microcinematography and the History of Science and Film«. *Isis* 97, Nr. 1 (März 2006): 121–32. <https://doi.org/10.1086/501105>.
- *Culturing Life: How Cells Became Technologies*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 2007.
- »Seeing Things: From Microcinematography to Live Cell Imaging«. *Nature Methods* 6, Nr. 10 (2009): 707–709. <https://doi.org/10.1038/nmeth1009-707>.
- »The Life of Movement: From Microcinematography to Live-Cell Imaging«. *Journal of Visual Culture* 11, Nr. 3 (2012): 378–399. <https://doi.org/10.1177/1470412912455622>.
- Latour, Bruno. »Visualization and Cognition: Drawing Things Together«. In *Knowledge and Society: Studies in the Sociology of Culture Past and Present*, Band 6, hg. v. Elizabeth Long und Henrika Kuklick, 1–40. Greenwich, Connecticut: JAI Press, 1986.
- »Drawing Things Together«. In *Representation in Scientific Practice*, hg. v. Michael Lynch und Steve Woolgar, 19–68. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1990.
- *Wir sind nie modern gewesen: Versuch einer symmetrischen Anthropologie* [i.O. 1991]. Aus dem Französischen von Gustav Roßler. Berlin: Akademie Verlag, 1995.
- *Der Berliner Schlüssel: Erkundungen eines Liebhabers der Wissenschaft*. Aus dem Französischen von Gustav Roßler. Berlin: Akademie Verlag, 1996.
- *Iconoclasm oder Gibt es eine Welt jenseits des Bilderkrieges?*. Aus dem Englischen von Gustav Roßler. Berlin: Merve, 2002.
- »Pasteur und Pouchet: Die Heterogenese der Wissenschaftsgeschichte«. In *Elemente einer Geschichte der Wissenschaften*, hg. v. Michel Serres, 749–789. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2002.
- und Steve Woolgar. *Laboratory Life: The Social Construction of Scientific Facts* [1979]. Einleitung von Jonas Salk. Mit einem neuen Postskript und Index der Autoren. Princeton: Princeton University Press, 1986.
- Ledermüller, Martin Frobenius. *Mikroskopische Gemüths- und Augen-Ergötzung. Bestehend in Ein Hundert nach der Natur gezeichneten und mit Farben erleuchteten Kupfertafeln, sammt deren Erklärung*. Nürnberg: Adam Wolfgang Winterschmidt, 1760–1762.
- Leonhard, Karin. »Blut sehen«. In *Transfusionen: Blutbilder und Biopolitik in der Neuzeit*, hg. v. Anja Lauper, 119–138. Zürich und Berlin: Diaphanes, 2005.
- Lethen, Helmut, Ludwig Jäger und Albrecht Koschorke (Hg.). *Auf die Wirklichkeit zeigen: Zum Problem der Evidenz in den Kulturwissenschaften. Ein Reader*. Frankfurt am Main: Campus, 2015.
- Leys, Ruth. »The Turn to Affect: A Critique«. *Critical Inquiry* 37, Nr. 3 (Frühling 2011): 434–472.
- *The Ascent of Affect: Genealogy and Critique*. Chicago: University of Chicago Press, 2017.

- Liebsch, Dimitri und Nicola Mößner (Hg.). *Visualisierung und Erkenntnis: Bildverstehen und Bildverwenden in Natur- und Geisteswissenschaften*. Köln: Herbert von Halem Verlag, 2012.
- Lippincott-Schwartz, Jennifer. »Breakthroughs in Intracellular Fluorescent Imaging, Part 2: Using Photobleaching and Photoactivation to Study the Endomembrane System«. iBiology. Gefilmt im Oktober 2009. Videovortrag, 35:27. <https://www.ibiology.org/cell-biology/intracellular-fluorescent-imaging/#part-2>.
- Lipps, Theodor. *Grundlegung der Ästhetik*. Hamburg und Leipzig: Voss, 1903.
- *Leitfaden der Psychologie*, 2. Auflage Leipzig: Engelmann, 1906.
- *Schriften zur Einföhlung*. Mit einer Einleitung und Anmerkungen, hg. v. Faustino Fabbianelli. Baden-Baden: Ergon, 2018.
- Lunenfeld, Peter. »Digital Photography: Dubitative Images«. In *Snap to Grid: A User's Guide to Digital Arts, Media, and Cultures*, 55–69. Cambridge, Massachusetts und London, England: MIT Press, 2000.
- Lynch, Michael. *Art and Artifact in Laboratory Science: A Study of Shop Work and Shop Talk in a Research Laboratory*. London: Routledge, 1985.
- »Science in the Age of Mechanical Reproduction: Moral and Epistemic Relations between Diagrams and Photographs«. *Biology and Philosophy* 6, Nr. 2 (1991): 205–226. <https://doi.org/10.1007/BF02426838>.
- »Representation is Overrated: Some Critical Remarks about the Use of the Concept of Representation in Science Studies«. *Configurations* 2, Nr. 1 (1994): 137–149.
- und Samuel Y. Edgerton Jr. »Aesthetics and Digital Image Processing: Representational Craft in Contemporary Astronomy«. In *Picturing Power: Visual Depiction and Social Relations*, hg. v. Gordon Fyfe und John Law, 184–220. London: Routledge, 1988.
- und Steve Woolgar (Hg.). *Representation in Scientific Practice*. Cambridge, Massachusetts und London, England: MIT Press, 1990.
- und Steve Woolgar. »Introduction: Sociological Orientations to Representational Practice in Science«. In *Representation in Scientific Practice*, hg. v. Michael Lynch und Steve Woolgar, 1–18. Cambridge, Massachusetts und London, England: MIT Press, 1990.
- Malinowski, Bronislaw. *Magic, Science and Religion and Other Essays*. Glencoe, Illinois: The Free Press, 1948.
- *Argonauts of the Western Pacific: An Account of Native Enterprises and Adventure in the Archipelagoes of Melanesian New Guinea [1922]*. New York: Dutton, 1961.
- Manovich, Lev. »The Engineering of Vision from Constructivism to Computers«. Dissertationsschrift. University of Rochester, 1993. https://www.academia.edu/2800644/The_Engineering_of_Vision_from_Constructivism_to_Computers?.
- *The Language of New Media*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2001.
- »Data Visualization as New Abstraction and Anti-Sublime«. PDF-Datei. 2002. <http://manovich.net/index.php/projects/data-visualisation-as-new-abstraction-and-anti-sublime>.
- »Scale Effects«. PDF-Datei. 2005. http://manovich.net/content/04-projects/047-scale-effects/44_article_2005.pdf.
- Marey, Etienne-Jules. *La Machine Animale: Locomotion Terrestre et Aérienne*. Paris : Librairie Germer Baillière, 1873.

- *La Méthode Graphique dans les Sciences Expérimentales et Principalement en Physiologie et en Médecine*. Paris: Masson, 1885.
- Marks, Laura U. *The Skin of the Film: Intercultural Cinema, Embodiment, and the Senses*. Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2000.
- *Touch: Sensuous Theory and Multisensory Media*. Minneapolis und London: Minnesota University Press, 2002.
- Marr, David. *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. Cambridge, Massachusetts und London, England: MIT Press, 2010.
- Massen, Robert, »Sehen, Erkennen, Entscheiden«. In *Technische Bildverarbeitung: Maschinelles Sehen*, hg. v. Bernd Jähne, Robert Massen, Bertram Nickolay und Harald Scharfenberg, 1–34. Berlin, Heidelberg und New York: Springer, 1995.
- Massumi, Brian. »The Autonomy of Affect«. In *Cultural Critique* 31 (Herbst 1995): 83–109.
- McLuhan, Marshall. *Understanding Media: The Extensions of Man*. New York: Signet Books, 1964.
- Mersch, Dieter. »Medialität und Undarstellbarkeit: Einleitung in eine ›negative‹ Medientheorie«. In *Performativität und Medialität*, hg. v. Sybille Krämer, 75–96. München: Fink, 2004.
- *Medientheorie zur Einführung*. Hamburg: Junius, 2006.
- Merz, Martina und Inge Hinterwalder. »Neue Bilder, Modelle und Simulationen: Zwischen Repräsentativität und Produktivität«. In *Handbuch Wissenschaftssoziologie*, hg. v. Sabine Maasen, Mario Kaiser, Martin Reinhart und Barbara Sutter, 303–316. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2012.
- Michelet, Jules. *L’Insecte*. Paris: L. Hachette, 1858.
- Michotte van den Berck, Albert. »Der Realitätscharakter der filmischen Projektion«. Aus dem Französischen übersetzt von Vinzenz Hediger. In »Digitales Kino/Filmologie und Psychologie«, Themenheft, *Montage A/V* 12, Nr. 1 (2003): 100–125. <https://doi.org/10.25969/mediarep/152>. Zuerst veröffentlicht unter dem Titel »La Caratère de ›Réalité‹ des Projections Cinématographiques«. *Revue Internationale de Filmologie*, Nr. 3–4 (1948): 249–261.
- »Die emotionale Teilnahme des Zuschauers am Geschehen auf der Leinwand«. Aus dem Französischen von Vinzenz Hediger. In »Digitales Kino/Filmologie und Psychologie«, Themenheft, *Montage A/V* 12, Nr. 1 (2003): 126–135. <https://doi.org/10.25969/mediarep/154>. Zuerst veröffentlicht unter dem Titel »La Participation Émotionnelle du Spectateur à l’Action Représentée à l’Écran«. *Revue Internationale de Filmologie* 4, Nr. 13 (1953): 87–95.
- Miksits, Klaus und Helmut Hahn. *Basiswissen Medizinische Mikrobiologie und Infektiologie*, 2., überarbeitete und korrigierte Auflage. Berlin: Springer, 1999.
- Missomelius, Petra. »Zum Wandel der visuellen Wahrnehmung«. In »Technisierung des Blicks«, hg. v. Angela Krewani, Themenheft, *Augen-Blick: Marburger Hefte zur Medienwissenschaft* 39 (2007): 11–21.
- Mitchell, Robert. *Experimental Life: Vitalism in Romantic Science and Literature*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2013.

- Mitchell, William J.T. *The Reconfigured Eye: Visual Truth in the Post-Photographic Era*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1992.
- Morrison, Margaret und Mary S. Morgan. »Models as Mediating Instruments«. In *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*, hg. v. Mary S. Morgan und Margaret Morrison, 10–37. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1999.
- Morus, Iwan Rhys. »Seeing and Believing Science«. *Isis* 97, Nr. 1 (März 2006): 101–110.
- Mosco, Vincent. *The Digital Sublime: Myth, Power, and Cyberspace*. Cambridge, Massachusetts und London, England: The MIT Press, 2004.
- Müller, Johannes. *Zur Vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes des Menschen und der Thiere*. Leipzig: Cnobloch, 1826.
- *Handbuch der Physiologie des Menschen*, Band 2.2. Coblenz: Holscher, 1838.
- Mulvey, Laura. *Death 24x a Second: Stillness and the Moving Image*. London: Reaktion Books, 2007.
- Murray, J.M. »Confocal Microscopy, Deconvolution, and Structured Illumination Methods«. In *Live Cell Imaging: A Laboratory Manual*, hg. v. Robert D. Goldman, 161–163. Cold Spring Harbor: Cold Spring Laboratory Press, 2010.
- Myers, Natasha. *Rendering Life Molecular: Models, Modelers, and Excitable Matter*. Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2015.
- Naumann-Beyer, Waltraud. »Anschauung«. In *Ästhetische Grundbegriffe*, Studienausgabe, Band 1, hg. v. Karlheinz Barck, Martin Fontius, Dieter Schlenstedt, Burkhardt Steinwachs und Friedrich Wolfzettel, 208–245. Stuttgart: J.B. Metzler, 2010.
- Nesper, Reinhard. »Die chemische Symbolik«. In *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, hg. v. Bettina Heinz und Jörg Huber, 173–186. Zürich: Edition Voldemeer, 2001.
- Nilsson, Lennart. *A Child is Born: The Drama of Life before Birth in Unprecedented Photographs. A Practical Guide for the Expectant Mother*. Aus dem Schwedischen übersetzt von Britt und Claes Wirsen und Annabelle MacMillian. New York: Dell, 1966.
- und Linda Forsell. *Ett Barn Blir Till*, Text von Lars Hamberger und Gudrun Abascal. Stockholm: Bonnier Fakta, 2018.
- Nixon-Abell, Jonathan, Christopher J. Obara, Aubrey V. Weigel, Dong Li, Wesley R. Legant, C. Shan Xu, H. Amalia Pasolli, Kirsten Harvey, Harald F. Hess, Eric Betzig, Craig Blackstone, Jennifer Lippincott-Schwartz. »Increased Spatiotemporal Resolution Reveals Highly Dynamic Dense Tubular Matrices in the Peripheral ER«. *Science*, neue Reihe, 354, Nr. 6311 (2016): 433 und aaf3928-1–aaf3928-12. <https://doi.org/10.1126/science.aaf3928>.
- Nohr, Rolf F. (Hg.). *Evidenz – »...das sieht man doch!«*. Münster: Lit, 2004.
- Nomarski, Georges. »Microinterféromètre Différentiel à Ondes Polarisées«. *Le Journal de Physique et le Radium* 16 (1955): 9–13.
- Ochsner, Beate und Robert Stock. »Vorwort«. In *senseAbility: Mediale Praktiken des Sehens und Hörens*, hg. v. dens., 9–15. Bielefeld: Transcript, 2016.
- Omari, Shakib, Elena Makareeva, Laura Gorrell, Michal Jarnik, Jennifer Lippincott-Schwartz, Sergey Leikin. »Mechanisms of Procollagen and HSP47 Sorting during

- ER-to-Golgi Trafficking«. *Matrix Biology* 93 (2020): 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.matbio.2020.06.002>.
- »Mechanisms of Procollagen and HSP47 Sorting during ER-to-Golgi Trafficking«. *Matrix Biology* 93 (2020): Video 5 (nur Online). <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0945053X20300676-mmc5.mp4>.
- Orgeron, Devin, Marsha Orgeron und Dan Streible (Hg.). *Learning with the Lights Off: Educational Film in the United States*. Oxford: Oxford University Press, 2012.
- Ostherr, Kirsten. *Cinematic Prophylaxis: Globalization and Contagion in the Discourse of World Health*. Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2007.
- »Operative Bodies: Live Action and Animation in Medical Films of the 1920s«. *Journal of Visual Culture* 11, Nr. 3. (2012): 352–377.
- Ott, Michaela. *Affizierung: Zu einer ästhetisch-epistemischen Figur*. München: Textem, 2010.
- Oxford English Dictionary*. »eyeball, v.«. Zuletzt geändert: Dezember 2019. <https://www.oed.com/view/Entry/67302?isAdvanced=false&result=2&rskey=vNb7jf&>.
- »mark, n.1«. Veröffentlicht im Dezember 2020. <https://www.oed.com/view/Entry/114169?isAdvanced=false&result=1&rskey=upHfB2&>.
- Paech, Joachim. »Dispositionen der Einfühlung: Anmerkungen zum Einfluß der Einfühlungs-Ästhetik des 19. Jahrhunderts auf die Theorie des Kinofilms«. In *Der Film in der Geschichte. Dokumentation der GFF-Tagung*, hg. v. Knut Hicketier, Eggo Müller und Rainer Rother, 106–121. Berlin: Edition Sigma, 1997.
- Papenburg, Bettina. »Bewegende Modelle des Lebendigen: Zu epistemischem Vermögen und affektiver Kraft (populär-)wissenschaftlicher Animationsfilme«. In *Im Wandel ... – Metamorphosen der Animation*, hg. v. Julia Eckel, Erwin Feyersinger und Meike Uhrig, 187–210. Heidelberg: Springer, 2017.
- »Das Dokumentarische als Autorisierungsstrategie und als Lektüremodus für bildgebende Verfahren und digitale Animationen in den Lebenswissenschaften«. In *Zur Ästhetik des Gemachten in Animation und Comic*, hg. v. Hans-Joachim Backe, Julia Eckel, Erwin Feyersinger, Véronique Sina und Jan-Noël Thon, 205–219. Berlin: De Gruyter, 2018.
- »Inszenierungen des mikroskopischen Dispositivs im animierten molekularbiologischen Lehrfilm«. In *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 14: *Scientific Fiction. Inszenierungen der Wissenschaft zwischen Film, Fakt und Fiktion*, hg. v. Luisa Feiersinger, 21–29. Berlin: De Gruyter, 2018.
- und Marta Zarzycka (Hg.). *Carnal Aesthetics: Transgressive Imagery and Feminist Politics*. London: I. B. Tauris, 2013.
- Parisi, Luciana. »Technoecologies of Sensation«. In *Deleuze | Guattari & Ecology*, hg. v. Bernd Herzogenrath, 182–199. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2009.
- Petri, Julius Richard. *Das Mikroskop: Von seinen Anfängen bis zur jetzigen Vervollkommnung für alle Freunde dieses Instruments*. Berlin: Schoetz, 1896.
- Pias, Claus. »Das digitale Bild gibt es nicht: Über das (Nicht-)Wissen der Bilder und die informatische Illusion«. *Zeitenblicke* 2, Nr. 1 (2003): o.S. <https://doi.org/10.25969/mediarep/4082>.

- Peirce, Charles S. »Logical Machine«. In *The New Elements of Mathematics*, Band 3.1: *Mathematical Miscellanea*, hg. v. Carolyn Eisele, 625–632. Den Haag und Paris: Mouton Publishers, 1976.
- »What Is a Sign?«. In *The Essential Peirce: Selected Philosophical Writings*, Band 2 (1893–1913), hg. v. Peirce Edition Project, 4–10 (Bloomington, Indiana und Indianapolis: Indiana University Press, 1998).
- Pickering, Andrew. *The Mangle of Practice: Time, Agency and Science*. Chicago und London: University of Chicago Press, 1995.
- Platon. »Sonnen-, Linien- und Höhlengleichnis«. In *Kritik des Sehens*, hg. v. Ralf Konersmann, 51–65. Leipzig: Reclam, 1997.
- Plattner, Helmut und Joachim Hentschel (Hg.). *Zellbiologie* [1997], 5. überarbeitete Auflage. Stuttgart: Thieme, 2017.
- Pollmann, Inga. *Cinematic Vitalism: Film Theory and the Question of Life*. Amsterdam: Amsterdam University Press, 2018.
- Reichle, Ingeborg, Steffen Siegel und Achim Spelten. »Die Wirklichkeit visueller Modelle«. In *Visuelle Modelle*, hg. v. Ingeborg Reichle, Steffen Siegel und Achim Spelten, 9–13. München: Fink, 2008.
- Reichmann, Max, Regie. *Das Blumenwunder*. 1922–1925.
- Rheinberger, Hans-Jörg. *Experiment. Differenz. Schrift*. Marburg: Basiliken-Presse, 1992.
- »Experimentalsysteme, Epistemische Dinge, Experimentalkulturen: Zu einer Epistemologie des Experiments«. *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* 42, Nr. 3 (1994): 405–417. <https://doi.org/10.1524/dzph.1994.42.3.405>.
- »Von der Zelle zum Gen: Repräsentationen der Molekularbiologie«. In *Räume des Wissens: Repräsentation, Codierung, Spur*, hg. v. Hans-Jörg Rheinberger, Michael Hagner und Bettina Wahrig-Schmidt, 265–279. Berlin: Akademie Verlag, 1997.
- *Experimentalsysteme und epistemische Dinge: Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas* [i.O. 1997]. Aus dem Englischen übersetzt von Gerhard Herrgott. Göttingen: Wallstein-Verlag, 2001.
- »Objekt und Repräsentation«. In *Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten*, hg. v. Bettina Heinz und Jörg Huber, 55–61. Zürich: Edition Voldemeer, 2001.
- »Partikel im Zellsaft: Bahnen eines wissenschaftlichen Objekts«. In *Ansichten der Wissenschaftsgeschichte*, hg. v. Michael Hagner, 299–334. Frankfurt am Main: Fischer, 2001.
- »Alles, was überhaupt zu einer Inskription führen kann«. In *Iterationen*, 9–29. Berlin: Merve Verlag, 2005.
- »Transpositions: From Traces through Data to Models and Simulations«. In *Transpositions: Aesthetico-Epistemic Operators in Artistic Research*, hg. v. Michael Schwab, 215–224. Leuven: Leuven University Press, 2018.
- Michael Hagner und Bettina Wahrig-Schmidt (Hg.). *Räume des Wissens: Repräsentation, Codierung, Spur*. Berlin: Akademie Verlag, 1997.
- Riskin, Jessica. *Science in the Age of Sensibility: The Sentimental Empiricists of the French Enlightenment*. Chicago: University of Chicago Press, 2002.

- Rodowick, David Norman. *The Virtual Life of Film*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 2007.
- Rösel von Rosenhof, August Johann. *Insecten-Belustigung*. Nürnberg: Fleischmann, 1736–1752.
- Rötzer, Florian (Hg.). *Digitaler Schein: Ästhetik der elektronischen Medien*. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1991.
- Rose, Jacqueline. *Sexuality in the Field of Vision*. London: Verso, 1986.
- Rosen, Philip. »Old and New: Image, Indexicality, and Historicity in the Digital Utopia«. In *Change Mummified: Cinema, Historicity, Theory*, 301–349. Minneapolis: University of Minnesota Press, 2001.
- Sachs-Hombach, Klaus, John Bateman, Robin Curtis, Beate Ochsner und Sebastian Thies. »Perspektiven: Medienwissenschaftliche Multimodalitätsforschung«. *Medienwissenschaft* 1 (2018): 8–26.
- Sawchuk, Kim. »Biotourism, Fantastic Voyage, and Sublime Inner Space«. In *Wild Science: Reading Feminism, Medicine and the Media*, hg. v. Janine Marchessault und Kim Sawchuk, 9–22. London: Routledge, 2000.
- Schäffner, Wolfgang. »Bewegungslinien: Analoge Aufzeichnungsmaschinen«. In *Electric Laokoon: Zeichen und Medien, von der Lochkarte zur Grammatologie*, hg. v. Michael Franz, Wolfgang Schäffner, Bernhard Siegert und Robert Stockhammer, 130–145. Berlin: Akademie Verlag, 2007.
- Schaffer, Simon. »Natural Philosophy and Public Spectacle in the Eighteenth Century«. *History of Science* xxi (1983): 1–43.
- Schleiden, Matthias. »Beiträge zur Phytogenese«. In *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin*, hg. v. Johannes Müller (1838): 137–176.
- Schlich, Thomas. »Wichtiger als der Gegenstand selbst« – Die Bedeutung des fotografischen Bildes in der Begründung der bakteriologischen Krankheitsauffassung durch Robert Koch«. In *Neue Wege in der Seuchengeschichte*, hg. v. Martin Dinges und Thomas Schlich, 143–174. Stuttgart: Steiner, 1995.
- Schlüter, Herrmann. *Grundkurs der Rhetorik*, 7. Auflage. München: Deutscher Taschenbuch Verlag, 1981.
- Schmidgen, Henning. »Pictures, Preparations, and Living Processes: The Production of Immediate Visual Perception (Anschauung) in Late-19th-Century Physiology«. *Journal of the History of Biology* 37, Nr. 3 (Herbst 2004): 477–513. <https://doi.org/10.1007/s10739-004-2286-x>.
- Schmitz, Sabine und Christine Desel. *Der Experimentator: Zellbiologie*. Berlin: Springer Spektrum, 2018.
- Scholz, Sebastian. »Bilderwelten, welche im Kleinsten wohnen: Vom Medien-Werden der Mikrofotografie zwischen Sichtbarem und Unsichtbarem«. In *Medialisierungen des Unsichtbaren um 1900*, hg. v. Susanne Scholz und Julika Griem, 61–78. Paderborn: Brill, 2010.
- Schrey, Dominik. *Analoge Nostalgie in der digitalen Medienkultur*. Berlin: Kadmos, 2017.

- Schröter, Jens. »Analog/Digital – Opposition oder Kontinuum?«. In *Analog/Digital – Opposition oder Kontinuum? Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung*, hg. v. Alexander Böhnke und Jens Schröter, 7–30. Bielefeld: Transcript, 2004.
- »Das Ende der Welt. Analoge vs. digitale Bilder – mehr oder weniger ›Realität?«. In *Analog/Digital – Opposition oder Kontinuum? Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung*, hg. v. Alexander Böhnke und dems., 335–354. Bielefeld: Transcript, 2004.
- 3D: *Zur Geschichte, Theorie und Medienästhetik des technisch-transplanen Bildes*. München: Fink, 2009.
- »Medienästhetik, Simulation und ›Neue Medien«. In »Medienästhetik«, Themenheft, *Zeitschrift für Medienwissenschaft* 8 (2013): 88–100. <https://doi.org/10.25969/mediarep/702>.
- Schwann, Theodor. *Mikroskopische Untersuchungen über die Übereinstimmung in der Struktur und dem Wachstum der Thiere und Pflanzen*. Berlin: Verlag der Sander'schen Buchhandlung, 1839.
- Seeber, Hans Ulrich. »Ästhetik der Faszination? Überlegungen und Beispiele«. *Anglia: Journal for English Philology* 128, Nr. 2 (2010): 197–224.
- Seel, Martin. »Zur ästhetischen Praxis der Kunst«. *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* 41, Nr. 1 (1993): 31–43,
- »Ästhetik und Aisthetik. Über einige Besonderheiten ästhetischer Wahrnehmung« [1995]. In *Bild und Reflexion. Paradigmen und Perspektiven gegenwärtiger Ästhetik*, hg. v. Birgit Recki und Lambert Wiesing, 17–38. München: Fink, 1997.
- Seigworth, Gregory J. und Melissa Gregg. »An Inventory of Shimmers«. In *The Affect Theory Reader*, hg. v. Melissa Gregg und Gregory J. Seigworth, 1–25. Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2010.
- Shapin, Steven und Simon Schaffer. *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life*. Einschließlich einer Übersetzung von Thomas Hobbes *Dialogus Physicus de Natura Aeris* von Simon Schaffer. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1985.
- Shotton, D.M. »The Current Renaissance in Light Microscopy 1: Dynamic Studies of Living Cells by Video Enhanced Contrast Microscopy«. *Proceedings of the Royal Microscopical Society* 22, Nr. 1 (1987): 37–44.
- Smelik, Anneke. »Tunnel Vision: Inner, Outer, and Virtual Space in Science Fiction Films and Medical Documentaries«. In *Feminism at the Intersections of Media, Bioscience, and Technology*, hg. v. ders. und Nina Lykke, 129–146. Seattle und London: University of Washington Press, 2008.
- Smith, Murray. *Engaging Characters: Fiction, Emotion, and the Cinema*. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- Snow, C.P. *The Two Cultures* [1959]. Mit einer Einleitung von Stefan Collini, 15. Auflage. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2012.
- *Die zwei Kulturen: Literarische und naturwissenschaftliche Intelligenz*. Aus dem Englischen übersetzt von Grete und Karl-Eberhardt Felten. Stuttgart: Klett, 1967.
- Snyder, Joel. »Visualization and Visibility«. In *Picturing Science, Producing Art*, hg. v. Caroline Jones und Peter Galison, 379–297. New York: Routledge, 1998.

- Sobchack, Vivian. *Screening Space: The American Science Fiction Film*. New Brunswick: Rutgers University Press, 1980.
- *The Address of the Eye: A Phenomenology of Film Experience*. Princeton: Princeton University Press, 1992.
 - *Carnal Thoughts: Embodiment and Moving Image Culture*. Berkeley und Los Angeles: University of California Press, 2004.
- Spinoza, Baruch de. *Ethik* [i.O. 1677]. Aus dem Lateinischen übersetzt und mit einer Einleitung und einem Register versehen von Dr. Otto Baensch. Sechste (der neuen Übersetzung erste) Auflage, Philosophische Bibliothek, Band 92. Leipzig: Verlag der Dürr'schen Buchhandlung, 1905.
- Stacey, Jackie. *The Cinematic Life of the Gene*. Durham, North Carolina und London, England: Duke University Press, 2010.
- Stafford, Barbara Maria. *Body Criticism: Imagining the Unseen in Enlightenment Art and Medicine* [1991]. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1993.
- *Artful Science: Enlightenment, Entertainment, and the Eclipse of Visual Education*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1994.
- Stahl, Lina Maria. *Isolieren – Zerlegen – Stillstellen: Zum Verhältnis von Bios und Biologie am Beispiel mikroskopischer Bildgebung*. Paderborn: Fink, 2018.
- »Horizonte der Sichtbarkeit: Astronomische Apparate als Medien der Sichtbarmachung«. In »Objektkulturen der Sichtbarmachung: Instrumente und Praktiken«. Reihe: Junges Forum für Sammlungs- und Objektforschung, Band II, hg. v. der Gesellschaft für Universitätssammlungen, 19–25, Online-Veröffentlichung auf dem edoc-Server der Humboldt-Universität zu Berlin, 2018. <https://doi.org/10.18452/19743>.
- Stelzer, Ernst H.K. »Light-Sheet Fluorescence Microscopy for Quantitative Biology«. *Nature Methods* 12, Nr. 1 (30. Dezember 2014): 23–26. <https://doi.org/10.1038/nmeth.3219>.
- Stephan, Peter F. »Wissen und Nicht-Wissen im Entwurf«. In *Entwerfen – Wissen – Produzieren: Desingforschung im Anwendungskontext*, Claudia Mareis, Gesche Joost und Kora Kimpel, 81–99. Bielefeld: Transcript, 2010.
- Stern, Daniel N. *The Interpersonal World of the Infant: A View from Psychoanalysis and Developmental Psychology* [1985]. London: Karnac Books, 1998.
- Stiller, Christoph, Alexander Bachmann und Andreas Geiger. »Maschinelles Sehen«. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, hg. v. Herrmann Winner, Stephan Hakuli, Felix Lotz und Christina Singer, 369–393. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015.
- Stollfuß, Sven. *Digitale Körperinnenwelten: Endoskopische 3D-Animationen zwischen Medizin und Populärkultur*. Marburg: Schüren, 2014.
- »Animierte Anatomie: Zum Wissen algorithmischer Bewegungsbildlichkeit in der modernen Medizin«. In *In Bewegung setzen...*, hg. v. Franziska Bruckner, Erwin Feyersinger, Markus Kuhn und Maike Sarah Reinert, 149–168. Wiesbaden: Springer, 2017.
- Sturm, Hertha und Christine Altstötter-Gleich. *Fernsehdiktate: Die Veränderung von Gedanken und Gefühlen. Ergebnisse und Folgerungen für eine rezipientenorientierte Mediendramaturgie*. Gütersloh: Bertelsmann, 1991.
- Sturm, Hertha und Hans Bonfadelli (Hg.). *Wie Kinder mit dem Fernsehen umgehen. Nutzen und Wirkung eines Mediums*. Stuttgart: Klett-Cotta, 1979.

- Stuurman, Nico. »Cameras and Photosensitive Detectors I: How do They Work?«. iBiology. Gefilmt im April 2012. Videovortrag, 22:56. <https://www.ibiology.org/talks/photosensitive-detectors/>.
- »Image Acquisition for Quantitative Analysis«. iBiology. Gefilmt im Oktober 2018. Videovortrag, 29:35. <https://www.ibiology.org/techniques/image-acquisition/>.
- und Jason R. Swedlow. »Software Tools, Data Structures, and Interfaces for Microscope Imaging«. *Cold Spring Harbor Protocols*, Nr. 1 (2012): 50–61. <https://doi.org/10.1101/pdb.top067504>.
- und Kurt Thorn. »Cameras and Digital Image Analysis«. iBiology. Gefilmt im April 2013. Videovortrag, 33:40. <https://www.ibiology.org/talks/digital-image-analysis/>.
- Suh, Christine. »Movie Magic«. *HHMI Bulletin* (November 2010): 31–33.
- Talbot, William Henry Fox. *The Pencil of Nature*. London: Longman, Brown, Green and Longmans, 1844. <https://www.gutenberg.org/files/33447/33447-pdf.pdf>. Online gestellt am 16. August 2010.
- Tan, Ed S. *Emotion and the Structure of Narrative Film*. Mahwah, N.J.: Erlbaum, 2011.
- Tedjasukmana, Chris. *Mechanische Verlebendigung: Ästhetische Erfahrung im Kino*. München: Fink, 2014.
- The Lancet. »The Royal Society Conversazione«. *The Lancet* (19. Juni 1897): 1706.
- The Nobel Prize. »The Nobel Prize in Physics 1953«. Outreach AB. Zuletzt geprüft: 24. September 2021. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1953/summary/>.
- »The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1965«. Outreach AB. Zuletzt geprüft: 8. Oktober 2021. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1965/summary/>.
- »The Nobel Prize in Chemistry 2008«. Outreach AB. Zuletzt geprüft: 14. September 2021. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2008/summary/>.
- The Royal Society. »Robert Hooke«. *The Royal Society: Science in the Making*. Zuletzt geprüft: 10. Februar 2021. <https://making-science.royalsociety.org/s/rs/people/fst00009590>.
- Thielmann, Tristan und Erhard Schüttpelz (Hg.). *Akteur-Medien-Theorie*. Bielefeld: Transcript, 2013.
- Thorn, Kurt. »Optical Sectioning and Confocal Microscopy«. iBiology. Gefilmt im Juni 2009. Video Vortrag, 24:46. <https://www.ibiology.org/talks/confocal-microscopy/>.
- »Two-Photon Microscopy«. iBiology. Gefilmt im April 2012. Videovortrag, 31:14. <https://www.ibiology.org/talks/two-photon-microscopy/>.
- Tomkins, Silvan S. *Affect, Imagery, Consciousness*, 2 Bände. New York: Springer, 1962–1963.
- Tosi, Virgilio. *Cinema Before Cinema: The Origins of Scientific Cinematography* [i.O. 1984]. Aus dem Italienischen übersetzt von Sergio Angelini. London: British Universities Film and Video Council, 2005.
- Tsien, Roger. »Fluorescent Proteins and the Story Behind GFP«. iBiology. Gefilmt im Mai 2012. Videovortrag, 34:36. <https://www.ibiology.org/talks/fluorescent-proteins/>.
- Tsvian, Yuri. »Media Fantasies and Penetrating Vision: Some Links between X-Rays, the Microscope, and Film«. In *Laboratory of Dreams: The Russian Avant-Garde and Cultural Experiment*, hg. v. John E. Bowlt und Olga Matich, 81–99. Stanford: Stanford University Press, 1996.

- Turing, Alan M. »The State of the Art«. In *Intelligence Service. Schriften*, hg. v. Bernhard Dotzler und Friedrich Kittler, 183–208. Berlin: Brinkmann und Bose, 1987.
- Uricchio, William. »The Algorithmic Turn: Photosynth, Augmented Reality and the State of the Image«. *Visual Studies* 26, Nr. 1 (2001): 25–35. <https://doi.org/10.1080/1472586X.2011.548486>.
- Vale Lab. »Vale Lab«. Zuletzt geprüft: 2. September 2021. <https://valelab.ucsf.edu/>.
- Vale, Ron. »Historical Contributions from Light Microscopy: What Can You Learn with a Light Microscope?«. iBiology. Gefilmt im März 2012. Videovortrag, 19:23. <https://www.ibiology.org/talks/light-microscopy/>.
- van Benthum van den Berg, Godfried, Maarten Cornelis Brands und Ernst Mulder (Hg.). *Three Cultures: Fifteen Lectures on the Confrontation of Academic Cultures*. Den Haag und Rotterdam: Universitaire Pers Rotterdam, 1989.
- van Dijk, José. *The Transparent Body: A Cultural Analysis of Medical Imaging*. Seattle und London: University of Washington Press, 2005.
- »Picturizing Science: The Science Documentary as Multimedia Spectacle«. *International Journal of Cultural Studies* 9, Nr. 1 (2006): 5–24.
- van Leeuwenhoek, Antoni. Brief 139 vom 14. September 1694. Adressiert an Richard Waller. In *Alle de Brieven van Antoni van Leeuwenhoek: Een volledige Uitgave van Leeuwenhoeks Werken, toegelicht en gezien in het Perspectief van de Geschiedenis der Wetenschappen en Geneeskunde, in het bijzonder met betrekking tot de algemene en biologische Mikroskopie* [Niederländisch – Englisch], hg. unter Schirmherrschaft der Leeuwenhoek-Gesellschaft der Königlichen Niederländischen Akademie der Wissenschaften und Künste, Band 10 (1694–1695), hg. v. L. C. Palm, 144–151. Lisse: Swets und Zeitlinger, 1979.
- Brief Nr. 204 (119) vom 25. September 1699. Adressiert an die Royal Society. In *Alle de Brieven van Antoni van Leeuwenhoek: De volledige werken van Van Leeuwenhoek, uitgegeven en toegelicht onder de Auspiciën van de Leeuwenhoek-Commissie der Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen* [Niederländisch – Englisch], hg. unter Schirmherrschaft der Leeuwenhoek-Gesellschaft der Königlichen Niederländischen Akademie der Wissenschaften und Künste, Band 12 (1696–1699), Hg. L. C. Palm, 334–353 (Lisse: Swets und Zeitlinger, 1989).
- Vehilken, Sebastian. *Zootechnologien: Eine Mediengeschichte der Schwarmforschung*. Zürich: Diaphanes, 2012.
- »The Great Pacific Garbage Catch: Müll als Medium einer ›Plastic Oceanography‹«. In »Zirkulation«, Themenheft, *Zeitschrift für Medienwissenschaft* 23 (2020): 84–98. <https://doi.org/10.25969/mediarep/14836>.
- Virchow, Rudolf. »Cellular-Pathologie«. *Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medizin* 8 (1855): 3–39.
- Vogl, Joseph. »Medien-Werden: Galileis Fernrohr«. In *Mediale Historiographien*, hg. v. Lorenz Engell und Joseph Vogl, 115–124. Weimar: Universitäts-Verlag, 2001.
- »Becoming Media: Galilei's Telescope«. Aus dem Deutschen übersetzt von Brian Hanrahan. In »New German Media Theory«, hg. v. Eva Horn, Themenheft, *Grey Room* 29 (Herbst 2007): 14–25. <https://doi.org/10.1162/grey.2007.1.29.14>.

- Voss, Christiane. »Fiktionale Immersion«. *Montage AV* 17, Nr. 2 (2008): 69–86. <https://doi.org/10.25969/mediarep/301>.
- Wahlberg, Malin. »Wonders of Cinematic Abstraction: J.C. Mol and the Aesthetic Experience of Science Film«. *Screen* 47, Nr. 3 (Herbst 2006): 273–289. <https://doi.org/10.1093/screen/hjl022>.
- Watson, James D. und Francis H.C. Crick. »Molecular Structure of Nucleic Acids«. *Nature* 171 (1953): 737–738.
- Webb, W.W. »Light Microscopy: A Modern Renaissance«. *Annals of the New York Academy of Science* 483 (Dezember 1986): 387–391. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1986.tb34547.x>.
- Weingart, Brigitte. »Viren visualisieren: Bildgebung und Popularisierung«. In *Virus! Mutationen einer Metapher*, hg. v. Ruth Mayer und ders., 98–130. Bielefeld: Transcript, 2004.
- »Blick zurück: Faszination als »Augenzauber««. In *Es trübt mein Auge sich in Glück und Licht: Über den Blick in der Literatur*. Festschrift für Helmut J. Schneider zum 65. Geburtstag, hg. v. Kenneth S. Calhoun, Eva Geulen, Claude Haas und Nils Reschke, 188–205. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2010.
- »Contact at a Distance: The Topology of Fascination«. *Rethinking Emotion: Interiority and Exteriority in Premodern, Modern, and Contemporary Thought*, hg. v. Rüdiger Campe und Julia Weber, 72–100. Berlin: De Gruyter, 2014.
- »Faszinieren«. In *Historisches Wörterbuch des Mediengebrauchs*, hg. v. Heiko Christians, Matthias Bickenbach und Nikolaus Wegmann, 209–224. Köln, Weimar und Wien: Böhlau, 2015.
- Weiss, Dieter G. »Video Enhanced Contrast Microscopy«. In *Cell Biology: A Laboratory Handbook*, hg. v. J. E. Celis, 3. Auflage, 99–109. San Diego: Academic Press, 1998.
- »Das neue Bild der Zelle: Wechsel der Sichtweisen in der Zellbiologie durch neue Mikroskopieverfahren«. In *Visualisierung und Erkenntnis: Bildverstehen und Bildverwenden in Natur- und Geisteswissenschaften*, hg. v. Dimitri Liebsch und Nicola Mößner, 295–328. Köln: Herbert von Halem Verlag, 2012.
- Weizsäcker, Carl Friedrich von. »Vorwort« zu *Die Logik des Lebenden: Von der Urzeugung zum genetischen Code* von François Jacob, 5–7. Aus dem Französischen übersetzt von Jutta und Klaus Scherrer. Frankfurt am Main: Fischer, 1972.
- Wellmann, Janina. »Bewegung an der Wand: Zur Aufführung von Organismen mit dem Sonnenmikroskop«. In *Bildwelten des Wissens: Kunsthistorisches Jahrbuch für Bildkritik*, Band 14: *Scientific Fiction. Inszenierungen der Wissenschaft zwischen Film, Fakt und Fiktion*, hg. v. Luisa Feiersinger, 10–20. Berlin: De Gruyter, 2018.
- Welsch, Wolfgang. *Aisthesis: Grundzüge und Perspektiven der aristotelischen Sinneslehre*. Stuttgart, Klett-Cotta, 1987.
- »Erweiterungen der Ästhetik. Eine Replik«. In *Bild und Reflexion: Paradigmen und Perspektiven gegenwärtiger Ästhetik*, hg. v. Birgit Recki und Lambert Wiesing, 39–67. München: Fink, 1997.
- *Ästhetisches Denken* [1990], 5. Auflage. Stuttgart: Reclam, 1998.

- Wenzel, Horst und Ludwig Jäger (Hg.), in Zusammenarbeit mit Robin Curtis und Christina Lechtermann. *Deixis und Evidenz*. Freiburg im Breisgau, Berlin und Wien: Rombach, 2008.
- Werner, Gabriele. »Bilddiskurse: Kritische Überlegungen zur Frage, ob es eine allgemeine Bildtheorie des naturwissenschaftlichen Bildes geben kann«. In *Das Technische Bild: Kompendium zu einer Stilgeschichte wissenschaftlicher Bilder*, hg. v. Horst Bredekamp, Birgit Schneider und Vera Dünkel, 30–35. Berlin: Akademie Verlag, 2008.
- White, Hayden. *Metahistory: The Historical Imagination in Nineteenth-Century Europe*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1973.
- *Metahistory: Die historische Einbildungskraft im 19. Jahrhundert*. Aus dem amerikanischen Englisch übersetzt von Peter Kohlhaas. Frankfurt am Main: Fischer, 1994.
- Wiener, Norbert. »Time, Communication, and the Nervous System«. *Annals of the New York Academy of Sciences* 50 (Oktober 1948): 197–219 <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1948.tb39853.x>.
- Wilton, Andrew. *Turner and the Sublime*. Chicago: University of Chicago Press, 1980.
- Wikipedia. »4K (Bildauflösung)«. Zuletzt geändert: 8. April 2021. [https://de.wikipedia.org/wiki/4K_\(Bildaufl%C3%B6sung\)](https://de.wikipedia.org/wiki/4K_(Bildaufl%C3%B6sung)).
- »Differentialinterferenzkontrast«. Zuletzt geändert: 15. Februar 2018. <https://de.wikipedia.org/wiki/Differentialinterferenzkontrast>.
- »Laser-Scanning-Mikroskop«. Zuletzt geändert: 4. Juli 2018. <https://de.wikipedia.org/wiki/Laser-Scanning-Mikroskop>.
- »Phasenkontrastmikroskopie«. Zuletzt geändert: 23. Oktober 2020. <https://de.wikipedia.org/wiki/Phasenkontrastmikroskopie>.
- »Visual Inspection«. Zuletzt geändert: 23. Oktober 2020. <https://de.wikipedia.org/wiki/Phasenkontrastmikroskopie>.
- Wilson, Catherine. *The Invisible World: Early Modern Philosophy and the Invention of the Microscope*. Princeton und New Jersey: Princeton University Press, 1995.
- Winkler, Hartmut. *Basiswissen Medien*. Frankfurt am Main: Fischer, 2008.
- »Prozessieren: Die dritte, vernachlässigte Medienfunktion«. Vortrag auf der Tagung: Media Theory in North America and German-Speaking Europe, 8.–10. April 2010, University of British Columbia, Vancouver. http://homepages.uni-paderborn.de/winkler/proc_d.pdf. Zuletzt geprüft: 1. Juli 2021.
- Wolf, Mark J. P. »Subjunctive Documentary: Computer Imaging and Simulation«. In *Collecting Visible Evidence*, hg. v. Michael Renov und Jane Gaines, 274–292. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1999.
- Wollen, Peter. *Signs and Meaning in the Cinema*. Bloomington, Indiana: Indiana University Press, 1998.
- Wyss, Beat. »Das indexikalische Bild: Hors-texte«. *Fotogeschichte* 20, Nr. 76 (2000): 3–11.
- Zarzycka, Marta und Bettina Papenburg (Hg.). »Motion Pictures: Politics of Perception«. Themenheft, *Discourse: Journal for Theoretical Studies in Media and Culture* 35, Nr. 2 (Frühling 2014).
- Zernike, Frits. »Das Phasenkontrastverfahren bei mikroskopischen Beobachtungen«. *Zeitschrift für Technische Physik*, Nr. 16 (1935): 454–457.

Zhuang, Xiaowei. »Super-Resolution Fluorescence Microscopy«. iBiology. Gefilmt im Juli 2011. Videovortrag, 1:18:17. <https://www.ibiology.org/biophysics/super-resolution/>.
Zooniverse. »Backyard Worlds: Planet 9«. Zuletzt geprüft: 6. April 2021. <https://www.zooniverse.org/projects/marckuchner/backyard-worlds-planet-9/about/research>.