



FAU Studien aus dem Maschinenbau 349

**Thomas Sander**

Ein Beitrag zur Charakterisierung  
und Auslegung des Verbundes von  
Kunststoffsubstraten mit harten  
Dünnschichten





Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von  
Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten

# **FAU Studien aus dem Maschinenbau**

## **Band 349**

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Thomas Sander

**Ein Beitrag zur Charakterisierung  
und Auslegung des Verbundes von  
Kunststoffsubstraten mit harten  
Dünnschichten**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk)  
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Erlangen  
FAU University Press  
2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bitte zitieren als

Sander, Thomas. 2020. *Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten*. FAU Studien aus dem Maschinenbau 349.  
Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-331-1.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.  
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.  
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:  
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:  
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-330-4 (Druckausgabe)  
eISBN: 978-3-96147-331-1 (Online-Ausgabe)  
ISSN: 2625-9974  
DOI: 10.25593/978-3-96147-331-1

**Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung  
des Verbundes von Kunststoffsubstraten  
mit harten Dünnschichten**

Der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Thomas Sander

aus Nürnberg

Als Dissertation genehmigt  
von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen

Prüfung: 16.12.2019

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack  
Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner,  
TU Darmstadt

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand größtenteils während meiner Tätigkeit als Akademischer Rat am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit. Seine Förderung und das mir entgegen gebrachte Vertrauen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner der TU Darmstadt für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Weidinger für die Mitwirkung in der Prüfungskommission als fachfremdes Mitglied sowie dem Prüfungsvorsitzenden Herrn Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp.

Schon im Studium verstand es Prof. Dr.-Ing. Harald Meerkamm meine Faszination für die Lösung von technischen Problemstellungen zu wecken. Die anschließende Arbeit am Lehrstuhl mit der Übertragung geeigneter Aufgaben, Projekte und Verantwortung erweiterte meinen Horizont maßgeblich. Vielen Dank für die Energie, das Vertrauen und das Vorleben eines stets konsequenten, ehrlichen und herzlichen Führungsstils.

Die wissenschaftlichen Arbeiten in der Abteilung Maschinenelemente mit dem Forschungsschwerpunkt der tribologischen PVD-/PACVD-Schichten am Lehrstuhl werden maßgeblich durch die Leitung von Dr.-Ing. Stephan Tremmel geprägt. Beginnend mit einer vorbildlichen Grundausbildung während des Studiums bis zur wissenschaftlichen Betreuung konnte ich mich stets auf seine fundierten und konstruktiven Ratschläge verlassen, wofür ich mich sehr bedanke.

Mein herzlicher Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen, welche neben der angenehmen Arbeitsatmosphäre insbesondere durch die zahlreichen konstruktiven fachlichen Diskussionen, den guten Zusammenhalt, die Hilfsbereitschaft und Zuverlässigkeit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders hervorheben möchte ich hier Thilo Breitsprecher, Günther Rabenstein, Thomas Rathert, Benjamin Schleich, Tobias Sprügel, Gabi Stingl, Andreas Stockinger, Evelyn Weyrich und Christian Witzgall. Innerhalb der Forschungsgruppe möchte ich mich besonders bei Harald Hetzner, Julia Kröner, Bernd Vierneusel, Tim Weikert und Ute Wolf für die gute Zusammenarbeit bedanken. Sehr bedanken möchte ich mich bei

meinen Bürokollegen Georg Gruber, Julia Husch, Kristian Mauser, Philipp Ziegler und Edgar Schulz, welche stets mit sehr gutem Zusammenhalt und Rücksicht füreinander da waren.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Michael Walter für die jahrelange gute Zusammenarbeit und die stets motivierende Art und Hingabe für die Arbeit. Die aus der Tischnachbarschaft gewachsene Freundschaft schätze ich sehr.

Vielen Dank an alle Studierenden, welche mich in Forschung und Lehre unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich Astrid Ehret, Philipp Gesell, Sebastian Heckner, Fabian Mühldorfer, Jörg Riedel, Johannes Sparrer, Matthias vom Busch, Susan Kett und Kerstin Hansen.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken. Ohne die Unterstützung und die Motivation meiner Eltern Ursula und Ullrich, meiner Schwiegereltern Ruth und Kevin, meines Bruders Oliver sowie meiner Freunde Franziska, Peter und Stephan wäre diese Arbeit nicht entstanden.

Größter Dank gilt meiner Frau Nathalie sowie unseren Kindern Frederik, Benedikt und Judith. Die Geduld und die Entbehrung der zahlreichen Stunden und Tage, welche zur Fertigstellung dieser Arbeit notwendig waren, weiß ich sehr zu schätzen.

Nürnberg, im Dezember 2019

Thomas Sander

# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis .....	ix
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemstellung .....	2
1.3 Aufgabenstellung und Forschungsziel .....	3
<b>2 Stand der Forschung und Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1 Grundlagen der Tribologie und tribotechnische Systeme .....	5
2.2 PVD-/PACVD-Beschichtungsverfahren.....	7
2.3 Dünne Hartstoffschichten.....	8
2.3.1 Schichtbildung .....	8
2.3.2 Schichtsysteme .....	9
2.3.3 Schichthaftung .....	10
2.3.4 Struktur .....	12
2.4 Beschichtung von Kunststoffsubstraten .....	13
2.4.1 Anwendungsgebiete .....	13
2.4.2 Besonderheiten bei der PVD-/PACVD-Beschichtung.....	14
2.5 Entwicklungsmethoden und Auslegungskonzepte tribologisch beschichteter Bauteile .....	15
2.6 Mehrachsige Spannungszustände und Vergleichsspannungen .....	20
2.7 Charakterisierungsverfahren.....	22
2.7.1 Indentierungsverfahren.....	22
2.7.2 Ritztest .....	25
2.8 Statistische Versuchsplanung: Latin Hypercube Sampling .....	27
2.9 Metamodelle .....	28
2.9.1 Response Surface Methodology (RSM).....	28
2.9.2 Künstliche Neuronale Netze .....	29
2.9.3 Gütekriterien .....	30
<b>3 Verbreitung und Bedarf an Charakterisierungsverfahren in der Industrie.....</b>	<b>33</b>
3.1 Vorgehensweise der Unternehmensbefragung .....	33
3.2 Auswertung der Unternehmensbefragung .....	34
3.2.1 Schichthaftung .....	35
3.2.2 Härte, Duktilität und elastische Eigenschaften .....	36

3.2.3	Zufriedenheit mit Prüfmethoden und Verbesserungspotentiale .....	36
3.3	Zusammenfassung .....	37
<b>4</b>	<b>Konzept zur Kennwertermittlung und Auslegung .....</b>	<b>39</b>
4.1	Ableitung des Handlungsbedarfes zur Beantwortung der Forschungsfrage .....	39
4.2	Vorgehensweise.....	40
4.3	Ermittlung der elastischen Parameter .....	43
4.3.1	Auswahl der Indentergeometrie .....	44
4.3.2	Direkte Auswertung mit FE-Ergebnissen.....	45
4.3.3	Einsatz eines Metamodells .....	45
4.3.4	Ermittlung der elastischen Substratparameter.....	47
4.3.5	Signifikanztest.....	48
4.4	Modifizierter Ritztest .....	48
4.4.1	Grenzen des genormten Ritztests.....	49
4.4.2	Problemanalyse und theoretische Betrachtung .....	51
4.4.3	Modifikationen .....	53
4.5	Auslegung .....	54
4.5.1	Mehrachsiges Spannungsanalyse .....	54
4.5.2	Tragfähigkeitsnachweis.....	54
<b>5</b>	<b>Angewandte Verfahren und Methoden .....</b>	<b>57</b>
5.1	Mikroskopie.....	57
5.1.1	Lichtmikroskop.....	57
5.1.2	Laserrastermikroskop.....	57
5.2	Schichtdicke .....	57
5.2.1	Kalottenschliff.....	57
5.2.2	Schrägschliff.....	58
5.3	Rauheit .....	59
5.4	Instrumentierte Eindringprüfung – Indentierung.....	60
5.5	Ritztest .....	61
5.6	Stift-Scheibe-Tribometer .....	63
5.7	Biegemodul.....	65
5.8	Probenkonditionierung.....	66
5.9	Finite-Elemente-Simulation .....	66
5.9.1	Finite-Elemente-Simulation der Indentierung.....	66
5.9.2	Finite-Elemente-Simulation des Ritztests.....	68
5.10	Statistische Versuchsplanung mittels Latin Hypercube Sampling.....	72

5.11	Signifikanztest .....	73
5.12	Metamodelle .....	75
5.12.1	Response Surface Methodology.....	75
5.12.2	Künstliche Neuronale Netze .....	75
<b>6</b>	<b>Verifizierung der Verfahren zur Ermittlung des Schicht- Elastizitätsmoduls.....</b>	<b>77</b>
6.1	Verifizierung der Finite-Elemente-Indentierungssimulationen .....	77
6.2	Verifizierung und Vergleich der Metamodelle.....	81
6.2.1	Response Surface Methodology (RSM).....	81
6.2.2	Künstliche Neuronale Netze .....	82
6.2.3	Vergleich der Metamodelle.....	84
6.3	Sensitivität der Indentierungsparameter .....	84
<b>7</b>	<b>Ergebnisse der Methode zur Ermittlung des Schicht- Elastizitätsmoduls.....</b>	<b>89</b>
7.1	Anwendung der Methode.....	89
7.1.1	Probekörper .....	89
7.1.2	Substrateigenschaften .....	90
7.1.3	Schichteigenschaften .....	92
7.2	Verifizierung der elastischen Eigenschaften mittels Biegeprüfstand .....	94
7.3	Konventionelle Messung des Eindringmoduls durch direkte Indentierung .....	98
7.4	Auswertung, Diskussion und Grenzen der Methode .....	99
7.4.1	Substrateigenschaften .....	99
7.4.2	Diskussion und Auswahl des Lageparameters .....	100
7.4.3	Genauigkeit der Ergebnisse im Vergleich zur Referenz.....	101
7.4.4	Betrachtung der Signifikanz als Akzeptanzkriterium .....	103
7.4.5	Genauigkeit bei der Verwendung der Metamodelle .....	106
<b>8</b>	<b>Ergebnisse des modifizierten Ritztests.....</b>	<b>109</b>
8.1	Experimentelle Ergebnisse des modifizierten Ritztests .....	109
8.1.1	Proben .....	109
8.1.2	Ergebnisse und Diskussion .....	109
8.2	Diskussion und Verifizierung der FE-Simulationen.....	115
8.3	Einfluss der Parameter auf den modifizierten Ritztest .....	118
8.3.1	Einfluss von Indenterradius und -form .....	118
8.3.2	Einfluss der Reibungszahl zwischen Schicht und Indenter.....	120
8.3.3	Einfluss der Schichtdicke .....	121
8.3.4	Einfluss des Schicht-Elastizitätsmoduls .....	123

8.4	Mehrachsige Spannungsanalyse.....	125
8.4.1	Auswertung und Zuordnung der Versagenserscheinungsformen mit deren Entstehung .....	125
8.4.2	Parametereinflüsse .....	128
<b>9</b>	<b>Leichtbaupotential für Kunststoffbauteile durch angepasste Schichten .....</b>	<b>133</b>
9.1	Verringerung von Durchbiegungen .....	133
9.2	Gezielte Anpassung der Eigenfrequenzen.....	135
9.3	Wirtschaftlichkeit .....	136
<b>10</b>	<b>Potential beschichteter Kunststoffe für Wälzlagerkäfige .....</b>	<b>139</b>
10.1	Tribologische Systemanalyse .....	140
10.1.1	Reibungskontakte an Wälzlagerkäfigen.....	140
10.1.2	Werkstoffe .....	141
10.1.3	Schmierstoff .....	143
10.1.4	Pressungen bei unterschiedlichen Prüfmodi .....	143
10.2	Ergebnisse und Diskussion .....	143
10.3	Bewertung.....	149
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>151</b>
<b>12</b>	<b>Summary and outlook .....</b>	<b>155</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>159</b>
	Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen .....	174
	Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten* .....	176

# Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Formelzeichen</i>	<i>Beschreibung</i>
$A$	Element
$A_c$	Kontaktfläche zwischen Indenter und Probenoberfläche
$a$	Kontaktradius
$a_c$	Kontaktradius
$B$	Beanspruchungskollektiv
$CoD$	Determinationskoeffizient
$CoP$	Coefficient of Prognosis
$D$	Probengesamtdicke (Schicht und Substrat)
$D'$	vergrößerte Probengesamtdicke
$d$	Schichtdicke
$d'$	vergrößerte Schichtdicke
$d_w$	Durchmesser des Verschleißsegmentes
$E$	Elastizitätsmodul
$E_C$	Schicht-Elastizitätsmodul
$E_{IT}$	Eindringmodul
$E_S$	Elastizitätsmodul des Substrates
$E_S^*$	Ersatz Elastizitätsmodul des Substrates
$F$	Kraft, Last
$F_N$	Normalkraft
$g$	Erdbeschleunigung
$h$	Eindringtiefe
$h_w$	Höhe des Verschleißsegmentes
$H_o$	Hypothese
$H_1$	Gegenhypothese
$I_C$	Flächenträgheitsmodul der Schicht
$I_S$	Substrat-Flächenträgheitsmodul
$k$	Polynomordnung
$k^*$	Ersatz Fließgrenze des Substrates
$L$	Probenlänge
$l$	Auflagerabstand
$L_C$	Kritische Normalkraft
$LBK_Z$	Leichtbaukennzahl für Zugbelastung

<b>Formelzeichen</b>	<b>Beschreibung</b>
$M$	Moment
$M_b$	Biegemoment
$n$	Anzahl der Versuche, Stichprobengröße
$n_\beta$	Mindestanzahl an Experimenten
$P$	Elementeigenschaften
$p$	Druck
$p$	Anzahl der Variablen
$q$	Mehrachsigkeitsquotient
$R$	Wechselwirkungen
$R$	Radius
$r$	Indenterradius
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$Ra$	Arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten
$S$	Struktur des Tribosystems
$S$	Spannungstensor
$S$	Kontaktsteifigkeit
$S$	Sicherheit
$s$	Standardabweichung
$s$	Durchmesser einer Umfangslinie beim Kalottenschliff
$s_G$	Gitterabstand
$SS_E$	Unerklärbare Variation
$SS_T$	Variation der Gesamtwerte
$SS_R$	Variation aufgrund der Residuen
$T$	Temperatur
$T$	Gesamttiefe der Kugelkalotte
$t$	Tiefe der Kugelkalotte im Substrat
$t$	Zeit
$t$	Prüfgröße des Signifikanztests
$t_B$	Beanspruchungsdauer
$t_c$	Schichtdicke
$V$	Vergrößerungsfaktor
$W_V$	Volumetrischer Verschleißbetrag
$w$	Durchbiegung
$X$	Eingangsgröße
$x_i$	Eingangsvariablen

<b>Formelzeichen</b>	<b>Beschreibung</b>
$Y$	Ausgangs- oder Nutzgröße
$y$	Zielgröße
$Z$	Verlustgrößen
$\alpha$	Einbettwinkel
$\alpha$	Signifikanzniveau
$\beta$	Korrekturfaktor
$\beta$	Regressionskoeffizient
$\varepsilon$	Dehnung
$\sigma_m$	Mittlere Normalspannung (hydrostatische Spannung)
$\sigma_b$	Biegespannung
$\sigma_C$	Oberflächenenergie der Beschichtung
$\sigma_S$	Oberflächenenergie des Substrates
$\sigma_V$	Vergleichsspannung
$\sigma_{Z,ertr}$	Ertragbarer Festigkeitskennwert für Zugbelastung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen
$\mu$	Reibungszahl
$\mu$	Mittelwert der Grundgesamtheit
$\rho$	Dichte
$\tau$	Schubspannung
$\tau_{red}$	Reduzierte Schubspannung
$\nu$	Querdehnzahl

***Indizes***

1, 2, 3, ...

a

B

C

eff

F

f

GEH

GF

GL

i

I

krit

max

min

NH

r

reg

SH

sp

z

***Beschreibung***

Zählindex

außen

Lokal, an einem bestimmten Betriebspunkt

Im Kontaktbereich

Effektiv

Fließgrenze

Unbelastet

Gestaltänderungshypothese

Glasfaserverstärkt

Gleitlack

Indenter

Innen

Kritisch

Größte, maximale

Kleinste, minimale

Normalspannungshypothese

Radial

Regulatorisch gefordert

Schubspannungshypothese

gesputtert

Kontaktrichtung

**Abkürzungen**

**Beschreibung**

a-C	Amorpher Kohlenstoff
AG	Aktiengesellschaft
ASA	Acrylester-Styrol-Acrylnitril
CD	Compact Disk
CAE	Computer-aided Engineering
CAX <sub>4</sub>	Elementtyp (4 Knoten)
CAX <sub>4</sub> R	Elementtyp (4 Knoten, reduzierte Ansatzfunktion)
CAX8	Viereckelement (bilineare Ansatzfunktion)
Cr	Chrom
CrN	Chromnitrid
CVD	Chemische Gasphasenabscheidung
DLC	Amorpher Kohlenstoff (diamond like carbon)
DVD	Digital Video Disc oder Digital Versatile Disc
E-Modul	Elastizitätsmodul
Et al.	Und andere (et alii, et aliae, et alia)
Fa.	Firma
FAU	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HRC	(Indenter zur) Härtebestimmung nach Rockwell-C
Kfz	Kraftfahrzeug
KNN	Künstliches Neuronales Netz(werk)
KT <sub>mfk</sub>	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der FAU Erlangen-Nürnberg ( <i>mfk</i> : Maschinenelemente und fertigungsgerechtes Konstruieren)
LHS	Latin Hypercube Sampling
MoS <sub>2</sub>	Molybdändisulfid
PA	Polyamid
PACVD	Plasmagestützte chemische Gasphasenabscheidung (plasma-assisted chemical vapor deposition)

***Abkürzungen***

PECVD

PET

PTFE

PVD

RSM

SFB

SiC

SST

Standardabw.

Ti

TiCN

TiN

VA

VDI

WC

3D

***Beschreibung***

Plasmagestützte chemische Gasphasenabscheidung (plasma-enhanced chemical vapor deposition)

Polyethylenterephthalat

Polytetrafluorethylen

Physikalische Dampfphasenabscheidung (physical vapor deposition)

Response Surface Methodology

Sonderforschungsbereich

Siliziumcarbid

Stift-Scheibe-Tribometer

Standardabweichung

Titan

Titancarbonitrid

Titannitrid

Rostfreier Stahl

Verein Deutscher Ingenieure

Wolframcarbid

Dreidimensional

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Kunststoffe haben in den vergangenen Jahrzehnten einen rasanten Aufstieg in vielfacher Hinsicht gezeigt; in erster Linie wirtschaftlich durch den starken Anstieg des weltweiten Verbrauches [1]. Die konsequente Forschung und (Weiter-) Entwicklung sowie die Erschließung unterschiedlichster Anwendungsbereiche [2] führten jedoch auch dazu, dass sich das Image verbessern konnte. Dominierten in den Köpfen noch vor wenigen Jahren überwiegend das „Billigimage“ und Problematiken wie Umweltverschmutzung, Recycling oder mangelnde Inertheit (zum Beispiel durch Weichmacher), sind Kunststoffe nunmehr so fester Bestandteil des Alltages, dass primär der Nutzen und die Einsatzgebiete in den Vordergrund des Bewusstseins rücken [3].

Aus technischer Sicht eignen sich Kunststoffbauteile aufgrund der Gestaltungsfreiheit, der großen Bandbreite wählbarer Materialparameter und der geringen Dichte des Werkstoffes für zahlreiche Anwendungsgebiete, insbesondere auch Leichtbaulösungen. Die Beschichtung der Oberflächen von Kunststoffbauteilen erfolgt üblicherweise zur Änderung der Oberflächeneigenschaften oder zur Integration weiterer Funktionen, wie etwa der Bildung von Diffusionsbarrieren, dekorativer oder optischer Manipulationen sowie der Möglichkeit zur Datenspeicherung oder direkten Integration von Sensoren.

Durch die Trennung der Funktionen von Oberfläche und Grundbauteil können die jeweiligen Vorteile aus dem Schichtwerkstoff an der Oberfläche und dem Substratmaterial kombiniert werden. Der Produktentwickler erhält durch die funktionale Schicht, als maßgeschneidertes Konstruktionselement [4], in Verbindung mit dem universell anpassbaren Kunststoff ein sehr großes Portfolio, um den vielfältigen und unterschiedlichen Anforderungen an ein Bauteil mit dessen technischer Oberfläche gerecht zu werden.

Tribologische Anforderungen rücken auch bei beschichteten Kunststoffen immer stärker in den Vordergrund. Zum einen die Reduzierung oder gezielte Einstellung von Reibung, welche insbesondere für energieeffiziente und ressourcenschonende Produkte notwendig ist; zum anderen die Reduzierung von Verschleiß an der Oberfläche, wie sie beispielsweise bei Touch-Displays von Smartphones oder der Verwendung von Kunststoffrahmen

und -gehäusen mit dekorativ relevanten Schichten zum Einsatz kommen. Denn auch der alltägliche Gebrauch, beispielsweise durch die Handhabung, die Aufbewahrung zusammen mit anderen Gegenständen oder die Reinigung von Konsumgütern, stellt nicht unerhebliche tribologische Ansprüche an die Oberfläche.

Die nutzbaren Synergien von tribologisch optimierten und ausgelegten Bauteilen in Kombination mit der Massereduktion durch Gestaltung in Leichtbauweise sind bestechend. So verbessern die verringerten Massen, insbesondere bei bewegten Teilen, die Belastung auf das tribologische System, was wiederum eine Massereduktion der Lagerstellen und Gesamtstruktur des Systems möglich macht. Zum anderen können neben der direkten Energieersparnis oftmals kleinere Antriebe eingesetzt oder aktive Schmiersysteme vermieden werden. [5]

## 1.2 Problemstellung

Für harte Dünnschichten auf Metallen oder Keramiken stehen zahlreiche Prüfmethode zur Verfügung, welche größtenteils genormt und in Wissenschaft und Praxis etabliert sind. Die sehr geringen Schichtdicken in Kombination mit dem verhältnismäßig weichen Kunststoff als Substratwerkstoff machen jedoch zahlreiche herkömmliche Materialtests zur mechanischen Charakterisierung von Schicht-Substrat-Verbunden unbrauchbar und sind hierfür auch nicht genormt. Somit bleiben in der Praxis oftmals lediglich Tests zur Bestimmung der Gebrauchstauglichkeit im direkten Vergleich mehrerer Muster. Für einen generellen Vergleich sind diese Tests jedoch meist zu abhängig von den Umgebungsbedingungen und der Durchführung der Tests und liefern daher kein zufriedenstellendes Ergebnis.

Eine allgemeine Herausforderung an die Entwicklung von Schicht-Substrat-Verbunden stellt die fehlende Herangehensweise zu deren Auslegung auf Basis von Modelluntersuchungen und Berechnungen mit einem Festigkeitsnachweis als Ergebnis. Während bei der strukturellen Auslegung von beispielsweise Stahlbauteilen allgemein anerkannte und genormte Modellversuche zur Bestimmung von Beanspruchungsgrenzen der Werkstoffe mit zahlreichen analytischen und numerischen Berechnungsmethoden existieren, ist dies für beschichtete Bauteile nicht oder nur sehr eingeschränkt der Fall. Zwar sind viele Schichten auf Nano- und Mikroebene erforscht und viele tribologische Mechanismen und werkstoffwissenschaftliche Zusammenhänge bereits bekannt; das Bindeglied zur Produktentwicklung – insbesondere durch Abstimmung mit Beschichtungstechnologen, Tribologen

beziehungsweise Applikationsspezialisten – findet jedoch oftmals zum falschen Zeitpunkt und in unzureichender Art und Weise statt. Hier werden meist Annahmen aus Erfahrungswerten, stark vereinfachende Überschlagsrechnungen – wie etwa ein Vergleich der Oberflächenpressungen – für eine erste, oftmals überdimensionierte, Auslegung herangezogen. Der eigentliche Festigkeitsnachweis erfolgt (wenn überhaupt) durch Probenmuster im Modellversuch oder bemusterte Bauteile im Komponentenversuch. Potentiale zur Material- und Masseinsparung bleiben hierdurch weitestgehend unerkannt und werden nicht genutzt, da eine iterative Annäherung an das Optimierungsziel durch die notwendige Fertigung von mehreren Substratkörpern mit anschließender Beschichtung und Prüfung sehr zeit- und kostenintensiv ist.

### **1.3 Aufgabenstellung und Forschungsziel**

Ziel der Forschungsarbeit ist eine systematische Charakterisierung und Auslegung von beschichteten Systemen mit Schwerpunkt auf harten Dünnschichten auf Kunststoffsubstraten. Hierbei soll eine Brücke von den meist werkstoffwissenschaftlichen, chemischen oder physikalischen Betrachtungen an solchen Verbunden und an den zugehörigen Beschichtungsprozessen hin zur Integration im Bauteil für ein optimales Produkt geschlagen werden. Der gezielte und angepasste Einsatz der beteiligten Beschichtungs- und Applikationsspezialisten, Tribologen, Simulanten sowie Produktentwicklern ist eine essentielle Voraussetzung für eine effiziente Vorgehensweise.

Diese Arbeit behandelt im Kern folgende Frage: Wie kann eine Vorgehensweise zur Auslegung der Tragfähigkeit von Verbunden mit Kunststoffsubstraten und harten Dünnschichten die beteiligten Domänen an geeigneter Stelle in den Entwicklungsprozess auf der Ebene des tribologischen Systems mit Blick auf die Produkteigenschaften integrieren und wie müssen hierfür Testverfahren, Simulationen und Modelle angewendet und angepasst werden, um weitverbreitetes Testequipment nutzen zu können?

Hierfür stehen im Rahmen dieser Arbeit folgende Punkte im Fokus:

- Entwicklung einer Vorgehensweise zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Schicht-Substrat-Systemen mit Bestimmung der elastischen Eigenschaften von Substrat und Schicht
- Auswahl und Entwicklung angepasster Prüfmethode zur Charakterisierung von harten Dünnschichten auf weichen Substratmaterialien, wie etwa Polymeren.

- Ermittlung des Elastizitätsmoduls der Schichten mit einem kombinierten Verfahren aus Indentierung und numerischen Berechnungen. Durch die Verwendung von Metamodellen kann nach Bildung einer Datenbasis auf die numerische Berechnung verzichtet und der Elastizitätsmodul nach den experimentellen Messungen schnell anhand von Regressionsmodellen ermittelt werden.
- Ermittlung der mechanischen Grenzen des Schicht-Substrat-Verbundes durch Ritzschädigung. Durch Modifikationen des Indenters und einer entsprechenden Testsstrategie bei Ritztests können fortan komplexe Spannungszustände gezielt erzeugt und anschließend die Belastungen, die Versagensmechanismen sowie die Entstehungspositionen den Versagensarten qualitativ und quantitativ zugeordnet werden.
- Nachbildung der Beanspruchungen zum Zeitpunkt der Schädigung mithilfe von numerischen Simulationen der Finite-Elemente-Methode (FEM).
- Bestimmung der Versagensgrenzen der Werkstoffe im Verbund und Darstellung im HENCKY-Diagramm.
- Illustration der Auswirkungen von Parametermodifikationen des Systems sowie der Belastung auf die Schichtbeanspruchung und Schicht-Substrat-Auslegung.
- Untersuchung der Einflüsse der dünnen Schichten auf die Steifigkeit und die Eigenfrequenzen des gesamten Bauteils.

Für das Anwendungsgebiet der beschichteten Wälzlagerkäfige werden die tribologischen und funktionalen Potentiale für harte und tribologisch relevante Schichten erörtert und gängigen Käfigwerkstoffen gegenübergestellt.

## 2 Stand der Forschung und Technik

### 2.1 Grundlagen der Tribologie und tribotechnische Systeme

Tribologie ist nach DIN 50323 [6] die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung und umfasst das Gesamtgebiet von Reibung, Verschleiß, Schmierung und Grenzflächenwechselwirkungen. Sie trägt durch Minderung von Verschleiß und Optimierung von Reibungsbedingungen zur Senkung des Energiebedarfs und zur Schonung von Ressourcen bei. [7]

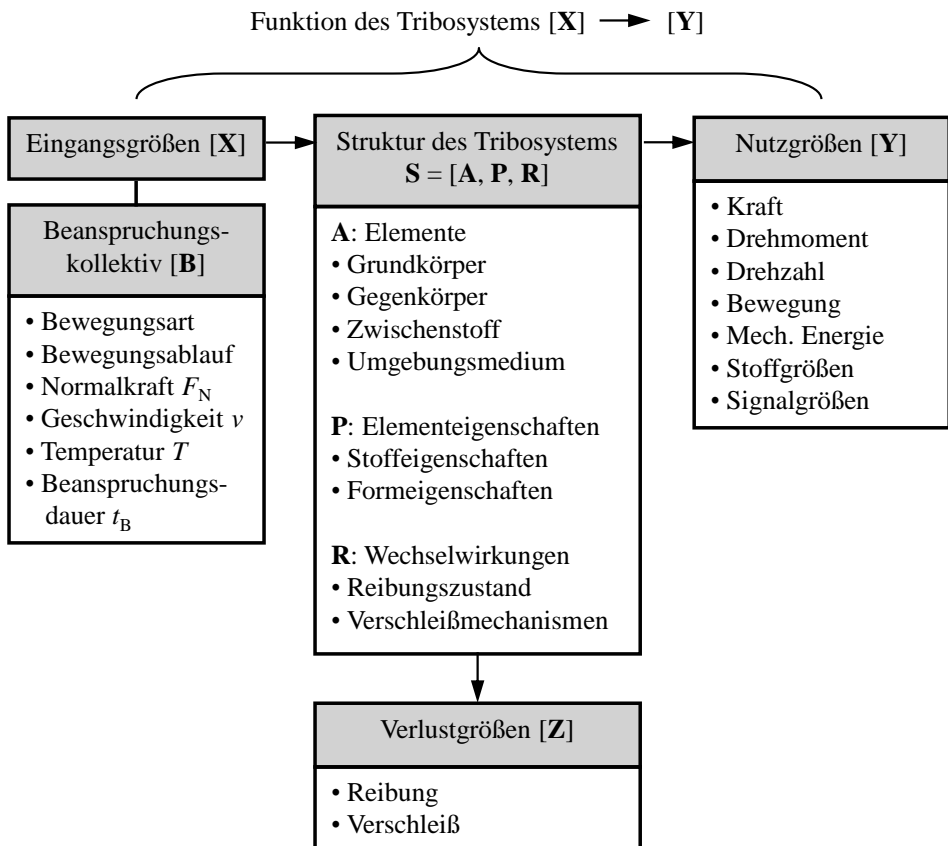


Bild 1: Schematische Darstellung eines tribologischen Systems, ergänzt nach [7, 8]

Tribotechnische Systeme können in die zwei Hauptparametergruppen *Funktion* und *Struktur* unterteilt werden und sind durch eine Vielzahl an

Parametern und Einflussgrößen gekennzeichnet [9]. Um Aussagen über ein System und dessen Verhalten treffen zu können, wird zunächst das Gesamtsystem analysiert, was nach DIN 50320 [10] folgende vier Grundschritte umfasst:

1. Kennzeichnung der technischen Funktion des Tribosystems
2. Angabe des Beanspruchungskollektivs
3. Kennzeichnung der Struktur des Tribosystems durch
  - a) die an Reibung und Verschleiß beteiligten Elemente
  - b) die relevanten Eigenschaften der Elemente
  - c) die Wechselwirkungen der Elemente
4. Angabe von Reibungs- und Verschleißkenngrößen

Durch die gewonnenen Parameter kann anschließend die in Bild 1 dargestellte Funktion aufgestellt und so das tribologische System allgemein beschrieben werden.

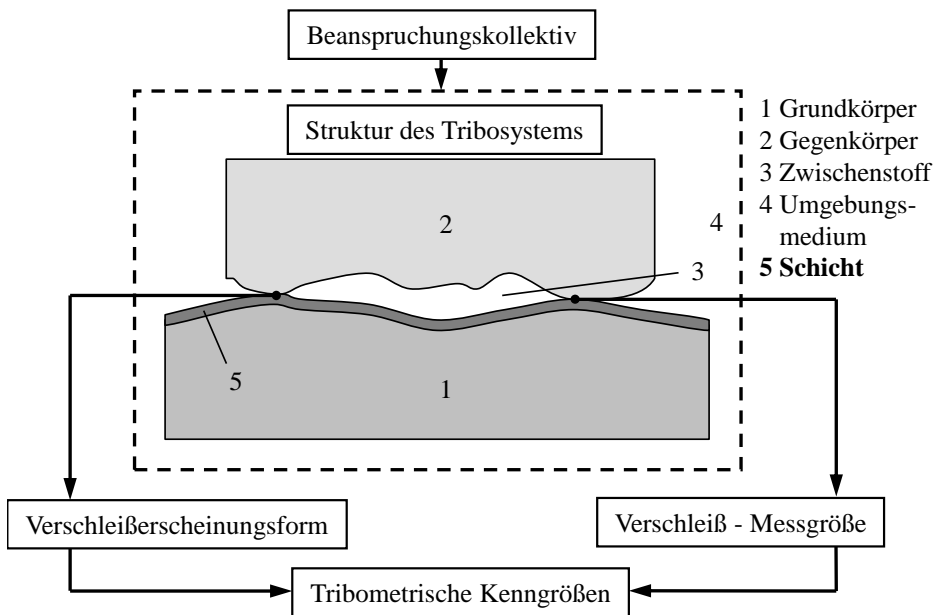


Bild 2: Tribosystem mit beschichteter Systemkomponente nach [9]

In der Struktur von Tribosystemen werden gewöhnlich die vier Elemente *Grundkörper*, *Gegenkörper*, *Zwischenstoff* und *Umgebungsmedium* unterschieden. Bei besonderer Berücksichtigung kommt die *Schicht* als fünftes Element hinzu. So wurde auch die allgemeine Darstellung eines

tribologischen Systems aus DIN 50320 [10] durch MUSAYEV [9] um die *Schicht* ergänzt, welches in Bild 2 dargestellt ist.

## 2.2 PVD-/PACVD-Beschichtungsverfahren

Die Physikalische Dampfphasenabscheidung (kurz: PVD; engl.: physical vapor deposition) bezeichnet das Aufbringen dünner Schichten durch physikalische Überführung des Beschichtungsmaterials in die Dampfphase und anschließender Kondensation auf einer Oberfläche. Ausgehend vom in fester Form vorliegenden Beschichtungswerkstoff, dem Target, werden durch intensiven Energieeintrag die Bindungen an der Oberfläche aufgebrochen und das Beschichtungsmaterial in Form von Molekülen, Atomen oder Ionen emittiert. Diese Beschichtungsteilchen fliegen über den Gasraum zu der Oberfläche des zu beschichtenden Bauteils, dem Substrat, und bilden dort durch Kondensation erneut eine dünne Feststoffschicht. Der gesamte Prozess (schematisch dargestellt in Bild 3) findet üblicherweise im Vakuum statt, um eine Verunreinigung der Schichten durch unerwünschte Atome (insbesondere Sauerstoff und Wasserdampf) zu vermeiden und den Teilchentransport durch die Gasphase zu erleichtern. Stöße der emittierten Beschichtungsteilchen an Fremdatomen führen zu einer Reduzierung der Energie und einer zusätzlichen Streuung. Beides vermindert nach [11] in der Regel die Schichtqualität und das Schichtwachstum.

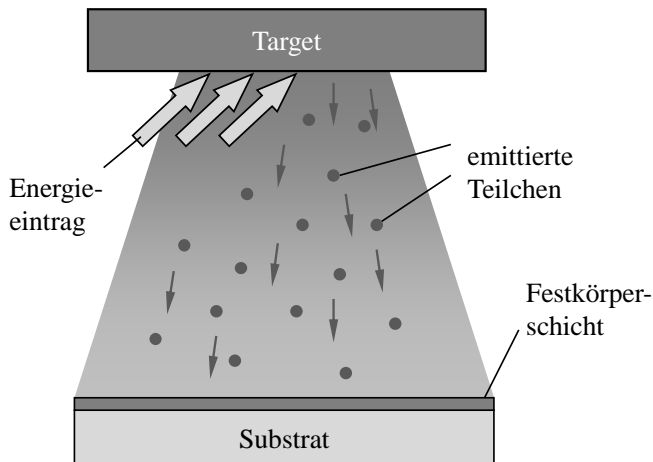


Bild 3: Prinzip der physikalischen Dampfphasenabscheidung

Hierbei sind die wichtigsten PVD-Verfahren das Vakuumlichtbogenverdampfen [12], das Sputtern [13], die Puls laserdeposition [14] und das einfache Bedampfen [15]. Darüber hinaus existieren zahlreiche Varianten, wie gefilterte Verfahren [16] zur Reduktion oder Vermeidung von

Makropartikeln [17], ionengestützte Abscheidung [11], reaktive Verfahren zur Integration nichtmetallischer Schichtkomponenten sowie hybride Verfahren. Bei hybriden Verfahren sei an dieser Stelle besonders die plasma-gestützte chemische Gasphasenabscheidung (PACVD von plasma-assisted chemical vapor deposition oder PECVD von plasma-enhanced CVD) hervorgehoben. Hierbei wird zwischen dem kathodischen Substrat und einer Anode (beziehungsweise der anodischen Kammerwand auf Erdpotential) eine elektrische Glimmentladung gezündet. Über die leitfähigen Substratoberflächen bildet sich konturgetreu der sogenannte Glimmsaum und die Substratumgebung wird durch Stoßprozesse im Reaktivgas in eine Plasmawolke gehüllt. Beim PACVD-Verfahren sind nach [18] im Vergleich zum herkömmlichen CVD-Verfahren niedrigere Drücke von 0,5 bis 5 mbar üblich, welche jedoch im Vergleich zu PVD-Verfahren noch moderat sind [19]. Die realisierbaren Beschichtungstemperaturen von unter 200 °C machen die Plasmaunterstützung vor allem für die Beschichtung von Leichtmetallen, Kunststoffen und gehärteten Stählen attraktiv. Weitere Vorteile sind die großen Beschichtungschichten und die konturgetreue Beschichtung komplexer Bauteile, da sich mit geringen Einschränkungen auch Bohrungen, Spalte und Hinterschneidungen beschichten lassen.

## 2.3 Dünne Hartstoffschichten

Die beschriebenen Beschichtungsverfahren dienen in erster Linie der Abscheidung dünner Schichten auf festen, meist metallischen Substraten. Der Begriff „dünne Schichten“ wird in unterschiedlichen Fachbereichen mit variierenden Definitionen verwendet. In der Vakuumbeschichtungstechnik werden damit in der Regel Schichten mit Dicken von maximal 10 µm bezeichnet [20], was auch der Definition in dieser Arbeit entspricht.

### 2.3.1 Schichtbildung

Die Abscheidung von Schichten kann bei ausschließlich physikalischer Betrachtung des Wachstums durch die Menge der ankommenden Teilchen, welche auf der Oberfläche haften und dem Abtrag bereits vorhandener Teilchen beschrieben werden. Dabei ist nach [21] die Wechselwirkung eines eintreffenden Teilchens mit der Oberfläche von zahlreichen Einflussgrößen abhängig. So wird die Interaktion durch die eintreffenden Teilchen beeinflusst mit deren Masse, Geschwindigkeit, energetischer Anregung, Auftreffwinkel und Teilchenstromdichte, während die Substratoberfläche durch Material, Temperatur, Rauheit und Oberflächenbedeckung beschrieben wird. Die Wechselwirkungen werden aus rein physikalischer

Sicht anhand der Energie der schichtbildenden oder -abtragenden Teilchen beschrieben und nach [22] in vier Mechanismen eingeteilt:

- Adsorption beziehungsweise Kondensation für niedrig energetische Teilchen mit  $< 1$  eV
- Einlagerung (Subplantation) für 1 bis 10 eV
- Zerstäuben (Sputtern) für  $10^2$  bis  $10^4$  eV
- Implantation für hochenergetische Teilchen  $> 10^4$  eV

Insbesondere bei den reaktiven Schichtabscheidungen müssen die chemischen Wechselwirkungen zusätzlich berücksichtigt werden [7]. Wird durch die Prozessparameter der Anteil gesputterter Teilchen größer als der Anteil haftender Teilchen, wird die Schicht beziehungsweise die Substratoberfläche abgetragen. Dieser Effekt wird sowohl zum gezielten Zerstäuben des Targetwerkstoffes beim Sputtern, als auch zur Oberflächenbehandlung des Substrates in Form von Plasmaätzen oder Oberflächenaktivierungen angewandt.

### 2.3.2 Schichtsysteme

Schichten können im einfachsten Fall einlagig auf dem Substrat abgeschieden oder aber als Schichtsystem mit teilweise komplexem Aufbau konzipiert werden. Dabei kann wiederum jede Einzelkomponente des Systems einphasig als Reinelement oder mehrphasig, zum Beispiel als Legierung oder mit amorpher Struktur, produziert werden. Bild 4 zeigt gängige Schichtvarianten, die nach [23] in Industrie und Forschung Anwendung finden und für Kohlenstoffschichten in DIN 4855 [24] genormt sind.

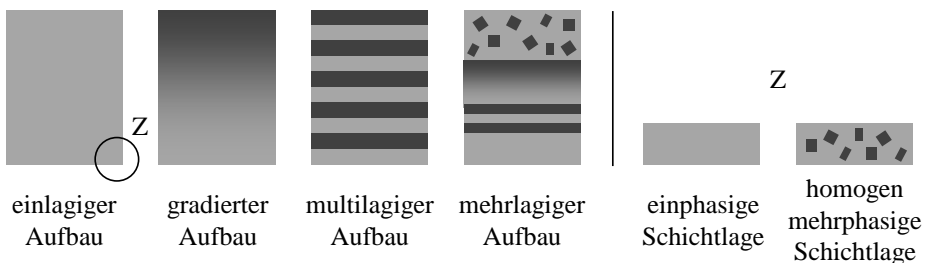


Bild 4: Typen von Schichtarchitekturen (links) und Ausführungen von Schichtlagen (rechts) nach DIN 4855 [24]

Die bedeutendsten Gründe für die Bildung teilweise sehr komplexer Schichtsysteme sind:

- der Ausgleich unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten,

- das Stoppen von Rissbildungen an Schnittstellen,
- die Reduzierung von Eigenspannungen,
- die Erhöhung der Elastizität,
- die Bildung von Diffusionsbarrieren,
- die Haftung zwischen den Schichtkomponenten und
- die gezielte Einstellung optischer Eigenschaften.

### 2.3.3 Schichthaftung

Die Haftung zwischen Schicht und Substrat beziehungsweise auch zwischen zwei Schichtlagen wird durch unterschiedliche Mechanismen ermöglicht, welche bei verschiedenen Schichtpaarungen oder unterschiedlichen Beschichtungsparametern wechseln können. Bild 5 zeigt fünf Haftungsarten, die einzeln oder auch in Mischformen auftreten.

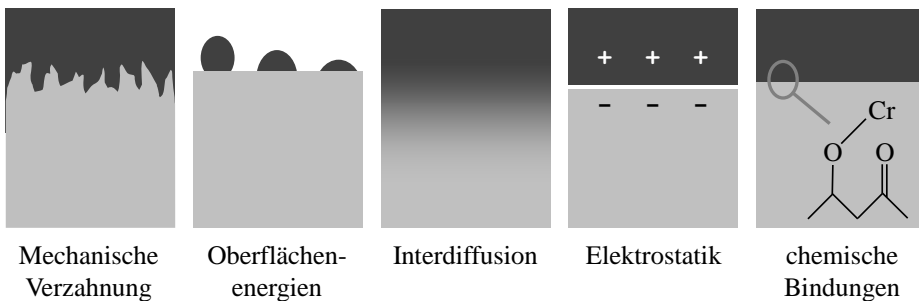


Bild 5: Mechanismen der Schichthaftung

Durch **mechanische Verzahnungen** werden nach [25] und [26] vorrangig die Grenzfläche und somit auch die für die Wechselwirkungen und die Bindungsenergien verantwortliche Kontaktfläche zwischen den Partnern erhöht. Eine Verzahnung im Sinne eines Formschlusses ist nur in sehr speziellen Fällen, unter anderem durch gezielte Ätzprozesse, realisierbar. Bei großer Rauheit entsteht zudem die Gefahr eines säulenförmigen Schichtwachstums aufgrund von Abschattungseffekten [27], welche die Kohäsion innerhalb der Schicht schwächt.

Anhand der **Oberflächenenergie** eines Körpers kann dessen Benetzbarkeit und Adsorptionsrate, in Verbindung mit anderen Kontaktpartnern bestimmt werden [26]. Vergleicht man die Oberflächenenergie  $\sigma_s$  des Substrates und die Oberflächenenergie  $\sigma_c$  der Beschichtung, soll für eine gute Benetzbarkeit  $\sigma_s > \sigma_c$  gelten. Über die Oberflächenenergie kann auch der

spätere Kontakt zwischen Schicht und anderen Medien untersucht werden [28]. Dies ist von besonderem Interesse, wenn beispielsweise hydrophobe Schichten erzeugt werden sollen.

Bei der **Interdiffusion** wird von einer Zone ausgegangen, in der beide Kontaktmaterialien als Legierung miteinander vereint vorliegen [26]. Dies setzt im Kontakt zwischen Schicht und Substrat hohe Temperaturen voraus. Zwischen zwei unterschiedlichen Schichtlagen genügt meist ein gradierter Übergang der beiden Beschichtungsquellen. Die Interdiffusion kann zu erheblichen Verbesserungen der Schichthaftung führen [29].

Insbesondere bei hohen Beanspruchungen und der Trennung von Gefügen spielen **elektrostatische Wechselwirkungen** eine wichtige Rolle [26]. Zwischen Festkörpern bildet sich im Gleichgewicht eine elektrische Doppelschicht, aus welcher Anziehungskräfte zwischen den Randzonen resultieren [30]. Beim Zerreißen von Kristallen und Gittern entstehen labile elektrische Oberflächenzustände und elektrostatisch aufgeladene Bezirke, welche erst allmählich durch die elektrostatische Leitfähigkeit und Gasentladung neutralisiert werden [31]. Aus dieser Potentialdifferenz, entlang der geladenen Doppelschicht resultieren elektrostatische Kräfte, welche zur Adhäsionsfestigkeit beitragen.

Die primären Haftungsmechanismen zwischen Schicht und Substrat sind **chemische Bindungen** [26]. Die Haftung wird durch interatomare beziehungsweise intermolekulare Kräfte zwischen den Kontaktpartnern hergestellt, die stark von den zwischenmolekularen Abständen abhängen. Hohe Bindungsenergien wie etwa durch kovalente Atombindungen, Metall-, Ionen- oder Komplexbindungen, setzen kleine Gitterabstände  $s_G$  von wenigen Å voraus und nehmen mit zunehmendem Abstand rapide ab. Weitere mögliche, jedoch schwächere zwischenmolekulare Kräfte sind VAN-DER-WAALS-Kräfte, Wasserstoffbrückenbindungen und Dispersionswechselwirkungen [30].

Die beschriebenen Haftungsmechanismen werden nach [25] in der Regel durch Verunreinigungen der Substratoberfläche drastisch eingeschränkt oder komplett verhindert. Rückstände von vorangegangenen Fertigungsschritten wie Öle, Fette, Kühlmittel, Reinigungsmittel aber auch bei Normalatmosphäre kontinuierlich nachbildende Oxide beeinträchtigen die Ausbildung der Haftmechanismen und müssen durch geeignete Reinigungs-, Ätz- und Konditionierungsverfahren beseitigt oder zumindest reduziert werden [32].

### 2.3.4 Struktur

Abhängig von den Prozessrandbedingungen sowie der chemischen Zusammensetzung von Substrat und Gasphase, der Energie der einfallenden Teilchen und Restgasatomen wächst die Schicht auf dem Substrat auf. Grundsätzlich überwiegen bei Beginn der Schichtbildung Desorptions-, Kondensations-, und Diffusionsvorgänge, wobei diese stark von der Abscheidetemperatur abhängen [33]. Hierzu wurden mehrere Modelle bezüglich des Schichtwachstums entwickelt, welche die Schichtstruktur in Abhängigkeit von Beschichtungsparametern beschreiben.

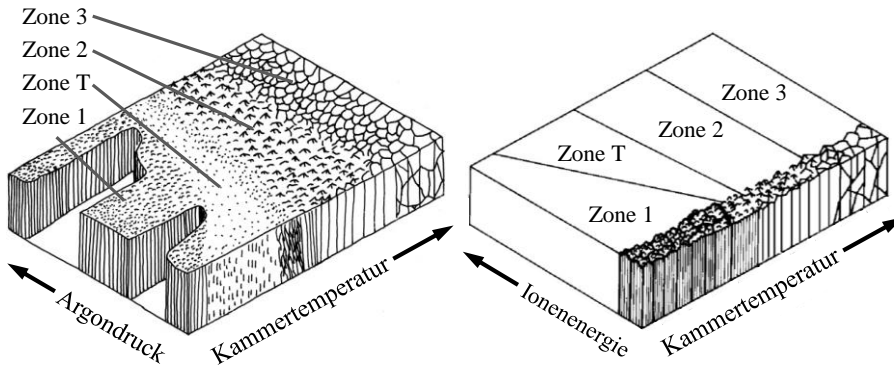


Bild 6: Strukturzonenmodelle nach THORNTON [34] (links) und MESSIER et al. [35] (rechts)

Das erste Strukturzonenmodell, in der die Schichtstruktur in Abhängigkeit von der Temperatur gezeigt wird, stammt von MOVCHAN und DEMCHISHIN [36] und wurde von THORNTON [34, 37] durch den Prozessgasdruck erweitert. Die Adatome (lose an die Oberfläche gebundene Beschichtungsatome) haben bei niedrigen Temperaturen eine geringere laterale Beweglichkeit auf der Oberfläche, können Abschattungen nicht ausgleichen und bilden eine poröse, dendritische Struktur mit kuppelförmigen Enden, welche in Bild 6 links durch die Zone 1 dargestellt wird. Mit steigender Temperatur und Beweglichkeit der Adatome entsteht eine dicht gepackte Stengel- oder auch Kolumnarstruktur (Zone 2) mit ausgeprägten Korngrenzen, frei von Fehlstellen [19]. Ab einer Abscheidetemperatur größer als der halben Schmelztemperatur des Schichtwerkstoffes kommt es zunehmend zu Volumendiffusion. Dies führt zu einer rekristallisierten Struktur (Zone 3) mit glatter Oberfläche und hoher Packungsdichte. Mit abnehmendem Druck bildet sich die breiter werdende Übergangszone T aus, welche ein faserförmiges Gefüge mit glatter Oberfläche aufweist und mit fallendem Druck die Zone 1 verdrängt. Dies ist auf die höhere durchschnittliche

kinetische Energie und die damit verbundene bessere Beweglichkeit der kondensierenden Teilchen zurückzuführen. Abschattungseffekte auf der Substratoberfläche können so leichter ausgeglichen werden als bei hohen Drücken [38].

Eine Weiterentwicklung der Strukturzonenmodelle erfolgte durch MESSIER et al. [35] mit der Berücksichtigung von negativen Substratbiasspannungen, welche – im Falle ionisierter Teilchen – ebenfalls die kinetische Energie und die Beweglichkeit der Adatome steigern. Die Autoren bezeichneten die Achse mit der „Biasspannung“, gaben jedoch die Einheit eV (Energie) an. Demnach lassen sich in der Fachliteratur auch unterschiedliche Achsenbeschriftungen finden. Während [38] den Einfluss der reinen Biasspannung hervorheben, kombiniert [33] das Substratbias mit dem Druck und betrachtet die Ionenenergie, wie es auch in Bild 6, rechts übernommen wurde. Für diese Arbeit besonders relevant ist die Erkenntnis, dass sich neben der Erhöhung der Temperatur die Übergangszone T auch durch den Ionenbeschuss (Anlegen von Biasspannung) in einem größeren Prozessfenster bildet, welche aufgrund der glatten Oberfläche und der geringen Fehlstellen angestrebt wird.

## 2.4 Beschichtung von Kunststoffsubstraten

Die Jahresproduktion von Kunststoffen ist in den letzten Jahrzehnten rasant gewachsen [39]. Gründe für das Wachstum dieser Werkstoffklasse sind die vielfältigen Vorteile des Werkstoffs. Aus technischer Sicht sind dies beispielsweise die gute Einstellbarkeit der Materialparameter in einem weiten Bereich, leichte und kostengünstige Herstellung, Freiheiten in der Formgebung, Korrosionsbeständigkeit, gute Spanbarkeit, geringe Dichte sowie die guten mechanischen und akustischen Dämpfungseigenschaften.

### 2.4.1 Anwendungsgebiete

Werden Kunststoffprodukte beschichtet, so kann dies vielfältige Gründe haben. Nachfolgend findet sich eine Auflistung der gängigsten Anwendungen und Beispiele.

- Dekorative Anwendungen für Konsumgüter (metallisierte Gehäuseteile an Mobilfunktelefonen, Kaffeemaschinen, Speichermedien, Kfz-Kühlergrills, Radkappen, etc.)
- Verschleißschutzschichten an Konsumgütern (Touchdisplays)
- Schicht zur Datenspeicherung (CD, DVD, Blu-ray Disks)

- Beeinflussung des Reflexions- oder Transmissionsverhaltens bei optischen Produkten (Brillengläser, Optiken, Fassaden, Reflektoren, Spiegel, etc.)
- Bildung einer Diffusionsbarriere in der Lebensmittel- und Verpackungsindustrie (z.B. metallisierte Folienverpackungen für Kaffee, Chips usw., Gasdichtheit bei PET-Flaschen)
- Elektromagnetische Anwendungen (metallisierte Folienverpackungen und Gehäuse zur Steigerung der elektromagnetischen Verträglichkeit)
- Steigerung der Inertheit und Biokompatibilität von Medizinprodukten (Prothesen und Operationsinstrumente)

Insbesondere bei dekorativen Anwendungen ist festzustellen, dass sowohl die Lebensdauer der Produkte mit uneingeschränkter dekorativer Funktion als auch die Belastbarkeit bis es zu optisch sichtbaren Schäden kommt, sehr unterschiedlich sind. Leider finden sich auch in mittel- bis hochpreisigen Produktsegmenten immer wieder Bauteile, deren Schicht bereits nach kurzer Zeit zerkratzt, abgewetzt oder abgewischt sind und somit deren eigentliche Funktion zumindest teilweise nicht mehr erfüllen. Dies zeigt, dass die tribologischen Anforderungen an Produktoberflächen im alltäglichen Gebrauch wie etwa im leichten Kontakt mit anderen Gegenständen oder Textilien sowie der Reinigung häufig nicht ausreichend gestellt und verifiziert sind oder im Rahmen der Produktentwicklung und -bemusterung schlichtweg unterschätzt beziehungsweise übergangen werden.

#### **2.4.2 Besonderheiten bei der PVD-/PACVD-Beschichtung**

Harte Dünnschichten sind meist für eine Abscheidung auf metallischen oder keramischen Substraten entwickelt. Bei der Beschichtung von Kunststoffen stellen die erforderlichen niedrigen Prozesstemperaturen eine Herausforderung dar, um ein plastisches Erweichen oder Schmelzen der Substrate zu vermeiden. Wie in Abschnitt 2.3.4 erläutert, hat die Temperatur andererseits erheblichen Einfluss auf die sich ausbildende Schichtstruktur.

Auch die elektrische Leitfähigkeit muss in diesem Kontext für den Beschichtungsprozess berücksichtigt werden. Da nur in Ausnahmefällen elektrisch leitfähige Kunststoffe verwendet werden, sind das Anlegen einer Biasspannung, die Nutzung von PACVD oder auch von galvanischen Prozessen nicht ohne weiteres möglich. Abhilfe kann neben der Verwendung

eines leitfähigen Kunststoffs auch die Aufbringung elektrisch leitfähiger Schichten durch Verdampfen, Sputtern oder auch Lackieren schaffen.

Kunststoffe können durch häufig enthaltene niedrigmolekulare Bestandteile (wie beispielsweise Wasser, Chlorwasserstoff, Alkohole, Farbstoffe oder Weichmacher) eine eingeschränkte Vakuumentauglichkeit aufweisen und im Vakuum ausgasen, verspröden, aufquellen oder aufschäumen. Mögliche Folgen für den Schicht-Substrat-Verbund sind die Beschädigung des Substrates sowie eine undefinierbare Schichtzusammensetzung mit verminderter Qualität. Auch Verunreinigungen und/oder Beschädigungen in der Beschichtungskammer und dem Pumpstand sind möglich. Die Machbarkeit der Beschichtung von Kunststoffen unter Vakuumbedingungen kann durch Auswahl von geeigneten vakuumfesten Kunststoffen, einer Reduzierung der niedermolekularen Bestandteile bei der Substratproduktion [40], das Auslagern bestimmter Bestandteile zum Beispiel im Vakuumtrockenschrank, das Aufbringen von Barrierschichten sowie der Anpassung der Prozessparameter erreicht werden.

## **2.5 Entwicklungsmethoden und Auslegungskonzepte tribologisch beschichteter Bauteile**

Wird ein Bauteil durch eine tribologische Schicht veredelt, so sind derzeit mehrere Herangehensweisen üblich, welche im Folgenden näher diskutiert werden.

Eine Schicht oder ein Schichtsystem kann initial speziell für den jeweiligen Anwendungsfall entwickelt werden. Diese maßgeschneiderten Schichten können genau auf die vorliegenden Anforderungen eingestellt werden, bieten ein angepasstes Leistungspotential für die gestellten Randbedingungen, zeigen aber häufig Schwächen, wenn sie unmodifiziert auf andere Anwendungen übertragen werden sollen.

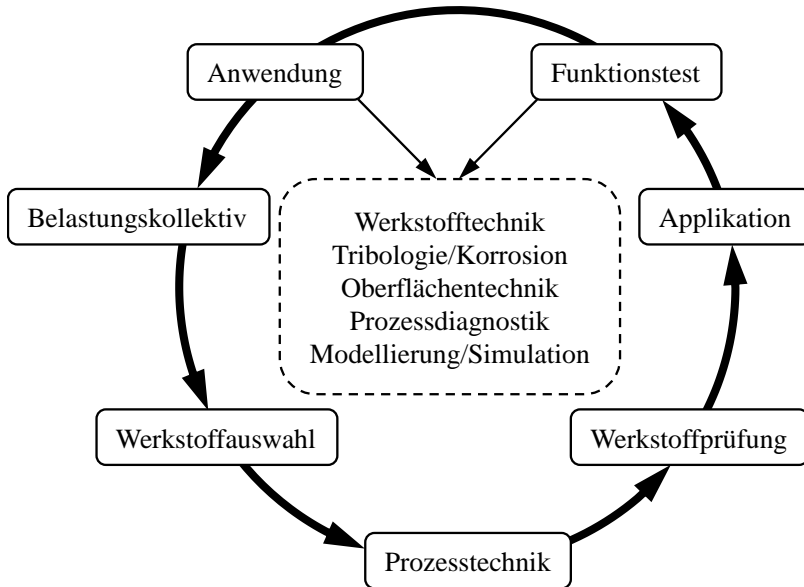


Bild 7: Methodik der iterativen Schichtentwicklung nach [41]

Eine Methodik für die Schichtentwicklung zeigen BOBZIN et al. [41] und wenden diese im Sonderforschungsbereich 442 (SFB 442) an. Die in Bild 7 dargestellte Methodik wird als iterativer Prozess beschrieben, welche die Schichteigenschaften schrittweise der gewünschten Anwendung anpasst.

Stehen Schicht- und Produktentwickler vor einer konkreten Entwicklungsaufgabe, kann die in Bild 7 dargestellte Methodik sicherlich wichtige Einflussgrößen aufzeigen, welche unbedingt beachtet werden sollten und hierbei ergänzend zur Funktionsdarstellung von tribotechnischen Systemen (Bild 1) verwendet werden. Nach Ansicht des Autors sollte der Produktentwickler durch weitere methodische Vorgehensweisen zur Lösung der Entwicklungsaufgabe gezielt unterstützt werden.

Eine Methodik für die systematische Entwicklung von maßgeschneiderten Schichten wurde bereits von TREMMEL et al. [4] (Bild 8) empfohlen. Hierbei liegt der Fokus auf der Vorgehensweise zur Optimierung der Schicht-Substrat-Systeme.

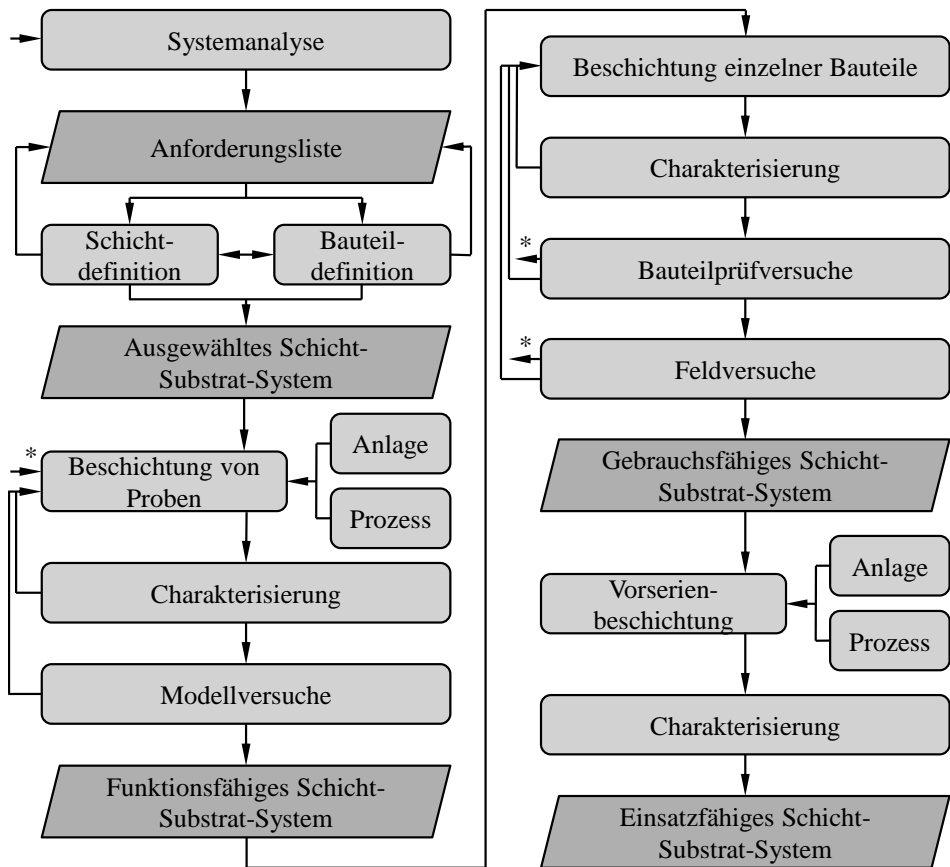


Bild 8: Systematische Entwicklung von maßgeschneiderten Schicht-Substrat-Systemen nach [4]

Ein Vorgehen, bei welchem ein bewährtes Schichtsystem ausgewählt und auf einen speziellen Anwendungsfall angepasst wird, zeigt die Firma CemeCon AG, deren Ablauf der „Beschichtungskonstruktion“ sich nach [42] folgendermaßen zusammenfassen lässt:

- Definition/Anforderung: Erfassung des Anwendungsprofils mithilfe folgender Punkte: Anwendungsgebiet, Zielsetzung Performance, Optik, Toleranzen, Oberflächen, Abmessungen der Werkzeuge und Seriengrößen
- Auslegung der Beschichtung: Die Schicht wird nach Auswahl der Vorbehandlungsmethode, der Schichtwerkstoffe, der Schichtdicke und des Finishings entwickelt

- **Bemusterung / Auswertung:** Erste Bauteile werden als Muster beschichtet, sowie der Ausgangszustand der Bauteile, die Bearbeitungsschritte und das Ergebnis dokumentiert
- **Festlegung der Spezifikationen**

Eine weitere häufig praktizierte Herangehensweise erfolgt durch die Auswahl eines bestehenden Schichtsystems mit anschließender Bemusterung von Probenbauteilen. Bei dieser Vorgehensweise werden üblicherweise auch mehrere Schichtsysteme ausgewählt und die Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Anwendung verglichen.

Eine Auslegung – vergleichbar mit der mechanischen Auslegung von Strukturbauteilen hinsichtlich der Analyse von Belastungen, Berechnung der resultierenden Beanspruchungen und Vergleich mit vorliegenden Materialkennwerten sowie der Abschätzung oder der Berechnung der Bauteilsicherheiten – ist im Bereich der tribologischen Schichten nicht Stand der Technik. Gründe hierfür bilden fehlende Methodenkompetenz [43], schwer zu bestimmende Materialkennwerte der dünnen Schichten [44], ein generell hoher Aufwand für numerisch stabile Kontaktsimulationen [45] (insbesondere durch die unterschiedliche Skalierung zwischen den Bauteildimensionen und den dünnen Schichten [46]) sowie der verhältnismäßig hohe Aufwand zum Abbilden der nichtlinearen Materialeigenschaften von Kunststoffen [47].

Ein weiterführendes Konzept für die Auslegung dünn beschichteter Bauteile, speziell unter zyklischer Beanspruchung im Wälz-Gleit-Kontakt, zeigt TREMMEL. Das Konzept wird in [43] theoretisch detailliert beschrieben und anhand eines Beispiels des Kontakts Nocke/Tassenstößel im Ventiltrieb von Verbrennungsmotoren aufgezeigt. Bild 9 zeigt die Grundstruktur des Auslegungskonzeptes für den Tragfähigkeitsnachweis und die Lebensdauerabschätzung von Schicht-Substrat-Verbunden.



Bild 9: Konzeptstruktur für den Tragfähigkeitsnachweis und die Lebensdauerabschätzung von Schicht-Substrat-Verbunden unter zyklischer Beanspruchung [43]

## 2.6 Mehrachsige Spannungszustände und Vergleichsspannungen

Eine besondere Herausforderung für die Auslegung von Bauteilen sind die im Anwendungsfall meist mehrachsige auftretenden Spannungszustände. Da die Werkstoffkennwerte überwiegend in Versuchen mit einachsigen oder gut zu idealisierenden Beanspruchungen gewonnen werden, ist ein direkter Vergleich problematisch.

Der mehrachsige Spannungszustand wird durch den Spannungstensor  $S$  mit drei Normalspannungen und sechs Schubspannungen beschrieben. Durch eine Hauptachsentransformation lassen sich für jeden beliebigen Spannungszustand im Gleichgewicht drei aufeinander senkrechte Richtungen finden, in denen Zug oder Druck, jedoch keine Schubspannungen auftreten. In diesen Richtungen wirken die Hauptspannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$ .

Bei der Bildung einer Vergleichsspannung  $\sigma_V$  wird der mehrachsige Spannungszustand in eine fiktive einachsige Spannung überführt, deren Wert im Zuge des Festigkeitsnachweises mit ertragbaren Spannungen (vorliegende Materialkennwerte) verglichen wird. Bei der Verwendung einer skalaren Größe anstatt eines komplizierten Spannungszustandes (Spannungstensor) ist in der Praxis von einem Informationsverlust auszugehen, welcher durch die Wahl einer geeigneten Festigkeitshypothese zu minimieren ist. [48]

Gängige Festigkeitshypothesen sind die **Schubspannungshypothese (SH)** nach TRESCA, welche überwiegend bei zähem Materialverhalten unter statischer Belastung angewendet wird und davon ausgeht, dass die größte Hauptspannungsdifferenz das Materialversagen verursacht:

$$\sigma_{V,SH} = 2\tau_{max} = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|; |\sigma_2 - \sigma_3|; |\sigma_3 - \sigma_1|) \quad (1)$$

Die gebräuchlichste Hypothese für duktilen Materialverhalten unter ruhender oder wechselnder Belastung stellt die **Gestaltänderungshypothese (GEH)** dar, welche auf die Fließbedingung von VON MISES zurückgeht:

$$\sigma_{V,GEH} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2)$$

Für spröde Materialien und Bauteile unter stoßartigen Belastungen wird üblicherweise die **Normalspannungshypothese (NH)** nach RANKINE verwendet, welche von einem Materialversagen bei Erreichen einer kritischen

maximalen Hauptspannung ausgeht. Werden die Hauptspannungen in der Reihenfolge  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  geordnet, gilt:

$$\sigma_{V,NH} = \sigma_{max} = \sigma_1 \quad (3)$$

Da die Art des Versagens neben dem Werkstoffverhalten auch maßgeblich vom Spannungszustand des Bauteils abhängt, sollte dieser ausreichend berücksichtigt werden. Neben der MOHRschen Hypothese bietet das HENCKY-Diagramm [49] eine anschauliche Darstellung des Sachverhaltes, in dem die reduzierte Schubspannung (Fließparameter)  $\tau_{red}$  über der mittleren Normalspannung (hydrostatische Spannung)  $\sigma_m$  aufgetragen wird. Hierbei entspricht  $\tau_{red}$  der Wurzel aus der zweiten Invarianten des Spannungsdeviators [50]

$$\tau_{red} = \sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sqrt{\frac{1}{3}}\sigma_{V,GEH} \quad (4)$$

und die mittlere Normalspannung

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (5)$$

Hieraus lässt sich der Mehrachsigsigkeitsquotient  $q$  nach CLAUSMEYER [51] bestimmen, welcher im jeweiligen Beanspruchungszustand das Verhältnis von Gestalt- zu Volumenänderungsenergie charakterisiert.

$$q = \frac{\tau_{red}}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{V,GEH}}{\sqrt{3}\sigma_m} \quad (6)$$

Bild 10 zeigt exemplarisch ein HENCKY-Diagramm mit unterschiedlichen Mehrachsigsigkeitsquotienten und einigen technisch relevanten Beispielen.

Je kleiner der Betrag des Mehrachsigsigkeitsquotienten ist, desto weniger Verformungsreserve des Werkstoffes ist für diese Beanspruchungssituation zu erwarten [52]. Bei Unterschreitung des kritischen Wertes des Mehrachsigsigkeitsquotienten  $q_{krit}$  wird die Spaltbruchgrenze vor der Fließgrenze erreicht, was im Allgemeinen jedoch nur an örtlich eng begrenzten Stellen eines Bauteils auftritt [53]. [54]

Das HENCKY-Diagramm in Kombination mit dem Mehrachsigsigkeitsquotienten nach CLAUSMEYER wird von TREMMEL in [43] zur Ermittlung und Auswertung der mehrachsigen Beanspruchungen und Beanspruchbarkeit von beschichteten Bauteilen unter zyklischer Beanspruchung herangezogen.

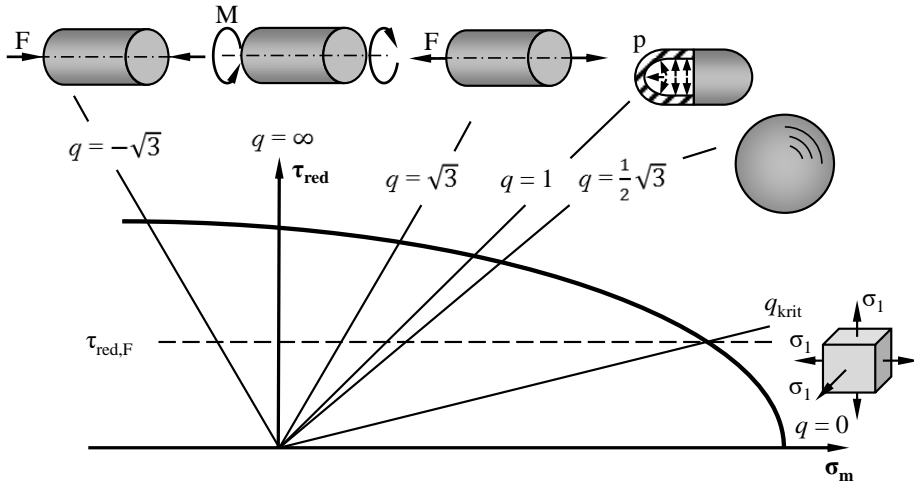


Bild 10: HENCKY-Diagramm mit technisch relevanten Beispielen für unterschiedliche Mehrachsigsigkoeffizienten modifiziert nach [50]

## 2.7 Charakterisierungsverfahren

### 2.7.1 Indentierungsverfahren

Der Elastizitätsmodul von homogenen Werkstoffen wird überwiegend durch Zugversuche mit genormten Standards bestimmt, wie etwa in ISO 6892 [55] für metallische Werkstoffe oder in ISO 527 [56] für Kunststoffe. Der Indentierungsversuch ist in der Oberflächen- und Beschichtungstechnik sehr weit verbreitet, da mit dessen Hilfe der Elastizitätsmodul zusätzlich zur Härte bestimmt werden kann.

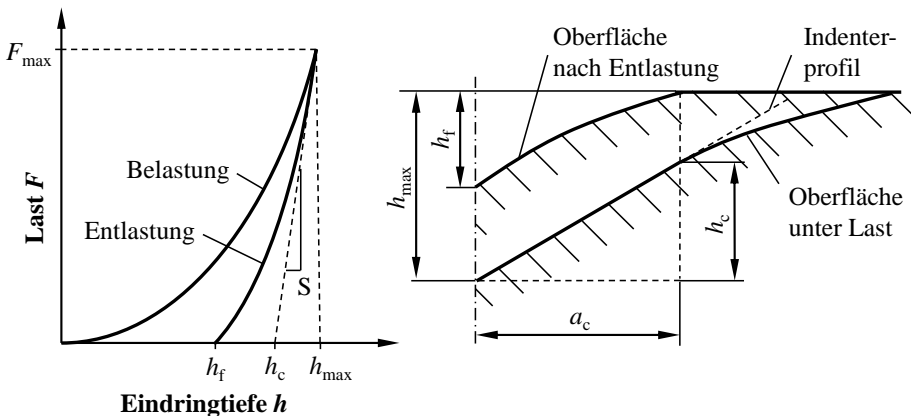


Bild 11: Schematische Darstellung sowie Kennwerte der Krafteindringkurve (links) und schematische Darstellung der radialsymmetrischen Kontaktregion (rechts)

Zur Elastizitätsmodulbestimmung mittels Indentierung wurden überwiegend Verfahren mit kugelförmigen Eindringkörpern [57] sowie mit Berkovich-Indentern (dreiseitige Pyramide) [58] entwickelt und verwendet und mit [59] das Modell um weitere Indentergeometrien ergänzt. Die OLIVER/PHARR-Methode [58, 59] stellt nach wie vor die Grundlage für die Bestimmung von Härte und Elastizitätsmodul bei Schichten mittels Indentierungsversuchen dar [60] und wird deshalb im Folgenden kurz vorgestellt. Einen Überblick der wichtigsten Kennwerte aus den schematischen Darstellungen der Krafteindringkurve sowie der Kontaktregion gibt Bild 11.

Für homogene Materialien zeigt das SNEDDON-Kontaktmodell den Zusammenhang zwischen Kontaktsteifigkeit  $S$  und dem effektiven Elastizitätsmodul  $E_{\text{eff}}$  nach [58]

$$S = \frac{\partial F}{\partial h} = 2\beta E_{\text{eff}} \sqrt{\frac{A_c}{\pi}} \quad (7)$$

Der dimensionslose Korrekturfaktor  $\beta$  ist von der Indentergeometrie abhängig und berücksichtigt die Steifigkeitsabweichungen des Indenters von dem als ideal-starr angenommenen Modell.  $A_c$  beschreibt die Kontaktfläche zwischen Indenter und Probenoberfläche und kann aus dem Kontaktradius  $a_c$  (Bild 11, rechts) sowie der Kontakttiefe  $h_c$  bestimmt werden (siehe Gleichung (9)). Der effektive Elastizitätsmodul  $E_{\text{eff}}$  berücksichtigt die elastischen Verformungen sowohl der Indenterspitze als auch der Probe. Hierbei sind  $E$  der Elastizitätsmodul und  $\nu$  die Querdehnzahl der Probe,  $E_i$  der Elastizitätsmodul und  $\nu_i$  die Querdehnzahl des Indenters. Es gilt:

$$\frac{1}{E_{\text{eff}}} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad (8)$$

Um aus der Krafteindringkurve die projizierte Kontaktfläche  $A_c$  bestimmen zu können, muss der elastische Anteil der Eindringtiefe berücksichtigt werden. Dieser ergibt sich aus der Differenz der maximalen Eindringtiefe  $h_{\text{max}}$  und der Kontakttiefe  $h_c$ , welche weiter durch den Quotienten aus Last  $F$  und Kontaktsteifigkeit  $S$  mit einem Geometriefaktor der Indenterform  $\varepsilon$  ausgedrückt wird. Somit ist die Kontakttiefe  $h_c$ :

$$h_c = h_{\text{max}} - h_{\text{el}} = h_{\text{max}} - \varepsilon \frac{F}{S} \quad (9)$$

Die Übertragung der Gleichung (7) auf die Indentierung einer ebenen Probenoberfläche mit einem sphärischen Indenter mit Radius  $R$  liefert nach [59]:

$$S = \frac{\partial F}{\partial h} = 2\sqrt{R}E_{eff}\sqrt{h_{max} - h_f} \quad (10)$$

Um bei beschichteten Systemen den Substrateinfluss in Grenzen zu halten, werden meist „Faustformeln“ eingesetzt. Diese gehen auf die meistgebräuchlichste „10 %-Regel“ nach BÜCKLE [61] zurück. Diese besagt, dass die maximale Eindringtiefe höchstens 10 % der Schichtdicke betragen darf, da bei Metallen der plastisch veränderte Bereich die zehnfache Tiefe des Eindrucks erreicht. Diese 10 %-Regel wurde für die Härtemessung sowohl rechnerisch [62] als auch experimentell [63] bestätigt und kann für weiche Schichten noch leicht erhöht werden, da hier die plastisch veränderte Zone um den Indenter bei gleicher Eindringtiefe und Schichtdicke kleiner ist als bei harten Schichten [64]. Bereits für die Härtemessung liest man oftmals die pauschale Aussage, dass PVD-Schichten aufgrund der geringen Schichtdicken für die Mikrohärtmessung nicht geeignet seien [65].

Wird hingegen der Substrateinfluss auf die Messung des Elastizitätsmoduls betrachtet, so stellen CHEN et al. in [66] und [67] fest, dass hier der Einfluss auf das Messergebnis wesentlich höher als bei der Härtemessung ausfällt. Nach TAUBE [68] müsste die maximale Eindringtiefe zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls auf 2-3 % begrenzt werden. Hier wurden zudem bewusst Schichten und Substrate mit ähnlichen mechanischen Eigenschaften kombiniert. In der Diskussion der Ergebnisse bezeichnet TAUBE die Untersuchung von Schichten auf Polymersubstraten als „unangenehm“ [68].

Zusätzlich geben weitere „Faustformeln“ eine minimale Eindringtiefe im Verhältnis zur Rauheit vor, um die Streuung der Ergebnisse zu limitieren. Die Streuung beruht auf Effekten an der Probenoberfläche oder Inhomogenitäten in oberflächennahen Bereichen sowie im Kontakt zwischen Indenter und Oberflächentopografie. Diese geometrischen Einflussparameter, steigen mit dem Verhältnis von Rauheit zu Eindringtiefe an und werden in Bild 12 anhand von drei möglichen Auswirkungen exemplarisch veranschaulicht. So dringt im linken Bild der Indenter tiefer ein oder die Indentierung verläuft inhomogen, falls die Rauheitsspitze bricht. Im mittleren und rechten Bild können Probleme bei der Nullpunktfindung und inhomogene Messverläufe auftreten.

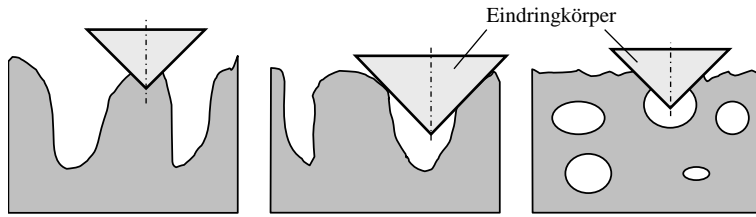


Bild 12: Einflussparameter der Oberflächentopografie auf das Indentierungsergebnis

Bereits bei dünnen Schichten von bis zu  $2\ \mu\text{m}$  Schichtdicke und üblichen Rauheiten entstehen Konflikte dieser „Faustformeln“, da die minimal geforderte Eindringtiefe infolge der Rauheit oberhalb der maximal zulässigen Eindringtiefe infolge der Schichtdicke liegt. Auch unterschreitet die maximal zulässige Eindringtiefe schnell den (sinnvollen beziehungsweise aussagekräftigen) Messbereich der Messgeräte.

Um bei dünnen Schichten den Substrateinfluss zu berücksichtigen beziehungsweise zu kompensieren, werden entweder FE-Simulationen [69], empirische Kompensationsgleichungen [70] oder aufwändige analytische Modelle (meist Halbraummodelle) [71] verwendet.

### 2.7.2 Ritztest

Der Ritztest (Scratchtest) ist eine gebräuchliche Methode, die Schichthafung quantitativ zu erfassen. Speziell für die Anwendung bei keramischen Schichten wird dieser in der Norm DIN EN 1071-3 [72] beschrieben, ist aber auch für die Charakterisierung anderer harter Schichten gebräuchlich.



Bild 13: Schematische Darstellung des Ritztests (links) und Abmessungen sowie Toleranzen eines Rockwell-C-Diamant-Eindringkörpers (rechts)

Dabei wird ein Prüfkörper, wie in Bild 13 (links) dargestellt, mit definierter Normalkraft und Vorschubgeschwindigkeit über die Probe geführt. Die Normalkraft innerhalb einer Ritzspur kann entweder kontinuierlich erhöht oder konstant gehalten werden und in mehreren Ritzspuren stufenweise

verändert werden. Als Prüfkörper kommt ein Rockwell-C-Diamant-Eindringkörper zum Einsatz. Dieser ist in DIN EN ISO 6508-2 [73] genormt und wird in Bild 13 (rechts) dargestellt.

Die Schädigung in der Ritzspur und/oder im Randbereich wird anschließend unter dem Lichtmikroskop untersucht und hinsichtlich der Versagenserscheinungsform beurteilt. BULL [74] klassifiziert die auftretenden Schadensbilder in drei Gruppen:

- Rissbildung in der Schicht (z. B. Zugrisse hinter dem Indenter, Rissbildung durch Krümmung der Schicht in die Ritzspur oder HERTZsche Risse)
- Abplatzung der Schicht vom Substrat (z. B. Druckabplatzungen vor dem Indenter, Abplatzungen infolge von Knickung der Schicht vor dem Indenter oder Abplatzungen hinter dem Indenter durch elastische Rückfederung)
- Absplitterung innerhalb der Schicht (Kohäsives Versagen, analog zu lateralen Absplitterungen in Keramiken)

Nach BURNETT und RICKERBY [75] werden fünf unterschiedliche Fehlermechanismen unterschieden, welche den Randbereich der Ritzspur als eigene Gruppe aufnimmt, jedoch die kohäsiven Schädigungen innerhalb der Hauptgruppen abhandelt:

- großflächige Schichtabplatzungen
- Schichtstauchung mit Ablösung
- Absplitterung der Schicht mit Abplatzungen im Randbereich
- Rissbildung aufgrund von Biegung
- Rissbildung durch Zugspannung

Die relevante Messgröße des Ritztests ist die kritische Normalkraft oder auch kritische Last  $L_C$ , bei welcher ein Versagen festzustellen ist. Häufig wird dabei die Art des auftretenden Fehlermechanismus nicht betrachtet, sondern lediglich die kritische Kraft des ersten auftretenden Fehlermechanismus als quantitativer Wert herangezogen. Hierbei ist zu erwähnen, dass eine plastische Verformung von Substrat und/oder Schicht ohne Rissbildung, Abplatzung oder Absplitterung häufig nicht als Schädigung gewertet wird. Somit ist genau auf die Beschreibung der jeweils durchgeführten Auswertung zu achten – oftmals geben auch nur die beigefügten Bilder Aufschluss. In der Praxis hat sich eine weitere Unterscheidung der kritischen

Normalkräfte als sinnvoll erwiesen und so wird (meist unter den Bezeichnungen  $L_{C1}$ ,  $L_{C2}$ , etc.) das Auftreten unterschiedlicher Fehlermechanismen beschrieben.

Weiterführende Erläuterungen zu den auftretenden Versagenserscheinungsformen, welche für die qualitative Auswertung hilfreich sind, finden sich in [72], [74], [75], [76] und [77].

## 2.8 Statistische Versuchsplanung: Latin Hypercube Sampling

Versuche oder Simulationen sind häufig sehr aufwendig und die Anzahl der variierbaren Parameter groß mit einer weiten Bandbreite. Soll der Aufwand durch eine reduzierte Anzahl der Experimente minimiert werden ohne dabei wichtige Zusammenhänge zu vernachlässigen, sind die Experimente sinnvoll zu wählen. Die statistische Versuchsplanung stellt Methoden zur effizienten Planung und Auswertung von Versuchsreihen zur Verfügung, welche entsprechend der vorliegenden Problemstellung ausgewählt und angepasst werden können. Im Folgenden wird die in dieser Arbeit verwendete Methode des Latin Hypercube Samplings vorgestellt.

Mit dem Latin Hypercube Sampling werden statistische Systemantworten generiert und die Variation der Eingangsparameter entsprechend ihrer Verteilungsfunktionen berücksichtigt. Das Verfahren wurde von MCKAY et. al [78] vorgestellt und stellt sicher, dass der zulässige Schwankungsbereich jeder Variablen voll ausgeschöpft wird [79]. [80]

Zunächst wird der Latin Hypercube Versuchsplan, eine  $(n \times p)$ -Matrix mit  $n$  Zeilen und  $p$  Spalten erstellt, wobei  $n$  die Anzahl der Versuche/Experimente und  $p$  die Anzahl der Variablen beschreibt. Hierbei besteht jede Spalte aus einer zufälligen Permutation der Zahlen  $\{1,2,\dots,n\}$ . Das Latin Hypercube Sampling wird erzeugt, indem von jedem Wert des Latin Hypercube Design eine zufällige Zahl aus dem Bereich  $[0,1)$  abgezogen wird und jeder Wert durch die Anzahl der Versuche  $n$  geteilt und dadurch ein Testfeld im Einheitsraum erstellt wird. [81]

Das Latin Hypercube Sampling wird vorwiegend für Computereperimente verwendet und bietet den Vorteil, dass die Sensitivität jeder Variablen über den gesamten Parameterraum bestimmt wird. Aus der Bandbreite jeder Variablen werden gleich viele Werte entnommen, wie Versuche durchgeführt werden und auch Parameterkorrelationen berücksichtigt.

## 2.9 Metamodelle

Die benötigten Zeiten und das notwendige Knowhow zur Modellbildung und Rechnung von aufwändigen Simulationen stehen häufig im Konflikt mit der gewünschten schnellen Beantwortung von oftmals analogen Fragestellungen diverser Anwendungsfälle. Alternativ werden Metamodelle (auch Approximations- oder Ersatzmodelle genannt) verwendet, um die Ergebnisse der aufwändigen Simulationen bei deutlich geringeren Rechenzeiten zu approximieren [82]. Insbesondere bei Computer-Experimenten können die Testfelder mittels statistischer Versuchsplanung (Abschnitt 2.8) so ausgelegt werden, dass die erzeugten Daten bei minimaler Versuchsanzahl eine optimierte Informationsmenge über den gesamten Faktorraum erzeugen. Je nach Metamodell können nicht nur lineare sondern auch komplizierte Zusammenhänge zwischen den Eingangs- und Ausgangsvariablen abgebildet werden [81].

### 2.9.1 Response Surface Methodology (RSM)

Die Response Surface Methodology wurde erstmals von BOX und WILSON eingeführt [83] und umfasst eine Gruppe statistischer Techniken zur empirischen Modellbildung und -gewinnung, um die Beobachtungen von Experimenten als Ausgangswerte mit korrespondierenden Eingangsvariablen in Verbindung zu bringen. Nach [84] lautet der Funktionszusammenhang zwischen der definierten Zielgröße  $y$  mit den  $n$  Eingangsvariablen  $x_i$ :

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (11)$$

Durch Polynome  $k$ -ter Ordnung wird die sogenannte Response Surface approximiert, wobei in der Praxis zumeist Polynome zweiter Ordnung Anwendung finden. [85, 86]

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=j+1}^k \beta_{ji} x_i x_j \quad (12)$$

Die Regressionskoeffizienten  $\beta_j$  werden bei der Response Surface Methodology an die vorhandenen Ergebnisse approximiert, sodass die Summe der Fehlerquadrate möglichst klein wird. Die Anzahl  $n_\beta$  der zu bestimmenden Regressionskoeffizienten berechnet sich für eine Response Surface zweiter Ordnung mit  $n$  Eingangsvariablen zu:

$$n_\beta = \frac{(n+1)(n+2)}{2} \quad (13)$$

$n_\beta$  gibt hierbei auch die Mindestanzahl an Experimenten vor, welche zur Bestimmung der Regressionskoeffizienten notwendig und im Rahmen der statistischen Versuchsplanung zu definieren sind [82]. Da die RSM numerisch verhältnismäßig einfach und schnell zu implementieren ist, hat sie sich als meistgenutztes Metamodell in der simulationsgetriebenen Produktentwicklung etabliert [87].

### 2.9.2 Künstliche Neuronale Netze

Künstliche Neuronale Netze (KNN) bilden biologische neuronale Netze nach und imitieren somit die Informationsverarbeitungsmechanismen des menschlichen Gehirns. Hierbei sind die Neuronen über Synapsen verbunden, welche sich – je nach Reiz – signalverstärkend oder signalhemmend anpassen können [81].

Im Vergleich zu den natürlichen Neuronalen Netzen sind die Künstlichen Neuronale Netze stark idealisiert, aber auch für eine parallelisierte rechnerbasierte Verarbeitung optimiert. Neuronen sind verhältnismäßig einfache Elemente mit hoher Konnektivität und modifizierbaren Verbindungsgewichten [88].

Neuronale Netze werden als lernfähig bezeichnet, da sie durch Trainingsdaten und -beispiele Aufgaben erlernen können, ohne dafür explizit programmiert werden zu müssen [89]. Des Weiteren können Neuronale Netze robust gegenüber Parameterschwankungen und Rauschen in den Eingängen umgesetzt werden [90].

Wie Bild 14 zeigt, lassen sich Künstliche Neuronale Netze prinzipiell in mehrere Schichten (*layer*) einteilen. Die Eingabeschicht (*Input Layer*) leitet die Eingabeparameter als Eingangssignal in das Netz weiter, während sich in der Ausgabeschicht (*Output Layer*) die gewünschte Approximation wiederfindet. Künstliche Neuronale Netze können dabei eine oder auch mehrere Ausgangsvariablen approximieren. Zwischen Ein- und Ausgabeschicht können sich mittlere oder sogenannte versteckte Schichten (*hidden layers*) befinden, auf welchen sich die versteckten Neuronen befinden.

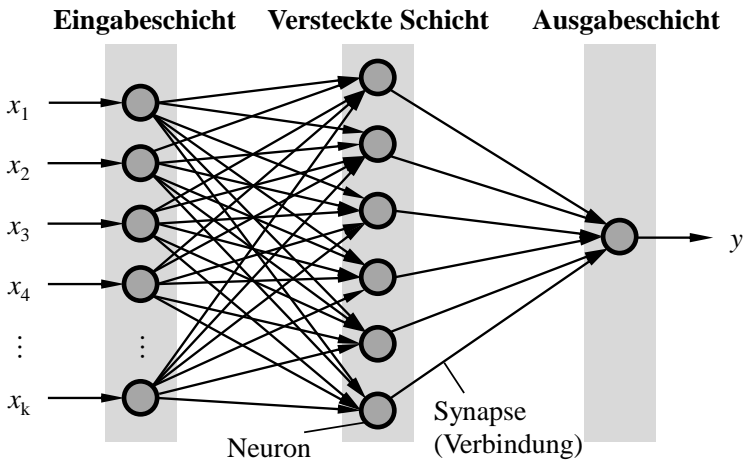


Bild 14: Schematischer Aufbau eines Künstlichen Neuronales Netzes

Die Anzahl der versteckten Schichten und der jeweils auf diesen befindlichen Neuronen kann die Güte der Approximationen maßgeblich beeinflussen. In der Regel wird nur eine verdeckte Schicht gewählt, bei sehr komplexen oder nicht-kontinuierlichen Zusammenhängen ist eine zweite verdeckte Schicht notwendig. Für die Wahl der Anzahl der Neuronen gibt es „Faustformeln“ nach [91] und [92], welche als Ausgangslage für die Modellbildung dienen können. [81]

### 2.9.3 Gütekriterien

Um die Vorhersagewerte der Metamodelle mit den Ergebnissen der Simulation vergleichen und bewerten zu können, gibt es mehrere gebräuchliche Gütekriterien. Diese Kriterien liefern Aussagen, wie gut ein Metamodell die vorhandenen Versuche/Experimente abbildet. Hierfür werden die Ergebnisse aufgeteilt in sogenannte Trainingsdaten (welche zur Erzeugung der Metamodelle verwendet werden) und Testdaten (welche die Vorhersagegenauigkeit des erzeugten Metamodells abprüfen). Sind die Residuen an den Testpunkten in der gleichen Größenordnung wie die Residuen der restlichen Datenpunkte und gleichzeitig in einer für die durchzuführenden Analysen akzeptablen Größe, so wird nach SIEBERTZ et al. [81] davon ausgegangen, dass das Metamodell den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsvariablen richtig abbildet und die Approximationsgenauigkeit ausreichend ist. Da die Modellqualität für den gesamten Faktorraum gewährleistet sein muss, ist bei der Wahl der Testpunkte darauf zu achten, dass der gesamte Faktorraum gleichmäßig und vollständig abgedeckt wird.

Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , oder auch Determinationskoeffizient ( $CoD$ ), ist ein Maß für die Güte der Anpassung einer Regressionsfunktion an die Simulationsergebnisse und wird nach [93] aus der Variation der Gesamtwerte  $SS_T$  und der Variation aufgrund der Residuen  $SS_R$  beziehungsweise der unerklärbaren Variation  $SS_E$  [94] berechnet:

$$COD = R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \mu_{\hat{y}})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \mu_y)^2} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (14)$$

Das Bestimmtheitsmaß kann Werte zwischen  $0 \leq R^2 \leq 1$  annehmen und birgt trotz seiner breiten Verwendung ein großes Potential für falsche Interpretationen [93].

Ein weiteres Gütekriterium, welches für komplexe Modelle [95] verwendet wird, ist der Coefficient of Prognosis ( $CoP$ ) und ergibt sich nach [94] zu:

$$COP = 1 - \frac{SS_E^{prediction}}{SS_T} = \left( \frac{E(Y_{test} \cdot Y_{train})}{\sigma_{Y(test)} \cdot \sigma_{Y(train)}} \right)^2 \quad (15)$$

Auch dieses Gütekriterium kann Werte zwischen  $0 \leq CoP \leq 1$  annehmen und bringt den Vorteil einer integrierten Skalierung mit sich, sodass beispielsweise ein  $CoP = 0,8$  einer Vorhersagegenauigkeit des Metamodells von 80 % für neue Datenpunkte entspricht [96].



### **3 Verbreitung und Bedarf an Charakterisierungsverfahren in der Industrie**

Die Methoden zur Charakterisierung von Oberflächen – sowohl beschichtet als auch unbeschichtet – werden in der Industrie in Art, Qualität und Häufigkeit sehr unterschiedlich verwendet. Um die Forschung an Charakterisierungsmethoden zielgerecht betreiben zu können, wurde eine Erhebung über aktuell angewandte Praktiken in Entwicklung und Qualitätssicherung durchgeführt [Su]. Hierbei stehen sowohl die Chancen und Defizite der heutigen Mess- und Prüfgeräte als auch die Planungen für die Zukunft im Fokus, um hieraus hilfreiche Aussagen zur Erstellung von neuen und der Weiterentwicklung bestehender Prüfmethoden treffen zu können.

#### **3.1 Vorgehensweise der Unternehmensbefragung**

Als Befragungsgegenstand wird gezielt auf das Thema Oberflächentechnologie in Form einer Einthemenbefragung eingegangen. Zur Informationsgenerierung bieten sich als Befragungsformen mehrere Möglichkeiten an, die Zielgruppe zu kontaktieren. Um möglichst viele Unternehmen ansprechen zu können, wurden zeitlich sowie wirtschaftlich sehr aufwändige Methoden wie persönliche Interviews und Telefongespräche ausgeschlossen. Aufgrund der guten Eignung für viele Adressaten, der objektiven Fragestellung ohne Beeinflussung durch den Befrager und der präzisen und verlustfreien Auswertung durch teils auswahlbegrenzte Angaben wurde die Erstellung eines digitalen Fragebogens gewählt. [97]

Per E-Mail angeschrieben wurden insgesamt 523 Unternehmen aus folgenden Oberflächentechnologiefeldern und deren Anwender:

- PVD-Beschichtung
- CVD-Beschichtung
- Diffusionsbeschichtung
- Lack- und Plast-Beschichtung
- Schmelztauchverfahren
- Thermisches Spritzen
- Auftragsschweißen

- Emaillieren
- Galvanisieren/Eloxieren

Die Erfassung und auch die Auswertung der beantworteten Fragebögen erfolgten lückenlos in digitaler Umgebung.

### 3.2 Auswertung der Unternehmensbefragung

Dem Aufruf zur Beantwortung der Fragen folgten 45 der 523 angeschriebenen Adressaten (entspricht 8,6 %). Auf eine Nachfassaktion wurde bewusst verzichtet. Es sei betont, dass durch die verhältnismäßig geringe Anzahl an Umfrageteilnehmern eine Repräsentativität der Befragung nur bedingt gegeben ist und die gezogenen Schlüsse nicht als allgemein gültig interpretiert werden dürfen. 1999 veranlasste der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) eine Studie in derselben Branche, jedoch mit einer breiteren Auswahl an Technologiefeldern und verschickte insgesamt 2000 Fragebogen. Nach einer Nachfassaktion war die Rücklaufquote mit 12 % etwas höher als die der vorliegenden Erhebung. Werden bei der Studie des VDI die in dieser Erhebung unbeachteten Technologiefelder herausgenommen, stellt sich eine vergleichbare Verteilung der Technologiefelder zwischen den beiden Umfragen ein. Bild 15 zeigt die Aufteilung der 45 Teilnehmer auf die jeweils angewandten Technologien für die in dieser Arbeit durchgeführte Erhebung.

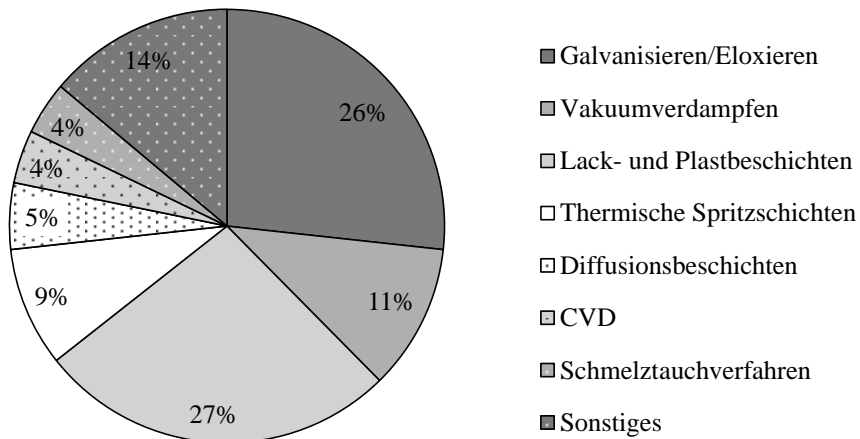


Bild 15: Angewandte Technologien der befragten Unternehmen

### 3.2.1 Schichthaftung

Testverfahren zur Ermittlung der Schichthaftung werden von knapp 80 % der befragten Unternehmen eingesetzt. Tabelle 1 zeigt deren Verbreitung anhand der Häufigkeit der Nennungen. In den Technologiefeldern PVD-Beschichtung, Lack- und Plastbeschichtung sowie der Galvanik kommen im Schnitt mehr als ein Verfahren zur Anwendung, während unter den Diffusions- und CVD-Beschichtern jeweils genau ein Verfahren genannt wird. In den verbleibenden Technologiefeldern wird im Schnitt jeweils ein oder gar kein Verfahren verwendet.

Tabelle 1: Verwendete Testverfahren zur Ermittlung der Schichthaftung

Verfahren	Nennungshäufigkeit
Ritztest	21 %
Stirnzugprüfung	21 %
Gitterschnitt	12 %
Biegetest	9 %
Tapetest	6 %
Rockwell-Eindrucktest	6 %
Thermoschockprüfung	6 %
Tempertest	3 %
Haft-Scherfestigkeits-	3 %
Kugelschlagtest	3 %
Tiefungsprüfung	3 %
Härtetestab	3 %
Pressglänzen	3 %
Schältest	3 %

Erwähnenswert ist der besondere Prüfaufwand der teilnehmenden Betriebe, welche Kunststoffsubstrate beschichten. Neben der Stirnzugprüfung werden vielfältige Verfahren wie Gitterschnitt, Tapetest, Härtetestab oder Pressglänzen durchgeführt. Der sonst sehr verbreitete Ritztest wird hier nicht eingesetzt. Dies deutet auf ein sehr uneinheitliches Vorgehen bei der Charakterisierung von beschichteten Kunststoffen hin.

### 3.2.2 Härte, Duktilität und elastische Eigenschaften

Unter den befragten Unternehmen geben 40 % die Durchführung von Härteprüfungen im eigenen Haus und 19 % eine Vergabe an externe Dienstleister an. Im Bereich der Dünnschichten ist die Messung im Mikrohärtebereich stark verbreitet, in den übrigen Technologiefeldern insbesondere die konventionellen Härtemessverfahren. Hervorzuheben ist die im Vergleich zur Wissenschaft und Forschung geringe Verbreitung der Härtemessung von Dünnschichten durch Nanoindentierung, welche lediglich von einem Unternehmen angegeben wird.

Die Duktilität der Schichten wird von 8,9 % der Teilnehmer, überwiegend durch Vergabe an externe Dienstleister, überprüft. Hierbei wird ausschließlich der Biegetest verwendet, teilweise in Kombination mit einer Sichtprüfung auf Porigkeit.

Die Bestimmung elastischer Eigenschaften (wie etwa des Schicht-Elastizitätsmoduls) findet in keinem der befragten Unternehmen statt.

### 3.2.3 Zufriedenheit mit Prüfmethoden und Verbesserungspotentiale

Um bei der Entwicklung von Charakterisierungsmethoden gezielt auf die von der Industrie gesehenen Mängel und Lücken eingehen zu können, wurde die Zufriedenheit mit den vorhandenen Systemen behandelt und analysiert (Bild 16).

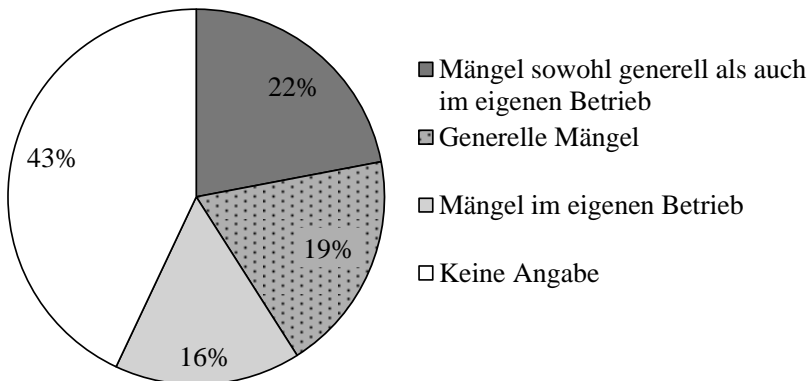


Bild 16: Mängelangaben im Bereich der Charakterisierung und Qualitätssicherung von Oberflächen

57 % der Betriebe geben Mängel im Bereich der Charakterisierung und Qualitätssicherung von Oberflächen an. Davon sieht der kleinste Teil die

Probleme ausschließlich im eigenen Unternehmen, welche zum Beispiel durch mangelhafte Sorgfalt des Prüfpersonals oder durch geringe Investitionsfreudigkeit der Unternehmensleitung in Prüfgeräte hervorgerufen werden. Immerhin geben 41 % generelle Mängel an, rund die Hälfte davon in Kombination mit Mängeln im eigenen Betrieb. Hierbei wird überwiegend auf zu komplizierte oder zeitintensive Prüfverfahren (teilweise auch mit Bezug auf nicht mehr zeitgemäße Normen) hingewiesen. Ebenfalls wird die nur sehr lückenhafte Normung der Testverfahren beklagt. So gibt es oftmals keinen für den Anwendungsfall passenden, genormten oder zumindest genau spezifizierbaren Test. So muss vielfach ein, für den Anwendungsfall nicht aussagefähiges aber dafür genormtes Testverfahren verwendet werden und daran auch die Spezifikation durch den Kunden erfolgen. In diesem Fall beurteilt der Beschichter die Schichtcharakterisierung als nicht lohnenden Aufwand, welchen der Kunde nicht honoriert, nicht monetär wertschätzt und welcher nur eingeschränkt zur Produktqualität beiträgt.

Neben den in den Fragebögen expliziten geäußerten Wünschen lassen sich aus den angesprochenen Mängeln und Lücken auch Verbesserungspotentiale der Prüftechniken ableiten: Könnten die Testverfahren genau spezifiziert und dennoch flexibel auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden, so würden die Schichten bereits während der Entwicklung besser auf den Anwendungsfall optimiert und somit die Gesamtqualität des Produktes verbessert werden. Explizit als Wünsche und Verbesserungsvorschläge werden vielfach die Leistungsfähigkeit der Prüfmethode in Hinsicht auf Geschwindigkeit beziehungsweise Dauer, Genauigkeit und Kosten genannt. Ein großes Anliegen bildet auch die möglichst unkomplizierte Bedienung und ein nachvollziehbares Wirkprinzip, welche die Einweisung des Personals verkürzen und die Reproduzierbarkeit und Aussagekraft der Ergebnisse erhöhen. Hinsichtlich der Flexibilität der Testverfahren und der Messgeräte wünschen sich zahlreiche Unternehmen, dass kostenintensive Prüfgeräte vielseitig einsetzbar sind und neben den Standardtests im Idealfall auch ein breites Band an Anwendungsfällen abdecken.

### **3.3 Zusammenfassung**

Neben der Beantwortung der Forschungsfragen werden in dieser Arbeit die Wünsche von industriellen Unternehmen analysiert, um – sofern möglich – die Integration der entwickelten Methoden in den Workflow der späteren Anwender zu optimieren. Demnach sollen Charakterisierungsverfahren schnell, einfach, vielseitig und idealerweise genormt sein. Schnelle und einfache Charakterisierungsverfahren zeichnen sich hierbei durch eines für

den Prüfer gut verständliches und schulbares Messprinzip aus. So können durch Hinterfragung der Plausibilität auftretende Fehler idealerweise erkannt und durch Überprüfung der Kausalität direkt abgestellt werden. Die Vielseitigkeit der Charakterisierungsverfahren ermöglicht zum einen die Verwendung der investitionsintensiven Mess- und Prüfgeräte für mehrere Aufgaben, zum anderen können neben standardisierten und genormten Modellversuchen auch Tests durchgeführt werden, welche dem späteren Anwendungsfall oder -gebiet genauer entsprechen.

Zur Verbreitung der angewandten Charakterisierungsverfahren sind bei der Ermittlung der Schichthaftung der Ritztest neben dem Stirnzugtest und für die Härte-, Duktilitäts- und Elastizitätsmodulbestimmung die Indentation im Mikro- und Ultramikrohärtebereich am weitesten verbreitet.

## **4 Konzept zur Kennwertermittlung und Auslegung**

Die vorangegangenen Kapitel zeigen zum einen die allgemeine Notwendigkeit sowie die Forderung der Industrie hinsichtlich einer methodischen und praktikablen Herangehensweise an die Charakterisierung und Auslegung tribologisch beanspruchter Bauteile. Auf der anderen Seite werden die Anforderungen noch nicht oder nur vereinzelt direkt durch den vorhandenen Stand der Forschung und Technik mit verhältnismäßigem Investitions- und/oder Zeitaufwand erfüllt. Auf Basis der in Kapitel 3 ermittelten Stärken und Defizite hinsichtlich der Oberflächencharakterisierung in deutschen Unternehmen der Oberflächentechnologie wird nachfolgend ein Konzept zur Kennwertermittlung und Auslegung beschichteter Kunststoffsubstrate entwickelt.

### **4.1 Ableitung des Handlungsbedarfes zur Beantwortung der Forschungsfrage**

Bei allen in Abschnitt 2.5 vorgestellten entwicklungsmethodischen Herangehensweisen (mit Ausnahme des Tragfähigkeitsnachweises für Bauteile unter zyklischer Beanspruchung nach TREMMEL) sind die Bauteilgeometrie sowie das spätere Lastkollektiv fest definiert oder müssen vereinfachend als fest definiert angenommen werden. Zum Zeitpunkt der Beurteilung von Leistungsfähigkeit oder gar der Funktionsfähigkeit der Schicht-Substrat-Systeme im Rahmen der Musterprüfung, Bauteil- oder Komponententests ist der Produktentwicklungsprozess schon sehr weit fortgeschritten. Bei der BauteilAuslegung werden deshalb häufig hohe Sicherheiten eingerechnet, um die Funktion des Gesamtproduktes auch bei eingeschränkter oder fehlender Funktionsfähigkeit des Schichtsystems zu gewährleisten. Durch solch konservative Auslegungen bleibt ein wesentlicher Teil des Leistungspotentials ungenutzt. Zwar werden im Falle einer tribologischen Schicht zum Beispiel Reibung und/oder Verschleiß gesenkt, großes Potential liegt allerdings in der Einsparung von Werkstoff, Bauteilmasse und -volumen – insbesondere bei bewegten Teilen. Im Sinne des Downsizings können durch geringere Reibungskräfte auf kontaktierte Flächen auch die Bauteile an sich kleiner und leichter gefertigt werden, was wiederum infolge der Senkung bewegter Massen die Betriebsbedingungen optimiert.

Vor diesem Hintergrund sei an dieser Stelle nochmals die Forschungsfrage als Kern der Arbeit wiederholt, um hierauf konkret eingehen zu können: Wie kann eine Vorgehensweise zur Auslegung der Tragfähigkeit von Verbunden mit Kunststoffsubstraten und harten Dünnschichten die beteiligten Domänen an geeigneter Stelle in den Entwicklungsprozess auf der Ebene des tribologischen Systems mit Blick auf die Produkteigenschaften integrieren und wie müssen hierfür Testverfahren, Simulationen und Modelle angewendet und angepasst werden, um weitverbreitetes Testequipment nutzen zu können?

Für eine optimale Entwicklung der Bauteilgeometrie unter Berücksichtigung der Schichtpotentiale bei gleichzeitiger Robustheit gegenüber Schäden im Substrat, dem Schichtsystem oder dem Schicht-Substrat-Verbund sind Themenfelder offen und werden im Rahmen folgender Teilfragen in dieser Arbeit beantwortet:

- Durch welche Vorgehensweise wird eine zuverlässige Auslegung beschichteter Bauteile hinsichtlich deren Tragfähigkeit im tribologischen Kontakt ermöglicht?
- Wie können die elastischen Eigenschaften von Substrat und Schicht mit weitverbreiteten Prüfmethoden zur Charakterisierung ermittelt werden und wie müssen diese für die behandelten Werkstoffe angepasst werden?
- Wie können verlässliche Kennwerte hinsichtlich der Grenzen von Schicht- und Substratmaterial sowie deren Verbund ermittelt und dargestellt werden?
- Wie wirken sich Parametermodifikationen des Systems sowie der Belastung auf die Schichtbeanspruchung aus?

## 4.2 Vorgehensweise

Die präsentierte Vorgehensweise als Kern zur Beantwortung der gestellten Forschungsfrage möchte einen gezielten und angepassten Einsatz der beteiligten Beschichtungs- und Applikationsspezialisten, Tribologen, Simulanten sowie Produktentwicklern ermöglichen und deren Arbeitsbereiche und Aufgaben während des Auslegungsprozesses aufzeigen. Hierfür wird die präsentierte Vorgehensweise in folgende drei Säulen aufgeteilt, welchen anschließend einzelne Schritte zugeordnet sind:

- Die Produktentwicklung, welche die Definition und Gewichtung der Anforderungen, Festlegung der Produktgestalt bis hin zur

Auslegung und Produktprüfung sowie der Definition der Fertigung beinhaltet.

- Die Modellbildung und Simulation.
- Der technologische Teil, welcher die Schichtentwicklung, Schichtabscheidetechniken sowie die -charakterisierung mit den experimentellen Versuchen beinhaltet.

Die Vorgehensweise geht zuallererst vom vorliegenden Anwendungsfall aus (Bild 17, links oben). Hierbei sind die Anforderungen an das System zu definieren und gegebenenfalls zu gewichten. In Zusammenarbeit mit Experten aus den Bereichen der Tribologie und Beschichtungstechnik können im Rahmen einer Analyse des tribologischen Systems (Tribologe) die Machbarkeit beurteilt (Beschichtungsexperte) und gegebenenfalls zusätzliche Anforderungen durch das angestrebte Beschichtungsverfahren festgelegt werden. Entweder kann bereits eine vorliegende Schicht aus dem Portfolio verwendet, durch die Technologieexperten neu entwickelt oder eine bestehende angepasst werden. Proben dieser Schicht und des Substrates werden dann experimentellen Messungen unterzogen. Hierbei sind unter anderem die Schichtdicke, die Reibungszahlen, die Schichthärte usw. verhältnismäßig einfach zu bestimmen.

Die Kenntnis des Elastizitätsmoduls ist von essentieller Bedeutung, da dieses direkt in die Spannungsberechnung und weiter in die Festigkeitsbestimmung und somit an mindestens zwei Stellen (Beanspruchung und Beanspruchbarkeit) in die Bauteilauslegung eingeht.

Gerade der Schicht-Elastizitätsmodul stellt eine Herausforderung dar, da er nicht direkt messbar ist und infolge dessen neben den Indentierungsversuchen zur Bestimmung der Schichthärte auch gesonderte Indentierungen zur Elastizitätsmodulbestimmung durchgeführt werden. Die Indentierungen werden parallel numerisch simuliert und aus dem Vergleich der Eindringtiefe, Last sowie weiterer Parameter mit den experimentellen Ergebnissen letztendlich der Schicht-Elastizitätsmodul bestimmt.

Für diesen Vergleich können entweder jeweils die vorliegenden Parameter simuliert und lediglich in der numerischen Simulation der Schicht-Elastizitätsmodul variiert werden, oder mit einem statistischen Versuchsplan zahlreiche Parameterkombinationen simuliert und später in ein Metamodell überführt werden. Dieses Metamodell kann für weitere folgende Schicht-Substrat-Systeme mit abweichenden Parametern der Schicht-Elastizitätsmodul sehr schnell approximieren, ohne dass dafür neue Simulationen notwendig sind.

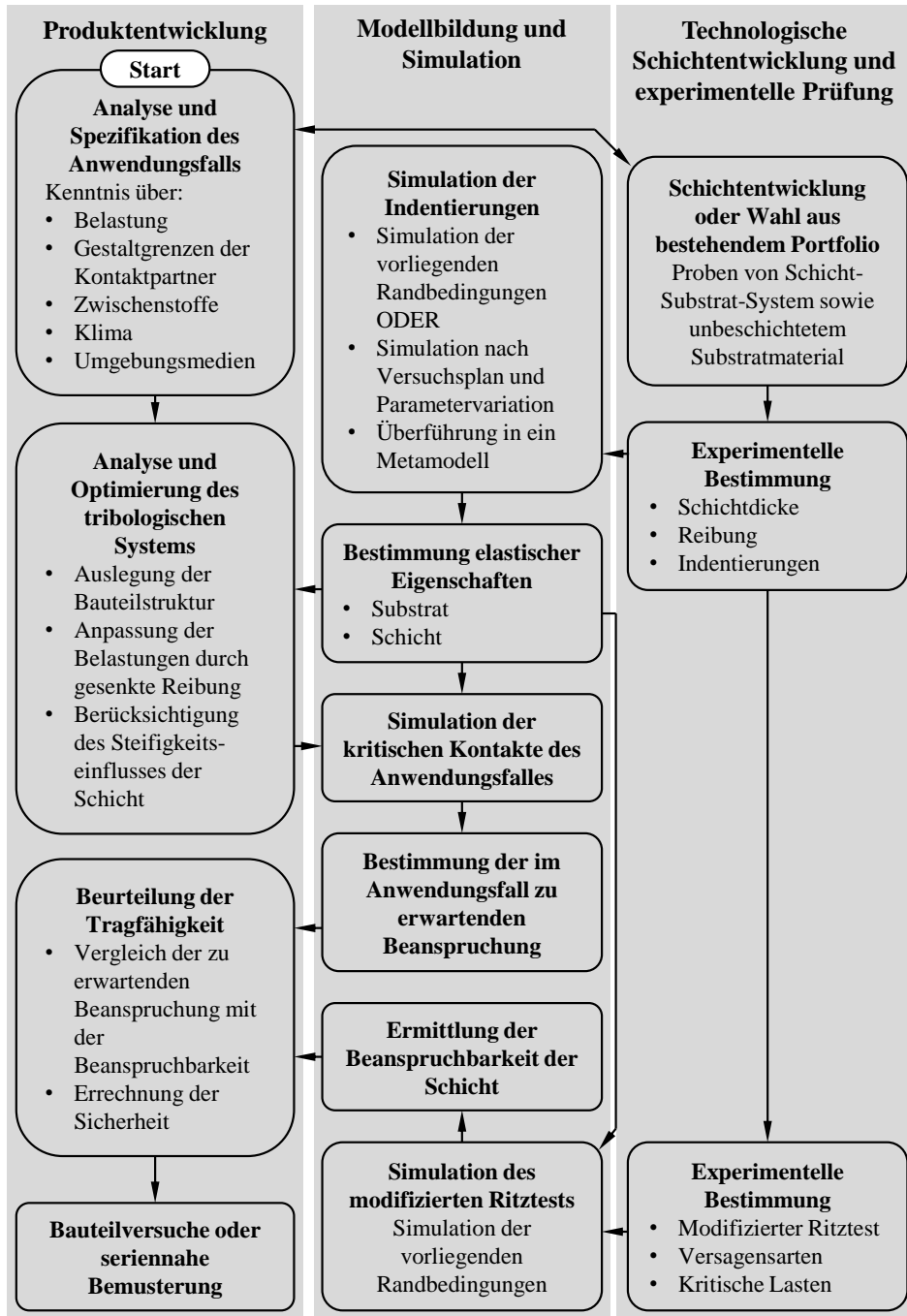


Bild 17: Vorgehensweise zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Schicht-Substrat-Systemen und Bestimmung der elastischen Eigenschaften von Substrat und Schicht

Mit Kenntnis der elastischen Eigenschaften sowie der vorliegenden Reibungszahlen und Dicke der Schicht kann das tribologische System gegebenenfalls weiter optimiert werden und die Bauteile unter Berücksichtigung des Steifigkeitseinflusses der Schicht ausmodelliert und deren tragenden Komponenten ausgelegt werden. Im Anschluss werden die kritischen tribologischen Kontakte simuliert und deren – im Anwendungsfall zu erwartende – Beanspruchung ermittelt.

Um nun die Beanspruchbarkeit des Schicht-Substrat-Verbundes zu bestimmen, werden die beschichteten Proben einem modifizierten Ritztest unterzogen und hierbei die Versagenserscheinungsformen und deren kritische Lasten ausgewertet. Auch dieser modifizierte Ritztest wird simuliert und so die mehrachsigen Spannungszustände bei Versagensentstehung der experimentellen Versuche nachgebildet.

Mit vorliegender Beanspruchbarkeit und zu erwartenden Beanspruchungen kann nun im Rahmen der Produktentwicklung die Tragfähigkeit des Schicht-Substrat-Verbundes beurteilt und dessen Sicherheit bestimmt werden. Wird die Tragfähigkeit als angemessen erachtet, können im nächsten Schritt Bauteil- oder Komponententests angestellt werden und/oder bereits eine Bemusterung unter seriennahen Bedingungen erfolgen.

Ist die Tragfähigkeit nicht ausreichend gegeben, so können geeignete Maßnahmen ergriffen werden. Dies kann die Anpassung der Bauteilgeometrien, der Kontaktparameter, des Schicht-Substrat-Systems oder eine Kombination daraus sein. Mit den durch die Simulation gewonnenen Erkenntnissen können die relevanten Optimierungsgrößen und -ziele besser abgeschätzt werden, da ein besseres Systemverständnis mit den Sensitivitäten der einzelnen Variablen vorhanden ist.

### **4.3 Ermittlung der elastischen Parameter**

Die Ermittlung des Schicht-Elastizitätsmoduls wird über eine Kombination von experimentellen Ergebnissen aus Indentierungsmessungen mit numerischen Simulationsergebnissen erreicht. Hierdurch kann der hohe Substrateinfluss (Abschnitt 2.7.1) bei einer rein experimentellen Messung kompensiert werden.

Die experimentellen Messungen erfolgen über Mikrohärte- oder Nanoindentierungen mit variierenden Lasten. Das Messergebnis der Indentierungen ist die maximale Eindringtiefe  $h_{\max}$ .

Die numerischen Simulationen bilden die experimentellen Indentierungen in einem parametrisierten FE-Modell nach, wobei als Hauptparameter der

Schicht-Elastizitätsmodul variiert wird. Auch hier bildet die maximale Eindringtiefe das Simulationsergebnis.

Anschließend werden die ermittelten Eindringtiefen aus experimenteller Messung mit den Simulationen verglichen und daraus der Schicht-Elastizitätsmodul bestimmt. Dies kann entweder direkt erfolgen oder mithilfe eines Metamodells. Beide Vorgehensweisen werden in den Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3 vorgestellt. Eine Übersicht der Parameter für beide Verfahren gibt Tabelle 2 auf Seite 46.

Um auch die elastischen Eigenschaften des Substratwerkstoffes im Abgleich zwischen Simulation und Experiment zu berücksichtigen, werden diese in einem vorangegangenen Schritt bestimmt, auf welchen im Abschnitt 4.3.4 näher eingegangen wird.

Um im ersten Schritt die Anzahl der Variablen und die Komplexität der Materialmodelle möglichst gering zu halten, werden mehrere Vereinfachungen getroffen:

- Das Verhalten der Schicht wird durch ein rein linear-elastisches Verhalten (HOOKE) beschrieben, welches für kleine Dehnungen aussagekräftig ist [98].
- Die auftretenden Effekte und Abhängigkeiten von Zeit, Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt werden durch das Modell nicht beschrieben. In den Versuchen sowie den Simulationen dieser Arbeit werden die Größen jedoch stets gleich gehalten, sodass diese für die vorliegenden Fälle aussagekräftig sind.
- Die Querkontraktionszahl wird für das jeweils vorliegende Material ausgewählt und konstant gehalten. Für allgemeingültige Aussagen müssen entsprechend aufwendige Materialmodelle und die Kennwerte in Abhängigkeit zu den vorliegenden Prüfbedingungen sowie den Struktur- und Verarbeitungsparametern verwendet werden. Durch das Fehlen dieser Informationen in den gängigen Datenbanken ist das Rechnen mit konstanter Querkontraktionszahl in der Praxis üblich [99].

### 4.3.1 Auswahl der Indentergeometrie

Als Eindringkörper werden sphärische Indentoren verwendet, welche nach CHUDOBA et al. [100] für die Elastizitätsmodulbestimmung bei dünnen Schichten besser geeignet sind als konventionelle Prüfspitzen wie Berkovich-Indenter. Bei gleicher Last bewirken sphärische Indenter einen

geringeren plastischen Anteil durch eine größere Kontaktfläche im Vergleich zu Vickers- oder Berkovich-Indentern. Dies kommt sowohl dem Vorhaben zugute, lediglich elastische Verformungen der Schichten zu messen und zu simulieren, als auch der Forderung aus der Umfrage der Industrie, dass die Methode auch mit den weit verbreiteten Mikrohärtmessgeräten möglich und nicht zwingend ein hochgenaues und investitionsintensives Nanoindentierungsgerät notwendig ist. [101]

### 4.3.2 Direkte Auswertung mit FE-Ergebnissen

In der FE-Simulation werden alle Parameter identisch zur experimentellen Messung gehalten und lediglich der Schicht-Elastizitätsmodul variiert. Anschließend kann anhand der gebildeten Kurve die gemessene Eindringtiefe angetragen und daraus der Elastizitätsmodul der gemessenen Schicht bestimmt, beziehungsweise bei grafischer Auswertung abgelesen werden, wie Bild 18 verdeutlicht.

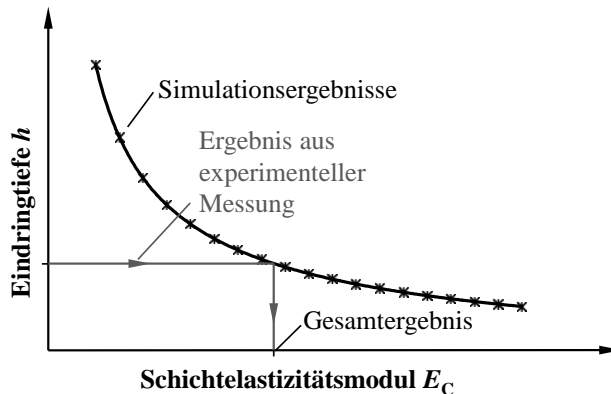


Bild 18: Bestimmung des Schicht-Elastizitätsmoduls  $E_C$  anhand der gemessenen Eindringtiefe  $h$  und Abgleich mit den FE-Ergebnissen

Die direkte Auswertung anhand der FE-Ergebnisse ist sehr genau, erfordert jedoch bei Veränderung der Parameter, zum Beispiel einer Änderung der Schichtdicke oder des Substratmaterials, stets neue FE-Berechnungen. Eine pragmatische Alternative hierzu könnten für übliche Substratmaterialien Kurvenscharen mit variierender Schichtdicke sein.

### 4.3.3 Einsatz eines Metamodells

Das Anpassen und Durchführen neuer FE-Berechnungen ist langwierig und nicht für jeden Anwender ohne weiteres durchführbar. Auch die Bestimmung mit Kurvenscharen gestaltet sich bei komplizierten Sachverhalten

sehr umständlich und wird im Bestreben nach einem papierlosen Arbeitsplatz vielfach nicht mehr als zeitgemäß empfunden. Um dem Anwender nach Eingabe der vorliegenden Parameter schnell einen präzisen Wert als Ergebnis zu liefern wird hier der Einsatz eines Metamodells beschrieben.

Tabelle 2: Parameter zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls

	Experimentelle Messung				Numerische Simulation				
	Bekannt /messbar	In vorherigem Schritt bestimmt	Unbekannt	Messergebnis	Bekannt / analog zum Experiment	Variabel (Zielgröße)	Simulationsergebnis	Variable für Metamodell	
<b>Parameter</b>	<i>Indenter</i>								
	Geometrie	•				•			
	Mechanische Eigenschaften	•				•			
	<i>Substrat</i>								
	Ersatz-E-Modul, $E_s^*$		•			•			•
	Ersatz-Fließgrenze, $k^*$		•			•			•
	<i>Schicht</i>								
	Schichtdicke, $d$	•				•			•
	E-Modul, $E_C$			•			•		•
	<i>Tribologisches System</i>								
	Prüfkraft, $F_N$	•				•			•
	Reibung Indenter/Schicht	•				•			
	Eindringtiefe, $h$			•	•			•	•

Für die Auswertung mithilfe eines Metamodells werden die FE-Simulationen zunächst anhand eines Versuchsplans durchgeführt. Hierbei werden

die Variablen des Metamodells (siehe Tabelle 2, rechte Spalte) durch das Latin Hypercube Sampling (siehe Abschnitt 2.8) kombiniert und über den Versuchsraum verteilt. Aus den Simulationsergebnissen dieses Versuchsplans wird anschließend ein Metamodell erstellt, welches die Simulationsergebnisse approximiert und dadurch weitere Simulationen ersetzt.

In dieser ersten Variante des Metamodells ist der Schicht-Elastizitätsmodul wie auch bei der FE-Simulation noch ein Eingangsparameter und die Eindringtiefe der Ausgabeparameter. Analog zur direkten FE-Auswertung wird der Schicht-Elastizitätsmodul variiert, in die Gleichungen des Metamodells eingesetzt, anhand von verhältnismäßig einfachen analytischen Gleichungen die Eindringtiefen berechnet und anschließend mit den experimentell ermittelten Eindringtiefen abgeglichen, ohne dafür langwierige FE-Kontaktsimulationen anzustoßen. Die Auswahl, Aufstellung und Verifizierung der entsprechenden Metamodelle erfolgt in Abschnitt 6.2.

Um den Workflow zu optimieren und dem experimentellen Vorgehen anzupassen, können im Metamodell die Eindringtiefe als Eingangsparameter und der Schicht-Elastizitätsmodul als Zielgröße definiert werden. Hierfür wird ein zweiter Versuchsplan mit den angepassten Parametern erstellt und mithilfe des ersten Metamodells die neuen Simulationsparameter bestimmt. Mit den getauschten Ein- und Ausgabeparametern können im Anschluss an die experimentellen Tests die gemessene Eindringtiefe neben den weiteren verwendeten Mess-, Schicht-, und Substratparametern in die Gleichungen des Metamodells eingesetzt werden und so der Schicht-Elastizitätsmodul berechnet werden.

#### 4.3.4 Ermittlung der elastischen Substratparameter

Um für die Bestimmung des Schicht-Elastizitätsmoduls den in Abschnitt 2.7.1 erläuterten Substrateinfluss bei der Indentierung mithilfe der FE-Simulation zu kompensieren, müssen die mechanischen Eigenschaften des Substratmaterials bekannt sein. Für übliche FE-Simulationen werden diese aus Materialdatenbanken – oftmals der Kunststoffhersteller oder der Simulationssoftware – entnommen und ein passendes Materialmodell gewählt. Diese können freilich nur gemittelte Materialeigenschaften wiedergeben und nicht im Speziellen auf die Kunststoffverarbeitung, die Konditionierung oder lokale Veränderungen in Bauteilbereichen eingehen. Da in dem vorliegenden Fall bereits geringe Abweichungen der Ergebnisse der Eindringtiefe relativ große Auswirkungen auf das Gesamtergebnis des Schicht-Elastizitätsmoduls haben, werden diese Substrateigenschaften vor der Simulation des beschichteten Systems separat bestimmt.

Die experimentelle Bestimmung der Substrateigenschaften erfolgt ebenfalls mittels Indentierung und wird auf demselben Prüfgerät mit unveränderten Einstellungen durchgeführt. Hierfür werden lediglich Proben ohne Schicht mit den gleichen Eigenschaften des Substrates im Verbund benötigt. Um auch den Einfluss der Atmosphäre während des Beschichtungsprozesses auf das Substrat zu berücksichtigen, kann eine Maskierung der Probe bei der Beschichtung oder ein partielles Abtragen der Schicht nach der Beschichtung durchgeführt werden.

Um bei den Messungen und Simulationen die Einflüsse des vereinfachten Materialmodells, der schwankenden Eigenschaften des Kunststoffes sowie der unterschiedlichen Umgebungs- und Prüfbedingungen bei der Ermittlung der Kennwerte zu kompensieren, werden zunächst ein Ersatz-Elastizitätsmodul  $E^*$  und eine Ersatz-Fließgrenze  $k^*$  des Substrates bestimmt. Diese Parameter basieren auf einem stark vereinfachten elastisch-idealplastischen Materialmodell und sind daher zunächst ausschließlich für die Bestimmung des Schicht-Elastizitätsmoduls mit der beschriebenen Methode und an dem untersuchten Probenpaar zu verwenden. Sie dürfen keinesfalls ohne weiteres zur pauschalen und globalen Auslegung von Bauteilen herangezogen werden, da hierfür meist aufwendigere Materialmodelle vonnöten sind. Bei der vorliegenden Indentierung werden neben der geringen Veränderung der Substratdehnungen infolge des Schichteinflusses alle sonstigen thermischen, zeitlichen und dynamischen Randbedingungen beibehalten, was die vereinfachte elastisch-ideal-plastische Betrachtung des Substratmaterials erlaubt [98].

#### 4.3.5 Signifikanztest

Die Anwendung der vorgestellten Methode macht es möglich, dass Materialparameter aus experimentellen Messergebnissen bestimmt werden, welche sich nicht ausreichend voneinander unterscheiden beziehungsweise zu stark streuen. Um dem Anwender die Fragestellung zu erleichtern, ob die verwendeten Daten ein robustes Ergebnis ermöglichen, werden die beiden Stichproben der Indentierungen von Substrat und Schicht-Substrat-System mithilfe eines Signifikanztests verglichen und überprüft. Dies ermöglicht zudem die Definition eines objektiven Akzeptanzkriteriums, welches die Verwendung der Stichproben mit der Methode beurteilt.

#### 4.4 Modifizierter Ritztest

Sowohl in der Forschung als auch in industriellen Anwendungen spielt der Ritztest eine wichtige Rolle in der mechanischen Charakterisierung von

Dünnschichten. Der in Absatz 2.7.2 beschriebene genormte Ritztest mit einem Rockwell-C-Diamant-Eindringkörper kommt überwiegend auf metallischen Substratwerkstoffen zum Einsatz. Durch seinen robusten Aufbau, die verhältnismäßig einfache Anwendung und die Kombination aus qualitativen sowie aussagekräftigen quantitativen Ergebnissen ist der Test weitverbreitet, was auch die Umfrageergebnisse aus Absatz 3.2.1 bestätigen. Dennoch gibt es Anwendungen, bei denen der Ritztest, durchgeführt mit den durch die Norm empfohlenen Einstellungen das Schicht-Substrat-System hinsichtlich der getesteten Eigenschaften nicht oder nur eingeschränkt charakterisiert [102].

Aufgrund seiner Vielseitigkeit und der weiten industriellen Verbreitung wurde der Test ausgewählt und entsprechend modifiziert, um zum einen die im nachfolgenden Abschnitt ermittelten Grenzen zu umgehen und zum anderen den Test für die Auslegung von Schicht-Substrat-Systemen nach der in Abschnitt 4.2 gezeigten Vorgehensweise zu qualifizieren. Der modifizierte Test und erzielte Ergebnisse wurden bereits auszugsweise in [103] diskutiert.

#### 4.4.1 Grenzen des genormten Ritztests

Bei der Untersuchung von harten Schichten auf weichen Substraten treten häufig bereits sehr früh Schädigungen auf. Der Test kann so nur schwer zur quantitativen Unterscheidung mehrerer Schicht-Substrat-Systeme herangezogen werden. Alternativ wären Ritztests auf Mikro- oder Nanoebene mit wesentlich geringeren Kräften und höherer Auflösung möglich, was jedoch überwiegend für die Grundlagenforschung relevant ist und weniger der direkt übertragbaren Belastung und Schädigung auf Bauteilebene entspricht. Im industriellen Einsatz sind zudem Mikro- und Nano-Ritztester selten zu finden, wie auch die Erhebung in Kapitel 3.2 bestätigt.

Ein ebenso häufig auftretendes Problem bei harten Schichten auf weichen Substraten ist neben plastischen Verformungen das Ausbleiben von jeglichen Schadensbildern, welche auf ein Schichtversagen oder mangelnde Adhäsion hindeuten würden. Als Beispiel hierfür sind in Bild 19 die Ergebnisse von zwei genormten Ritztests mit einer CrN- und einer TiN-Schicht auf ASA-Substraten und jeweils linear ansteigenden Lasten von 0 bis 100 N zu sehen. In beiden Fällen ist auffällig, dass keinerlei Rissbildungen, Abplatzungen oder Absplitterungen zu sehen sind. Die Substrate sind zwar plastisch stark verformt, die Schichten folgen der Kontur jedoch ohne erkennbare Schäden. Diese Ergebnisse suggerieren, dass Schicht und Substrat eine hervorragende Adhäsion besitzen und praktisch keine adhäsionsbedingten

Schädigungen an den Schichten zu erwarten sind. Kommen die Schicht-Substrat-Systeme mit anderen Gegenständen in Berührung, können die Schichten jedoch verhältnismäßig leicht durchstoßen oder abgekratzt werden.

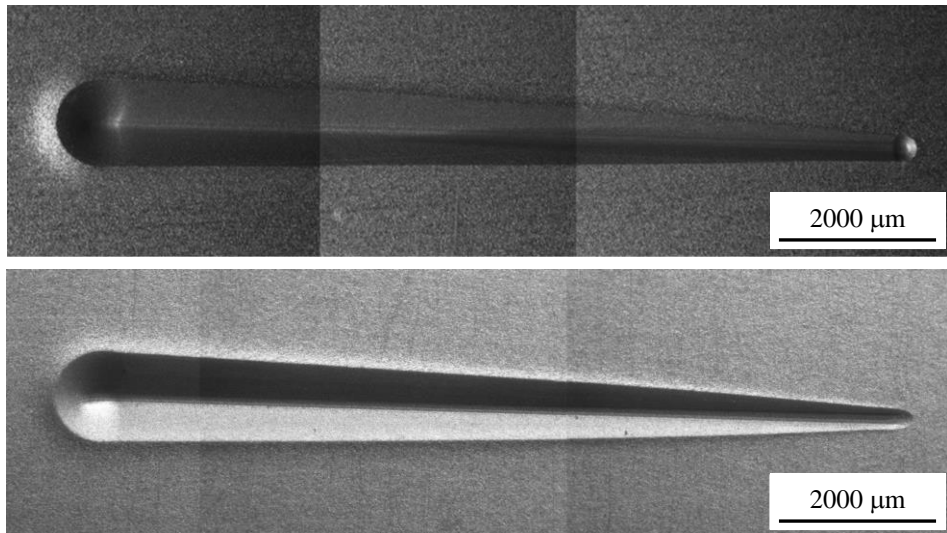


Bild 19: Ritztests mit genormten Rockwell-C-Eindringkörpern ohne erkennbare Schichtversagen auf ASA-Substraten mit CrN-Schicht (oben) und TiN-Schicht (unten)

Ein weiteres Problem bei der Durchführung des genormten Ritztests stellt der Verschleiß des Eindringkörpers dar, wie er in Bild 20 dargestellt ist. Zwar ist die Indentergeometrie bestens definiert (Bild 13) und durch Kalibriermessungen in der Regel auch verifiziert, in der Praxis ist jedoch häufig zu sehen, dass Ritztests mit verschlissenen, teilweise sogar mit fehlender Diamant-Indenterspitze durchgeführt werden. Durch eine seltene Kontrolle der Indenterspitze werden Beschädigungen oftmals erst nach der Anwendung auf allen Proben festgestellt, was bei der zerstörenden Prüfung einen großen wirtschaftlichen Verlust bedeutet. Ebenfalls, meist aus wirtschaftlichen Gründen, werden die kostspieligen Eindringkörper nur bei vorliegender Beschädigung ausgetauscht. Besonders problematisch stellt sich der Verschleiß bei der Charakterisierung von sehr harten und/oder stark abrasiven Oberflächen dar, wie typischen Verschleißschutzschichten für Zerspanwerkzeuge oder im Extremfall bei Diamantschichten oder -folien wie beschrieben in [104].

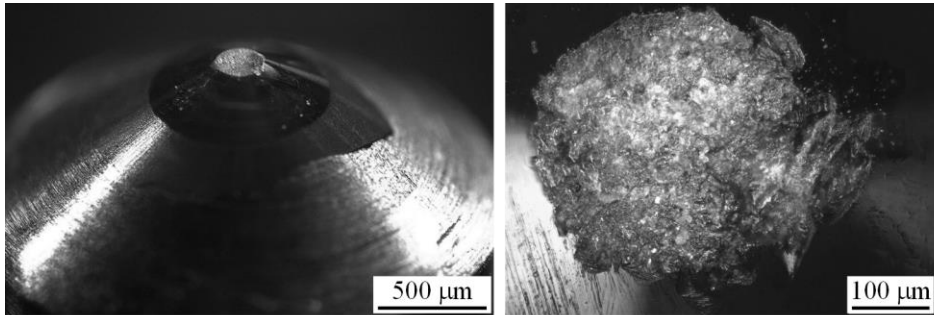


Bild 20: Beschädigte Eindringkörper mit gebrochener Spitze (links) und verschlissener Oberfläche (rechts)

#### 4.4.2 Problemanalyse und theoretische Betrachtung

Zur Analyse und Lösung der Probleme ist die Frage zu beantworten, wie die Diskrepanz zwischen den sehr guten Ergebnissen beim genormten Ritztest und dem schlechten Abschneiden bei den Gebrauchswerten entstehen kann und wie dies zukünftig aussagekräftig quantifiziert werden kann. Nach BULL [74] wäre aufgrund der vorliegenden Bedingungen mit dem weichen Polymersubstrat und den Schichthärten im Bereich typischer Verschleißschutzschichten mit durchgehenden Schichtrissen zu rechnen, wie Bild 21 zeigt.

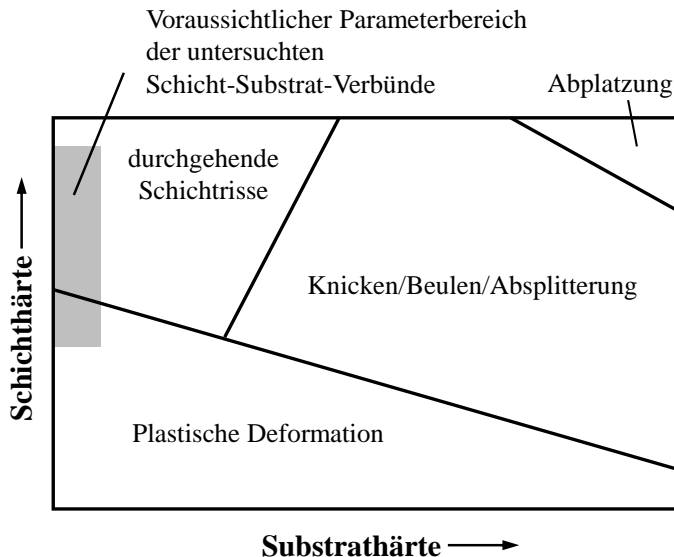


Bild 21: Erwarteter Parameterbereich der getesteten Schichten (CrN und TiN) und Substrat (ASA) in einer vereinfachten Karte der Schadensbilder nach [74]

Ein erster Ansatz ist die Betrachtung der Reibung zwischen Indenter und Testoberfläche. In früheren analytischen Modellen von Eindringprüfungen [105] und des Ritztests [75, 106] wurde die Reibung nicht betrachtet und der Spannungszustand überwiegend aus der Indentierungsgeometrie und der plastischen Zone hergeleitet. Neben der tangentialen Kraft, welche für die Umformung der Werkstoffe beim Ritzten notwendig ist (Pflügen), wird in [107] eine weitere tangentiale Kraft beschrieben, welche zur Überwindung der Reibung notwendig ist. Dieser Reibungsanteil verursacht zusätzliche Spannungen an der Oberfläche sowie tiefer im Material und sollte folglich betrachtet werden. Da der genormte Ritztest lediglich Diamantindenter mit der zu testenden Oberfläche kontaktiert, ergeben sich womöglich durch andere Indenterwerkstoffe und somit anderen Reibungsverhältnissen unterschiedliche Ergebnisse für den Gebrauchswert.

Wie bereits beschrieben ist die Indentergeometrie, vereinfacht auf den Indenterradius, ebenfalls ausschlaggebend für die Ergebnisse. ICHIMURA und ISHII [108] ermitteln für CrN- und TiN-Schichten auf Stahlsubstraten einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen den resultierenden kritischen Lasten bei variierenden Indenterradien zwischen 100-400  $\mu\text{m}$ . Durch die Erhöhung des Indenterradius könnte also das Problem mit den zu früh auftretenden Schädigungen umgangen werden.

XIE und HAWTHORNE beschreiben für den Ritztest in [109] die Überlagerung der Druckspannungen mit Biegespannungen. Das Verhältnis zwischen Druck- und Biegespannungen ist stark vom Indenterradius abhängig. So nehmen bei kleiner werdenden Indenterradien die Biegespannungen im Verhältnis zu. Für das Auftreten von adhäsiven Schädigungen sind bei vielen Schicht-Substrat-Systemen – insbesondere bei guter Schichthftung – die Druckspannungen ausschlaggebend, wie in Bild 22 dargestellt. Im Falle des Ausbleibens eines erkennbaren Schichtversagens kann die Erhöhung des Indenterradius ebenfalls hilfreich sein.

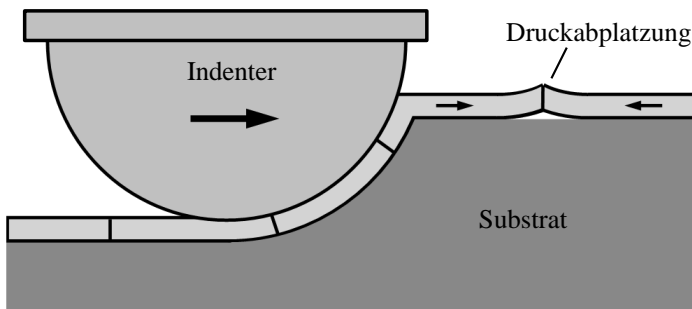


Bild 22: Abplatzungen vor dem Indenter infolge von Druckspannungen

Zur Vermeidung oder Senkung der Auswirkungen des Verschleißes an der Indenterspitze könnten die Belastungen reduziert oder weniger abrasive Testoberflächen gewählt werden. Beides ist jedoch nicht zielführend, da dies dem eigentlichen Zweck der Prüfung entgegensteht. Da für die bisherigen Indenter Spitzen aus Diamant verwendet werden, verspricht auch ein Werkstoffwechsel des Indenters keine Steigerung der Verschleißbeständigkeit. Als Lösung bleibt somit einzig noch die regelmäßige Kontrolle und / oder der Tausch der Spitzen in kurzen Intervallen.

### 4.4.3 Modifikationen

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, bringt die Variation der Indentergeometrie mehrere Vorteile mit sich. Wird der Spitzenradius erhöht, lassen sich Kugeln verwenden, welche in der Laborpraxis praktikabel zu spannen sind. Die präsentierte Charakterisierungsmethode wird analog zum genormten Ritztest durchgeführt, jedoch mit modifiziertem Eindringkörper. Wie in Bild 23 schematisch gezeigt, werden anstatt beziehungsweise zusätzlich zum Rockwell-C Diamantindenter Kugeln aus 100Cr6 (Wälzlagerstahl) in unterschiedlicher Größe verwendet. So gibt es für unterschiedliche Kugeldurchmesser mehrere Kugelhalter, welche am Ritztester schnell zu wechseln sind.

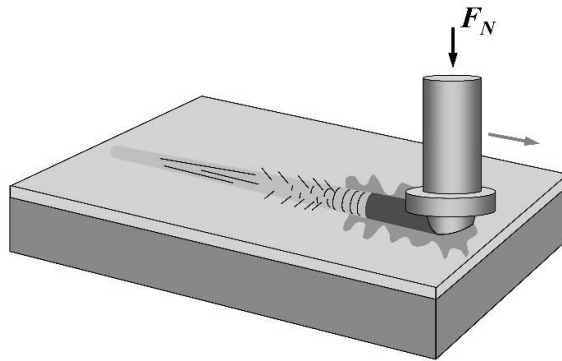


Bild 23: Prinzip des Ritztests mit Kugelindenter

Werden Wälzlagerkugeln in Standardgrößen nach DIN 5401 [110] gewählt, können diese verhältnismäßig preisgünstig mit guter Verfügbarkeit bezogen werden. Durch die genormten und engen Toleranzen ist eine hohe Maß- und Formgenauigkeit garantiert und somit eine gute Reproduzierbarkeit gegeben. Im Falle von Verschleiß am Indenter ist ein Austausch der Prüfgeometrie einfach, schnell und kostengünstig zu vollziehen.

Die Werkstoffauswahl für industriell hergestellte Wälzlagerkugeln reicht von diversen Stahlsorten mit unterschiedlich kombinierbaren Eigenschaften (gehärtet, nicht rostend, unlegiert) über diverse Kunststoffe, Kupfer-Zink-Legierungen, Kupfer-Zinn-Legierungen, Aluminium bis hin zu unterschiedlichen Sinterwerkstoffen, Gläsern und Keramiken [110]. Diese Materialauswahl ermöglicht zum einen eine Variation der Reibungszahlen, was das Auftreten von unterschiedlichen Schädigungsmechanismen beim Ritztest hervorrufen kann. Zum anderen lässt sich die Werkstoffpaarung im Ritztest an die tribologische Kontaktpaarung der Anwendung individuell anpassen und somit den Ritztest als Modelltest realitätsnaher werden. Relevant ist dies insbesondere dann, wenn der Fokus der Charakterisierung auf Gebrauchswerten (wie der Ritz- oder Kratzfestigkeit) liegt und die Auswirkungen auf die Oberfläche des Schicht-Substrat-Verbundes (zur Erfüllung spezifischer technischer, optischer oder dekorativer Funktionen) analysiert werden sollen. Auch die Auswertung des Verschleißes auf dem Ritz-Indenter kann in diesem Fall wichtige Informationen für das Verständnis des tribologischen Systems liefern.

## 4.5 Auslegung

### 4.5.1 Mehrachsige Spannungsanalyse

Zur Analyse und Vergleich mehrachsiger Spannungen werden die in Abschnitt 2.6 vorgestellten reduzierten Grenzspannungen  $\tau_{\text{red}}$  und die mittlere Normalspannung  $\sigma_m$  verwendet. Aus dem Quotient dieser lässt sich der Mehrachsige Quotient nach CLAUSEMEYER  $q = \tau_{\text{red}} / \sigma_m$  bilden und im HENCKY-Diagramm anschaulich darstellen. Für einen beliebigen Betriebspunkt lässt sich somit für den vorliegenden Mehrachsige Quotienten die angenommene Spannung einer Grenzspannung gegenüberstellen.

Somit können zum einen Versuchsergebnisse, welche die Beanspruchbarkeit messbar machen auf Bauteile und deren Betriebsbedingungen übertragen werden. Zum anderen können die Randbedingungen für Modell- und Bauteilversuche auf einen gezielten Anwendungsfall präzise angepasst werden, ohne sich dabei auf stark verallgemeinernde Überschlagsrechnungen wie beispielsweise den Vergleich von Flächenpressungen beschränken zu müssen.

### 4.5.2 Tragfähigkeitsnachweis

Für tribologische Kontakte ist neben dem Vergleich der maximalen Spannungen an einem Punkt auch die jeweilige Auswertestelle von großer

Bedeutung. Aus diesem Grund wird anhand des Ritztests aufgezeigt, welche Orte eines tribologischen Kontakts ausgewertet werden sollten und welchen Einfluss eine Modifikation der einzelnen Parameter zur Folge hat. In der Kombination aus den relevanten Orten der Auswertung mit der Sensitivität eines jeden Parameters (auf die Beanspruchung) können somit die tatsächlich relevanten kritischen Stellen identifiziert werden.

Als letzten Schritt, bevor die Bauteile unter Betriebsbedingungen getestet werden oder die seriennahe Bemusterung auf Großanlagen erfolgt, wird im vorgestellten Konzept die Tragfähigkeit an den identifizierten kritischen Stellen bewertet. Hierbei muss festgelegt werden, ob beispielsweise eine plastische Verformung des Substrates erfolgt beziehungsweise erfolgen darf. Wie in [43] aufgezeigt, lassen sich im HENCKY-Diagramm die MOHRschen Hüllparabeln für Substrat und Schicht überlagern und somit die Grenzen der Komponenten des Werkstoffverbundes separat darstellen und auswerten.

Für die Bewertung der Tragfähigkeit werden Bauteile mit Sicherheiten ausgelegt. So entspricht der Quotient aus der Beanspruchbarkeit und der auftretenden Beanspruchung der lokalen Sicherheit an einem bestimmten Betriebspunkt  $S_{(B)}$ . Die niedrigste Sicherheit, welche in der Variation der Betriebsbedingungen und an allen Stellen des Bauteils auftritt, stellt die Gesamtsicherheit  $S$  dar. Diese Gesamtsicherheit  $S$  muss größer als die definierte Mindestsicherheit  $S_{min}$  sein, welche sich ebenfalls weiter unterteilen lässt. Für jede Teilsicherheit  $S_{Teil,x}$  können zum einen die zu erwartenden Streuungen der Parameter, als auch die Abweichungen zwischen den angenommenen zu den tatsächlich auftretenden Parametern bewertet werden.

$$S = \min \left( \frac{\text{Beanspruchbarkeit}_{(B)}}{\text{Beanspruchung}_{(B)}} \right) \geq S_{min} \quad (16)$$

$$S_{min} = S_{Teil,1} \cdot S_{Teil,2} \cdot \dots \cdot S_{Teil,n} \geq S_{reg} \geq 1$$

Mit den Teilsicherheiten lassen sich beispielsweise Unsicherheiten oder Ungenauigkeiten hinsichtlich Lasten, Werkstoffe, Chargenschwankungen, geometrischer Abweichungen, Rand- und Umgebungsbedingungen, Modellbildung (FEM, Materialmodelle, Verallgemeinerungen im Schicht-Substrat-Verbund), Schadensschwere (Konsequenz) oder Gefährdung bei Bauteilversagen berücksichtigen. Hierunter können auch Unsicherheiten hinsichtlich der Schichtparameter und deren Bestimmung (wie zum Beispiel Rauheit oder Schwankung der Schichtdicke) durch entsprechend konservative Auslegung kompensiert werden.

Insbesondere aus einer Risikoanalyse oder regulatorischen Anforderungen kann hervorgehen, dass die Mindestsicherheit  $S_{\min}$  – unabhängig von der Berechnung aus den Teilsicherheiten – einen gewissen Wert  $S_{\text{reg}}$  nicht unterschreiten sollte beziehungsweise darf. Generell ist die Mindestsicherheit  $S_{\min}$  größer oder gleich eins.

## 5 Angewandte Verfahren und Methoden

In der Arbeit werden unterschiedlichste Verfahren und Methoden angewendet. Diese beinhalten neben der Probenerstellung und -behandlung insbesondere zahlreiche experimentelle Messungen, Modellbildungen, numerische Simulationen sowie der Versuchsplanung und Methoden zur Datenauswertung. Dieses Kapitel gibt detaillierte Informationen zu den angewandten Verfahren und Methoden sowie den relevanten verwendeten Einstellungen und Parametern.

### 5.1 Mikroskopie

#### 5.1.1 Lichtmikroskop

Lichtmikroskopische Aufnahmen und Messungen werden auf einem Material-Lichtmikroskop Leica DM4000 mit zugehöriger Mikroskopkamera, Aufnahme- und Messsoftware durchgeführt. Zur optischen Kontrolle bei Schliften und Ritztests wird ein Stereo-Lichtmikroskop Leica MZ8 verwendet.

#### 5.1.2 Laserrastermikroskop

Zur Messung von verhältnismäßig kleinen Strukturen sowie Aufnahmen der Oberflächentopografie wird ein Laserrastermikroskop Keyence VK-X200 verwendet. Durch Überlagerung lichtmikroskopischer Farbbilder mit Höhenmessungen eines violetten Halbleiter-Lasers (Wellenlänge 408 nm) können bis zu 24.000fache Gesamtvergrößerungen und eine Anzeigeauflösung bei der Höhenmessung von 0,0005  $\mu\text{m}$  erreicht werden [111].

### 5.2 Schichtdicke

Die Schichtdicke wird bevorzugt mittels Kalottenschliff ermittelt. Sollte der Schicht-Substrat-Verbund mit seiner Oberflächenbeschaffenheit und Schichtdicke für dieses Verfahren ungeeignet sein, wird auf das aufwändigere Verfahren im Schrägschliff zurückgegriffen, um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten.

#### 5.2.1 Kalottenschliff

Die Bestimmung der Schichtdicke mittels Kalottenschliff wird nach DIN EN 1071-2 [112] auf der am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk)

entwickelten Prüfeinrichtung KSG-2 durchgeführt. Zum Schleifen der Klotte wird eine Stahlkugel aus 100Cr6 mit  $\varnothing 30$  mm bei einer Antriebsdrehzahl von  $100 \text{ min}^{-1}$  und einer Diamantsuspension auf Wasserbasis mit einer Korngröße von  $0,25 \mu\text{m}$  verwendet. Das Prinzip sowie die Kenngrößen sind in Bild 24 dargestellt.

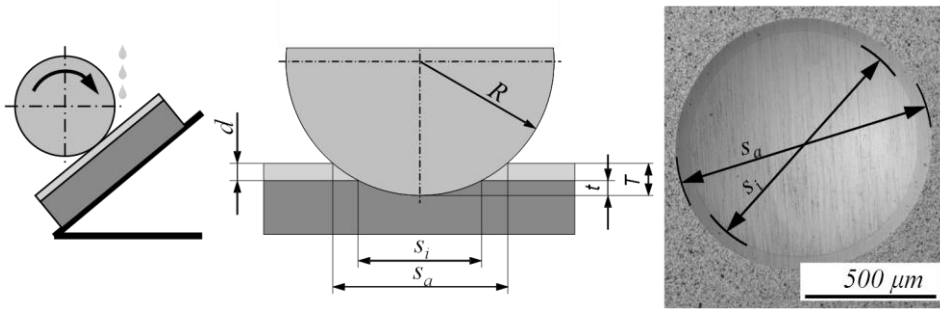


Bild 24: Prinzip und Kenngrößen des Kalottenschliffes

Die Bestimmung der Schichtdicke  $d$  erfolgt mittels lichtmikroskopischer Auswertung (siehe Abschnitt 5.1.1) der Durchmesser  $s_i$  und  $s_a$  und anschließender Berechnung nach:

$$d = T - t = \sqrt{R^2 - 0,25 \cdot s_a^2} - \sqrt{R^2 - 0,25 \cdot s_i^2} \quad (17)$$

### 5.2.2 Schrägschliff

Um Schichtdicken direkt zu messen, wird üblicherweise ein Querschliff mit anschließender Messung nach DIN EN ISO 1463 [170] durchgeführt. Das Verfahren stellt jedoch für dünne Schichten relativ hohe Anforderungen an die laterale Messgenauigkeit des Mikroskopes und ist zudem verhältnismäßig anfällig bei Winkelabweichungen der Querschnittsfläche zur Senkrechten der Schichtfläche.

Beide Nachteile werden mit dem Schrägschliff stark vermindert beziehungsweise sogar eliminiert. Vor dem Einbetten wird hierfür die Probenesamtdicke  $D$  (Schicht und Substrat) mit einer Bügelmessschraube gemessen. Anschließend werden die Proben, wie in Bild 25 dargestellt, mittels einer Einbetthilfe unter einem Einbettwinkel  $\alpha$  in der Form gegen Auftrieb fixiert und mit Epoxidharzeinbettmittel (Epoclear 1000, Fa. Schmitz Metallographie GmbH) übergossen.

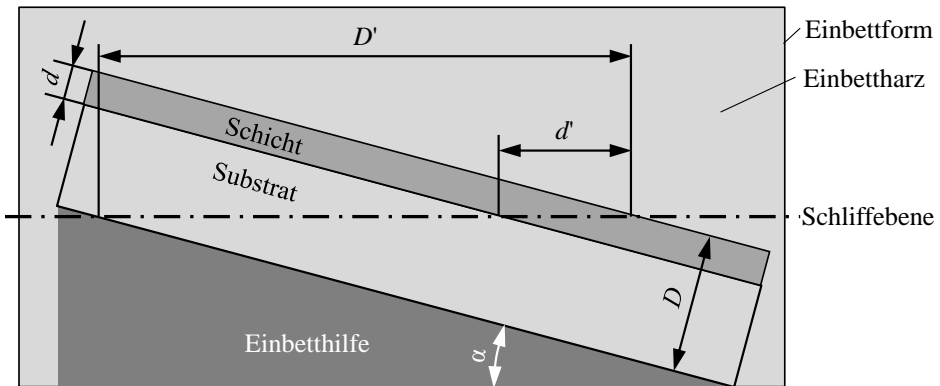


Bild 25: Prinzip und Kenngrößen des Schrägschliffes

Nach der Probenentnahme erfolgen mehrere Schleif- und Poliervorgänge auf einer Schleifmaschine (Struers Planopol). Beim Grob- und Planschleifen werden die Proben mit SiC-Nassschleifscheiben (Körnung P320,  $\varnothing$  300 mm) und unter Wasserkühlung bis zur Schiffebene (Bild 25) abgetragen und eingeebnet. Anschließend erfolgen wassergekühlte Feinschleife mit den Körnungen P800, P1200 sowie P2500 und Poliervorgänge auf alkoholgeschmierten Baumwolltüchern mit Diamantsuspensionen der Korngrößen 6  $\mu\text{m}$  und 1  $\mu\text{m}$ .

Mithilfe des Laserrastermikroskops (Abschnitt 5.1.2) kann anschließend die vergrößerte Probengesamtdicke  $D'$  und die vergrößerte Schichtdicke  $d'$  gemessen werden. Zusammen mit der zuvor gemessenen Probengesamtdicke  $D$  ist die gesuchte Schichtdicke  $d$  und der Vergrößerungsfaktor  $V$  nach folgendem Zusammenhang zu bestimmen:

$$d = \tan \alpha \cdot d' = V \cdot d' = \frac{D}{D'} \cdot d' \quad (18)$$

Da das Ergebnis sehr sensitiv bezüglich des Einbettwinkels  $\alpha$  ist und dessen Reproduzierbarkeit während des Einbettens sowie die Beeinflussung durch das Schleifen nur schwer konstant zu halten sind, wird die Bestimmung und Berechnung des Vergrößerungsfaktors  $V$  für jede Probe separat durchgeführt.

### 5.3 Rauheit

Die Rauheitskenngrößen nach DIN EN ISO 12085 [113] werden taktil mit einem Tastschnittgerät (Mahr Perthometer S3P) gemessen.

## 5.4 Instrumentierte Eindringprüfung – Indentierung

Die Indentierungsversuche – sowohl für die Ermittlung der elastischen Schichtparameter, als auch zur Bestimmung der Mikrohärtigkeit der Schichten – werden auf dem Ultramikrohärtemessgerät Fischerscope H100 (Bild 26) mit der zugehörigen Auswertesoftware WIN\_HCU durchgeführt.

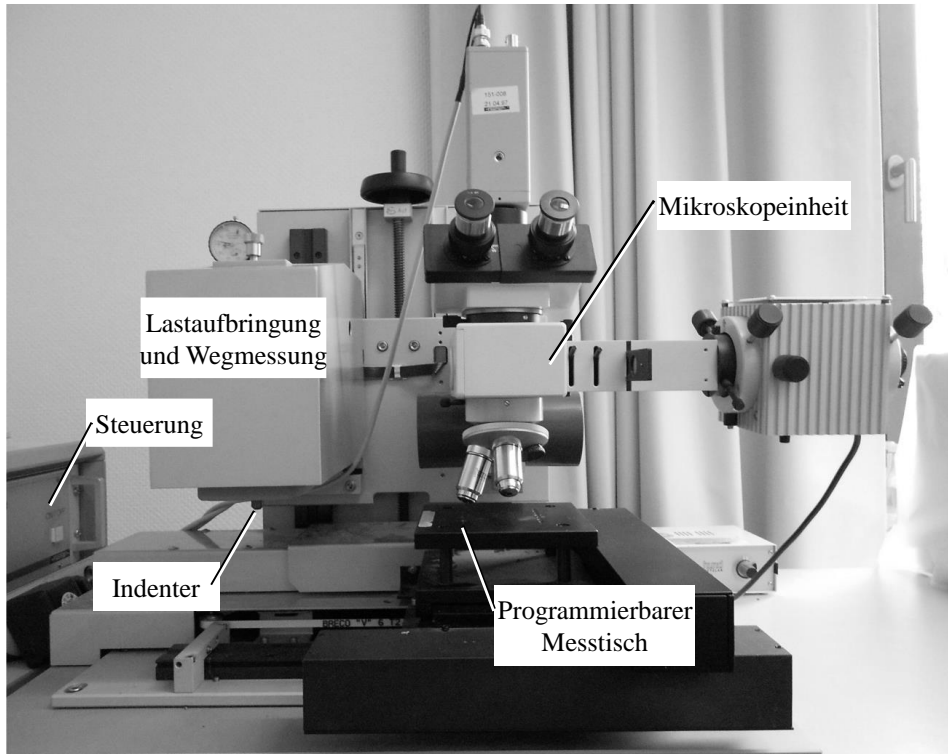


Bild 26: Ultramikrohärtemessgerät Fischerscope H100

Wie in Abschnitt 4.3.1 erläutert, stehen für das Gerät diverse Eindringkörper zur Auswahl. In dieser Arbeit wird für die Bestimmung der Mikrohärtigkeit ein Vickers-Indenter und für die Bestimmung der elastischen Parameter ein Kugelindenter mit einem Spitzenradius von  $200\ \mu\text{m}$  verwendet. Die Last von maximal  $500\ \text{mN}$  wird in  $20\ \text{s}$  linear aufgebracht und mit einer symmetrischen Lastrampe wieder reduziert. Die Last-Kraft-Kurve wird durchgängig aufgezeichnet und für die Auswertung und den Abgleich mit den numerischen Werten die jeweilige Eindringtiefe  $h$  bei  $200\ \text{mN}$  und bei  $500\ \text{mN}$  automatisch extrahiert und dokumentiert.

Das Gerät wird üblicherweise für Härtemessungen eingesetzt. Zu diesem Zweck ist es mit diversen Kalibrier- DIN EN ISO 14577-2 [114] und Korrek-

turfunktionen ausgestattet. Diese sind für die Angabe der richtigen Härte-  
werte essentiell und werden mit entsprechenden Härtevergleichsplatten  
bestimmt und in Kalibrierdateien geschrieben, rechnen dabei aber auch die  
gemessenen Werte der Eindringtiefe  $h$  direkt um. Selbst die in der Auswer-  
tung einstellbare „unkorrigierte Eindringtiefe  $h_u$ “ unterliegt bereits den be-  
sagten Kalibrierdateien – anders als die Bezeichnung vermuten lässt. Für  
die Ermittlung der elastischen Parameter mit Abgleich durch eine Simula-  
tion (wie im Falle dieser Arbeit) ist es notwendig, die Rohdaten zu verwen-  
den. Deshalb dürfen bereits während den Messungen weder die Indenter-  
Kalibrierdatei, noch die Härte- und Formkorrekturdateien aktiviert blei-  
ben.

## 5.5 Ritztest

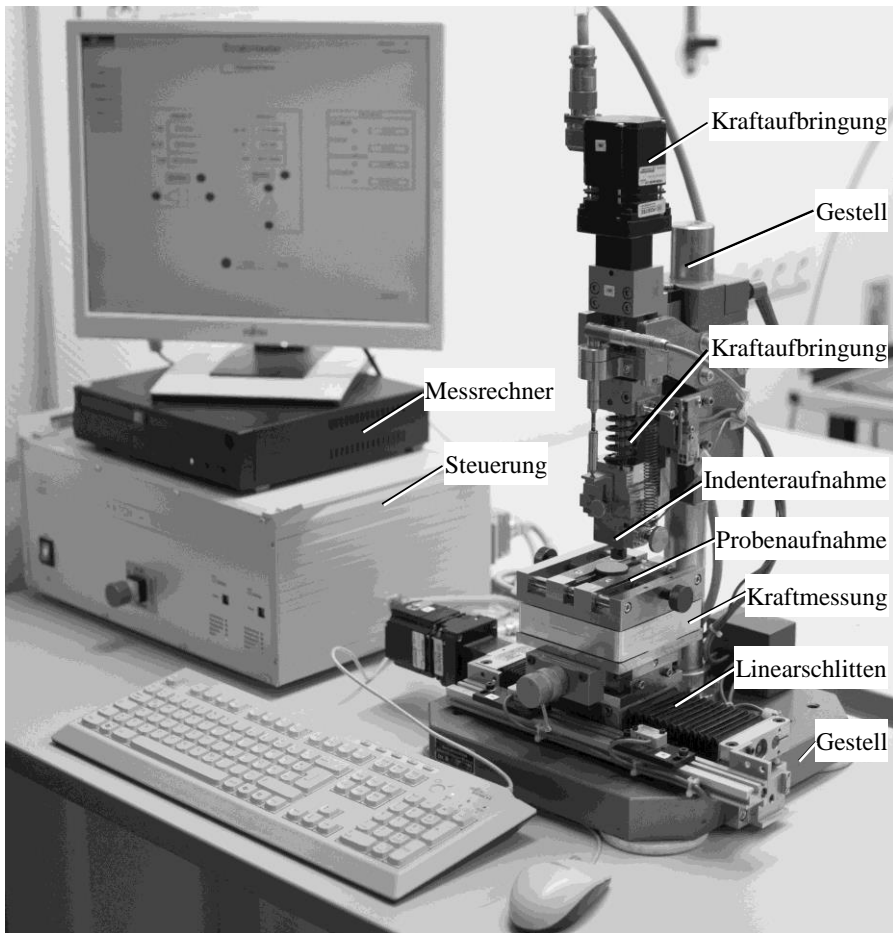


Bild 27: Aufbau des modifizierten Ritztesters RTG-2

Zur Durchführung der Ritztests und der Realisierung der in Abschnitt 4.4.3 beschriebenen Modifikationen, wurde auf Basis eines vorhandenen Gerätes ein Ritztester entwickelt und hergestellt. Hierbei sind die Entwicklung in [S15], die Inbetriebnahme und die Optimierung der Regelungsparameter in [S23] beschrieben.

Zur Durchführung von Versuchen gemäß DIN EN 1071-3 [72], wird die Last von maximal 500 N auf den Eindringkörper durch ein Federsystem aufgebracht (Bild 28, links), welches mit einem Linearsystem und einem Servomotor mit Spindel gespannt wird. Hierbei kann die Last sowohl auf einem konstanten Wert gehalten oder linear ansteigend programmiert werden. Als Indenter stehen neben dem Rockwell-C-Eindringkörper nach DIN EN ISO 6508-2 [73] mit angelöteter Diamant-Prüfspitze noch Wälzlagerkugeln in zwei Größen ( $\varnothing 3,969$  mm und  $\varnothing 2,778$  mm) zur Verfügung. Die Kugeln aus 100Cr6 (Wälzlagerstahl, mindestens 740 HV 10, Abmessungen toleriert nach DIN 5401 [110] und ISO 3290 [115]) werden in zwei passend dafür angefertigten Halterungen arretiert (Bild 28, rechts). Die Eindringtiefe des Indenters wird während der Messung über einen induktiven Wegaufnehmer mit einer Auflösung von  $0,3 \mu\text{m}$  und einem Messbereich von 10 mm erfasst (Bild 28, links). Durch die Ausführung als Tauchankersystem wird eine konstant sehr kleine Last auf die Kraftaufbringung ausgeübt, welche sich wiederum durch die Zugfeder gut kompensieren lässt.

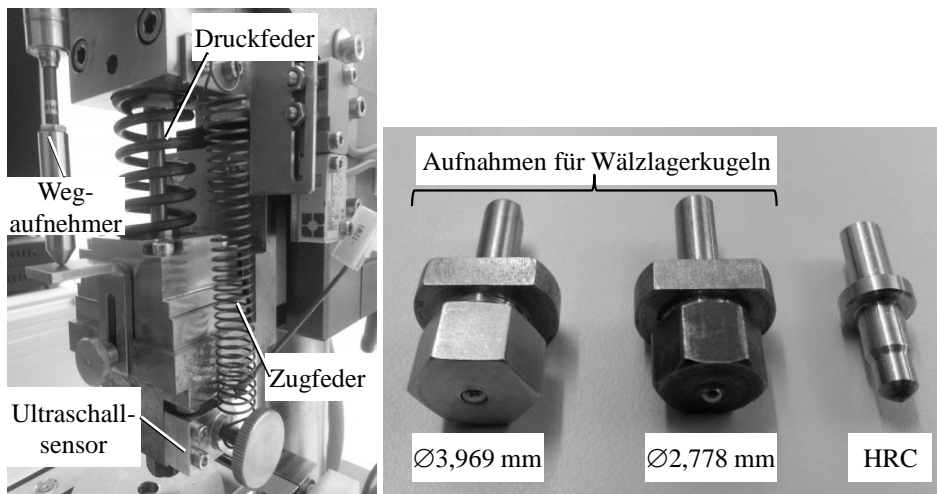


Bild 28: Federsystem zur Lastaufbringung (links) und Eindringkörper (rechts)

Die laterale Bewegung der Probe erfolgt über eine Probenaufnahme auf einem angetriebenen Linearschlitten. Die Ermittlung der Normalkraft am Indenter und der Reibungskraft erfolgt über einen Mehrachsen-

Kraftsensor, welcher sich zwischen Linearschlitten und Probenaufnahme befindet. Ein Ultraschallsensor kann zur Erfassung von akustischen Veränderungen in der Indenteraufnahme angebracht werden.

Eine Steuerung mit der erforderlichen Leistungselektronik, Messverstärkern und Sicherheitseinrichtungen verbindet die mechanische Einheit mit dem Messrechner. Dieser beinhaltet die Module zur Menüführung, Programmierung der Messparameter, Bedienung aller elektronischen Komponenten sowie zur Aufzeichnung und Visualisierung der Parameter von Sensoren und Aktuatoren.

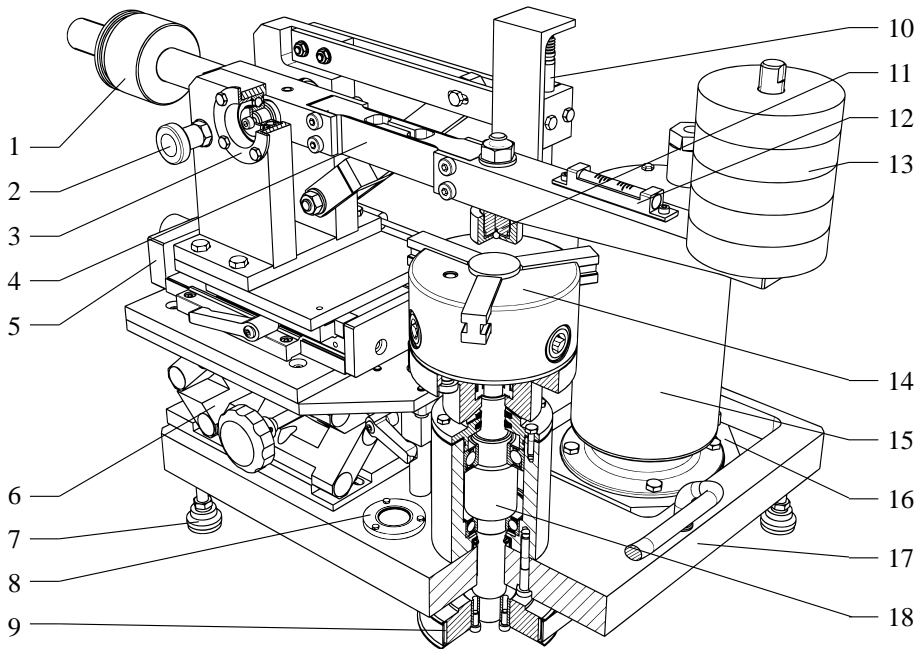
Die Ritztests in dieser Arbeit wurden mit den Einstellungen in Tabelle 3 durchgeführt. Diese entsprechen in Forschung und Praxis üblichen Werten und wurden hinsichtlich der maximalen Last den Schicht-Substrat-Verbunden optimiert auf Auflösung und Auftreten von Schädigungen.

Tabelle 3: Angaben und Einstellparameter zu den Ritztests:

Ritzstrecke:	10 mm
Vorschubgeschwindigkeit:	10 mm/min
Lastrate:	50 N/min beziehungsweise 100 N/min
Maximale Last:	50 N beziehungsweise 100 N
Indenter:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HRC R 0,2 mm, Diamant</li> <li>• Ø 2,778 mm Kugel, 100Cr6, auch bezeichnet mit: R 1,39</li> <li>• Ø 3,969 mm Kugel, 100Cr6, auch bezeichnet mit: R 1,98</li> </ul>
Probenvorbereitung:	Reinigung mit Isopropanol

## 5.6 Stift-Scheibe-Tribometer

Da viele tribologische Kontakte und insbesondere auch Kunststoffe sehr sensibel auf klimatische Schwankungen reagieren, wurde im Laufe dieser Arbeit mit [S21] das klimatisierbare Stift-Scheibe-Tribometer K-SST-1 entwickelt und in Betrieb genommen. Der Aufbau des Tribometers kann Bild 29 entnommen werden. Neben den kontinuierlich rotierenden, können auch zyklische Versuche mit einem großen Spektrum an Schwenkwinkeln, Beschleunigungen und Geschwindigkeiten durchgeführt werden. Durch die Integration in einer Klimakammer KPK 200 der Firma Feutron ist das Versuchsklima in Bereichen von -10 bis +50 °C Temperatur und 0 bis 100 % relativer Luftfeuchte einstellbar.



- |  |   |
|--|---|
| 1 Gegengewicht (Hebelarm tarieren)         | 10 Wegsensor mit Halterung (Verschleiß)       |
| 2 Rastbolzen (Hebelarm arretieren)         | 11 Halterung für Gegenkörper (Kugel fixieren) |
| 3 Lagerung des Hebelarms                   | 12 Libelle                                    |
| 4 Wägezelle (Reibungskraft erfassen)       | 13 Gewichte (Normalkraft aufbringen)          |
| 5 Linearführung mit Wegsensor (Reibradius) | 14 Probekörper und Dreibackenfutter           |
| 6 Scherenhubtisch (Probenhöhe ausgleichen) | 15 Servoantrieb                               |
| 7 Fuss                                     | 16 Riemenspannvorrichtung                     |
| 8 Dosenlibelle                             | 17 Grundplatte                                |
| 9 Riemenscheibe                            | 18 Welle mit Lagerung                         |

Bild 29: Aufbau des klimatisierbaren Stift-Scheibe-Tribometers K-SST-1

Das tribologische Verhalten wurde in dieser Arbeit mit fest eingespannten Wälzlagerkugeln aus gehärtetem 100Cr6 und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,1 m/s und einem Gleitweg von 5 000 m ermittelt. Alle Proben wurden in zwei Prüfmodi getestet:

- Im Prüfmodus 1 wird eine Kugel mit  $\varnothing$  4 mm und eine Normalkraft  $F_N$  von 10 N verwendet.
- Im Prüfmodus 2 wird eine Kugel mit  $\varnothing$  10 mm und eine Normalkraft  $F_N$  von 5 N verwendet.

Die jeweils aus den elastischen Eigenschaften resultierenden Pressungen sind in Abschnitt 10.1.4 erläutert. Die Prüfkammer wurde auf Normalklima 23/50 ( $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $50 \pm 5 \%$  relative Luftfeuchtigkeit) ISO 291 [116] gehalten.

## 5.7 Biegemodul

Die Biegeversuche werden an einem Drei-Punkt-Biegeprüfstand durchgeführt. Der Prüfstand ist an DIN EN ISO 178 [117] angelehnt, welche die Biegeeigenschaften von Kunststoffen an Flachkörpern normt. Der Messaufbau ist hinsichtlich der Prüfung von Hohlprofilen in [S5] geringfügig modifiziert. Der Aufbau und die Abmessungen sind Bild 30 zu entnehmen.

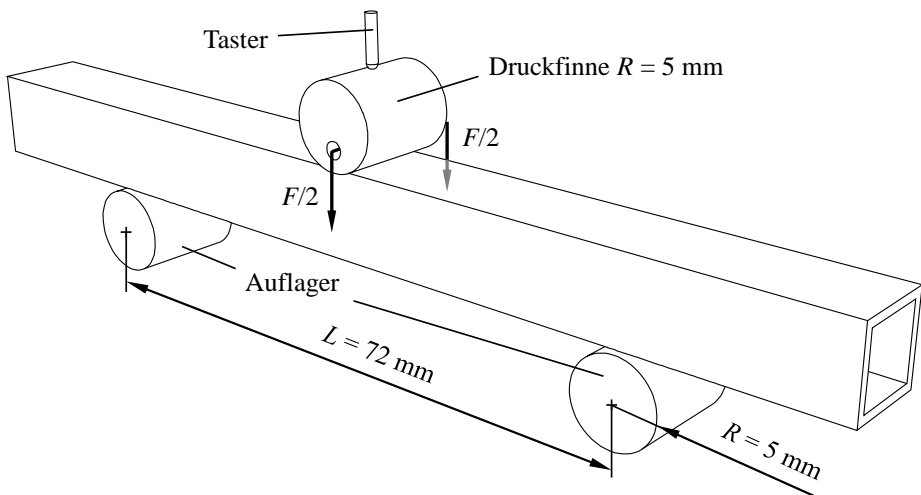


Bild 30: Prinzipskizze des Versuchsbaus zur Biegeprüfung

Die klimatisierten Laborbedingungen bei Normalklima 23/50 ( $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $50 \pm 5 \%$  relative Luftfeuchtigkeit) ISO 291 [116] schließen einen signifikanten Einfluss des Klimas auf die Messergebnisse aus. Die Last wird jeweils von 3,0 N auf eine Gesamtlast von 42,5 N in 14 Belastungsschritten erhöht. Um die Retardation infolge des viskoelastischen Materialverhaltens der Kunststoffsubstrate bei allen Versuchen identisch zu lassen, wurden sämtliche Belastungsschritte nach dem exakt gleichen zeitlichen Ablauf durchgeführt. Die Gewichtskraft sowie die Messkraft des Tasters der Messuhr wurden kompensiert. Die Versuche wurden jeweils an vier Probekörpern durchgeführt und die Ergebnisse arithmetisch gemittelt.

## 5.8 Probenkonditionierung

Da bei Kunststoffen, insbesondere bei dem Substratwerkstoff Polyamid, viele Eigenschaften von dessen Feuchtegehalt abhängig sind, können die Werkstoffeigenschaften nur bei einem festgelegten Feuchtegehalt reproduzierbar gemessen werden. Zur Messung und Lagerung wird das Normalklima 23/50 nach ISO 291 [116] mit der Lufttemperatur  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  und der relativen Feuchte  $50 \pm 5\%$  gewählt.

Die Proben haben nach der Lagerung im Vakuumtrockenschrank (für die Beschichtungsvorbereitung) und nach dem eigentlichen Vakuumbeschichtungsprozess einen sehr geringen Feuchtegehalt. Eine Konditionierung vor den Messungen ist notwendig. Da die Feuchteaufnahme-geschwindigkeit von Polyamid bei Raumtemperatur sehr gering ist, wäre bei Normalklima die Lagerungszeit unverhältnismäßig lange. Es wird deshalb auf den beschleunigten Konditionierungsprozess für Polyamid-Werkstoffe nach EN ISO 1110 [118] zurückgegriffen. Da die Schicht an jeweils einer Seite der Probekörper den Feuchtigkeitsausgleich behindern könnte, wird zur Ermittlung der Lagerungsdauern als Wanddicke  $h$  der Probekörper die doppelte Wandstärke angenommen. Da die Norm lediglich die Mindestlagerdauer vorschreibt, ist eine Verlängerung der Lagerdauer unkritisch. Die Proben werden in einer Klimaprüfkammer des Herstellers FEUTRON Typ 3436/15 für 5,5 Tage bei  $70^\circ\text{C}$  und 62 % relativer Feuchte gelagert. Nach erreichter Sättigung, welche durch mehrmalige Wägung während des Konditioniervorgangs bestätigt wird, lagern die Proben anschließend mindestens 2 Tage bei Normalklima.

## 5.9 Finite-Elemente-Simulation

Alle FE-Simulationen wurden mit ABAQUS/CAE der Firma Dassault Systèmes durchgeführt.

### 5.9.1 Finite-Elemente-Simulation der Indentierung

Für die Kontaktsimulationen der Indentierung wird die Rotationssymmetrie der betrachteten Teile genutzt, um das Problem auf ein achsensymmetrisches 2D-Modell zu reduzieren, welches aus zwei Körpern besteht: der Kugel und dem Schicht-Substrat-Verbund. Die Kugel wird mit CAX8-Elementen mit quadratischer Ansatzfunktion modelliert, um die sphärische Form geeignet abzubilden. Der Schicht-Substrat-Verbund wird mit Hilfe einer Partitionierung realisiert und den zwei „sections“ jeweils verschiedene Materialien zugewiesen. Als Elementtypen werden CAX4-Elemente,

Viereckelemente mit bilinearem Ansatz, verwendet. In Abschnitt 6.1 werden zusätzlich CAX4R-Elemente mit reduzierter Integration für eine beschleunigte Lösung der Gleichungen und mit „hourglass control“ anhand einer Parameterstudie diskutiert. In diesem Abschnitt wird auch die erforderliche Netzdicke über eine Konvergenzanalyse verifiziert. [119]

Die drei Komponenten Kugel, Schicht und Substrat werden wiederum durch mehrere Parameter beschrieben. Bild 31 zeigt die Parametrisierung des Modells, welche mit den Parametern des Metamodells in Abschnitt 4.3.3 übereinstimmen.

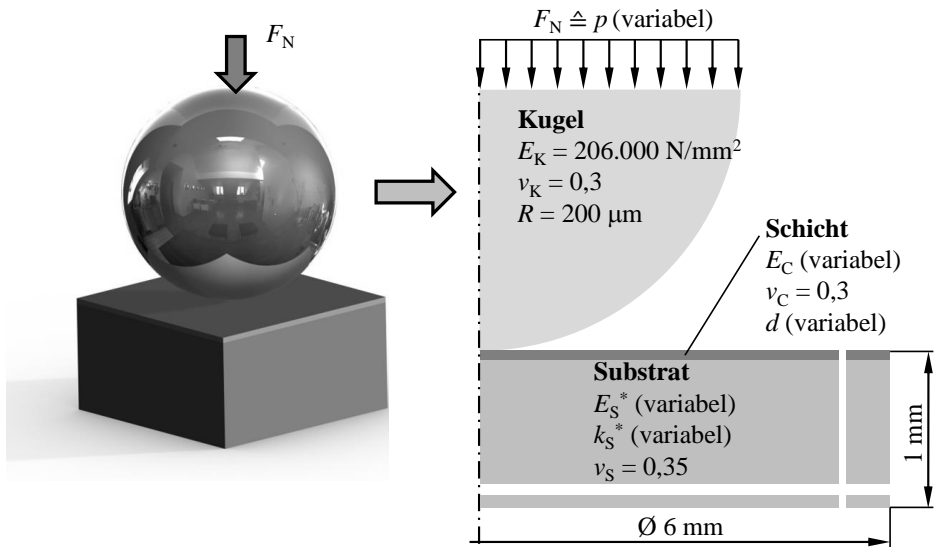


Bild 31: Parametrisierung des FE-Modells

Um die fünf variablen Eingangsgrößen gemäß dem Versuchsplan automatisiert in das Modell und die Simulation überführen zu können, wird ein Skript in der objektorientierten Programmiersprache PYTHON verwendet. Dieses generiert zu jeder Parametereinstellung das zugehörige Inputfile mit der Ausführung der Berechnung und wird in ABAQUS COMMAND gestartet. Auf die Automatisierung der Simulation wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen und auf [S2, S8 und S12] verwiesen.

Folgende Kontakteinstellungen werden gewählt:

- Diskretisierung: surface-to-surface,
- Masterfläche: Kugeloberfläche,
- Slavefläche: Schichtoberfläche,

- Gleitformulierung: small-sliding,
- Druck-Durchdringungs-Charakteristik: hard-contact,
- Haftreibungszahl: 0,4.

Um die Kontaktfindung zwischen den zwei Kontaktflächen robust zu gestalten, wird der Eindringvorgang in insgesamt vier Schritten simuliert:

- Ind-1: Anheben der Kugel um 0,1 mm von der Oberfläche. Last- und Kontaktbedingungen sind deaktiviert.
- Ind-2: Bewegung der Kugel zurück auf die Oberfläche. Die Kontaktbedingung ist aktiviert, die Lastbedingung deaktiviert.
- Ind-3: Aufbringen der Last mit aktivierten Last- und Kontaktbedingungen.
- Ind-4: Die Kugel wird zurück in die Ausgangsposition gebracht, Last- und Kontaktbedingungen sind deaktiviert.

### 5.9.2 Finite-Elemente-Simulation des Ritztests

Um die Rechenzeiten der Kontaktsimulationen der Ritztests zu verkürzen, wird die Flächensymmetrie parallel zur Ritzrichtung genutzt und nur eine Hälfte modelliert und berechnet, mit entsprechender Kompensation der zweiten Hälfte durch die Wahl der Randbedingungen. Um die Knotenanzahl und somit auch die Rechenzeit zu reduzieren, sind die Gesamtabmessungen des Modells verkleinert, ohne dass der Randbereich Einfluss auf die Simulationsergebnisse nimmt.

Simuliert werden drei unterschiedliche Indenter, analog zu den experimentell durchgeführten Ritztests (vgl. Abschnitt 5.5): Ein Rockwell-C-Eindringkörper nach DIN EN ISO 6508-2 [73] mit Diamant-Prüfspitze und Wälzlagerkugeln in den Größen  $\varnothing 3,969$  mm und  $\varnothing 2,778$  mm.

Die Unterseite des Probekörpers ist mit der Sperrung aller sechs Freiheitsgrade fest eingespannt. Auf der Symmetrieebene werden die Verschiebungen lotrecht zur Symmetrieebene sowohl von Indenter, als auch Schicht-Substrat-System gesperrt. Durch Sperrung der Rotationen wird der Indenter an einem Kippen oder Verdrehen gehindert, was der Einspannung im Ritztester entspricht.

Die Indenter werden mit Tetraederelementen mit quadratischer Ansatzfunktion vernetzt. Hierzu werden diese in je vier Zellen aufgeteilt und das Netz mittels biased seeding zur Kontaktstelle hin verfeinert.

Der Schicht-Substrat-Verbund wird mit Hexaederelementen vernetzt. Der Quader wird mithilfe einer Partitionierung in Schicht und Substrat unterteilt und separat vernetzt, sodass die unteren Knoten der Schicht mit den oberen Knoten des Substrates identisch sind. Durch das biased seeding wird das Netz zur Symmetrieebene sowie zur Probenoberfläche und damit der Kontaktfläche hin verfeinert.

Folgende Kontakteinstellungen werden gewählt:

- Diskretisierung: surface-to-surface,
- Masterfläche: Indenteroberfläche,
- Slavefläche: Schichtoberfläche,
- Gleitformulierung: fine-sliding,
- Druck-Durchdringungs-Charakteristik: hard-contact,
- Surface-smoothing: aktiviert,
- Friction formulation: Penalty.

Für eine stabile Kontaktfindung sowie der realitätsgetreuen Abfolge der Modellbildung, wird die Simulation in fünf Schritte aufgeteilt. Nach der Kontaktfindung wird eine Vorkraft aufgebracht. Die Vorkraft entspricht beim experimentellen Ritztest der Findung des Nullpunktes beziehungsweise des Kontakts zwischen Indenter und Probenoberfläche. Danach erfolgen der eigentliche Ritzvorgang und eine Entlastung. Die Einstellungen der einzelnen Schritte sind in Tabelle 4 erläutert und in Bild 32 schematisch dargestellt.

Zur Umsetzung der Versuchspläne dient auch für dieses Modell und die Simulationen ein Script in PYTHON. Hierfür sei auf [S14 und S18] verwiesen.

Die Materialeigenschaften der Indenter werden als ideal-linear-elastisch angenommen, da die Beanspruchungen verhältnismäßig gering und die Belastungsdauer kurz sind sowie eine genaue Auswertung der Spannungen in den Indentern nicht relevant ist. Dem Rockwell-C-Indenter aus Diamant werden ein Elastizitätsmodul  $E$  von  $1,22 \cdot 10^6$  N/mm<sup>2</sup> und eine Querdehnzahl  $\nu_K = 0,20$  zugewiesen. Die Materialeigenschaften der Prüfkugeln sind analog zum FE-Modell für die Indentierungen (Abschnitt 5.9.1) gewählt.

Tabelle 4: Einstellungen je Schritt zur Simulation des Ritztests

Schritt	Ritz-1	Ritz-2	Ritz-3	Ritz-4	Ritz-5
<b>Beschreibung</b>	Kontaktfindung	Kontaktfindung	Vorkraft	Ritzvorgang	Entlastung
<b>Kontaktbedingungen</b>	-	aktiviert	aktiviert	aktiviert	aktiviert
<b>Last (Vorkraft)</b>	-	-	aktiviert	deaktiviert	deaktiviert
<b>Last (<math>F_N</math>)</b>	-	-	-	aktiviert	deaktiviert
<b>Randbedingung Verfahrweg Indenter</b>	o	o	o	Verfahren	Endlage
<b>Randbedingung Indenterhöhe</b>	Anheben (0,1mm)	Absenken auf 0	-	-	Anheben auf 0

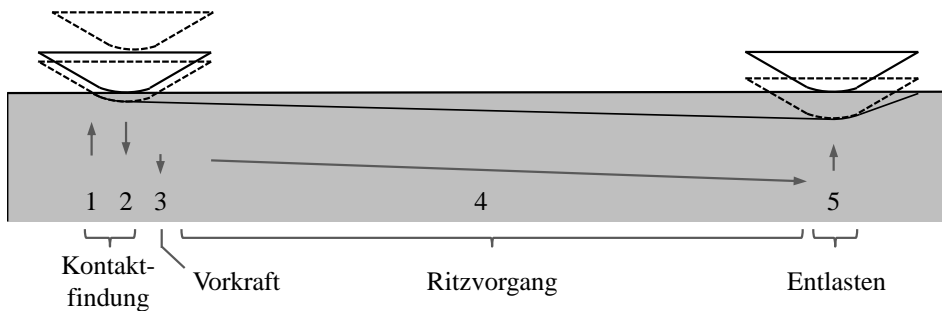


Bild 32: Schematische Darstellung der Schritte zur Simulation des Ritztests

Die Materialeigenschaften der Schichten werden ebenfalls als ideal-linear-elastisch angenommen. Zum einen fehlen für die allermeisten Schichtmaterialien zuverlässige Materialeigenschaften – eine Problematik welche, zumindest für den Elastizitätsmodul, auch in dieser Arbeit behandelt wird. Zum anderen sind die meisten Schichtmaterialien als vergleichsweise spröde anzunehmen. Die Simulationen sollen demnach nur bis zu den entsprechenden Schädigungen ausgewertet werden – das vorgestellte Modell bildet ausschließlich intakte Schicht-Substrat-Verbunde ab. Das Verhalten nach einer Schädigung ist Bestandteil diverser Forschungsarbeiten, jedoch im Bereich der Dünnschichten simulativ nicht als Stand der Technik zu betrachten.

Im Gegensatz zu Indenter und Schicht hat der plastische Anteil der Kunststoffsubstrate einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Simulationen. Der Einsatz umfassender Materialmodelle (Elastizität, Plastizität, Richtungsabhängigkeiten, Ortsabhängigkeiten, Zeitabhängigkeiten, Geschwindigkeitsabhängigkeiten, Temperaturabhängigkeiten) erfordert einen hohen Aufwand in der Bestimmung der dafür notwendigen Materialparameter. Um für eine ingenieurmäßige Herangehensweise einen geeigneten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Aufwand zu finden, wurde das bilineare Materialmodell gewählt. Dieses Modell umfasst Spannung, Dehnung, Elastizität und Plastizität und kann auch Verfestigungen im Material berücksichtigen [120]. Da die experimentellen Versuche und die Simulationen weder hohe Dynamiken noch Untersuchungen über lange Zeiträume hinweg abbilden sollen, wird auf eine zeit- und geschwindigkeitsabhängige Betrachtung verzichtet. Thermisch werden die Materialparameter gemäß den vorherrschenden Laborbedingungen definiert. Weiterhin wird das Probenmaterial als homogen angenommen.

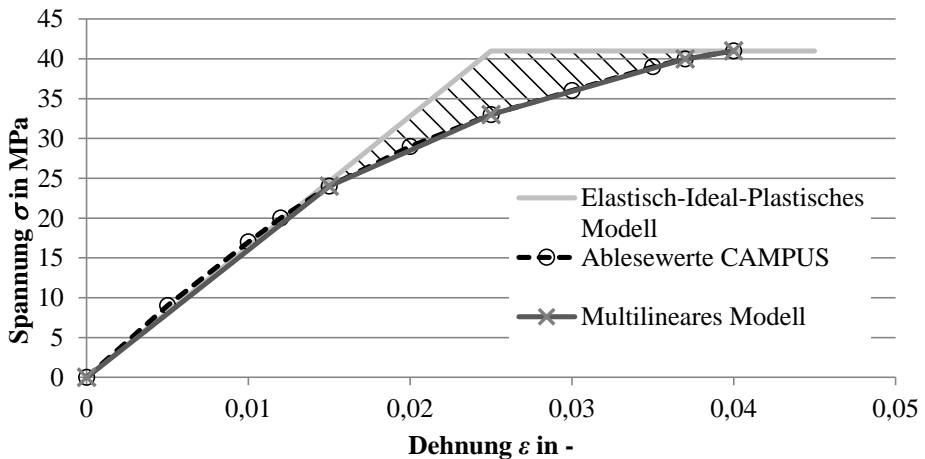


Bild 33: Überführung der Ablesewerte aus der Materialdatenbank CAMPUS [121] in ein multilineares Materialmodell und Vergleich mit einem Elastisch-Ideal-Plastischen Materialmodell am Beispiel von ULTRAMID A3K

Ausgehend von den Materialparametern aus einer Werkstoffdatenbank, zum Beispiel des Kunststofflieferanten, werden die Werte aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die entsprechende Labortemperatur entnommen. Dies ist im Bild 33 beispielhaft mit insgesamt 11 Ablesepunkten (Kreise) dargestellt. Diese Kurve wird in mehrere lineare Abschnitte unterteilt, welche sich der Messwertkurve aus der Datenbank bestmöglich angleicht. Im Beispiel erfolgt dies durch Wahl von fünf Punkten (Kreuze), welche bereits eine zufriedenstellende Übereinstimmung liefern. In Bild 33

zeigt die schraffierte Fläche die starke Abweichung zum elastisch-idealplastischen Materialmodell, welches bei Dehnungen ab 0,015 erhöhte Spannungswerte ausgeben würde.

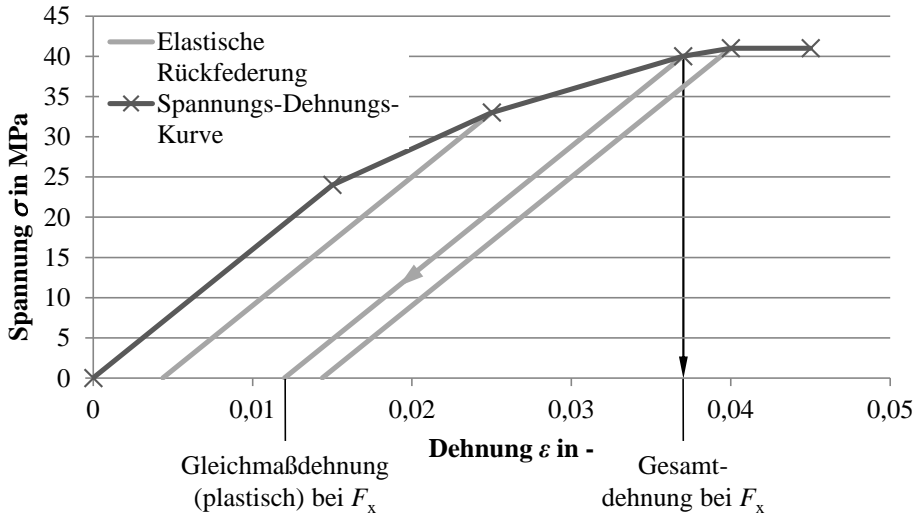


Bild 34: Spannungs-Dehnungsdiagramm mit plastischen Dehnanteilen

Bild 34 zeigt die elastische Rückfederung im multilinearen Modell sowie den Unterschied zwischen der Gesamtdehnung und der plastischen Dehnung. Diese plastischen Dehnungen werden in ABAQUS im Materialmodell hinterlegt.

## 5.10 Statistische Versuchsplanung mittels Latin Hypercube Sampling

Wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben, beinhaltet das Modell zur Bestimmung der elastischen Schichteigenschaften mehrere variable Parameter und eine Ausgabegröße. Mittels Latin Hypercube Sampling wird hierfür in MATLAB ein Versuchsplan erstellt und mit dem „maximin-Kriterium“ optimiert. Dieser Optimierungsschritt wählt in fünf Schritten eine Matrix mit einer maximalen Minimaldistanz der Punkte aus, was eine gleichmäßigere Verteilung der Zufallszahlen sicherstellt.

Um den Versuchsplan entsprechend der gewünschten Parameterbereiche aufzustellen, wird eine Schleife programmiert. In einer  $(p \times 2)$  - Matrix wird in jeder Zeile das Minimum und Maximum der jeweiligen Variable eingetragen und aus der Differenz die Bandbreite errechnet. Um die Zufallszahlen des Latin Hypercube Samplings zwischen Null und Eins auf diese

Bandbreite abzubilden, werden sie mit der Differenz multipliziert und das Minimum addiert. Der gewonnene Wertebereich liegt zwischen dem Minimum und Maximum, die einzelnen Zahlenwerte werden entsprechend gerundet.

### Modell mit Schicht

Der aufgestellte Versuchsplan enthält insgesamt 100 Versuche mit der in Tabelle 5 aufgezeigten Parametrisierung.

Tabelle 5: Parametrisierung des Versuchsplans für das Modell mit Schicht

Parameter	Minimum	Maximum
Kraft $F_N$	0,1 N	1,0 N
Schichtdicke $d$	1 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$
E-Modul der Schicht $E_C$	5 GPa	700 GPa
Ersatz E-Modul des Substrates $E_S^*$	725 MPa	3 770 MPa
Ersatz Fließgrenze des Substrates $k^*$	52 MPa	130 MPa

### Modell ohne Schicht

Das Modell ohne Schicht entspricht im Aufbau einer vereinfachten Version des Modells mit Schicht. Anstatt der fünf variablen Parameter besitzt dieses nur drei, deren Parametrisierung Tabelle 6 zu entnehmen ist.

Tabelle 6: Parametrisierung des Versuchsplans für das Modell ohne Schicht

Parameter	Minimum	Maximum
Kraft $F_N$	0,1 N	1,0 N
Ersatz E-Modul des Substrates $E_S^*$	725 MPa	3 770 MPa
Ersatz Fließgrenze des Substrates $k^*$	52 MPa	130 MPa

## 5.11 Signifikanztest

Anhand der Parameterprüfung werden mithilfe der beurteilenden Statistik die Verteilungen vorliegender Stichproben ausgewertet. Auf Basis einer Hypothese über die Verteilung wird mit objektiver Rechnung nach den

Regeln der mathematischen Statistik festgestellt, ob mit der vorliegenden Stichprobe die Hypothese zugunsten der Gegenhypothese abzulehnen sei oder ob es (mit dieser Stichprobe) keinen Grund für die Ablehnung der Hypothese gibt. [122]

Für den ausgewählten t-Test wird eine normalverteilte Grundgesamtheit vorausgesetzt. Mithilfe des sogenannten t-Wertes kann das Vertrauensintervall bestimmt werden. Dies hängt unter anderem vom Stichprobenumfang und vom Signifikanzniveau ab. Für sehr große Stichproben geht die student'sche t-Verteilung in die Normalverteilung über [123]. Für den Vergleich zweier empirischer Mittelwerte unabhängiger Stichproben ergibt sich bei unbekanntem und möglicherweise ungleichen Varianzen nach [122] die Prüfgröße  $t$

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\frac{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} + \frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2}} \quad (19)$$

mit den jeweiligen arithmetischen Mittelwerten von  $x_i$ , den Standardabweichungen  $s_i$  und den Stichprobengrößen  $n_i$ . Weiterhin ist zu definieren, ob der Ablehnungsbereich eine ein- oder zweiseitige Form annimmt. Fällt die Prüfgröße  $t$  in den Ablehnungsbereich der betrachteten Fragestellung, dann ist die Nullhypothese abzulehnen. Andernfalls sprechen die verbundenen Zufallsstichproben nicht signifikant gegen die Hypothese, es gibt also keinen Grund zur Ablehnung der Nullhypothese.

Für eine schnelle Entscheidung bei zweiseitiger Fragestellung wird in dieser Arbeit MICROSOFT EXCEL verwendet, da diese Software an sehr vielen Arbeits- und Prüfrechnern verfügbar ist. Die Funktion *TTEST* liefert direkt den P-Wert der zweiseitigen Überschreitungswahrscheinlichkeit [122].

Wird wegen der zweiseitigen Gegenhypothese  $H_1$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (20)$$

die zweiseitige Fragestellung behandelt, so ist die Hypothese  $H_0$

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (21)$$

zugunsten der Gegenhypothese  $H_1$  abzulehnen, wenn der Ergebniswert der Excel-Funktion *TTEST* kleiner als das vorgegebene Signifikanzniveau  $\alpha$  ist:

$$TTEST(\dots; \dots; 2; 3) < \alpha \rightarrow \text{Ablehnung } H_0, \text{ Annahme } H_1 \quad (22)$$

Hierbei werden in der Funktion *TTEST* an den ersten beiden Stellen die jeweiligen Stichproben eingetragen. An dritter Stelle die Zahl 2 für zweiseitige Fragestellung (zweiseitige Verteilung) und an vierter Stelle die Zahl 3

für den heteroskedastischen Testtyp (zwei Stichproben mit ungleicher Varianz) [124].

## 5.12 Metamodelle

### 5.12.1 Response Surface Methodology

Die gezeigten Metamodelle mittels Response Surface Methodology (RSM) basieren in Teilen auf Ergebnissen der Arbeiten [S2] und [S12] und wurden in [125] auszugsweise veröffentlicht und wissenschaftlich diskutiert.

Die RSM wird aus den normierten und gerundeten Simulationsergebnissen gebildet und ein Polynom zweiter Ordnung erzeugt. Für die vorhandenen fünf Parameter  $x_i$  ( $E_S^*$ ,  $k^*$ ,  $d$ ,  $E_C$  und  $F_N$  aus Tabelle 2, S. 46) bedeutet dies formal:

$$\begin{aligned}
 f = & \beta(1) + \beta(2) \cdot x_1 + \beta(3) \cdot x_2 + \beta(4) \cdot x_3 + \beta(5) \cdot x_4 + \beta(6) \cdot x_5 + & (23) \\
 & + \beta(7) \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta(8) \cdot x_1 \cdot x_3 + \beta(9) \cdot x_1 \cdot x_4 + \beta(10) \cdot x_1 \cdot x_5 + \\
 & + \beta(11) \cdot x_2 \cdot x_3 + \beta(12) \cdot x_2 \cdot x_4 + \beta(13) \cdot x_2 \cdot x_5 + \\
 & + \beta(14) \cdot x_3 \cdot x_4 + \beta(15) \cdot x_3 \cdot x_5 + \\
 & + \beta(16) \cdot x_4 \cdot x_5 + \\
 & + \beta(17) \cdot x_1^2 + \beta(18) \cdot x_2^2 + \beta(19) \cdot x_3^2 + \beta(20) \cdot x_4^2 + \beta(21) \cdot x_5^2
 \end{aligned}$$

In MATLAB wird hierfür die kommerziell verfügbare STATISTICS TOOLBOX verwendet und mit der Funktion *regstats* eine multilineare Regression durchgeführt. Zur Berechnung der Regressionskoeffizienten  $\beta$  (also zum Lösen des Gleichungssystems der Dimension  $n_\beta$ ) wird in MATLAB die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet. [126]

### 5.12.2 Künstliche Neuronale Netze

Die vorliegenden Künstlichen Neuronalen Netze wurden im Rahmen der Arbeit [S2] erstellt und auszugsweise in [125] veröffentlicht und wissenschaftlich diskutiert.

In MATLAB wird die Funktion *create\_fit\_net* verwendet, welche aus übergebenen Eingabe- (input) und Ausgabewerten (target) ein neuronales Netz erzeugt. Hierfür werden im Vektor *numHiddenNeurons* die Anzahl der verdeckten Schichten sowie die Anzahl der Neuronen pro versteckte Schicht angegeben.

Die Eingabeschicht besteht aus fünf variablen Parametern (Tabelle 5) und die Ausgabeschicht aus einem Ausgabeparameter. Nach [92] ergibt sich für den vorliegenden Fall ein optimales Netz bei der Wahl von einem bis zehn Neuronen. Des Weiteren ist aufgrund der gegebenen Stetigkeit der

Funktionen davon auszugehen, dass bereits eine verdeckte Schicht ausreicht. Um den Einfluss der Wahl der Schicht- und Neuronenanzahl zu untersuchen, werden mittels *newfit*-Befehl zehn Netze mit nur einer Schicht erzeugt auf der sich ein bis zehn Neuronen befinden. Zusätzlich werden drei Netze mit zwei verdeckten Schichten und fünf, neun beziehungsweise zehn Neuronen auf jeder dieser Schichten überprüft.

Bevor die Netzwerke mit dem Befehl *train* und den definierten Ein- und Ausgabewerten trainiert werden, muss festgelegt werden, welche Daten zum Trainieren und welche Daten zum Testen des Netzwerkes verwendet werden sollen. Auf Grundlage der Wertetabelle aus den FE-Simulationen werden anschließend die Test- und Trainingsdaten in transponierte Matrizen und Vektoren gespeichert.

Nun können die Ergebnisse des Netzes an den definierten Test-Punkten errechnet und mit den Ergebnissen der FE-Simulationen verglichen werden. Als Kriterium für die Güte der erstellten Netze und zur Auswahl des geeignetsten Netzes wird der in Abschnitt 2.9.3 vorgestellte Coefficient of Prognosis (CoP-Wert) verwendet.

## 6 Verifizierung der Verfahren zur Ermittlung des Schicht-Elastizitätsmoduls

### 6.1 Verifizierung der Finite-Elemente-Indentierungssimulationen

Die Einstellungen einer FE-Kontaktsimulation können erhebliche Auswirkungen auf die Ergebnisse haben [127]. Zugleich muss das Problem zuverlässig konvergieren und für den praktischen Einsatz mit einem verhältnismäßigen Aufwand an Rechenzeit und -ressourcen lösbar sein. Die in Abschnitt 5.9.1 gewählten Einstellungen werden nachfolgend diskutiert und verifiziert. Die Vorgehensweise der Verifizierung ist auch auf andere Kontaktprobleme übertragbar. Die Ergebnisse wurden bereits auszugsweise in [128] publiziert und wissenschaftlich diskutiert.

Um die Kontakteinstellungen numerisch zu verifizieren, wird das Modell weiter vereinfacht und mit analytischen Berechnungen nach HERTZ [129] verglichen. Die Vereinfachungen dienen der Erfüllung der Voraussetzung der HERTZ'schen Theorie:

- Die Eigenschaften der Schicht werden für diesen Zweck gleich den Eigenschaften des Substratmaterials gesetzt, sodass ein **homogener und isotroper Körper mit linear-elastischen Eigenschaften** entsteht. Um die Plausibilität der Zahlenwerte zusätzlich überprüfen zu können, wird für diese Verifizierung der Elastizitätsmodul eines Stahlwerkstoffes herangezogen, da hier eine größere Erfahrungsbasis mit den entstehenden Beanspruchungen vorliegt.
- Bereits ohne Anpassungen ist die **Kontaktfläche eben und klein** gegenüber den geometrischen Abmessungen der Körper.
- Das Modell wird so angepasst, dass zwischen Kugel und Oberfläche **Reibungsfreiheit ohne Schubspannungen in der Kontaktfläche** vorliegt.
- Die Körper können als **elastische Halbräume** betrachtet werden.

So ergibt sich nach [130] im Kontakt einer Kugel mit einem elastischen Halbraum der maximale Druck  $p_{max}$  gemäß

$$p_{max} = \sqrt[3]{\frac{6 F \cdot E^2}{\pi^3 (1 - \nu^2)^2 \cdot R^2}} \quad (24)$$

aus dem Elastizitätsmodul  $E$  für Körperkombinationen

$$\frac{1 - \nu^2}{E} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (25)$$

und dem Kontaktradius  $a$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 F \cdot R}{4 E}} \quad (26)$$

Die analytische Lösung der Komponenten des Spannungstensors auf der Koordinatenachse (mit  $z$  in Kontaktierungsrichtung) lautet nach JOHNSON [131]

$$\sigma_z = -p_{max} \left(1 + \frac{z^2}{a^2}\right)^{-1} \quad (27)$$

und der Koordinate  $r$  in radialer Richtung

$$\sigma_r = -p_{max} \left[ (1 + \nu) \left(1 - \frac{z}{a} \arctan \frac{a}{z}\right) - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{z^2}{a^2}\right)^{-1} \right]. \quad (28)$$

Mithilfe dieser Hauptspannungen lässt sich die maximale Schubspannung  $\tau_1$  bestimmen:

$$\tau_1 = \frac{1}{2} |\sigma_z - \sigma_r| = p_{max} \left| \frac{1 + \nu}{2} \left(1 - \frac{z}{a} \arctan \frac{a}{z}\right) - \frac{3}{4} \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2} \right| \quad (29)$$

Nach der Schubspannungshypothese von TRESCA ergibt sich für die Vergleichsspannung:

$$\sigma_v = 2 \cdot \tau_{max} = \max |\sigma_z - \sigma_r| \quad (30)$$

Für die Verifizierung der Berechnungen wird zunächst der Elementtyp untersucht. ABAQUS stellt neben den CAX4-Elementen zusätzlich CAX4R-Elemente mit reduzierter Integration für eine beschleunigte Lösung der Gleichungen und mit „hourglass control“ zur Verfügung. Beim vereinfachten Modell (Schichteigenschaften sind gleich den Substrateigenschaften) zeigen beide Elementtypen das identische Ergebnis, welches um -1,40 % vom

analytischen Ergebnis abweicht. Die Rechenzeit fällt durch die reduzierte Integration um 23 % von 422 s auf 324 s. Wird jedoch das Modell mit Hartstoffschicht betrachtet, zeigt sich in den Berechnungsergebnissen ein Unterschied von 4,04 % zwischen beiden Elementtypen, wobei die reduzierte Integration das Ergebnis „zu weich“ wiedergibt. Trotz der Zeitersparnis von 31 % wird daher von der Reduced Integration zugunsten einer höheren Ergebnisqualität Abstand genommen.

Die Kontaktdiskretisierung wird anhand des vereinfachten Modells überprüft, da dieses durch den homogenen Verlauf im Kontaktpartner mit der Slave-Fläche anschaulichere Ergebnisse bezüglich der Kontaktierung verspricht. Wie in Bild 35 rechts ersichtlich, bilden sich bei der Node-to-surface Diskretisierung Spannungslücken zwischen und entsprechende Beanspruchungskonzentrationen an den Slave Knoten. Diese führen zu starken Abweichungen der Ergebnisse. Im Gegensatz dazu zeigt die Surface-to-surface Diskretisierung (Bild 35, links) einen gleichmäßigen Spannungsverlauf und sehr geringe Abweichungen zur analytischen Referenz. Diese wird somit bei allen folgenden Simulationen verwendet.

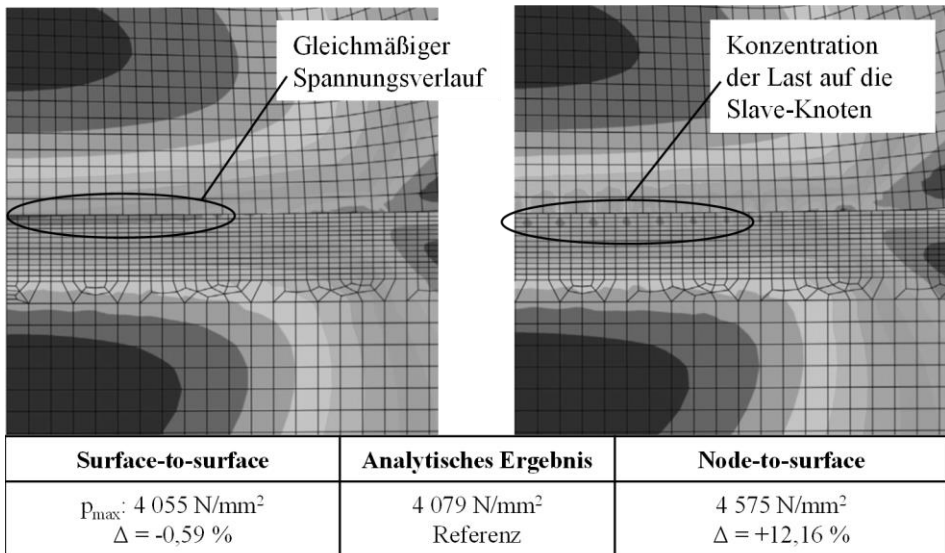


Bild 35: Qualitativer und quantitativer Vergleich der Kontaktdiskretisierung

Um die ermittelten Beanspruchungen auch in der Substrattiefe zu verifizieren, werden diese in Bild 36 in Kontaktierungsrichtung aufgetragen und mit den analytischen Ergebnissen verglichen. Für eine bessere Vergleichbarkeit mit Literaturwerten wurde eine in Fachbüchern übliche Darstellung gewählt und die Spannungen auf den maximalen Kontaktdruck  $p_{\max}$

und die Position in Koordinatenrichtung  $z$  auf den Kontaktradius  $a$  normiert. Es lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung der quantitativen Werte mit einer maximalen Abweichung von 1,70 % ( $\sigma_{v\_SH}$  bei  $z/a: 0,47$ ) feststellen. Der Verlauf der Kurven stimmt zudem qualitativ mit den Erkenntnissen etablierter Fachbücher wie [132] überein, welche ebenfalls die maximalen Schub- und Vergleichsspannungen (Schubspannungshypothese) bei einer normierten Tiefe von  $z/a = 0,47$  errechnen. Auch der Kontaktradius  $a$  wird verifiziert indem der Kontaktdruck von der Kontaktmitte aus in radialer Richtung aufgetragen wird und am Kontaktrand auf 0 abfällt. Der numerische Abstandswert stimmt mit 85  $\mu\text{m}$  exakt mit dem analytischen Wert überein.

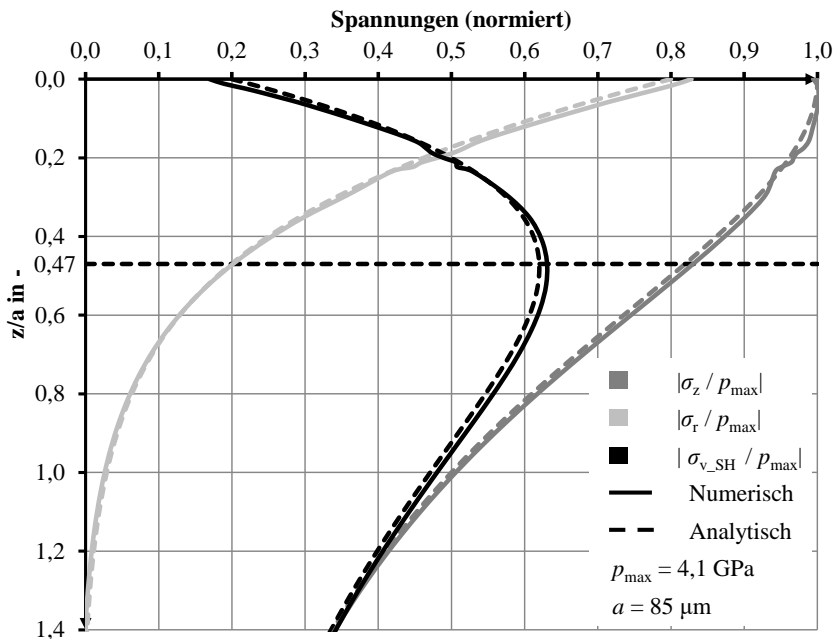
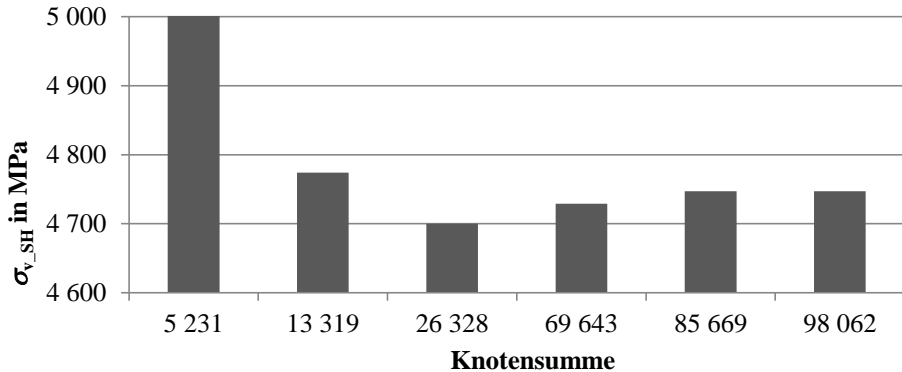


Bild 36: Vergleich der numerischen mit den analytischen Ergebnissen

Mittels einer Konvergenzanalyse wird eine angemessene Netzdichte ermittelt und die Verteilung der Knoten mittels Partitionen auf Kugel, Schicht und Substrat festgelegt. Um den Übergang von unterschiedlichen Materialparametern bei Schicht und Substrat berücksichtigen zu können, wird die Konvergenzanalyse mit einer exemplarischen Schicht (CrN) durchgeführt. In Bild 37 ist zu erkennen, dass für die resultierende Vergleichsspannung  $\sigma_{v\_SH}$  das Ergebnis mit zunehmender Knotenanzahl konvergiert. Somit können geeignete Netzdichten für Kugel und Schicht-Substrat-System gefunden werden, um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen und gleichzeitig

einen unangemessen hohen Rechenaufwand vermeiden. Über die Einstellung *Biased Seeding* werden ungleichmäßige Verteilungen der Elemente entlang von Kante definiert, wobei der Bias-Wert das Verhältnis der Größe des größten Elements zur Größe des feinsten Elements definiert.



Versuch #	Knotensumme	$\sigma_{v\_SH}$ in MPa	rel. Abweichung zu Versuch # 6 in %
1	5 231	5 008	5,50
2	13 319	4 774	0,57
3	26 328	4 700	-0,99
4	69 643	4 729	-0,38
5	85 669	4 747	0
6	98 062	4 747	0

Bild 37: Konvergenzanalyse zur Ermittlung einer angemessenen Netzdichte

## 6.2 Verifizierung und Vergleich der Metamodelle

Um die Approximationsgüte der Metamodelle zu überprüfen, wird der Coefficient of Prognosis (CoP) verwendet, welcher als modellunabhängiges Qualitätskriterium die Vorhersagequalität des Modells quantifiziert (Abschnitt 2.9.3). Im Rahmen einer Split Validation werden von den 100 Versuchsreihen 70 zum Erstellen und 30 zur Berechnung der Güte der Metamodelle herangezogen.

### 6.2.1 Response Surface Methodology (RSM)

Das in Abschnitt 5.12.1 beschriebene Metamodell der *Response Surface Methodology* hat mit einem CoP-Wert und einem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von

jeweils 0,9987 eine sehr gute Vorhersagegüte. Das heißt die durchgeführten Simulationen werden im Mittel mit einer Genauigkeit von 99,87 % von der Response Surface richtig mathematisch beschrieben. In Bild 38 ist die gute Übereinstimmung der Ergebnisse des Regressionsmodells und der FE-Simulationen mit relativen Abweichungen von maximal 2,37 % (bei Testpunkt #25) zu sehen.

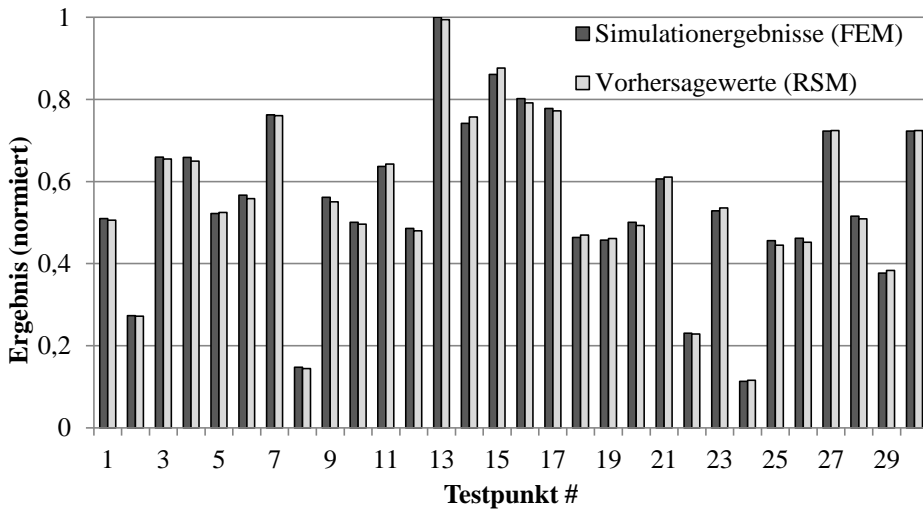


Bild 38: Ergebnisse der Testdaten aus der RSM und der FE-Simulation im Vergleich

### 6.2.2 Künstliche Neuronale Netze

Wie in Abschnitt 5.12.2 beschrieben, ist die Vorhersagegüte von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) insbesondere von der Anzahl an Schichten und den darauf platzierten Neuronen abhängig. In einer Vorstudie werden Netze mit einer verdeckten Schicht und zugleich steigender Neuronenzahl erzeugt und die Ergebnisse in Tabelle 7 aufgeführt. Weiter werden auch Neuronensätze mit zwei Schichten untersucht, welche für die vorliegende Aufgabenstellung jedoch eine geringere Vorhersagegüte zeigen (nicht dargestellt).

Die Netze mit der besten Vorhersagegüte besitzen auf einer Schicht 5 beziehungsweise 9 Neuronen und liefern einen CoP-Wert von jeweils 0,9972. Bild 39 vergleicht die Ergebnisse beider Netze mit den Simulationsergebnissen an den Testpunkten. Beide Netze zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen, welche Abweichungen in unterschiedlichen Ausprägungen zeigen, insgesamt betrachtet jedoch zum selben Wert der Übereinstimmungsgüte auf hohem Niveau kommen.

Tabelle 7: Vergleich der Vorhersagegüte für verschiedene Einstellungen der künstlichen neuronalen Netze

Anzahl der Schichten	Neuronen pro Schicht	CoP
1	1	0,3385
1	2	0,9880
1	3	0,9946
1	4	0,9961
1	5	0,9972
1	6	0,9886
1	7	0,9969
1	8	0,9962
1	9	0,9972
1	10	0,9971

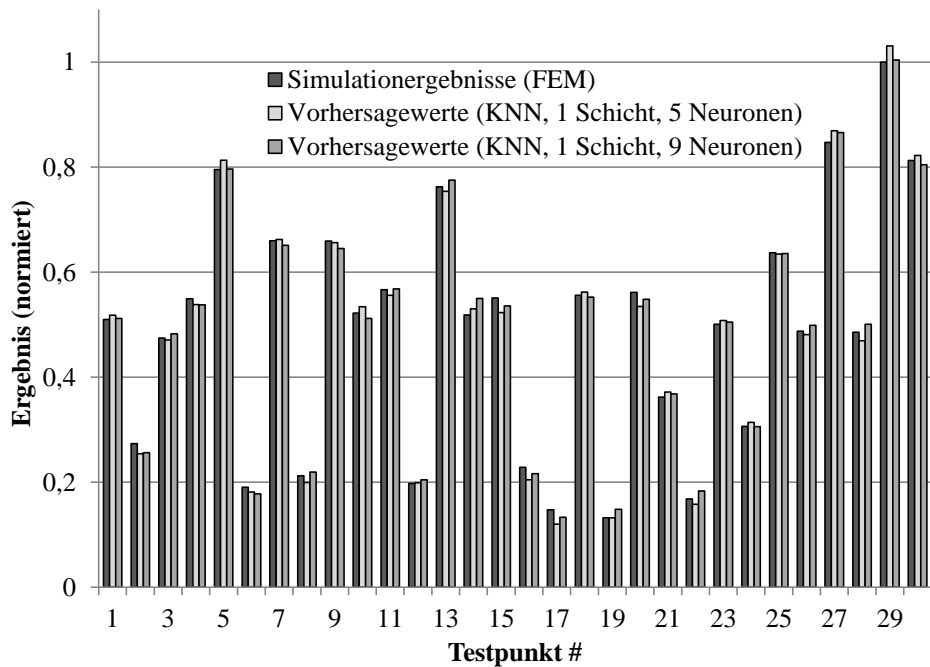


Bild 39: Ergebnisse der Testdaten der beiden besten Künstlichen Neuronalen Netze und der FE-Simulation im Vergleich

### 6.2.3 Vergleich der Metamodelle

Im Vergleich zur Response Surface Methodology (RSM) sind die maximalen relativen Abweichungen bei den Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) höher, was im Gesamtergebnis auch die etwas niedrigeren CoP-Werte bestätigen. Für den vorhandenen Datensatz zeigt das RSM-Modell die bessere Vorhersagegüte. Im Praxisfall muss dies aber nicht zwangsweise das geeignetere Modell sein. Die vorhandenen Vorhersageergebnisse wurden aus einem sehr gleichmäßig verteilten Versuchsplan ermittelt. Möchte der Anwender beispielsweise im Laufe der Zeit zusätzliche Daten generieren und hierfür ergänzende Simulationen in weiteren Wertebereichen durchführen, kann er beide Metamodelle anpassen. Dies kann jedoch zu sehr ungleichmäßig verteilten Eingangsgrößen führen, womit insbesondere künstliche neuronale Netzwerke tendenziell besser umgehen können und diverse Trainings-Strategien zur Verfügung stehen, welche für ungleichmäßige Trainingsdaten entwickelt wurden [133].

## 6.3 Sensitivität der Indentierungsparameter

Ein großer Vorteil der Metamodelle ist neben der schnellen Berechnung von einzelnen Punkten auch die Möglichkeit, die Zusammenhänge in 3D-Plots darzustellen. Dem Anwender kann so ein gutes Bild über die Zusammenhänge und Einflüsse der jeweiligen Eingangsparameter mit ihrer jeweiligen Sensitivität auf die Ausgangsgröße vermittelt werden. Im Folgenden werden in den 3D-Plots jeweils zwei Parameter variiert und der Einfluss auf die Eindringtiefe dargestellt. Werden Parameter nicht variiert, sind sie im jeweiligen Plot auf die Einstellungen in Tabelle 8 fixiert:

Tabelle 8: Fixierte Parameterwerte in 3D-Plots

Parameter	Wert
Kraft $F_N$	0,55 N
Schichtdicke $d$	3,0 $\mu\text{m}$
E-Modul der Schicht $E_C$	350 GPa
Ersatz E-Modul des Substrates $E_S^*$	2,25 GPa
Ersatz Fließgrenze des Substrates $k^*$	90 MPa

Wie zu erwarten, zeigt der Substrat-Elastizitätsmodul in Bild 40 mit einer Differenz von  $\Delta h_1 \approx 5 \mu\text{m}$  (über 3 GPa hinweg) einen wesentlich größeren Einfluss auf die Eindringtiefe des Indenters als die Schichtdicke. Dennoch

ist deren Einfluss mit einer Differenz von etwa  $\Delta h_2 \approx 1 \mu\text{m}$  (über einen Wertebereich von  $4 \mu\text{m}$ ) deutlich zu erkennen. Ebenfalls belegt der Plot die Annahme, dass der Einfluss der Schichtdicke – und somit der Einfluss der gesamten Schicht – bei geringeren Substrat-Elastizitätsmoduln am größten ist. Somit sind Kunststoffsubstrate durch den im Vergleich zu metallischen oder keramischen Substratwerkstoffen niedrigen Elastizitätsmodul für die Untersuchung und Anwendung des Effektes besonders geeignet.

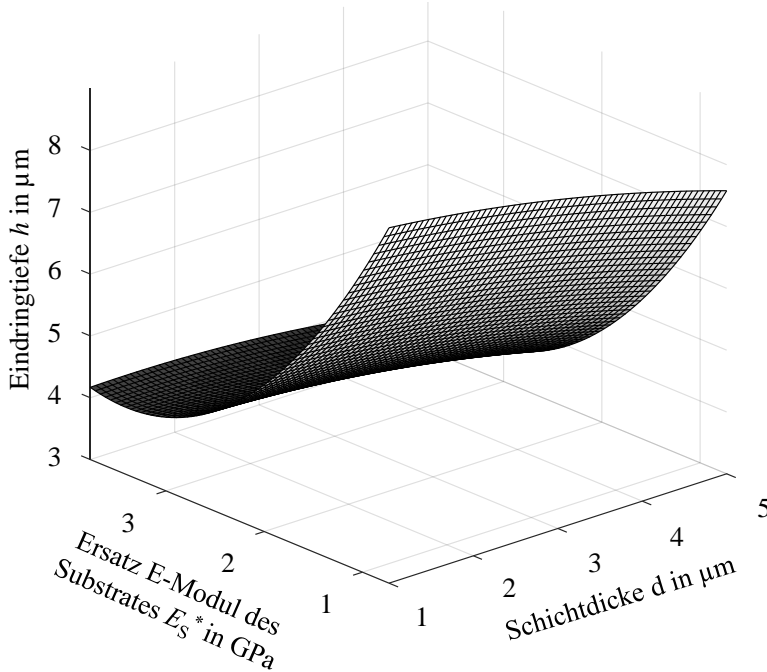


Bild 40: 3D-Plot der Eindringtiefe in Abhängigkeit von Substrat-Elastizitätsmodul und Schichtdicke

Analog verhält sich der Effekt in Bild 41 für den Schicht-Elastizitätsmodul. Auch hier ist der Einfluss des Substrat-Elastizitätsmoduls mit der Differenz von  $\Delta h_3 \approx 5 \mu\text{m}$  (über einen Wertebereich von  $3 \text{ GPa}$ ) dominant. Der Einfluss des Schicht-Elastizitätsmoduls mit einer Differenz von  $\Delta h_4 \approx 1 \mu\text{m}$  (über einem Wertebereich von  $690 \text{ GPa}$ ) ist aber auch ohne Anpassung der Skala klar ersichtlich. Hier nimmt der Versteifungseffekt – also die Reduktion der Eindringtiefe durch die Hartstoffschicht – ebenfalls mit abnehmendem Substrat-Elastizitätsmodul zu.

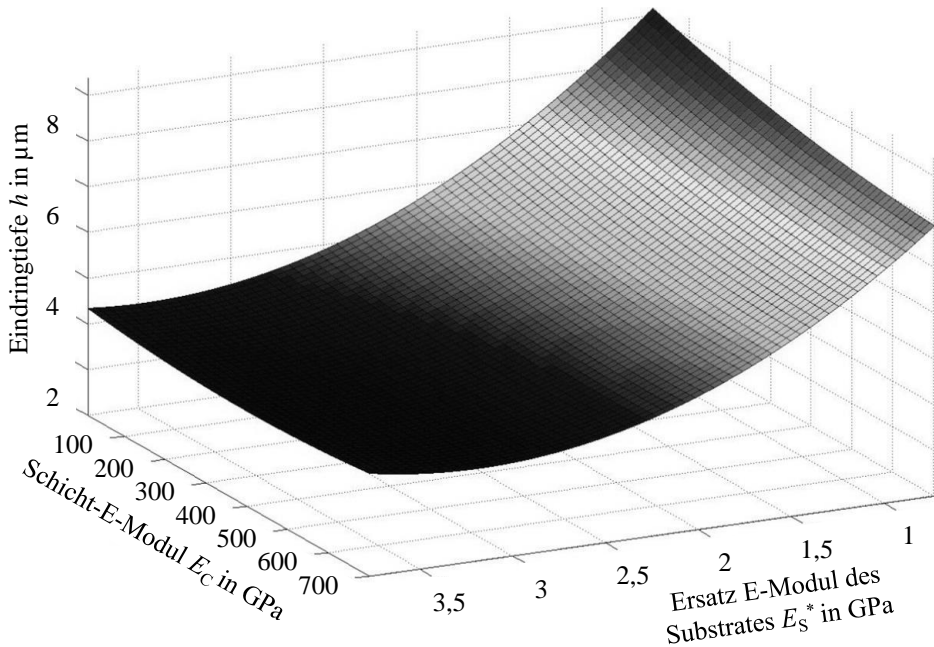


Bild 41: 3D-Plot der Eindringtiefe in Abhängigkeit von Substrat-Elastizitätsmodul und Schicht-Elastizitätsmodul

Bild 42 zeigt die Eindringtiefe bei Variation der Normalkraft und Schichtdicke. Die zweidimensionalen Ausschnitte, normal zur Achse der Schichtdicke, können somit als Kräfteindringkurven der Indentierung (vergleiche Bild 11) bei elastisch-ideal plastischem Stoffverhalten interpretiert werden. Auch hier hat erwartungsgemäß die Variation der Normalkraft mit einer Differenz von fast  $7 \mu\text{m}$  bei einer Erhöhung um  $0,9 \text{ N}$  eine erheblich höhere Wirkung als die steigende Schichtdicke von  $1$  auf  $5 \mu\text{m}$  welche die Eindringtiefe lediglich um etwa  $1,5 \mu\text{m}$  verringert. Die Kräfteindringkurve mit verhältnismäßig dicker Schicht ist deutlich degressiver ausgeprägt als mit dünner Hartstoffschicht – oder analog dazu ohne Hartstoffschicht.

Wie die 3D-Plots zeigen, haben die Schichtparameter wie zu erwarten – verglichen mit einigen Substrat- oder experimentellen Parametern (Normalkraft) – eine verhältnismäßig geringe Sensitivität bezüglich der Eindringtiefe. Dennoch ist deren Einfluss innerhalb der üblichen Parameterbereiche Schichtdicke und Schicht-Elastizitätsmodul deutlich sichtbar und somit messtechnisch erfassbar und auswertbar.

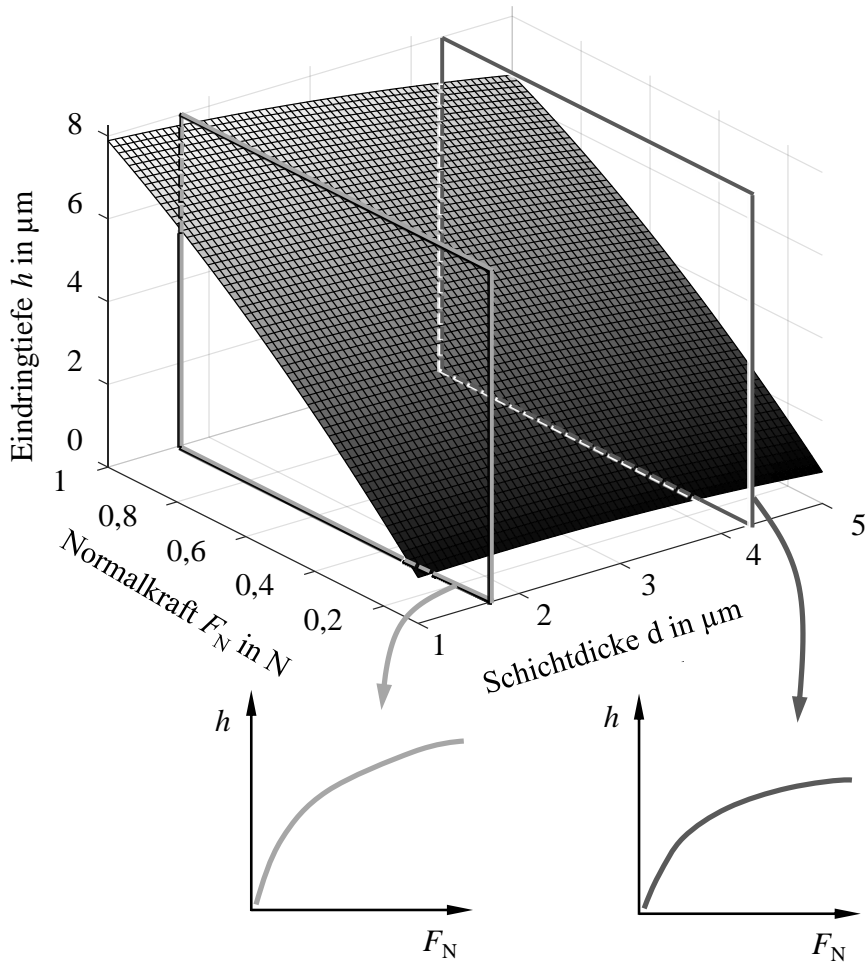


Bild 42: 3D-Plot der Eindringtiefe in Abhängigkeit von Normalkraft auf den Indenter und Schichtdicke



## 7 Ergebnisse der Methode zur Ermittlung des Schicht-Elastizitätsmoduls

### 7.1 Anwendung der Methode

#### 7.1.1 Probekörper

Aufgrund der positiven mechanischen Eigenschaften und der Eignung zur Vakuumbeschichtung wird Acrylester-Styrol-Acrylnitril (ASA) als Substratwerkstoff der zu untersuchenden Probekörper gewählt. Zur Bestimmung der Schichtdicken und für die Indentierungen werden scheibenförmige Proben verwendet (Bild 43, rechts). Für die im Abschnitt 7.2 beschriebenen Verifizierungen auf dem Biegeprüfstand werden Hohlprofile mit gleichem Werkstoff auf identische Weise konditioniert, beschichtet und getestet. Wie Bild 43, links zeigt, haben die Außenkanten des nahezu scharfkantigen, quadratischen Querschnittes einen Abstand von 10 mm, der Abstand der Kanten des Hohlprofil-Innenraums beträgt 8 mm bei einer Probenlänge von 120 mm.

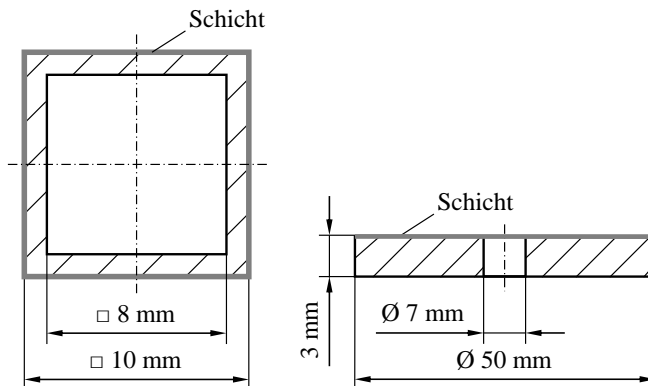


Bild 43: Abmessungen der Probekörper für die Biegeprüfung (links) und weiteren Charakterisierungen (rechts)

Um bei den unterschiedlichen Proben nahezu identische Oberflächen herzustellen, werden die Kunststoffsubstrate nach einer alkoholischen Reinigung im Ultraschallbad jeweils einem Plasmaätzprozess in ionisiertem Argon unterzogen. Dies beseitigt letzte Verunreinigungen, sorgt durch einen Sputterprozess an der Probenoberfläche für vergleichbare Rauheiten und aktiviert die Oberfläche für eine bessere Schichthaftung. Mittels Vakuumlichtbogenverdampfen werden zwei unterschiedliche Schichttypen, eine

Titannitrid- (TiN) und eine Chromnitridschicht (CrN), aufgebracht. Zur Haftvermittlung werden zunächst rein metallische Schichten (Ti bei den TiN-Proben und Cr bei den CrN-Proben) von wenigen 10 nm abgeschieden, welche in der weiteren Modellbildung vernachlässigt werden. Anschließend erfolgt der eigentliche Beschichtungsschritt durch reaktives Vakuumlichtbogenverdampfen. Für die TiN-Proben wird ein Titantarget, für die CrN-Proben ein Chromtarget verwendet, jeweils mit Stickstoff als Reaktivgas. Die Schichten werden in Dreifachrotation auf der Außenseite der Probekörper mit den jeweiligen Schichtdicken bei der TiN-Schicht von 0,40  $\mu\text{m}$ , 0,83  $\mu\text{m}$ , 1,03  $\mu\text{m}$ , 1,32  $\mu\text{m}$  und 1,74  $\mu\text{m}$  abgeschieden. Bei der CrN-Schicht betragen die Schichtdicken 0,59  $\mu\text{m}$ , 1,15  $\mu\text{m}$  und 1,21  $\mu\text{m}$ .

Tabelle 9: Arithmetische Mittelwerte der Profilordinaten  $R_a$  der Probekörper mit Standardabweichungen  $\sigma$

Schichtwerkstoff	Schichtdicke $d$ in $\mu\text{m}$		$R_a$ in $\mu\text{m}$	
		$\sigma$		$\sigma$
Substrat (ohne)	-		0,37	0,03
TiN	0,40	0,10	0,46	0,15
TiN	0,83	0,17	0,38	0,12
TiN	1,03	0,08	0,32	0,16
TiN	1,32	0,29	0,49	0,16
TiN	1,74	0,42	0,72	0,12
CrN	0,59	0,07	0,51	0,19
CrN	1,15	0,10	0,46	0,15
CrN	1,21	0,21	0,59	0,18

Die Rauheiten der Oberflächen werden an den scheibenförmigen Probekörpern gemessen. Tabelle 9 fasst die Dicken sowie die Rauheiten der Schichten mit deren Standardabweichungen zusammen. Aufgrund diverser Änderungen der Norm(en) zu Bestimmung und Angabe von Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit sei erwähnt, dass sich die hier angegebenen arithmetischen Mittelwerte der Profilordinaten  $R_a$  auf die Norm DIN EN ISO 4287:2010-07 mit Ausgabe der Kenngröße von 1997 stützen DIN EN ISO 4287 [134].

### 7.1.2 Substrateigenschaften

Um die Schichtparameter präzise zu bestimmen, werden zunächst die elastischen Ersatzparameter  $E_s^*$  und  $k^*$  (wie in Abschnitt 4.3.4 beschrieben)

ermittelt. Hierfür werden an vier scheibenförmigen Probenkörpern insgesamt 48 Indentierungen vorgenommen. Hiervon sind offensichtliche Ausreißer zu entfernen, welche durch mangelhafte Nullpunktfindung oder Einflussparameter der Oberfläche entstehen (siehe Abschnitt 2.7.1) und von den einwandfreien Messungen eindeutig getrennt werden können.

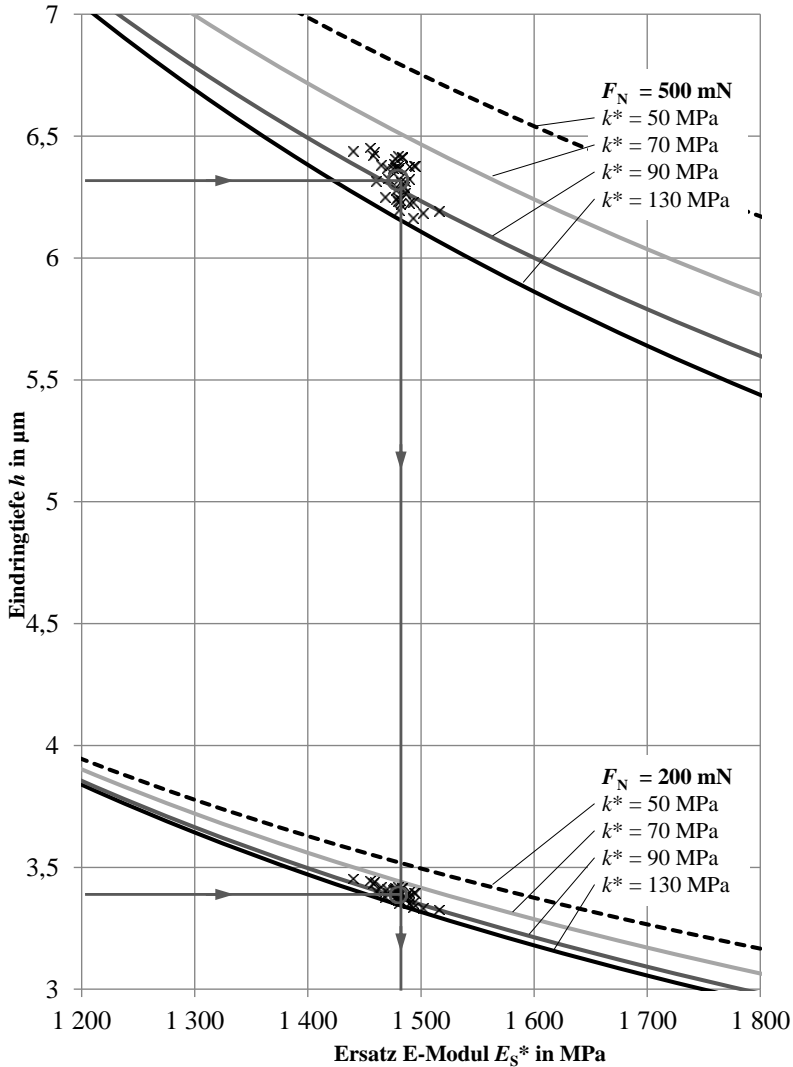


Bild 44: Bestimmung der elastischen Ersatzparameter des Substratwerkstoffes

Die verbleibenden 40 Messpunkte zeigen für  $F_N = 200 \text{ mN}$  eine mittlere Eindringtiefe  $h$  von  $3,39 \mu\text{m}$  (mit einer Standardabweichung von  $0,019 \mu\text{m}$ ) und für  $F_N = 500 \text{ mN}$  eine mittlere Eindringtiefe  $h$  von  $6,32 \mu\text{m}$  (mit einer Standardabweichung von  $0,080 \mu\text{m}$ ). Anhand der simulierten Werte

können die elastischen Ersatzparameter für das Substratmaterial bestimmt werden (Bild 44).

Um die Unsicherheit der Messung beurteilen zu können, werden die Parameter für alle 40 Indentierungen bestimmt. Somit ergibt sich ein mittlerer Ersatz- Elastizitätsmodul  $E_S^*$  von 1 479 MPa (mit einer Standardabweichung von 13 MPa) und eine mittlere Ersatz-Fließgrenze  $k^*$  von 83,2 MPa (mit einer Standardabweichung von 16,3 MPa).

### 7.1.3 Schichteigenschaften

Mithilfe der ermittelten Ersatzparameter  $E_S^*$  und  $k^*$  für das Substrat werden nun die Elastizitätsmoduln der Schichten bestimmt. Die Indentierungen werden für jede Kombination von Schichttyp und -dicke an jeweils drei unterschiedlichen Proben und an 60 Stellen (20 pro Probe) durchgeführt. Klare Ausreißer werden entfernt, es verbleiben für jede Kombination jedoch mindestens 43 verwertbare Indentierungsmessungen, von welchen per Zufall 40 Werte als Stichprobe ausgewertet werden.

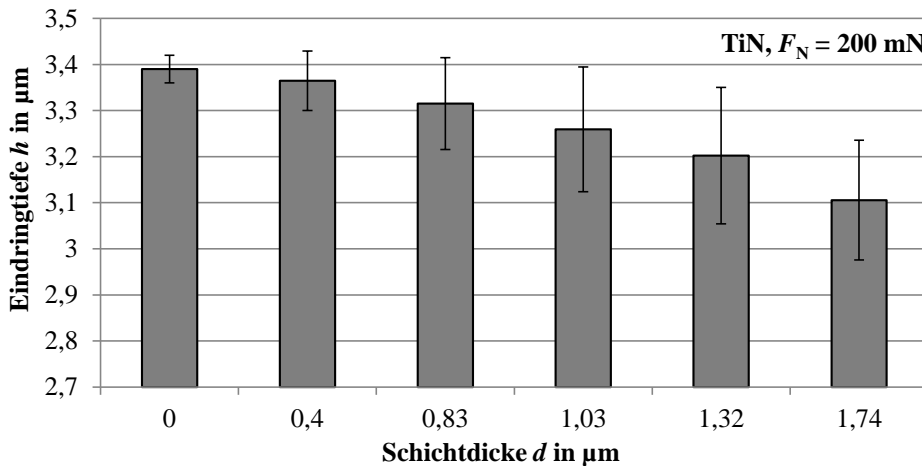


Bild 45: Gemessene Eindringtiefen der Indentierungen an TiN-beschichteten Probekörpern bei einer Prüfkraft  $F_N = 200$  mN in Abhängigkeit zur Schichtdicke

Für die TiN-Schichten sind die Ergebnisse der Eindringtiefen  $h$  in Bild 45 ( $F_N = 200$  mN) und Bild 46 ( $F_N = 500$  mN) gezeigt. Die Eindringtiefe nimmt erwartungsgemäß mit zunehmender Schichtdicke ab und ist bei beiden Prüfkraften vergleichbar. Die Standardabweichung ist bei allen Schichten deutlich größer als bei den Proben ohne Schicht, nimmt zunächst zu und hält sich dann auf einem relativ konstanten Niveau von maximal 0,148  $\mu\text{m}$  bei  $F_N = 200$  mN beziehungsweise 0,209  $\mu\text{m}$  bei  $F_N = 500$  mN.

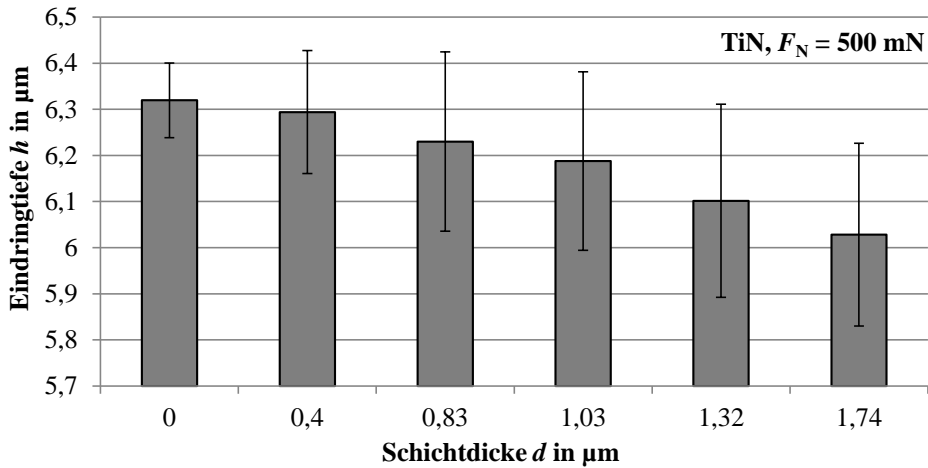


Bild 46: Gemessene Eindringtiefen der Indentierungen an TiN-beschichteten Probekörpern bei einer Prüfkraft  $F_N = 500 \text{ mN}$  in Abhängigkeit zur Schichtdicke

Die entsprechenden Ergebnisse für die CrN-Schichten können für beide Prüfkraften  $F_N$  Bild 47 entnommen werden. Auch bei diesem Schichtwerkstoff ist der Einfluss der Schichtdicke klar ersichtlich, jedoch in schwächer ausgeprägter Form (im Vergleich zu den TiN-Schichten). Die Standardabweichung ist mit maximal  $0,11 \mu\text{m}$  ebenfalls etwas geringer als bei den TiN-Proben.

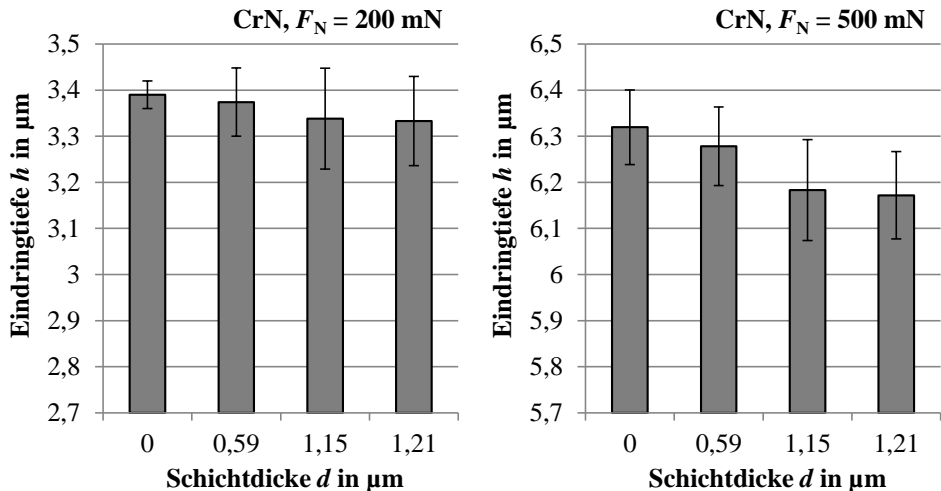


Bild 47: Gemessene Eindringtiefen der Indentierungen an CrN-beschichteten Probekörpern bei Prüfkraften  $F_N = 200 \text{ mN}$  (links) und  $500 \text{ mN}$  (rechts) in Abhängigkeit zur Schichtdicke

Aus den ermittelten Eindringtiefen  $h$  lassen sich die Elastizitätsmoduln  $E_C$  mit den unterschiedlichen vorgestellten Methoden ermitteln. Dies sind im Einzelnen die direkte Auswertung der FEM-Ergebnisse (siehe Abschnitt 4.3.2) sowie der Einsatz eines Metamodells wie der Response Surface Methodology (siehe Abschnitt 6.2.1) oder eines Künstlichen Neuronalen Netzes (siehe Abschnitt 6.2.2). Um auch hier die Streuung der Ergebnisse zu erfassen, wurden neben den Mittelwerten auch alle Einzelwerte ermittelt, und anschließend die Standardabweichung berechnet (siehe Tabelle 10). Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt mit einem Vergleich zu den Referenzmessmethoden in Abschnitt 7.4.

Tabelle 10: Schicht-Elastizitätsmoduln  $E_C$  mit unterschiedlichen Auswertemethoden bei einer Prüfkraft  $F_N = 200$  mN

Schichtwerkstoff	Schichtdicke $d$ in $\mu\text{m}$	Direkte Auswertung der FE-Ergebnisse		RSM		KNN	
		Median $E_C$ in GPa	$\sigma_{E_C}$ in GPa	Median $E_C$ in GPa	$\sigma_{E_C}$ in GPa	Median $E_C$ in GPa	$\sigma_{E_C}$ in GPa
TiN	0,40	60,2	52,9	64,3	57,1	62,0	61,4
	0,83	92,3	65,3	98,1	72,9	92,7	69,0
	1,03	131,5	80,0	135,7	90,2	131,0	85,4
	1,32	117,1	49,9	122,1	53,1	120,8	52,5
	1,74	121,3	27,7	123,7	31,9	123,1	31,8
CrN	0,59	4,3	61,3	7,7	58,7	8,6	62,6
	1,15	58,2	54,1	59,2	54,2	57,6	53,4
	1,21	54,3	48,8	55,1	49,3	53,5	48,5

## 7.2 Verifizierung der elastischen Eigenschaften mittels Biegeprüfstand

Mittels dem in Abschnitt 5.7 erläuterten Biegeprüfstand werden die Ergebnisse der vorgestellten Methode zur Ermittlung der elastischen Schichtparameter verifiziert.

Aus den gemessenen Durchsenkungen lassen sich die Elastizitätsmoduln von Substrat und auch Schicht bestimmen. Um den Substrat-Elastizitätsmodul  $E_S$  zu bestimmen, werden die Ergebnisse der Durchbiegung  $w_{\max}$  der unbeschichteten Proben mithilfe der umgestellten Formel zur Berechnung balkenartiger Tragwerke (31) bestimmt [135]. Hierbei ist die Last auf den

Balken die Kraft  $F$ , der Abstand der Auflager  $l$  und das Flächenträgheitsmoment des Substrats  $I_S$ :

$$E_S = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot w_{max} \cdot I_S} \quad (31)$$

Im Biegeprüfstand werden insgesamt sechs Proben und jeweils die Messdaten für drei unterschiedliche Belastungen ausgewertet. Die Zusammenfassung der Ergebnisse ist Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 11: Ermittelte Substrat-Elastizitätsmoduln aus dem Biegeprüfstand

Belastung $F$ in N	Mittelwert $w_{max}$ in mm	Standard- abweichung $\sigma w_{max}$ in mm	Mittelwert $E_S$ in GPa	Standard- abweichung $\sigma E_S$ in GPa
13,7	0,154	0,010	1,398	0,091
28,1	0,306	0,015	1,443	0,067
42,5	0,456	0,018	1,463	0,057
Gesamtmittelwert			1,434	0,075

Die Durchbiegung in Abhängigkeit zu Belastung und Schichtdicke der aufgebracht TiN-Schichten zeigt Bild 48. Die Kurven weisen jeweils einen linearen und gleichmäßigen Verlauf mit zunehmender Belastung auf. Die Reduzierung der Durchbiegung durch die Schichten stimmt qualitativ mit den jeweils abgeschiedenen Schichtdicken überein.

Die Durchbiegung kann bei maximaler Belastung (42,5 N) von 456  $\mu\text{m}$  des unbeschichteten Probekörpers durch die TiN-Schicht mit einer Dicke von 1,74  $\mu\text{m}$  um 14 % auf 392  $\mu\text{m}$  reduziert werden.

Die analytische Berechnung des Elastizitätsmoduls der Schicht  $E_C$  erfolgt durch Erweiterung der Formel (31) um die Schichtparameter mit dem Flächenträgheitsmoment der Schicht  $I_C$  (unter der Annahme, dass die Schicht fest am Substrat haftet) [48] mit

$$E_C \cdot I_C + E_S \cdot I_S = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot w_{max}} \quad (32)$$

und Auflösen nach dem Elastizitätsmodul der Schicht  $E_C$ :

$$E_C = \frac{\frac{F \cdot l^3}{48 \cdot w_{max}} - E_S \cdot I_S}{I_C} \quad (33)$$

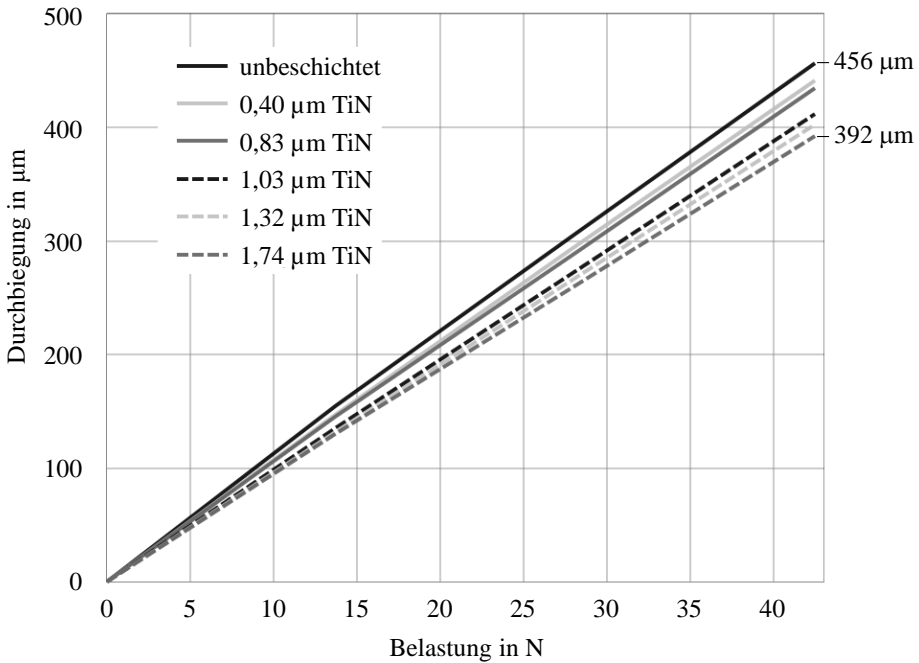


Bild 48: Gemessene Durchbiegung der Probekörper in Abhängigkeit der Belastung und Dicke der TiN-Schichten

Tabelle 12: Elastizitätsmoduln der TiN-Schichten

Schichtdicke $d$ in $\mu\text{m}$	Mittelwert $E_c$ in GPa	Standardabweichung $\sigma_{E_c}$ in GPa
0,40	104,1	38,5
0,83	73,5	19,7
1,03	125,3	9,22
1,32	119,9	6,32
1,74	105,0	9,28
Gesamtmittelwert	116,7	12,0

Für die Titanitrid-Schichten ergeben sich die Elastizitätsmoduln aus Tabelle 12. Da die dünneren Schichten einen verhältnismäßig geringen Einfluss auf die Durchbiegung haben, ist die Standardabweichung der berechneten Schicht-Elastizitätsmoduln groß. Für die Auswertung des Gesamtergebnisses werden deshalb nur die drei dicksten Schichten mit Schichtdicken über 1  $\mu\text{m}$  herangezogen.

Bild 49 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für die Chromnitrid-Schichten. Die dickste Schicht (mit 1,21  $\mu\text{m}$ ) reduziert bei Maximalbelastung die Durchbiegung um 5,8 % auf 430  $\mu\text{m}$ . Auch hier ist der Verlauf der Kurven linear und die steigende Durchbiegungsreduzierung bei steigender Schichtdicke ersichtlich.

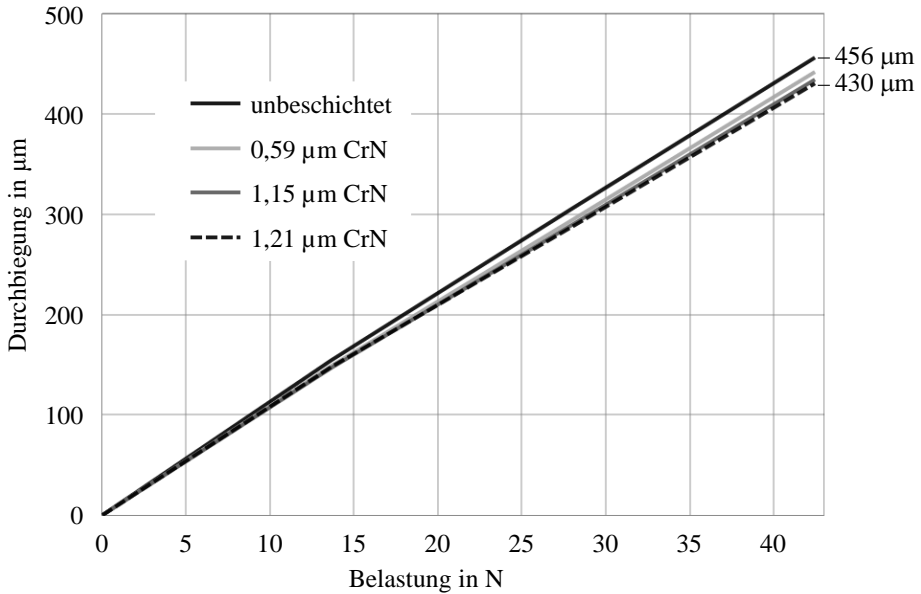


Bild 49: Gemessene Durchbiegung der Probekörper in Abhängigkeit der Belastung und Dicke der CrN-Schichten

Tabelle 13: Elastizitätsmoduln der CrN-Schichten

Schichtdicke $d$ in $\mu\text{m}$	Mittelwert $E_c$ in GPa	Standardabweichung $\sigma E_c$ in GPa
0,59	87,2	11,2
1,15	60,5	6,70
1,21	65,0	7,40
Gesamtmittelwert	62,8	7,41

Die mit Formel (33) errechneten Elastizitätsmoduln sind Tabelle 13 zu entnehmen. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Standardabweichung der Ergebnisse bei kleinen Schichtdicken groß ist und ab Schichtdicken von etwa 1  $\mu\text{m}$  relativ konstant bleibt. Aus diesem Grund werden zur Ermittlung des Gesamtergebnisses auch für die CrN-Schichten nur die beiden dicksten Schichten verwendet.

### 7.3 Konventionelle Messung des Eindringmoduls durch direkte Indentierung

Als Referenz für die gebräuchlichste angewandte Methode, wird die TiN-Schicht mit der Schichtdicke  $1,74\ \mu\text{m}$  mit dem in Abschnitt 5.4 beschriebenen Ultramikrohärtemessgerät mit einem Vickersindenter untersucht. Um das in Abschnitt 2.7.1 beschriebene Verhältnis zwischen den Einflüssen der Oberfläche sowie des Substrateinflusses zu identifizieren, wurde die Prüfkraft  $F_N$  variiert. Wie den Ergebnissen in Bild 50 zu entnehmen ist, zeigt sich bei den Messungen mit niedriger Prüfkraft und folglich geringen Eindringtiefen eine hohe Streuung durch die Oberfläche. Mit steigender Prüfkraft ab  $5\ \text{mN}$  werden scheinbar stabile Ergebnisse ausgegeben, welche jedoch aufgrund des Substrateinflusses mehr als  $90\ \%$  Abweichung zu den Ergebnissen der Indentierungsversuche sowie den Referenzmessungen am Biegeprüfstand zeigen. Für eine Verwendung zur weiteren Berechnung oder Auslegung von Verbunden von Hartstoffschichten auf Kunststoffsubstraten ist diese Messmethode folglich nicht geeignet und bestätigt den eingangs formulierten Handlungsbedarf.

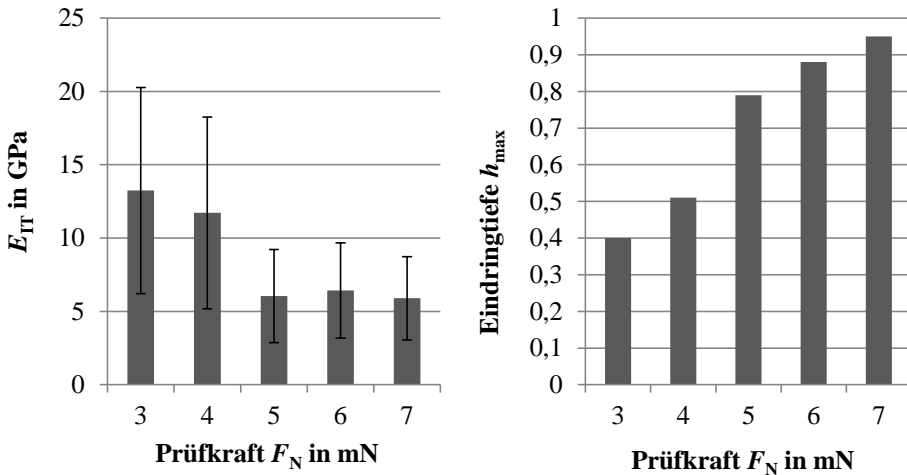


Bild 50: Gemessener Eindringmodul  $E_{IT}$  mit Vickersindenter an der TiN-Schicht mit  $1,74\ \mu\text{m}$  in Abhängigkeit zur Prüfkraft  $F_N$  (links) und zugehörige maximale Eindringtiefen  $h_{max}$  (rechts)

## 7.4 Auswertung, Diskussion und Grenzen der Methode

### 7.4.1 Substrateigenschaften

Der über die vorgestellte Indentierungs- und Simulations-Methode ermittelte Elastizitätsmodul (Abschnitt 7.1.3) zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der konventionellen Methode über den Biegeprüfstand aus Abschnitt 7.27.2. Mit 1 479 MPa liegt der ermittelte Ersatz-Elastizitätsmodul  $E_s^*$  lediglich 3 % über dem Referenzwert von 1 434 MPa aus dem Biegeprüfstand und weist mit einer Standardabweichung von 13 MPa eine sehr geringe Streuung auf.

Die Notwendigkeit der Bestimmung des vorliegenden Elastizitätsmoduls zeigt wiederum der Vergleich mit dem Datenblatt. Dieses weist mit 2 200 MPa [136] einen um 53 % höheren Wert aus als der Referenzwert auf dem Biegeprüfstand.

Die im Datenblatt gelisteten Eigenschaften sind gemäß normativen Prüfungen bestimmt und geben detaillierten Aufschluss über das Materialverhalten und die Bedingungen bei der Herstellung der Proben. Insbesondere die für den Elastizitätsmodul relevanten Informationen bezüglich der Konditionierung und des Feuchtegehaltes werden allerdings nicht immer angegeben. Nach [137] ist die reproduzierbare Probenkonditionierung und Einhaltung des Normalklimas nach ISO 291 [116] generell zu beachten. In einigen Datenblättern (insbesondere bei hygroskopischen Polyamiden) werden die Kennwerte für unterschiedliche Konditionierungszustände angegeben, um sie gemäß dem Anwendungsfall auswählen zu können. Mit einer möglichen Wasseraufnahme des vorliegenden Werkstoffs ASA von 1,65 % [136] können sich immerhin große Unterschiede bezüglich der mechanischen Eigenschaften einstellen. Neben dem Feuchtegehalt können nach [137] auch weitere Störgrößen wie der Herstellprozess, Produktionsfehler, Werkzeugeigenschaften, Alterungseinflüsse, Werkstoffcharge, Probenvorbereitung, Probenhandlung oder Maschinenbedienung Abweichungen zu den Kennwerten der Datenblätter erzeugen, was zur Auslegung von Kunststoffbauteilen die Prüfung am Demonstrator unter den angestrebten Anwendungsbedingungen empfiehlt.

Vor diesem Hintergrund ist der in Abschnitt 4.3.4 erläuterte Fehler, der aufgrund des einfachen Materialmodells bei der Ermittlung des Ersatz-Elastizitätsmoduls  $E_s^*$  entsteht, als verhältnismäßig klein einzuschätzen. Zur Verwendung eines genaueren und komplizierteren Materialmodells sind ohnehin weitere Materialkennwerte notwendig, sodass entweder

Recherchen oder Messungen der Kennwerte, welche den Kunststoff im konkreten Bauteil und Anwendungsfall ausreichend gut beschreiben, notwendig sind. Für überschlägige Berechnungen mit einfachen Materialmodellen, welche lediglich ein Elastizitätsmodul und gegebenenfalls eine Fließgrenze benötigen, sind die über die vorgestellte Methode ermittelten Kennwerte weitaus genauer als die Entnahme aus dem Datenblatt ohne Hinterfragung der genauen Prüfbedingungen.

### 7.4.2 Diskussion und Auswahl des Lageparameters

Die Auswahl des korrekten Lageparameters ist bei der Anwendung der Methode und für die Auswertung des Schicht-Elastizitätsmoduls essentiell. Wie bereits in Bild 41 (Abschnitt 6.3) zu sehen ist, verhält sich der Schicht-Elastizitätsmodul  $E_C$  zur Eindringtiefe  $h$  nicht linear. Wird von einer normalverteilten Eindringtiefe  $h$  als Eingangsparameter ausgegangen, sind zunächst arithmetischer Mittelwert und Median an identischer Stelle zu ermitteln. Wie in Bild 51 (links) exemplarisch dargestellt, entsteht bei der Auswertung jedoch eine schiefe Verteilung des Schicht-Elastizitätsmoduls  $E_C$ . Der arithmetische Mittelwert, berechnet aus der Ausgangsgröße  $E_C$ , würde folglich einen zu kleinen Wert ausgeben, während der Median den sortierten Datensatz teilt und weiterhin die zur Auswertung relevante Stelle aufzeigt.

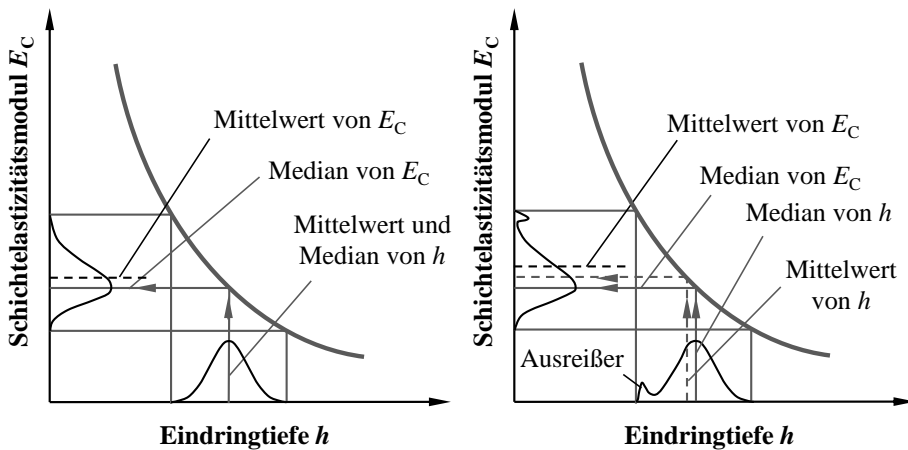


Bild 51: Exemplarische und stark überzeichnete Darstellung des Einflusses der Lageparameter bei der Auswertung des Schicht-Elastizitätsmoduls  $E_C$  (links) mit dem zusätzlichen Einfluss von Ausreißern (rechts)

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Auswahl des Lageparameters ist der Umgang mit Ausreißern. Insbesondere bei der Indentierung von beschichteten Oberflächen zeigen sich schnell Ausreißer und damit eine Erhöhung

der Streuung. In Bild 51 rechts wird exemplarisch gezeigt, wie bereits wenige Ausreißer (welche eine zu hohe Eindringtiefe  $h$  in die Stichprobe einbringen) den arithmetischen Mittelwert der Eingangsgröße  $h$  signifikant beeinflussen. Der Median wird von solchen Ausreißern nicht oder nur geringfügig beeinflusst [138]. Sind die Extremwerte bei  $h$  (wie im Beispiel) deutlich höher als der Zentralwert, würden bei arithmetischer Mittelwertbildung der Ergebnisse des Schicht-Elastizitätsmoduls  $E_C$  noch ein zusätzlicher Hebeleffekt auftreten und den Mittelwert von  $E_C$  als empfindliches Lagemaß weiter absenken. Auch hier bleibt der Median als Zentralwert der Stichprobe an der korrekten Stelle.

Wie Tabelle 9 für den Anwendungsfall zu entnehmen ist, wird die Oberfläche mit Durchführung des Beschichtungsprozesses zwar nur geringfügig rauer, die Standardabweichung steigt jedoch von  $0,03 \mu\text{m}$  bei den unbeschichteten Proben auf Werte von  $0,12$  bis  $0,19 \mu\text{m}$  bei den beschichteten Proben; ohne erkennbare Abhängigkeit von der Schichtdicke  $d$ . Dieser Effekt wird durch die Beschichtung mittels Vakuumlichtbogenverdampfung verursacht. Hierbei werden neben dem im Brennfleck verdampften Targetmaterial [139], welches kleine Oberflächenunebenheiten nivellieren kann [140], auch Makropartikel emittiert. Diese Makropartikel entstehen zum einen durch Mikroexplosionen im Kathodenbrennfleck [141, 142], zum anderen durch Droplets (Schmelzemaikropartikel), welche durch den Plasmaegendruck aus dem Schmelzebad am Kathodenbrennfleck geschleudert beziehungsweise versprüht werden [143].

Die erhöhte Streuung der Rauheit an den beschichteten Oberflächen zeigt sich auch in den erhöhten Streuungen der gemessenen Eindringtiefen (Bild 45 bis Bild 47) aufgrund des Oberflächeneinflusses auf die Indentierung wieder. Die erhöhte Oberflächenhärte der Schichtwerkstoffe verringert die Dämpfung des Effektes bei der Oberflächenglättung und verstärkt somit die Streuung weiter. Die geringere Schichthärte und ein geringerer Elastizitätsmodul erklären (durch die höhere Dämpfung) die kleineren Streuungen bei den CrN-Schichten (Bild 47) im Vergleich zu den TiN-Schichten (Bild 45 und Bild 46). Generell bestätigt dies die Verwendung des Medians als robusten Lageparameter anstelle des oft gebräuchlichen arithmetischen Mittels.

### 7.4.3 Genauigkeit der Ergebnisse im Vergleich zur Referenz

Um die Genauigkeit der vorgestellten Methode abzuschätzen, werden in Bild 52 die Ergebnisse der Indentierungsmethode mit den Ergebnissen der Referenzmessung am Biegeprüfstand für die TiN-Schichten verglichen.

Sowohl die Ergebnisse der vorgestellten Methode als auch die Messergebnisse am Biegeprüfstand zeigen, dass die Bestimmung des Schicht-Elastizitätsmoduls  $E_C$  mit zunehmender Schichtdicke genauer wird. So weicht das Ergebnis der Indentierungsmethode bei der kleinsten Schichtdicke von  $0,4 \mu\text{m}$  noch um  $48 \%$  vom Mittelwert der Referenzmessung ab. Die Abweichungen werden mit zunehmender Schichtdicke tendenziell geringer und betragen bei der dicksten Schicht mit  $1,74 \mu\text{m}$  nur noch  $4 \%$ . Bei einer Schichtdicke von  $1,35 \mu\text{m}$  erreicht die Abweichung sogar ein Minimum mit  $0,4 \%$ . Auch die Varianz der Ergebnisse sinkt mit zunehmender Schichtdicke  $d$ . So fällt der Quotient aus Standardabweichung zu Median von  $88 \%$  (bei  $d = 0,4 \mu\text{m}$ ) kontinuierlich auf  $23 \%$  (bei  $d = 1,74 \mu\text{m}$ ).

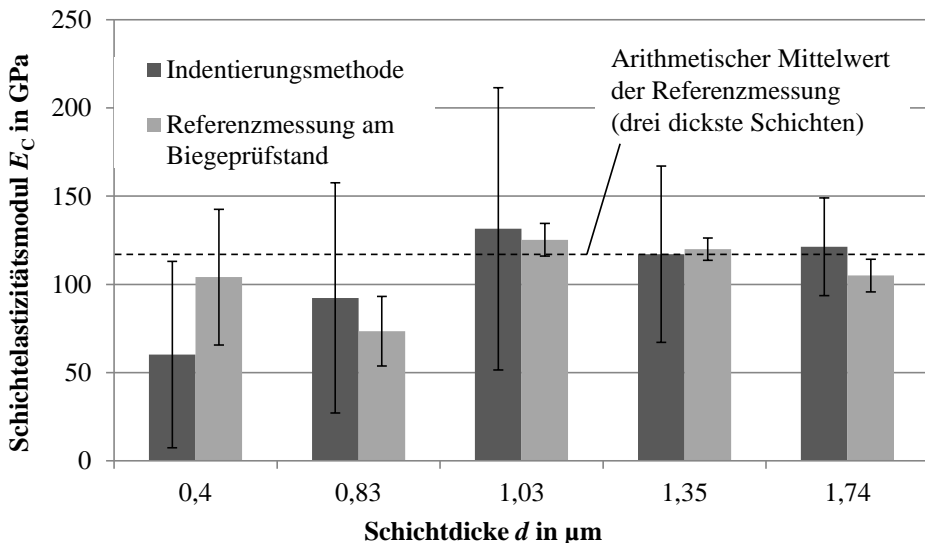


Bild 52: Vergleich der Ergebnisse der Indentierungsmethode mit den Ergebnissen der Referenzmessung am Biegeprüfstand für die TiN-Schichten

Beim Vergleich der Ergebnisse der CrN-Schichten in Bild 53 zeigt sich ein ähnlicher Verlauf. Der Quotient aus Standardabweichung zu Median fällt vom 14-fachen Wert (bei  $d = 0,59 \mu\text{m}$ ) auf  $90 \%$  (bei  $d = 1,21 \mu\text{m}$ ). Die Abweichung fällt mit dem großen Sprung der Schichtdicke  $d$  von  $93 \%$  (bei  $d = 0,4 \mu\text{m}$ ) rapide ab auf  $7 \%$  (bei  $d = 1,15 \mu\text{m}$ ) und steigt dann noch leicht an auf  $13 \%$  (bei  $d = 1,21 \mu\text{m}$ ).

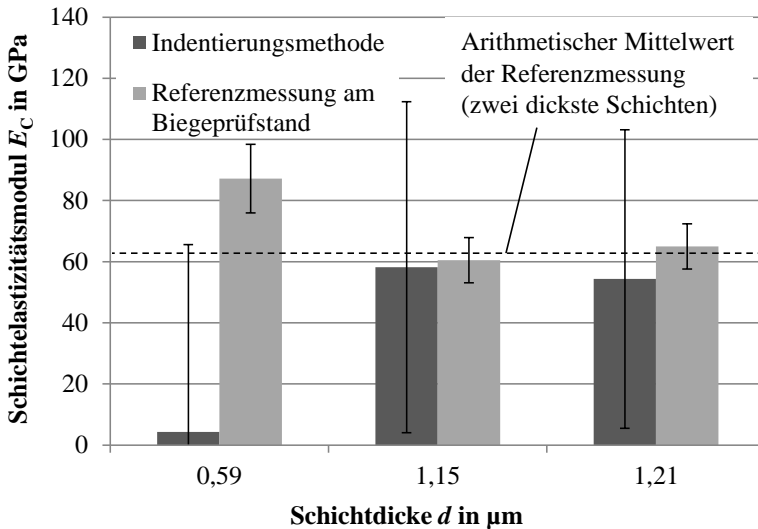


Bild 53: Vergleich der Ergebnisse der Indentierungsmethode mit den Ergebnissen der Referenzmessung am Biegeprüfstand für die CrN-Schichten

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Methode für die untersuchten Schichten für verhältnismäßig große Schichtdicken im Median genaue Ergebnisse liefert. Die Standardabweichung ist, wie in Abschnitt 7.4.2 erläutert, relativ groß, nimmt jedoch mit steigenden Schichtdicken ab. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt ein Akzeptanzkriterium für die Verwendung der Methode aufgestellt.

Im Vergleich zur konventionellen Messmethode mit der direkten Messung des Eindringmoduls  $E_{IT}$  auf dem Ultramikrohärtemessgerät (Bild 50) zeigen sich die Vorzüge der Methode. Selbst bei der dicksten TiN-Schicht ist der Substrateinfluss bei der direkten Messung so gravierend, dass die Abweichungen zur Referenzmessung stets mindestens 89 % betragen. Bei dünneren und „weicheren“ Schichten sind die Abweichungen erwartungsgemäß noch erheblich höher.

#### 7.4.4 Betrachtung der Signifikanz als Akzeptanzkriterium

Die gezeigten Ergebnisse verdeutlichen, dass mit der vorgestellten Indentierungsmethode verhältnismäßig genaue Ergebnisse erzielt werden können, diese jedoch stark von den Eingangsparametern, Randbedingungen und den Störgrößen beeinflusst werden können. Eine sinnvolle und genaue Auswertung kann insbesondere dann erfolgen, wenn der Unterschied der Eindringtiefen der Indentierungen zwischen unbeschichtetem und beschichtetem Probenkörper verhältnismäßig groß ist. Dies ist der Fall, wenn

idealerweise eine dicke Schicht mit hohem Elastizitätsmodul bei gleichzeitig geringem Substrat-Elastizitätsmodul vorliegt. Störgrößen wie Rauheit, Messunsicherheiten bei Indentierung und Schichtdickenmessung sowie Chargenschwankungen bei Substraten und Schichten erhöhen überdies die Streuung der Parameter.

Um diesem Zusammenspiel an Einflussgrößen gerecht zu werden, wäre es im vorliegenden Fall naheliegend (jedoch zu einfach), jeweils Akzeptanzkriterien für die einzelnen Parameter, wie beispielsweise eine maximale Schichtdicke und Substrat-Elastizitätsmodul sowie minimale Rauheit und Schicht-Elastizitätsmodul, zu definieren. Der Anwendungsbereich der Methode würde damit zu weit eingeschränkt werden. Vielmehr sollte ein Akzeptanzkriterium anzeigen, dass sich die gemessenen Zentralwerte der beschichteten und unbeschichteten Proben ausreichend voneinander unterscheiden, eine angemessene Streuung aufweisen und eine ausreichende Anzahl an Einzelmessungen erfolgt ist. All diese Punkte werden durch folgende Frage behandelt: **Unterscheiden sich die Ergebnisse der Indentierung zwischen Substrat und beschichteter Probe signifikant voneinander?**

Als Signifikanztest werden für alle beschichteten Proben ungepaarte Zweistichproben-t-Tests für Stichproben ungleicher Varianz (heteroskedastisch) zur Überprüfung der Signifikanz gegenüber dem Substrat durchgeführt.

Hierfür wird folgende Nullhypothese  $H_0$  aufgestellt: Die Indentierungsergebnisse zwischen Substrat und beschichteter Probe unterscheiden sich nicht voneinander.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (34)$$

Mit der zweiseitigen Fragestellung für die Gegenhypothese  $H_1$ : Die Indentierungsergebnisse zwischen Substrat und beschichteter Probe sind unterschiedlich.

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (35)$$

Das Signifikanzniveau wird auf  $\alpha = 0,01$  festgelegt und hierdurch der Fehler 1. Art,  $H_0$  zu Unrecht zu verwerfen, auf 1 % begrenzt.

Die Ergebnisse des Signifikanztests und die Abweichungen der Messungen der Indentierungsmethode von der Referenzprobe sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Ergebnisse des Signifikanztests

Probe	P-Wert	Entscheidung	Verwendung der Messergebnisse nach Signifikanztest?	Abweichung Indentierungsmessungen zu Referenz
TiN (0,4 $\mu\text{m}$ )	0,031	$H_0$ annehmen $H_1$ ablehnen	nein	48 %
TiN (0,83 $\mu\text{m}$ )	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$H_0$ ablehnen $H_1$ annehmen	ja	21 %
TiN (1,03 $\mu\text{m}$ )	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$H_0$ ablehnen $H_1$ annehmen	ja	13 %
TiN (1,35 $\mu\text{m}$ )	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$H_0$ ablehnen $H_1$ annehmen	ja	0,4 %
TiN (1,74 $\mu\text{m}$ )	$7,1 \cdot 10^{-17}$	$H_0$ ablehnen $H_1$ annehmen	ja	4 %
CrN (0,59 $\mu\text{m}$ )	0,22	$H_0$ annehmen $H_1$ ablehnen	nein	93 %
CrN (1,15 $\mu\text{m}$ )	0,0063	$H_0$ ablehnen $H_1$ annehmen	ja	7 %
CrN (1,21 $\mu\text{m}$ )	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$H_0$ ablehnen $H_1$ annehmen	ja	13 %

Es zeigt sich, dass von beiden Schichttypen die Proben mit der dünnsten Schicht bei den Ergebnissen der Indentierung mit dem aufgestellten Signifikanzniveau keinen *signifikanten* Unterschied zum Substrat haben. Dies wird durch die großen Abweichungen bei Anwendung der Methode bestätigt. Die Probe mit der 0,83  $\mu\text{m}$ -dicken TiN-Schicht zeigt unter den mit  $\alpha = 0,01$  angenommenen Messergebnissen die größte Abweichung (21 %) zur Referenz. Beim Blick auf den Einzelwert der Referenzmessung ist jedoch festzustellen, dass dieser noch weiter vom gemittelten Gesamtwert der TiN-Schichten liegt als der durch Indentierung ermittelte Wert. Dies deutet daraufhin, dass die Abweichung nicht durch die Messungen und die Anwendung der Methode zustande kommt, sondern tatsächlich eine Schicht mit geringerem Elastizitätsmodul vorliegt.

Mit dem gezeigten Signifikanztest hat der Anwender die Möglichkeit direkt nach der Indentierung von Substrat und beschichteter Probe die Daten auf Anwendbarkeit zu prüfen. Insbesondere vor der Durchführung von neuen,

relativ zeitintensiven FE-Simulationen können so Schicht-Substrat-Verbunde identifiziert werden, welche für die Methode nicht geeignet sind oder sich an der Grenze einer sinnvollen Auswertung befinden. Selbstverständlich kann auch dieser Test Fehlmessungen nicht ausschließen und der Anwender muss, wie bei allen Simulationen und Messungen, stets die Plausibilität hinterfragen und gegebenenfalls das Akzeptanzkriterium in Form des Signifikanzniveaus anpassen und/oder Referenzmessungen durchführen.

### 7.4.5 Genauigkeit bei der Verwendung der Metamodelle

Die in Abschnitt 7.4.3 betrachteten Genauigkeiten beziehen sich auf die direkte Bestimmung des Schicht-Elastizitätsmoduls  $E_C$  aus den FE-Simulationsergebnissen. Für eine quantitative Abschätzung der Fehler, welche durch Verwendung der Metamodelle entstehen, zeigt Bild 54 die Ergebnisse aller ausgewerteter Schichttypen und -dicken der beiden Metamodelle (RSM und KNN) und vergleicht diese mit der direkten Auswertung als Referenz.

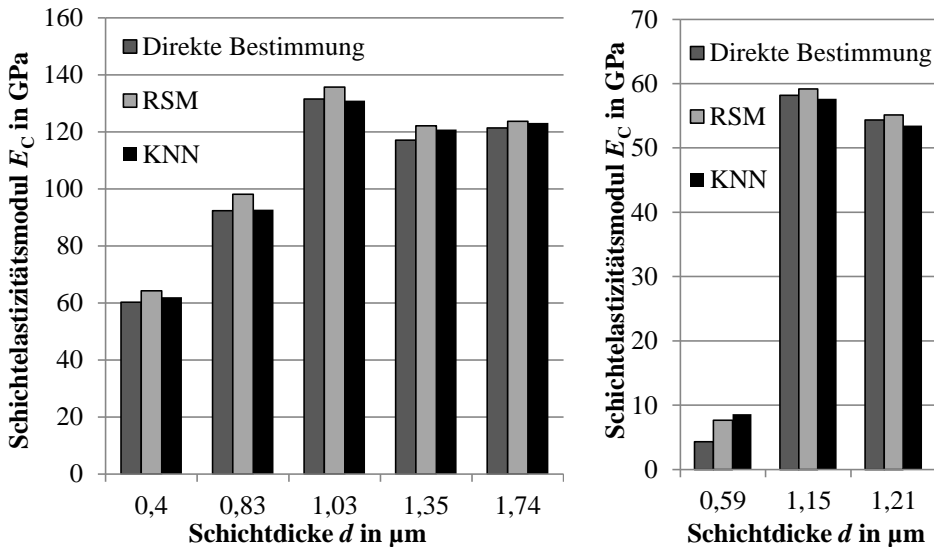


Bild 54: Auswertungsergebnisse der Schicht-Elastizitätsmoduln bei Verwendung der Metamodelle im Vergleich zur direkten Bestimmung aus den FEM-Ergebnissen der TiN-Schichten (links) und der CrN-Schichten (rechts)

Es geht hervor, dass die Abweichungen nicht klar ersichtlichen Trends folgen, wie beispielsweise steigende Abweichungen mit wachsenden Schichtdicken oder Elastizitätsmoduln was dem statistischen Charakter der

Metamodelle geschuldet und demnach plausibel und nachvollziehbar ist. Vielmehr sind sie abhängig von der Lage der abgefragten Parameter und der Genauigkeit der damit verbundenen Regressionskurven an diesen Stellen. So sind die Metamodelle in der Nähe von Parametersets aus den Trainingsdaten tendenziell genauer als in deren Lücken oder gar außerhalb des Parameterbereiches. Dies zeigt die CrN-Schicht mit  $d = 0,59 \mu\text{m}$  und einem ermittelten Elastizitätsmodul  $E_C < 10 \text{ GPa}$  am Rand beziehungsweise *außerhalb des Parameterbereiches* der Trainingsdaten und hat mit 77,9 % Abweichung für die RSM und mit 99,8 % für das KNN die mit Abstand größten Fehler. Die zweithöchsten Abweichungen sind jeweils deutlich geringer und betragen für die RSM 6,7 % (TiN,  $0,4 \mu\text{m}$ ) und für das KNN 4,3 % (TiN,  $1,35 \mu\text{m}$ ). Auch hier zeigt sich durch die unterschiedlichen Parametersets der zweitgrößten Abweichungen die Abhängigkeit zu den dahinterliegenden Regressionskurven. Es sei somit nochmals hervorgehoben, dass bereits bei der Erstellung des Versuchsplans (für die Metamodelle) das spätere Anwendungsintervall aller Parameter beachtet werden muss um Auswertungen außerhalb des Parameterbereichs von vornherein auszuschließen.

Insgesamt beträgt die mittlere Abweichung für die Response-Surface-Methodology 3,6 % und für das Künstliche Neuronale Netz 1,6 %, jeweils ohne den erwähnten Ausreißer (CrN,  $0,59 \mu\text{m}$ ) und können so als zufriedenstellend gewertet werden.



## 8 Ergebnisse des modifizierten Ritztests

### 8.1 Experimentelle Ergebnisse des modifizierten Ritztests

Der modifizierte Ritztest wurde auszugsweise in [103] vorgestellt und wissenschaftlich diskutiert und fand Anwendung unter anderem in [104, 140, 144, 145, 146] sowie [147].

#### 8.1.1 Proben

Für die Proben wird als Substrat extrudiertes Plattenmaterial aus ASA-Polymer mit der Stärke 3 mm verwendet und einer Plasmavorbehandlung unterzogen. Ähnlich zu Abschnitt 7.1.1 sind mittels Vakuumlichtbogenverdampfen zwei unterschiedliche Schichttypen, eine Titannitrid- (TiN) und eine Chromnitridschicht (CrN) aufgebracht, hier jedoch in Einfachrotation chargiert. Zur Haftvermittlung werden jeweils rein metallische Schichten von wenigen 10 nm abgeschieden. Um die Anwendung des modifizierten Ritztests auch an Proben mit reduzierter Schichthaftung zu testen, werden pro Schichtart jeweils auch Proben ohne Plasmavorbehandlung beschichtet.

Die durchschnittliche Schichtdicke  $d$  beträgt für die TiN-Schichten 1,51  $\mu\text{m}$  und 0,52  $\mu\text{m}$  für die CrN-Schichten.

Hinsichtlich der Rauheit betragen die arithmetischen Mittelwerte der Profilordinaten  $R_a$  nach DIN EN ISO 4287 [134] mit Ausgabe der relevanten Kenngröße von 1997 bei den unbeschichteten Substratoberflächen 0,37  $\mu\text{m}$ , 0,29  $\mu\text{m}$  bei den TiN-Schichten und 0,20  $\mu\text{m}$  bei den CrN-Schichten.

#### 8.1.2 Ergebnisse und Diskussion

In Erweiterung zum Rockwell-Indenter (vergleiche Bild 19 in Abschnitt 4.4.1) können durch den modifizierten Ritztest auch bei Schichten mit guter Substrathaftung gezielt charakteristische Schäden im Schicht-Substrat-Verbund hervorgerufen und gemessen werden. Die Tests werden wie in Abschnitt 5.5 beschrieben mit einer maximalen Last von 50 N durchgeführt. Die Zusammenfassung der Ergebnisse mit den gemittelten kritischen Lasten  $L_C$  von jeweils fünf Ritztests zeigt Bild 55. Die geringen Standardabweichungen bestätigen die relativ gute Reproduzierbarkeit der Testmethode. Hierbei werden neben den beiden Schichttypen (TiN und CrN) die

beiden unterschiedlichen Indenterradien ( $r = 1,39 \mu\text{m}$  und  $r = 1,98 \mu\text{m}$ ) unterschieden und zwei unterschiedliche Versagensformen (kontinuierliche und diskontinuierliche Perforation) ausgewertet, welche anschließend noch näher erläutert und durch Bilder verdeutlicht werden.

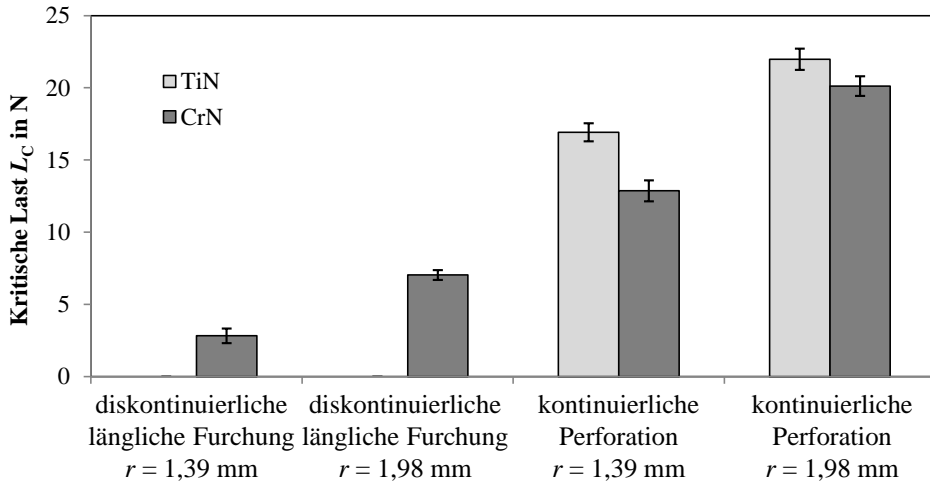


Bild 55: Kritische Lasten  $L_C$  des modifizierten Ritztests von CrN und TiN auf ASA Substrat bei unterschiedlichen Indenterradien  $r$

Der Vergleich der beiden Kugelindenter zeigt die erwartete Tendenz von steigenden kritischen Lasten  $L_C$  mit steigendem Indenterradius  $r$ . Für erheblich kleinere Indenterradien im Bereich von  $50 \mu\text{m} > r > 500 \mu\text{m}$  zeigen XIE und HAWTHORNE [109] und RANDALL et al. [148] im Bereich von  $20 \mu\text{m} > r > 500 \mu\text{m}$  die gleiche Tendenz.

In vielen Veröffentlichungen werden die Versagenserscheinungsformen sehr gut analysiert, zusammengefasst und deren Entstehung beschrieben. Diese Arbeiten enthalten jedoch keine duktilen Versagenserscheinungsformen des Ritztests [74; 77; 75; 76]. Erfreulicherweise sind diese duktilen Versagenserscheinungsformen in [72] zur Prüfung von Hochleistungskeramiken mit aufgenommen.

Wie Bild 56 (CrN-Schicht mit einem Kugelindenter mit  $r = 1,98 \text{ mm}$ ) und Bild 57 (CrN-Schicht mit einem Kugelindenter mit  $r = 1,39 \text{ mm}$ ) zeigen, bildet sich zunächst eine plastische Verformung des Substrates aus, welcher die Schicht ohne adhäsivem oder kohäsivem Schaden folgt. Mit steigender Kraft prägen sich diskontinuierlich längliche Risse und Furchungen – also Schädigungen, welche nur vorübergehende Defekte ausbilden – in der Ritzspur aus, bis eine kontinuierliche Schichtperforation (bis zum Ende des

Ritztests anhaltend) auftritt. Am Ende der Ritzspur ist eine Agglomeration aus delaminierten Schichtfragmenten zu finden.

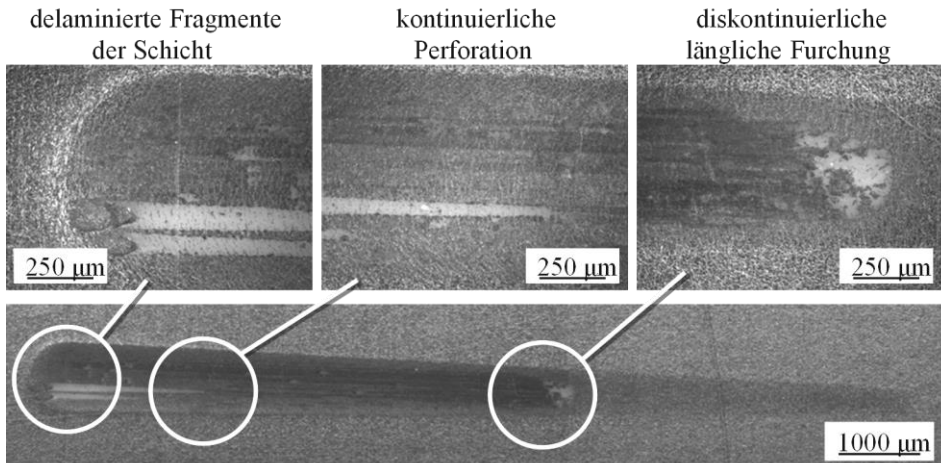


Bild 56: Ergebnisse und Versagenserscheinungsformen einer CrN-Schicht beim modifizierten Ritztest mit einem Kugellindenter  $\varnothing$  3,969 mm

VITRY et al. beschreiben in [149] ähnliche Versagenserscheinungsformen an wärmebehandelten Nickel-Bor-Schichten auf duktilen Aluminiumlegierungen und stellen durch das Ausbleiben von Beulung, Knickung oder Abplatzungen ebenfalls eine gute Schichthaftung fest. Diese Versagenserscheinungsformen treten nach BULL [74] jedoch erst ab einer gewissen Substrathärte auf, wie die Karte der Schadensbilder in Bild 21 (Abschnitt 4.4.2) zeigt.

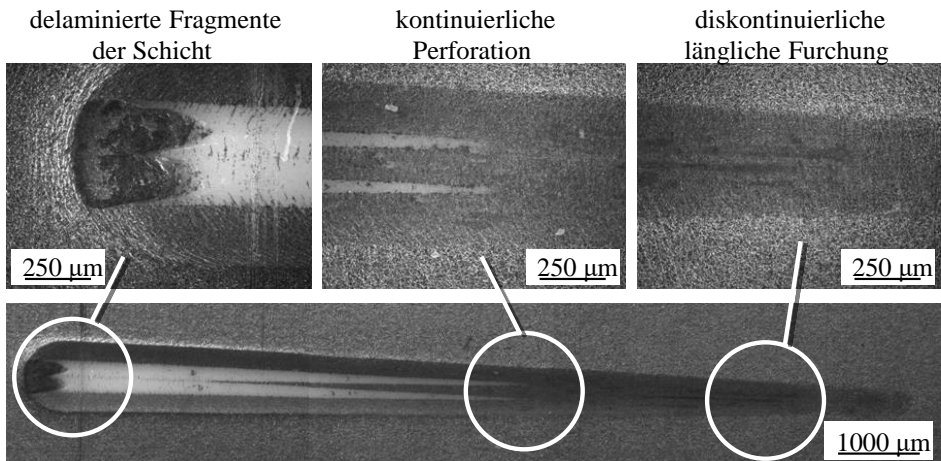


Bild 57: Ergebnisse und Versagenserscheinungsformen einer CrN-Schicht beim modifizierten Ritztest mit einem Kugellindenter  $\varnothing$  2,778 mm

Im Vergleich mit den Kugelindentern mag es verwundern, dass der Rockwell-Indenter mit dem sehr kleinen Radius von  $r = 0,25 \text{ mm}$  bei maximalen Kräften bis 100 N neben der plastischen Verformung keine Schädigung des gezeigten Schicht-Substrat-Verbundes erzielt (Bild 19 in Abschnitt 4.4.1), während die Kugelindenter bereits bei Kräften bis 50 N zu den charakteristischen Ergebnissen führen. In [109] wird festgestellt, dass das Druckspannungsfeld vor dem Indenter bei größeren Spitzenradien größer als bei kleinen Indenteradien sein kann, während die Biegespannungen reduziert werden. In einem gewissen Bereich kann im Test durch die Wahl des Indenterradius also beeinflusst werden, ob ein Versagen eher adhäsiv oder kohäsiv auftritt. Die halbkreisförmigen Strukturen, welche beim Kugelindenter mit  $\varnothing 2,778 \text{ mm}$  in Bild 57 sehr deutlich zu sehen sind, beim Kugelindenter mit  $\varnothing 3,969 \text{ mm}$  (Bild 56) schwächer ausgeprägt und beim Rockwell-Indenter (Bild 19) nicht mehr erkennbar sind, bestätigen die Beeinflussung des Druckspannungsfeldes durch die Indenterwahl. Erreichen diese Druckspannungen einen kritischen Wert, führt dies nach [150] und [107] zu einer ringförmigen Rissbildung.

Bei Anwendung des modifizierten Ritztests an der TiN-Schicht können ähnliche Tendenzen bezüglich der kritischen Lasten im Verhältnis zum Indenterradius wie bei der CrN-Schicht festgestellt werden. Insgesamt zeigt das TiN-Schichtmaterial jedoch ein spröderes und brüchigeres Verhalten.

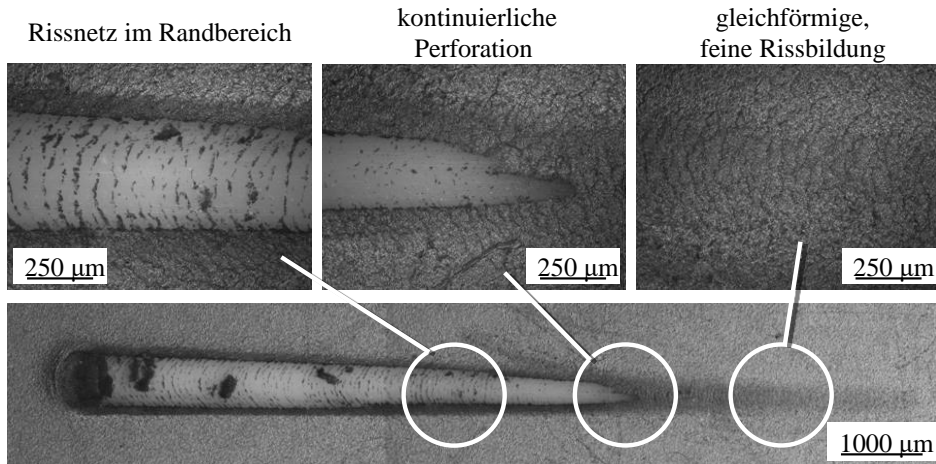


Bild 58: Ergebnisse und Versagenserscheinungsformen einer TiN-Schicht beim modifizierten Ritztest mit einem Kugelindenter  $\varnothing 2,778 \text{ mm}$

In Bild 58 ist bereits nach kurzer Ritzstrecke eine gleichförmige und feine Rissbildung zu erkennen, welche anschließend in eine kontinuierliche Schichtperforation übergeht mit feinem Rissnetzwerk im Randbereich.

Auch hier belegen die spröden Schichtfragmente, welche am Substrat anhaften ein Schichtversagen aufgrund der Stauchung des Verbundes vor dem Indenter, wie es in [75] beschrieben wird. Auch bei der TiN-Schicht befinden sich die meisten delaminierten Schichtfragmente am Ende der Ritzspur.

In [151] werden bei reaktiv gesputterten TiN-Schichten auf Crofer 1700 ähnliche Risse seitlich der Ritzspur beschrieben, jedoch in größerem Abstand. Während die Vickershärte des Crofer bei etwa 176 HV liegt, weist das vorliegende ASA-Substrat nur etwa ein Zehntel dieses Wertes an Härte auf. Das Polymersubstrat kann somit nur einen erheblich geringeren Stützeffekt bewirken, was die höhere Anzahl der dichten und feinen Risse erklärt.

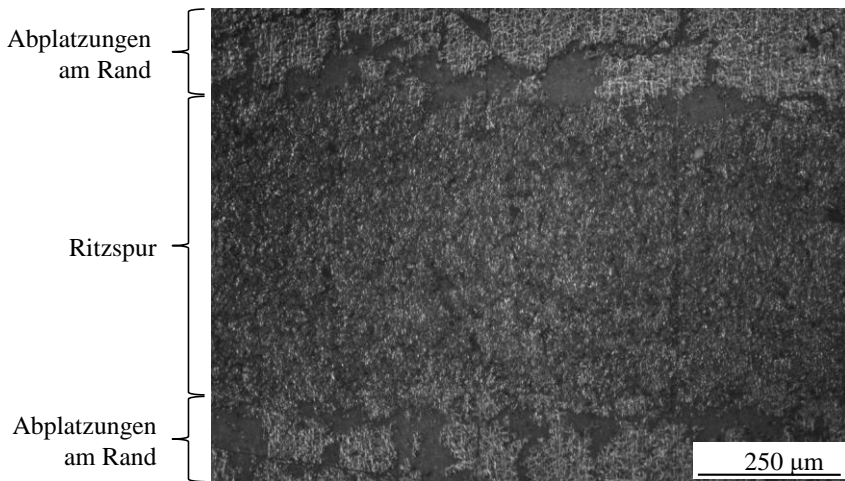


Bild 59: Adhäsives Versagen einer TiN-Schicht am Rand der Ritzspur

Bei Anwendung des modifizierten Ritztests auf einer Probe mit TiN-Schicht, welche vor dem Beschichtungsprozess keiner Plasmabehandlung und Aktivierung der Polymeroberfläche unterzogen wurde, platzt die Schicht am Rand der Ritzspur infolge der Verformung ab, wie in Bild 59 zu sehen. In der Ritzspur selbst wird die Schichtoberfläche geglättet, bleibt jedoch intakt. Auch wenn die Karte der Schadensbilder in Bild 21 (Abschnitt 4.4.2) Abplatzungen erst bei höheren Substrathärten anzeigt, können in solch extremen Fällen bereits bei geringeren Substrathärten derartige Schadenscharakteristiken auftreten.

Zur Untersuchung weiterer Anwendungsfälle des modifizierten Ritztests und um den Verschleiß der Kugeln besser quantifizieren zu können, wird der Test auch auf Stahlsubstraten mit Diamantbeschichtung angewendet. Zur Schädigung dieser harten Schichten, werden die Normalkräfte linear

bis 200 N gesteigert. Bild 60 zeigt eine Grenzflächenabplatzung [75], ausgelöst durch HERTZ'sche Risse [74] in der Ritzspur. PERRY zeigt in [152] ähnliche Schadensbilder, welche zwischen den Stahlsubstraten und den TiN-Schichten beginnend in der Schicht kohäsiv fortlaufen.

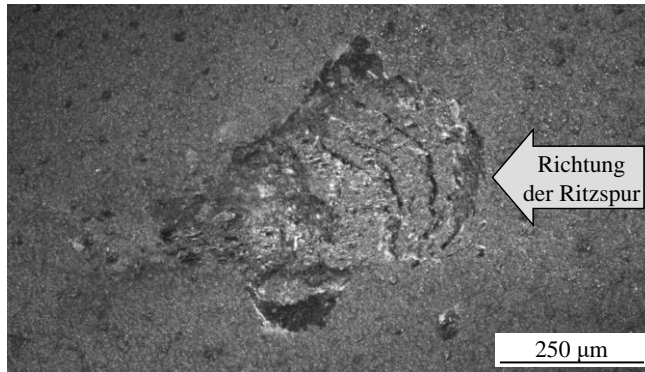


Bild 60: Grenzflächenabplatzung einer Diamantschicht durch den modifizierten Ritztest mit einem Kugelindenter  $\varnothing 2,778$  mm

Um den Verschleiß an den Kugelindentern zu erfassen und einen Einfluss auf die Ergebnisse auszuschließen, werden die Indenter nach jedem Ritzvorgang visuell geprüft und die Geometrie mikroskopisch überprüft. Auch nach mehrfachen Ritzvorgängen sind die 100Cr6-Kugeln durch die CrN- und die TiN-Schichten an der Oberfläche poliert. Es kann jedoch kein messbarer Einfluss auf die Kugelgeometrie (zum Beispiel in Form einer Abflachung) festgestellt werden. Ein signifikanter Einfluss auf die Reibungszahl aufgrund der geringfügig gesunkenen Rauheit kann nicht festgestellt werden. Nichtsdestotrotz muss der Anwender – wie beim genormten Ritztest mit dem Rockwell-Indenter auch [72] – den Indenter regelmäßig auf Verunreinigungen und Veränderungen in seiner geometrischen Form untersuchen und gegebenenfalls auswechseln.

Im Kontakt mit den Diamantschichten kann bereits nach dem ersten Ritzvorgang abrasiver Verschleiß festgestellt werden. Dieser beträgt für den Kugelindenter  $\varnothing 2,778$  mm  $1,62 \cdot 10^{-3}$  mm<sup>3</sup> (siehe Bild 61) und  $2,96 \cdot 10^{-3}$  mm<sup>3</sup> für den Kugelindenter  $\varnothing 3,969$  mm. Solch ein starker Verschleiß hat starken Einfluss auf die Indentergeometrie und somit auf die auftretenden Belastungen. Ein Wechsel des Indenters ist nach jedem Ritzvorgang notwendig und bei einer quantitativen Auswertung des Tests eine Verkürzung der Ritzstrecke zur Schonung der Indentergeometrie anzuraten.

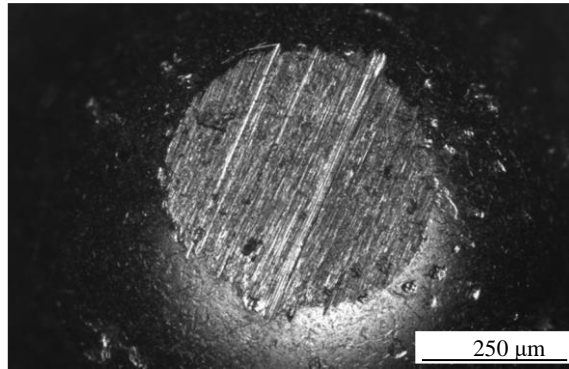


Bild 61: Abrasiver Verschleiß des  $\varnothing$  2,778 mm Kugellindenters nach Kontakt mit der Diamantschicht

## 8.2 Diskussion und Verifizierung der FE-Simulationen

Um das Modell und die Kontaktbedingungen zu verifizieren wurden im Modell die Schichteigenschaften gleich den Substrateigenschaften gesetzt und analog zu den FE-Indentierungen in Abschnitt 6.1 mit dem analytischen Modell verglichen. Hierfür wurde im Zeitschritt *Ritz-3* für eine Sekunde die Vorkraft entsprechend erhöht und ein Kontakt ohne laterale Bewegung verifiziert. Auch hier stimmen die Ergebnisse sehr gut mit den analytischen Werten überein.

Zur qualitativen Auswertung der Ritztests von harten Dünnschichten auf weichem Substrat zeigt Bild 62 die Verteilung der ersten Hauptspannungen während des Ritztests bei einer simulierten Last von 25 N mit einem Kugellindenter  $\varnothing$  2,778 mm. Zur besseren Übersichtlichkeit sind Indenter und Substrat ausgeblendet. Aufgrund der Verhältnisse zwischen Elastizitätsmoduln, Belastung und Verformung zeigt sich, dass die Beanspruchungen des Substrates schnell dessen Fließgrenze erreichen und das Substrat plastisch deformiert. Die Schicht hat aufgrund des erheblich größeren Elastizitätsmoduls eine gewisse Tragwirkung, folgt jedoch der Verformung des Substrates. Aufgrund des großen Sprunges des Elastizitätsmoduls sind die Spannungen im Substrat im Vergleich zur Schicht sehr gering und rücken bei der quantitativen Auswertung in den Hintergrund. Auch der Indenter wird durch seine vergleichsweise große Stützwirkung im Verhältnis zur Schicht kaum beansprucht.

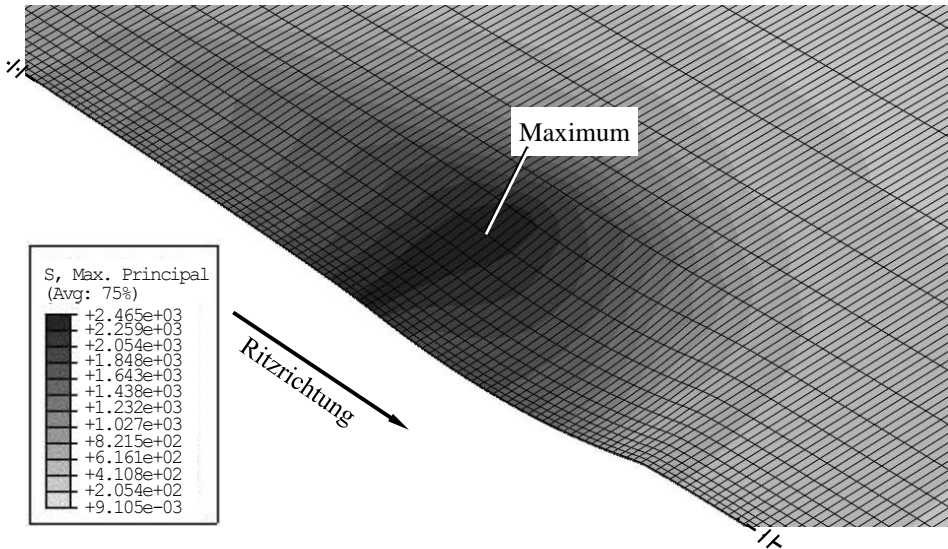


Bild 62: Exemplarische Auswertung der ersten Hauptspannung in der Schicht während eines Ritztests (Kugelindenter  $\varnothing$  2,778 mm, Indenter und Substrat ausgeblendet)

Wie Bild 62 zeigt, befindet sich das Maximum der ersten Hauptspannung (wie auch das Maximum der VON-MISES-Spannungen) nicht am Scheitelpunkt des Indenters oder kurz dahinter, sondern seitlich nach außen versetzt. Dies ist der Überlagerung der Koordinatenspannungen mit den Schubspannungen im Spannungstensor geschuldet – analog zu anderen Kontaktsituationen wie etwa dem Kugel-Ebene-Kontakt [7, 130].

Die Plausibilität und Relevanz der an dieser Stelle simulierten Ergebnisse zeigen sich in zahlreichen Auswertungen in der Praxis des Ritztests. Auch in dieser Arbeit bildet sich in Bild 56 und Bild 57 die kontinuierliche Perforation an genau dieser besagten Stelle aus. Für die Interpretation der FE-Simulationen ist somit der Punkt der maximalen ersten Hauptspannung die erste relevante Stelle zur systematischen Auswertung.

Die Betrachtung der zweiten Hauptspannung in Bild 63 hebt die Stelle in der Symmetrieebene kurz hinter dem Scheitelpunkt des Indenters hervor. Dieser Punkt wird in den meisten analytischen Rechenmodellen besonders betrachtet [109, 153, 154]. Auch diese Stelle sollte für die Interpretation der FE-Simulationen systematisch ausgewertet werden.

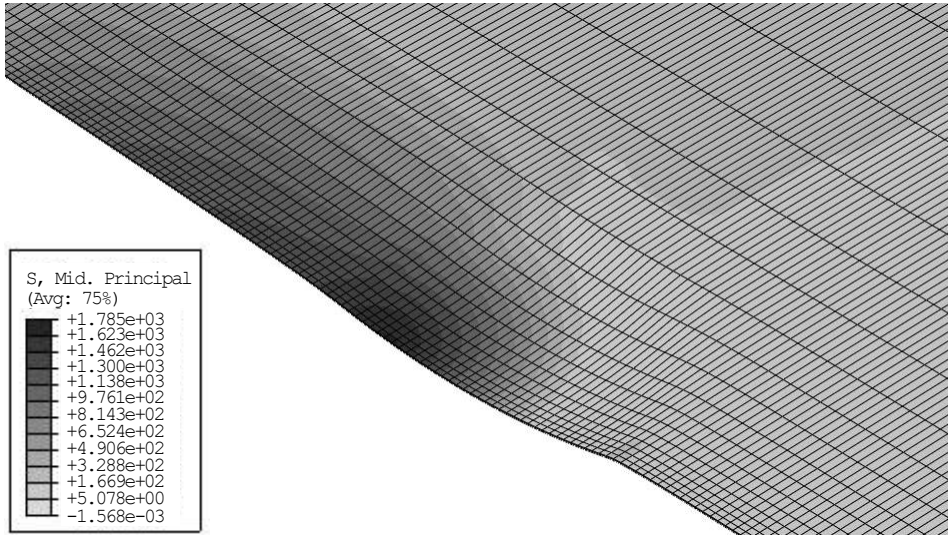


Bild 63: Exemplarische Auswertung der zweiten Hauptspannung in der Schicht während eines Ritztests (Kugelindenter  $\varnothing$  2,778 mm, Indenter und Substrat ausgeblendet)

Die dritte Hauptspannung (Bild 64) hebt weitere Stellen für die Auswertung hervor. Hier zeigen sich die Druckspannungen, welche dem Indenter vorauslaufen und zum Rand der Indenter-Kontaktzone ansteigen. Entlang der Indenter-Kontaktzone verlaufen diese Druckspannungen weiter ringförmig nach außen mit abnehmendem Betrag.

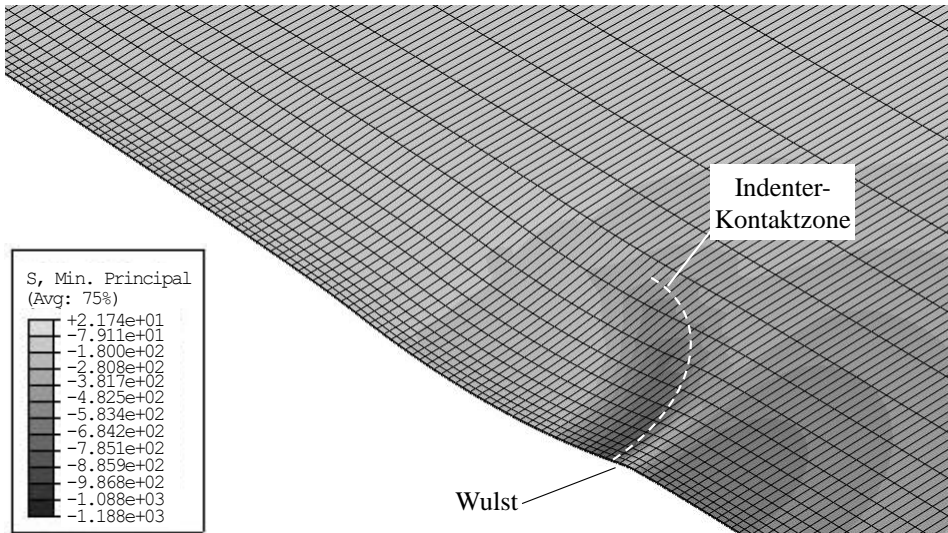


Bild 64: Exemplarische Auswertung der dritten Hauptspannung in der Schicht während eines Ritztests (Kugelindenter  $\varnothing$  2,778 mm, Indenter und Substrat ausgeblendet)

Direkt vor dieser Druckspannungszone befindet sich eine Wulst, deren geometrische Ausprägung stark von den Parametern des Ritztests abhängt, wie der nachfolgende Abschnitt zeigt. Abhängig von diesen Parametern bildet sich eine Biegespannung in der Schicht, welche von den Druckspannungen überlagert wird. Am Beispiel in Bild 64 zeigt sich, dass die Druckspannungen an der Schichtoberseite durch die Biegespannungskomponente reduziert werden, jedoch nicht auf Zugspannungen wechseln. Auf der Schichtunterseite befindet sich im Scheitelpunkt der Wulst das (betragsmäßige) Maximum der Spannungen. Vor dieser Wulst wird die Schicht durch Druckspannungen komprimiert. Diese Wulst setzt sich ebenfalls seitlich um die Kontaktzone fort. Auch die seitlichen Bereiche können für die Interpretation der Simulationsergebnisse von großem Interesse sein, sofern Schädigungen im Randbereich der Ritzspur auftreten oder zu erwarten sind.

Im Vergleich zu Simulationen an beschichteten Stahlsubstraten zeigt sich der enorme Einfluss der großen Verformungen durch das weiche und schnell plastifizierende Substratmaterial. Während sich bei HOLMBERG et.al [155] die Spannungen verhältnismäßig homogen in das Stahlsubstrat fortsetzen, zeigen sich bei der Kombination aus harter Schicht und weichem Substrat die erwarteten großen Spannungssprünge am Interface. Weiterhin ist in [156] und [157] zu sehen, dass sich die ersten Hauptspannungen unter dem Indenter als Druckspannungen formieren und ringförmig um den Indenter als Zugspannungen ausbilden. Im Vergleich dazu bilden sich in Bild 62 in der Schicht ausschließlich Zugspannungen, welche durch die starke Verformung der Schicht plausibel sind.

### **8.3 Einfluss der Parameter auf den modifizierten Ritztest**

Durch die FE-Simulation mit variierenden Parametern ist es möglich, qualitative Aussagen über den Einfluss der unterschiedlichen Parameter auf den modifizierten Ritztest zu treffen. Dies ist sowohl für ein besseres Verständnis der komplexen Zusammenhänge im Rahmen der Schichtentwicklung als auch bei der Überführung in das Produkt für die spätere Anwendung von großer Bedeutung.

#### **8.3.1 Einfluss von Indenterradius und -form**

In den folgenden Diagrammen werden die plastischen Verformungen des Schicht-Substrat-Systems ausgewertet bei einem Schicht-Elastizitätsmodul  $E_C = 100\,000$  MPa und einer Schichtdicke  $d = 2,8$   $\mu\text{m}$ .

Zu Beginn der Ritzstrecke zeigt Bild 65, dass in den Modellen noch keine plastische Verformung auftritt. Erst bei etwa 15 % der Ritzlänge sind nennenswerte bleibende Verformungen festzustellen. Wie erwartet, steigen mit abnehmendem Indenterradius die bleibenden Verformungen. Während die Kugelindenter eine annähernd linear anwachsende Verformung hervorrufen, sinkt der Rockwell-Indenter nach Erreichen der Fließgrenze zunächst schnell ein und zeigt erst anschließend einen linearen Verlauf. Für die quantitative Auswertung des modifizierten Ritztests könnte dies problematisch sein, da innerhalb eines kleinen Belastungssprunges große Veränderungen hinsichtlich der Beanspruchung erfolgen.

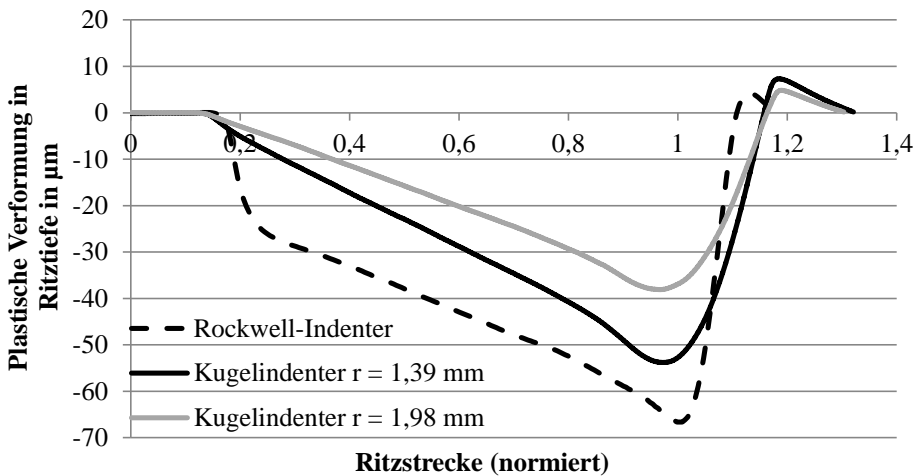


Bild 65: Plastische Verformung in Richtung der Ritztiefe entlang der Ritzstrecke in Abhängigkeit vom Indenterradius

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Kugelindenter mit Radius  $r = 1,39$  mm, also der mittlere Indenterradius die größte Materialaufwölbung am Ende der Ritzspur verursacht. Im Vergleich zum größeren Kugelindenter ist dies durch das tiefere Einsinken und folglich mehr zu verdrängenden Materials zu erklären. Da der Rockwell-Indenter noch tiefer eindringt, sind hier die unterschiedliche Form der Indenter und die unterschiedlichen Spannungszustände ausschlaggebend. Dies bestätigt Bild 66, welches die plastische Verformung in Querrichtung und am Ende der Ritzstrecke aufzeigt.

Während das Verhältnis der Materialanhäufung seitlich des Indenters zu vor dem Indenter beim Rockwell-Indenter annähernd 3 beträgt, zeigen die Kugelindenter lediglich ein Verhältnis von 0,6. Diese Beobachtungen stützen die in Abschnitt 4.4 getroffenen Annahmen, dass unterschiedliche Indenterformen durch Variation der überlagerten Spannungen eine größere Bandbreite an Beanspruchungen bieten können.

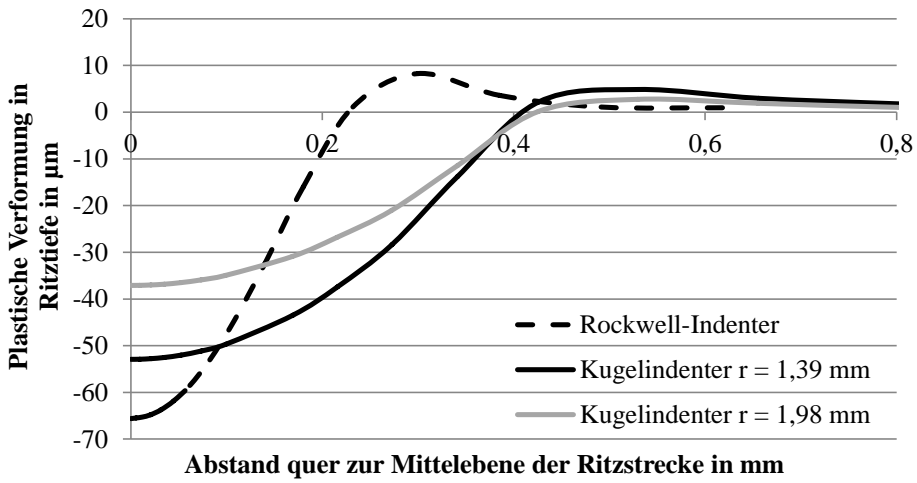


Bild 66: Plastische Verformung in Richtung der Ritztiefe in Querrichtung und am Ende der Ritzstrecke in Abhängigkeit vom Indenterradius

### 8.3.2 Einfluss der Reibungszahl zwischen Schicht und Indenter

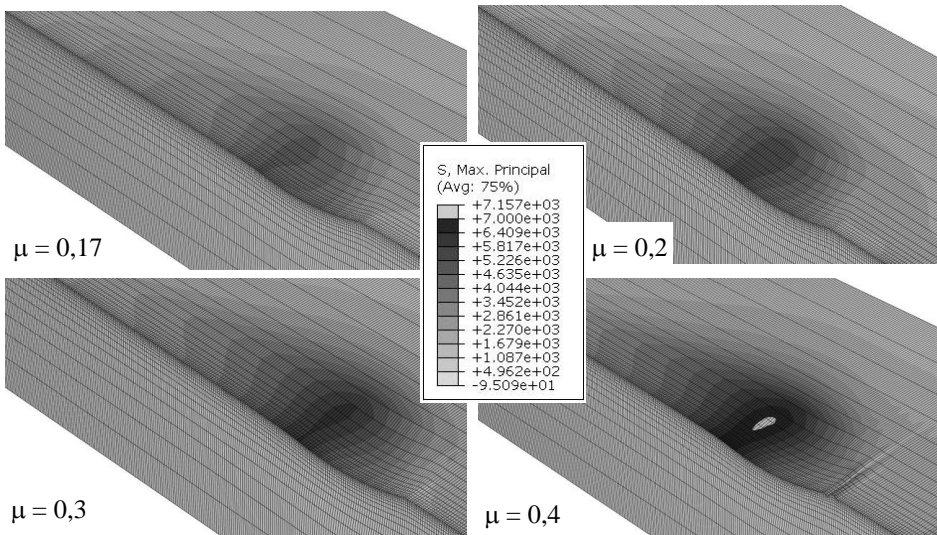


Bild 67: Spannungsverteilungen in Abhängigkeit der Reibungszahl  $\mu$  zwischen Schicht und Indenter

In Bild 67 wird der Einfluss der Reibungszahl zwischen Schicht und Indenter sichtbar. Die Parameterstudie zeigt die Spannungszustände unter Belastung am Ende der Ritzstrecke mit einem (ausgeblendeten) Kugel-

indenter mit  $r = 1,39 \text{ mm}$ , einer Schichtdicke  $d = 2,8 \text{ }\mu\text{m}$  und einem Schicht-Elastizitätsmodul  $E_C = 100\,000 \text{ MPa}$ .

Bereits die verhältnismäßig kleine Variation der Reibungszahl  $\mu$  innerhalb des Intervalls von  $[0,17; 0,4]$  lässt die maximalen Spannungen quantitativ um annähernd 25 % zunehmen. Weiterhin ist zu beobachten, dass sich neben den maximalen Spannungen insbesondere auch die Spannungsverteilung vor dem Indenter deutlich ändert. Die Materialaufwölbung vor dem Indenter ist bei  $\mu = 0,4$  fast dreimal höher als bei den ursprünglichen  $\mu = 0,17$ .

Auch für die Reibungszahl werden die in Abschnitt 4.4 getroffenen Annahmen bestätigt. Durch die einfache Auswahl und Anwendung unterschiedlicher Kugelwerkstoffe im modifizierten Ritztest kann nicht nur die Materialpaarung und dadurch die Charakterisierung gezielt an den Anwendungsfall angepasst werden, sondern durch Variation der Spannungszustände auch zu einem tieferen Verständnis bezüglich der Beanspruchbarkeit von Schicht-Substrat-Verbunden beitragen.

### 8.3.3 Einfluss der Schichtdicke

Analog zu den Indentierungen in Abschnitt 6.3 hat die Schicht mit hohem Elastizitätsmodul im Vergleich zum Substratwerkstoff einen sichtbaren Einfluss auf die Verformung beziehungsweise die Ritztiefe, wie Bild 68 zeigt. Durch den hohen Schicht-Elastizitätsmodul haben bereits die relativ kleinen Änderungen der Ritztiefe einen erheblichen Einfluss auf die Spannungswerte.

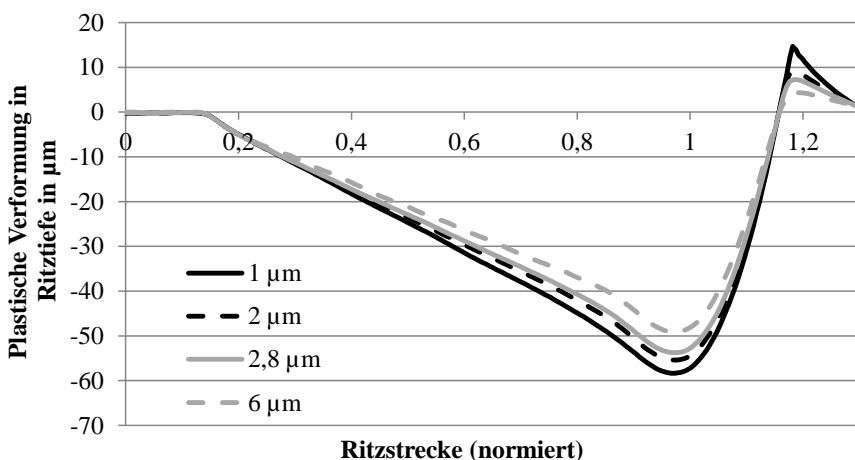


Bild 68: Verformung in Richtung der Ritztiefe entlang der Ritzstrecke in Abhängigkeit von der Schichtdicke  $d$

Bild 69 zeigt den Einfluss der Schichtdicke  $d$  auf die Spannungsverteilung anhand von simulierten Ritztests unter Belastung am Ende der Ritzstrecke mit einem (ausgeblendeten) Kugelindenter mit  $r = 1,39$  mm, einem Schicht-Elastizitätsmodul  $E_C = 100\,000$  MPa und einer Reibungszahl von  $\mu = 0,17$ .

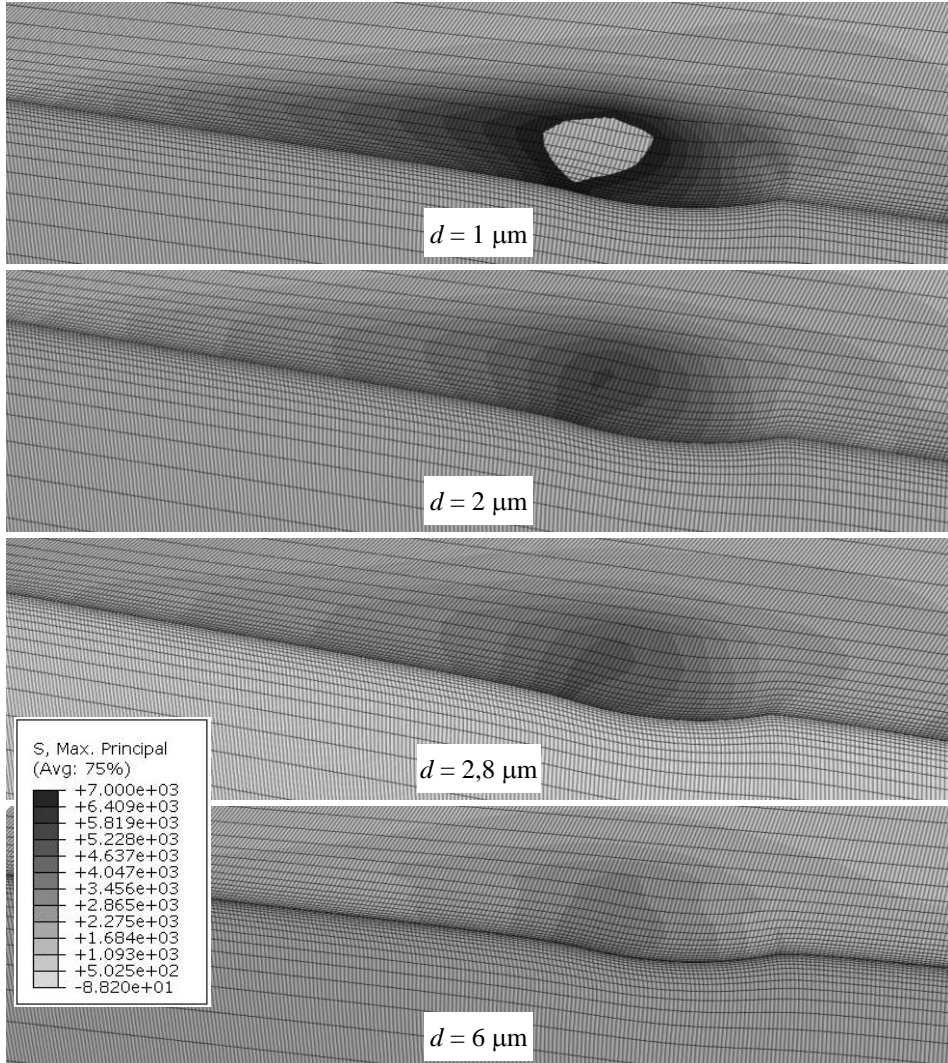


Bild 69: Spannungsverteilungen in Abhängigkeit der Schichtdicke  $d$

Auch hier zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Schichtdicke auf die quantitativen Spannungswerte. So sinkt der Wert der maximalen Schichtspannung von  $8\,100$  MPa bei  $d = 1\ \mu\text{m}$  auf  $2\,800$  MPa bei  $d = 6\ \mu\text{m}$ . Auch die Übergänge von Ritzspur zur Kontaktfläche mit dem Indenter und weiter in

die Randbereiche fallen bei den dickeren Schichten gleichmäßiger aus. Der Ort der maximalen Spannung wandert zudem geringfügig in Richtung der Symmetrieebene.

### 8.3.4 Einfluss des Schicht-Elastizitätsmoduls

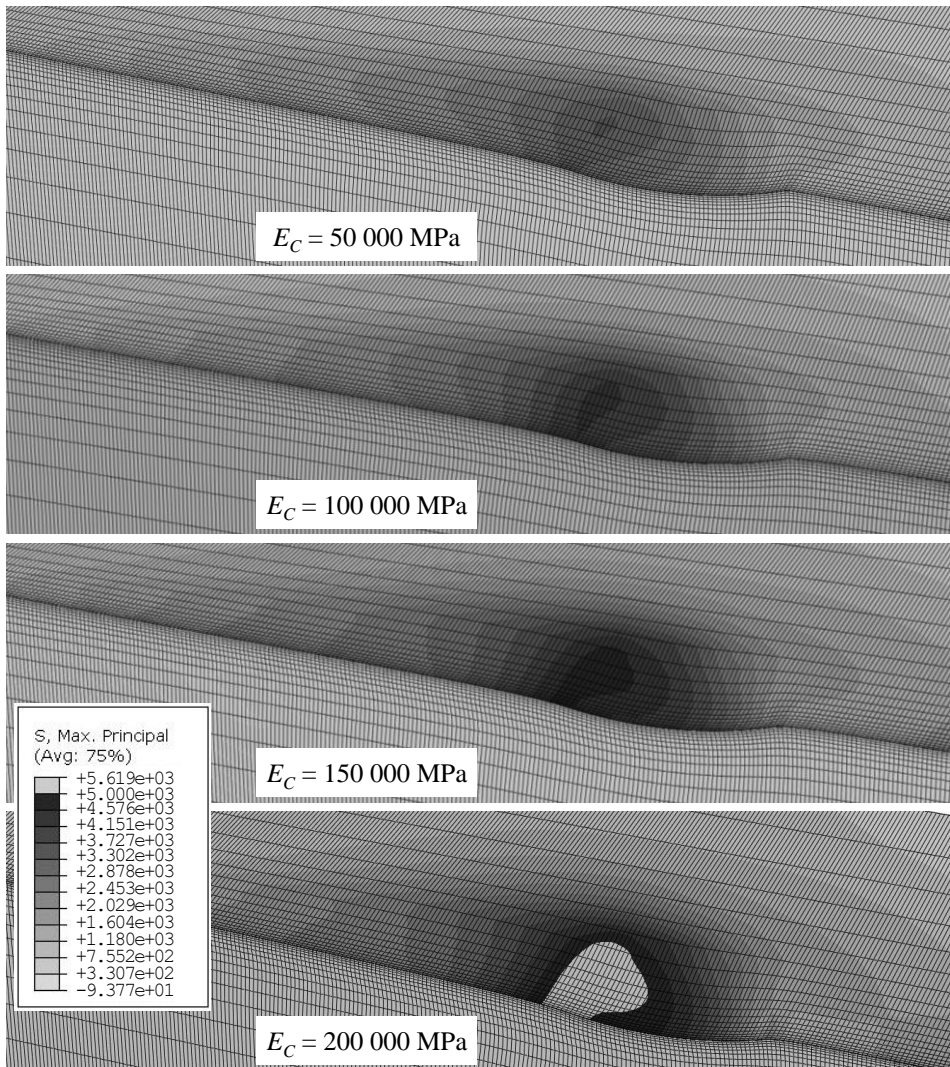


Bild 70: Spannungsverteilungen in Abhängigkeit des Schicht-Elastizitätsmoduls  $E_C$

Um den Einfluss des Schicht-Elastizitätsmoduls  $E_C$  zu untersuchen, zeigt Bild 70 die Spannungsverteilungen am Ende der Ritzstrecke unter Belastung mit einem (ausgeblendeten) Kugelindenter mit  $r = 1,39\text{ mm}$ , einer Schichtdicke  $d = 2,8\text{ }\mu\text{m}$  und einer Reibungszahl von  $\mu = 0,17$ . Mit

steigendem Schicht-Elastizitätsmodul  $E_C$  nehmen die Spannungen ebenfalls zu. Sowohl an der Stelle der maximalen Spannungen, als auch der Betrag am lokalen Maximum vor dem Indenter.

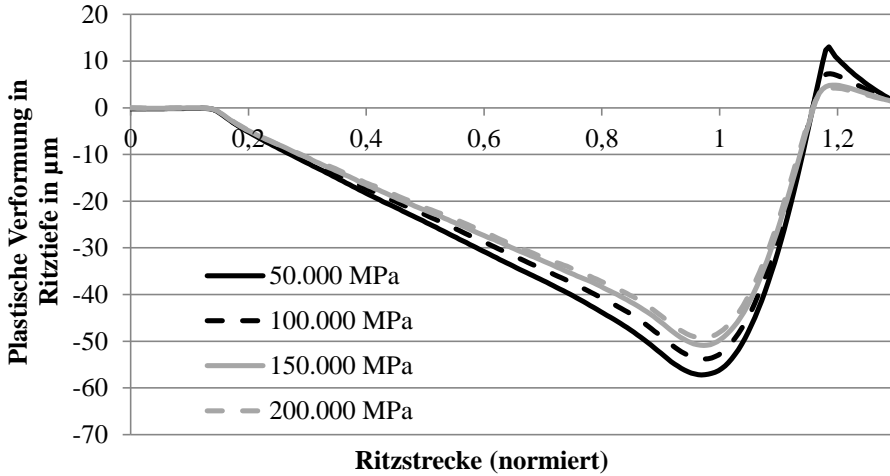


Bild 71: Verformung in Richtung der Ritztiefe entlang der Ritzstrecke in Abhängigkeit des Schicht-Elastizitätsmoduls  $E_C$

Die Durchsenkungen in Richtung der Ritztiefe verringern sich mit steigendem Schicht-Elastizitätsmodul  $E_C$  und verhalten sich beim Ritztest weitestgehend analog zu den Feststellungen bei den Indentierungen in Abschnitt 6.3, wie die Auswertung in Bild 71 zeigt. Einen Überblick zum Verhältnis der Spannungssteigerung und Dehnungsreduzierung infolge einer Erhöhung des Schicht-Elastizitätsmoduls  $E_C$  zeigt Bild 72.

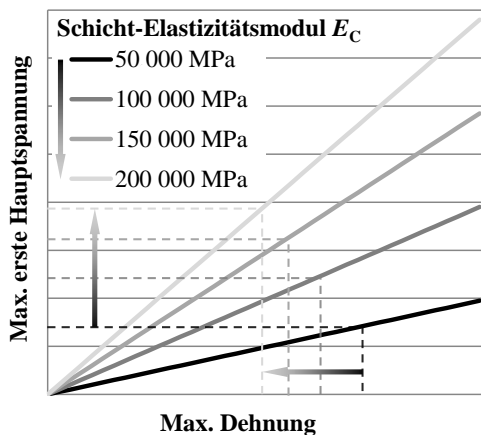


Bild 72: Maximale Spannungen und maximale Dehnungen (jeweils normiert) bei unterschiedlichen Schicht-Elastizitätsmodul  $E_C$

## 8.4 Mehrachsige Spannungsanalyse

Die gezeigten Ergebnisse zeigen die komplexen mehrachsigen Spannungszustände, welche während des modifizierten Ritztests auftreten. Durch die relativ einfachen Möglichkeiten der Modifikation der Testparameter – hier sind besonders die Indenterform- und der -radius sowie die Beeinflussung der Reibungszahl durch unterschiedliche Kugelwerkstoffe zu nennen – können Schicht-Substrat-Verbunde neben der Belastbarkeit mit der vorgestellten Methode auch sehr umfassend hinsichtlich der Beanspruchbarkeit untersucht werden. Durch das Auftreten unterschiedlicher Schadensbilder lassen sich auch mehrere Punkte hinsichtlich der Beanspruchungsgrenzen auswerten. Neben den quantitativen Werten liefert die Analyse der Schadensbilder zudem wichtige qualitative Ergebnisse, welche Schäden bei entsprechender Belastung zu erwarten sind und welche Schicht-Substrat-Systeme bei entsprechenden Anforderungen besser geeignet sind.

### 8.4.1 Auswertung und Zuordnung der Versagenserscheinungsformen mit deren Entstehung

Um dem Anwender eine Hilfestellung zur Auswertung von Ritztests, Simulationen und deren Zusammenführung zu geben, zeigt Bild 73 zunächst die Lage der für die Auswertung relevanten Stellen der Simulationen. Nach dem experimentellen Ritztest wird bei der mikroskopischen Auswertung die jeweilige Versagenserscheinungsform bestimmt und die dabei wirkende Belastung anhand der Position in Längsrichtung der Ritzstrecke berechnet. Hierbei ist wichtig, dass die Schädigung nicht unbedingt in der vertikalen Mittelachse des Indenters auftritt, sondern dieser vor- beziehungsweise nachgelagert oder auch seitlich auftreten kann. Insbesondere bei vor- oder nachgelagerter Entstehung, muss dies bei der Berechnung der dabei wirkenden Last mitberücksichtigt werden. Eine zusätzliche Orientierung bietet hier die Analyse der akustischen Signale beziehungsweise der Indentierungstiefe während des Ritztests.

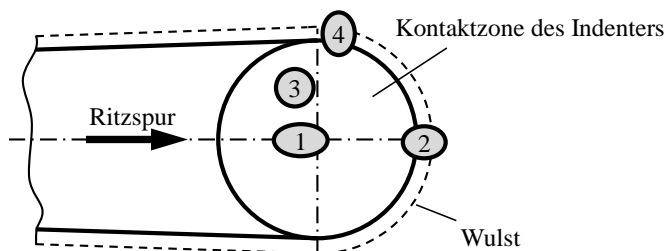
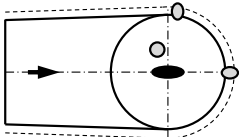
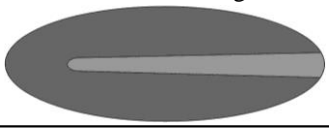
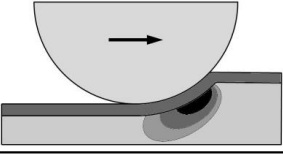
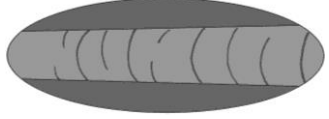
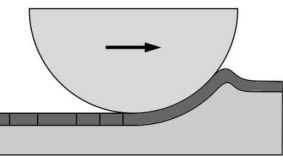
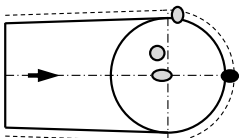
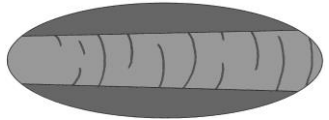
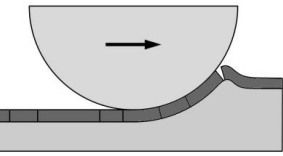
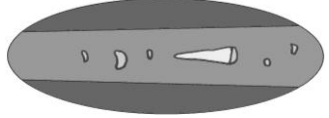
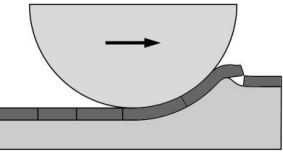
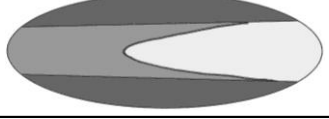
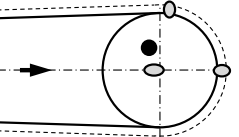

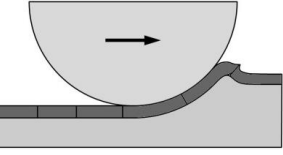
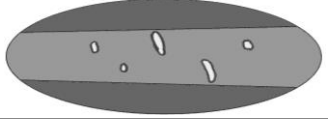
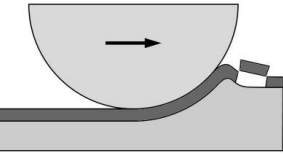
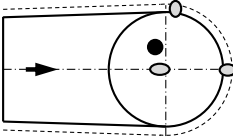
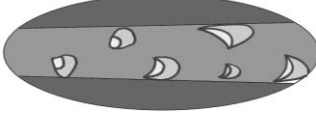
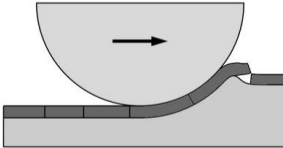
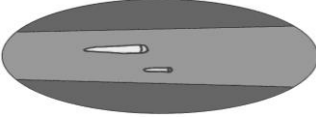
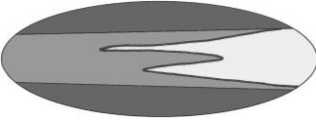
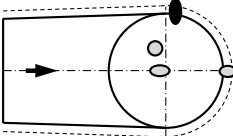
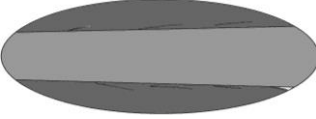
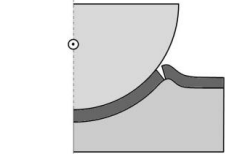
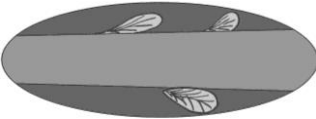
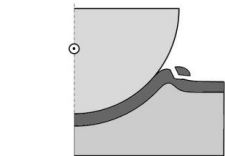
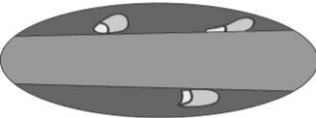
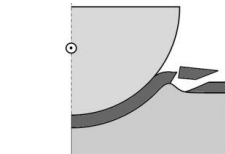
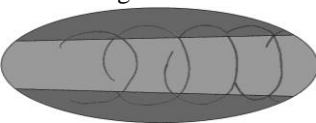
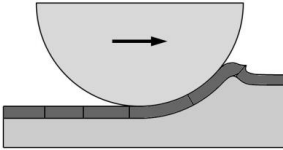


Bild 73: Positionen der relevanten Stellen zur Auswertung des modifizierten Ritztests

Tabelle 15: Versagenserscheinungsformen und deren Zuordnung zur Auswertungsposition und Versagensentstehung

Lage #	Versagenserscheinungsform	Entstehung
<p>1</p> 	<p>Plastische Verformung</p> 	
	<p>HERTZsche Zugrisse (innerhalb der Ritzspur)</p> 	
<p>2</p> 	<p>Übereinstimmende Knickrisse</p> 	
	<p>Symmetrische diskontinuierliche Schichtperforierung</p> 	
	<p>Symmetrische kontinuierliche Schichtperforierung</p> 	
<p>3</p> 	<p>Fischgrätenmuster (innerhalb der Ritzspur)</p> 	
	<p>Örtliche Abplatzung (innerhalb der Ritzspur)</p> 	

Lage #	Versagenserscheinungsform	Entstehung
<p>3 (Fortsetzung)</p> 	<p>Schalenförmige adhäsive und kohäsive Abplatzung</p> 	
	<p>Seitliche diskontinuierliche Schichtperforierung</p> 	
	<p>Seitliche kontinuierliche Schichtperforierung</p> 	
<p>4</p> 	<p>Längsrisse an den Grenzen der Ritzspur</p> 	
	<p>Kohäsive Abplatzung am Rand der Ritzspur</p> 	
	<p>Adhäsive und kohäsive Abplatzung am Rand</p> 	
	<p>Kreisförmige HERTZsche Risse</p> 	

Die wichtigsten Versagenserscheinungsformen sind in Tabelle 15 aufgezeigt. Sie orientieren sich dabei soweit möglich an der Nomenklatur und teilweise der Darstellung aus [72]. Um die Entstehung der Versagenserscheinungsformen besser einordnen zu können, sind die üblichen Schädigungsmechanismen zugeordnet und illustriert, welche teilweise aus [75] und [74] bekannt sind. Die Entstehung ist für das Verständnis des tribologischen Systems von großem Interesse und bietet eine Hilfe für die Bestimmung der korrekten Last bei Versagensentstehung, da hierfür die Position der vertikalen Indentermittelachse abgeschätzt werden muss.

### 8.4.2 Parametereinflüsse

Um die für die jeweilige Anwendung relevanten Schichtparameter qualitativ bewerten zu können ist es essentiell, deren Einfluss auf den tribologischen Kontakt zu verstehen und einordnen zu können. So können erst dann die erforderlichen Parameter des Schicht-Substrat-Systems im Rahmen des Anforderungsmanagements auch sinnvoll abgeschätzt und festgelegt werden. Anhand dieser Anforderungen ist ein passendes tribologisches System auszuwählen oder gegebenenfalls zu entwickeln beziehungsweise anzupassen.

Die folgenden Diagramme zeigen die Ergebnisse des modifizierten Ritztests im HENCKY-Diagramm anhand eines Schicht-Substrat-Verbundes mit

- dem in Abschnitt 5.9.2 beschriebenen Substratwerkstoff PA66 (ULTRAMID A3K) [121]
- einer Schicht mit einer Dicke von  $d = 2,8 \mu\text{m}$
- einem Elastizitätsmodul von  $E_C = 100\,000 \text{ MPa}$
- bei einer simulierten Last von 25 N mit einem Kugelindenter  $\varnothing 2,778 \text{ mm}$
- einer Reibungszahl von  $\mu = 0,1$ .

Um die Auswirkungen der Parametervariationen ersichtlich zu machen, weisen die Pfeilspitzen auf folgende Werte bei sonst gleichen Parametern hin:  $\mu \uparrow \triangleq \mu = 0,4$ ;  $E \downarrow \triangleq E_C = 50\,000 \text{ MPa}$ ;  $E \uparrow \triangleq E_C = 150\,000 \text{ MPa}$ ;  $d \downarrow \triangleq d = 1,0 \mu\text{m}$ ;  $d \uparrow \triangleq d = 6,0 \mu\text{m}$ .

Für die Auswerteposition 1 zeigt Bild 74 links die Parametereinflüsse sowie rechts die resultierenden Beanspruchungen bei den unterschiedlichen Indentern. Es ist gut zu erkennen, dass die Variationen von Schicht-Elastizitätsmodul und Schichtdicke an dieser Auswertestelle den Mehrachs-

keitsquotienten  $q = 0,92$  kaum beeinflussen und die Beanspruchung im HENCKY-Diagramm nahezu linear zur Ursprungsgeraden verschoben wird. Lediglich die Erhöhung der Reibungszahl ergibt eine leichte Erhöhung des Mehrachsigsigkeitsquotienten  $q$  auf 1,1. Die drei unterschiedlichen Indenter zeigen zwar große Unterschiede in den absoluten Spannungswerten, liegen jedoch ebenfalls nahezu exakt auf der Ursprungsgeraden. Dies lässt den Schluss zu, dass für die Auswertung der Versagenserscheinungsformen an der Auswerteposition 1 eine Indentervariation nur wenig neue (qualitative) Erkenntnisse liefert.

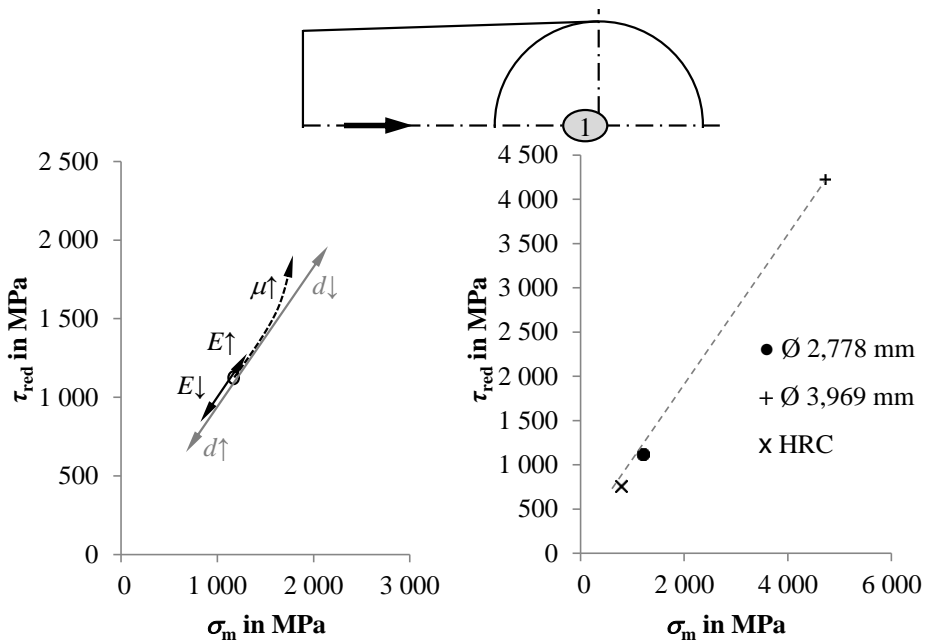


Bild 74: Auswerteposition 1: Einflüsse der Systemparameter mit ø2,778mm-Kugelindenter (links) und Beanspruchungen bei unterschiedlichen Indentern (rechts)

Wie Bild 75 links für die Auswerteposition 2 (dem Indenter vorausgehend) zeigt, wird auch hier die Beanspruchung durch die Reibung stark beeinflusst. Mit erhöhter Reibungszahl steigt der Spannungsbetrag stark an und der Mehrachsigsigkeitsquotient  $q$  ändert sich von -2,6 auf -1,2. Mit zunehmender Schichtdicke sinkt der Betrag der Beanspruchungen, während der Mehrachsigsigkeitsquotient nur leicht variiert. Mit steigendem Schicht-Elastizitätsmodul steigt auch der Mehrachsigsigkeitsquotient leicht, hat mit Änderungen von insgesamt unter 20 % jedoch nur einen geringen Einfluss und wird aus Gründen der Übersichtlichkeit im Diagramm nicht dargestellt. Weiter zeigt Bild 75 rechts den signifikanten Einfluss der Indentergeometrie für diese Auswerteposition. Während die Kugelindenter mit

Mehrsigkeitsquotienten von  $q = -2,6$  ( $\varnothing 2,778$  mm) und  $q = -2,1$  ( $\varnothing 3,969$  mm) im negativen Bereich des HENCKY-Diagramms liegen, befindet sich der Rockwell-C-Indenter mit  $q = 4,8$  qualitativ an einer völlig anderen Stelle. Auch quantitativ wird die Auswerteposition 2 durch den HRC-Indenter wesentlich höher beansprucht, während der Betrag zwischen den beiden Kugelindentern nur um 11 % variiert. Zusammenfassend ist festzustellen, dass zur Auswertung von Schädigungsmechanismen, welche an Auswerteposition 2 entstehen, die Analyse von Ritztests mit unterschiedlichen Indenterformen sehr vielversprechend und ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn hierdurch sehr wahrscheinlich ist.

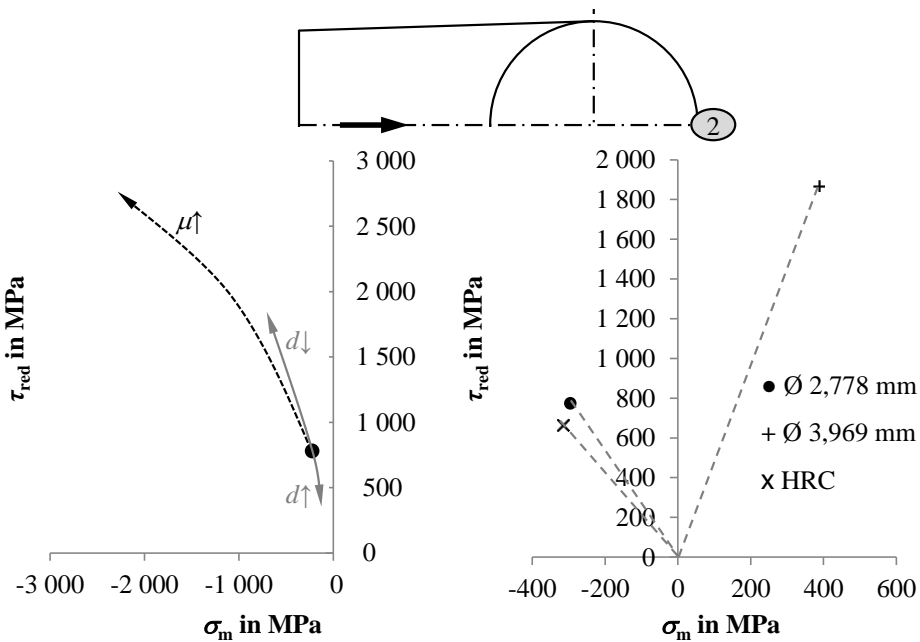


Bild 75: Auswerteposition 2: Einflüsse der Systemparameter mit  $\varnothing 2,778$ mm-Kugelindenter (links) und Beanspruchungen bei unterschiedlichen Indentern (rechts)

Hinsichtlich der qualitativen Einflüsse der variierenden Parameter ähnelt Auswerteposition 3 in Bild 76 links sehr der Auswerteposition 1 in Bild 74. An Auswerteposition 3 (Stelle der höchsten ersten Hauptspannung, seitlich in der Kontaktzone) fällt jedoch der Mehrsigkeitsquotient mit steigender Schichtdicke leicht ab. Quantitativ haben die veränderten Parameter einen etwas höheren Einfluss als an Auswerteposition 1.

Bei Betrachtung der unterschiedlichen Indenter in Bild 76 rechts ist zu erkennen, dass der Rockwell-Indenter im Vergleich zur Auswerteposition 1 nahezu unverändert bei  $q = 0,91$  verharrt, jedoch mit einem um 18 %

höheren Betrag. Bei den beiden Kugelindentern steigt der Mehrachsigsigkeitsquotient auf  $q = 1,2$ , während der Betrag für Versuche mit dem  $\varnothing 2,778$  mm-Kugelindenter im Vergleich zur Auswerteposition 1 um 20 % ansteigt, liegt der entsprechende Unterschied für Versuche mit  $\varnothing 3,969$  mm-Kugelindenter bei fast 80 %, was sich auch im dichteren Abstand der Beanspruchungspunkte der beiden Kugelindenter im HENCKY-Diagramm zeigt.

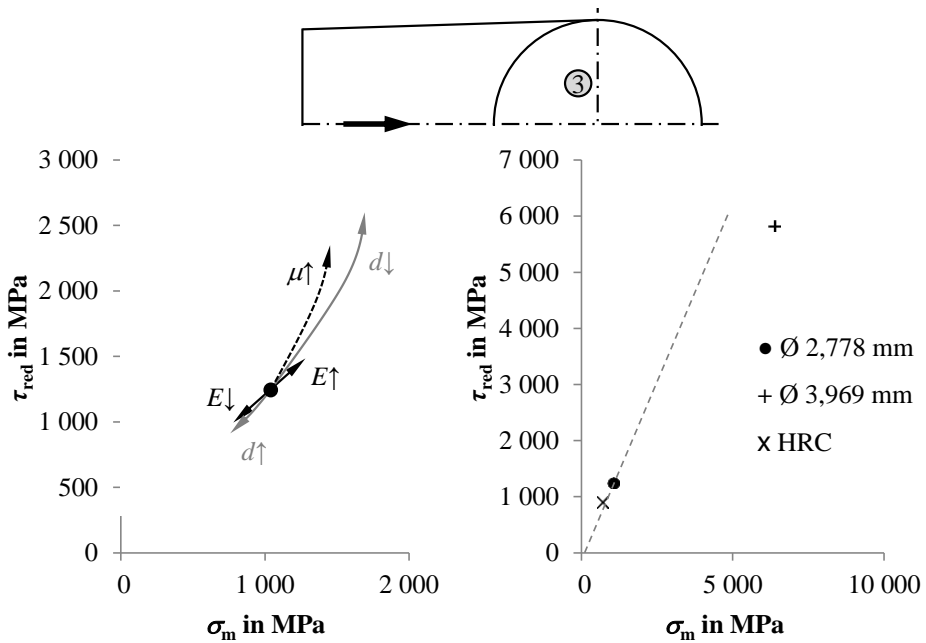


Bild 76: Auswerteposition 3: Einflüsse der Systemparameter mit  $\varnothing 2,778$  mm-Kugelindenter (links) und Beanspruchungen bei unterschiedlichen Indentern (rechts)

Auch an der Auswerteposition 4, seitlich und neben der Kontaktzone, sind die Einflüsse der Systemparameter deutlich, wie Bild 77 links zeigt. Mit Erhöhung der Reibungszahl erhöht sich der Mehrachsigsigkeitsquotient von 2,6 auf 4,0 mit einer Steigerung des Betrages um 47 %. Eine Veränderung des Schicht-Elastizitätsmoduls verschiebt den Beanspruchungspunkt im HENCKY-Diagramm nahezu linear, jedoch nicht entlang der Ursprungsgeraden. Den größten Einfluss auf die Beanspruchung zeigt in diesem Diagramm die Schichtdicke, welche mit abnehmender Dicke den Betrag mehr als verdoppelt (bei nur leichter Zunahme des Mehrachsigsigkeitsquotienten).

Einen Vergleich der unterschiedlichen Indenter zeigt Bild 77 rechts. Ähnlich zu Auswerteposition 3 liegen auch hier die beiden Kugelindenter sehr nahe zusammen, jedoch bei einem deutlich höheren Mehrachsigsigkeits-

quotienten von gemittelt  $q = 2,6$ . Der HRC-Indenter liegt mit  $q = 2,1$  zwar darunter, jedoch ebenfalls deutlich höher, als an der Auswerteposition 3.

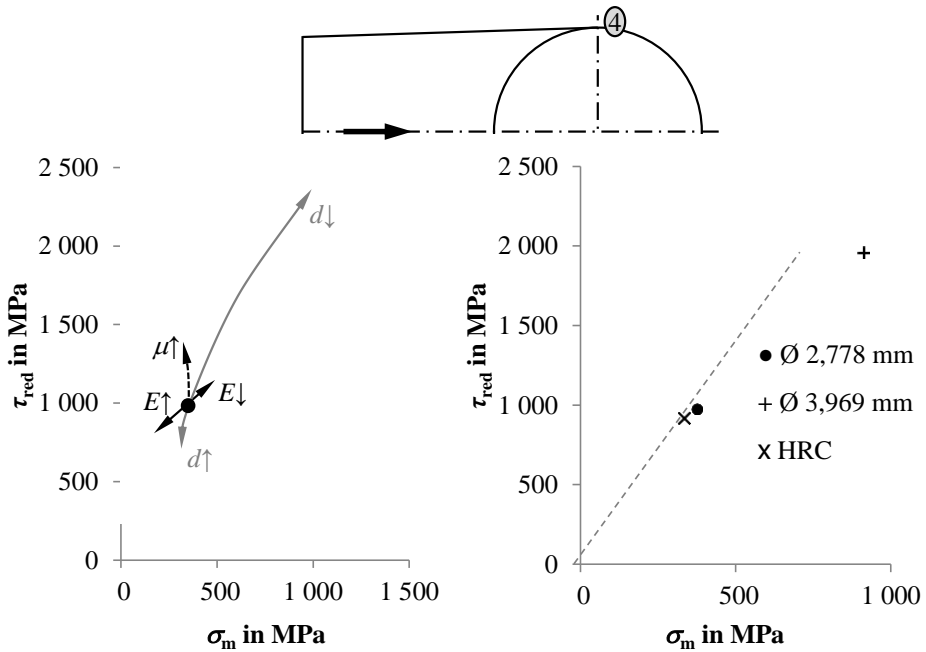


Bild 77: Auswerteposition 4: Einflüsse der Systemparameter mit  $\varnothing 2,778$ mm-Kugelindenter (links) und Beanspruchungen bei unterschiedlichen Indentern (rechts)

## 9 Leichtbaupotential für Kunststoffbauteile durch angepasste Schichten

Die Möglichkeiten durch Dünnschichten die Steifigkeit von Bauteilen merklich zu erhöhen sowie die Eigenfrequenzen anzupassen und hierdurch einen Beitrag zum konsequenten Leichtbau zu leisten, sind bislang noch unbeachtet. Ist eine funktionale Schicht bereits in einem Bauteil integriert und werden die erforderlichen Prozessschritte (wie Reinigung, Chargierung, Konditionierung und anschließende Beschichtung) ohnehin schon getätigt, so sind die Mehrkosten für eine entsprechend angepasste Schicht verhältnismäßig gering. Dieses Kapitel zeigt, in welchem Umfang harte Schichten positiven Einfluss auf die Bauteilsteifigkeit nehmen können und belegt, dass dieser Einfluss analytisch und auch simulativ quantifiziert werden kann. Gleichzeitig wird aufgezeigt, welche Einschränkungen und Herausforderungen bei der Produktentwicklung zu beachten sind. Die gezeigten Ergebnisse wurden bereits auszugsweise in [158] und [159] veröffentlicht und wissenschaftlich diskutiert.

### 9.1 Verringerung von Durchbiegungen

Der bauteilversteifende Effekt resultiert zum einen aus den wesentlich höheren Elastizitätsmoduln der Schichtwerkstoffe im Vergleich zu denen der Kunststoffsubstrate. Zum anderen befinden sich Schichten (an der Oberfläche und damit in gewissem Abstand zur neutralen Faser des Bauteils) an einer für die Bauteilsteifigkeit sehr sensitiven Lage.

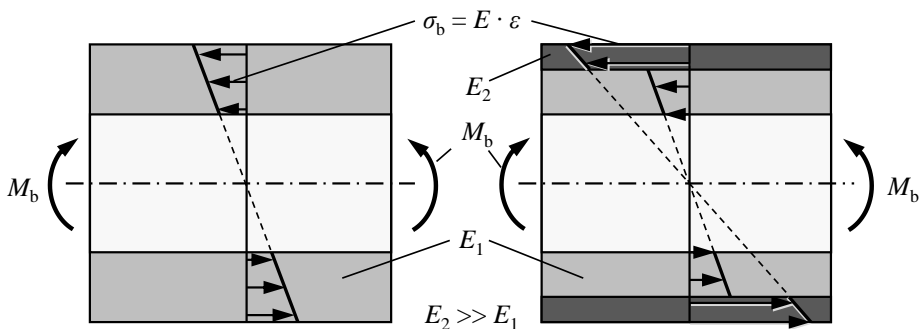


Bild 78: Schematischer Spannungsverlauf in Hohlprofilen unter Biegebeanspruchung bei gleicher Dehnung, unbeschichtet (links) und beschichtet (rechts) [169]

Neben dem versteifenden Effekt kommt es zusätzlich zur Ausbildung von sehr unterschiedlichen Spannungen innerhalb des Verbundes, wie Bild 78 schematisch mit stark überhöht dargestellter Schichtdicke zeigt. Während bei unbeschichteten Hohlprofilen (links) die Biegespannung von der neutralen Faser bis zur Außenkante linear ansteigt, ist der Spannungssprung an der Grenzfläche des beschichteten Hohlkörpers (rechts) für kleine Dehnungen (idealisiert durch das HOOKEsche Gesetz  $\sigma = E \cdot \epsilon$ ) ersichtlich. So folgt bei gleicher Dehnung  $\epsilon$  aber unterschiedlichen Elastizitätsmoduln  $E$  auch die Spannung dem sprunghaften Wechsel der Materialparameter. Analog zur Biegebelastung wurde dieser Spannungssprung auch in den Simulationen, sowohl für die Ermittlung der elastischen Eigenschaften mittels Indentation in Kapitel 6 und 7, als auch bei den Ritztests in Kapitel 8 deutlich sichtbar.

Der Einfluss dünner harter Schichten auf die Durchsenkung von Kunststoff-Hohlprofilen, wurde bereits in Abschnitt 7.2 (sowohl für TiN- als auch für CrN-Schichten) belegt. Hierbei wird unter anderem die Durchsenkung des ASA-Hohlprofils durch die Aufbringung einer TiN-Schicht der Dicke  $1,74 \mu\text{m}$  um  $14 \%$  reduziert. Die Masse des Probekörpers nimmt durch die Beschichtung jedoch lediglich um  $0,13 \%$  zu.

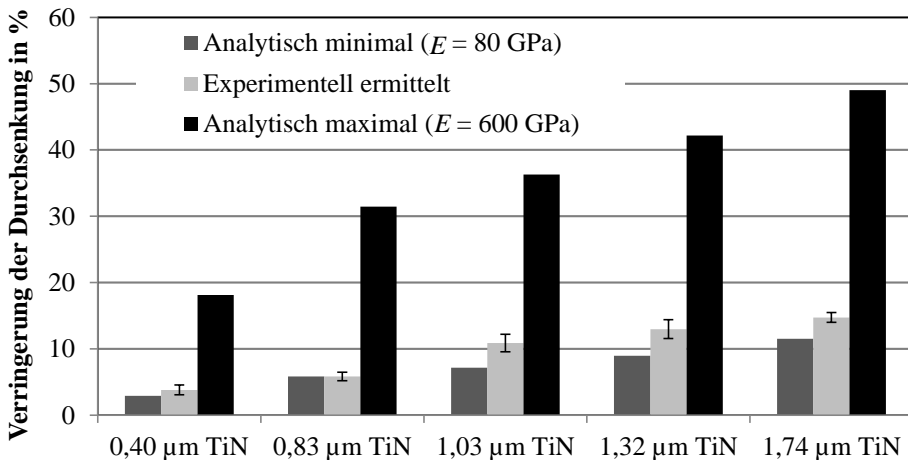


Bild 79: Prozentuale Verringerung der Durchbiegung bei unterschiedlichen Schichtdicken: Experimentelle Ergebnisse im Vergleich zu analytischen Berechnungen bei Minimal- und Maximalwerten des Schicht-Elastizitätsmoduls.

Der im Biegeprüfstand ermittelte und berechnete mittlere Schicht-Elastizitätsmodul von  $117 \text{ GPa}$  ist dabei für TiN-Schichten noch nicht besonders hoch. Da die Spanne der Literaturwerte von  $80 \text{ GPa}$  [160] und  $600 \text{ GPa}$  [161] noch nicht ausgeschöpft wird, kann der Effekt noch verstärkt werden. Bild

79 zeigt neben der gemessenen prozentualen Reduktion der Durchbiegung für die unterschiedlichen Schichtdicken auch die errechneten Werte bei angenommenen Minimal- und Maximalwerten der Elastizitätsmoduln und somit das Reduktionspotential.

Wird angenommen, dass auf dem vorliegenden Substrat eine TiN-Schicht mit  $d = 5 \mu\text{m}$  Schichtdicke und  $E_C = 400 \text{ GPa}$  Schicht-Elastizitätsmodul [162] appliziert wird, so verringert sich rechnerisch die Durchbiegung um 35 %. Würde nun die Wandstärke des Kunststoffhohlkörpers soweit reduziert bis die Durchbiegung wieder dem Wert des unbeschichteten Probekörpers entspricht, so läge die Gewichtsersparnis bei 16 %. Insofern ist die Einbeziehung der Schicht auf die Gesamtsteifigkeit des Bauteiles in vielen Anwendungsfällen ein zielführender Ansatz.

## 9.2 Gezielte Anpassung der Eigenfrequenzen

Neben einer Reduzierung der Durchbiegung können durch die Schichtwahl auch die Eigenfrequenzen von Bauteilen beeinflusst beziehungsweise angepasst werden. So wurden die Eigenfrequenzen des in Abschnitt 7.1.1 beschriebenen quadratischen Hohlprofils mit einer schwingenden Länge von 100 mm mittels FEM simuliert. Bild 80 zeigt als Ergebnis die ersten fünf Eigenfrequenzen im einseitig fest eingespannten Zustand mit  $5 \mu\text{m}$  dicken Schichten unterschiedlicher Materialien.

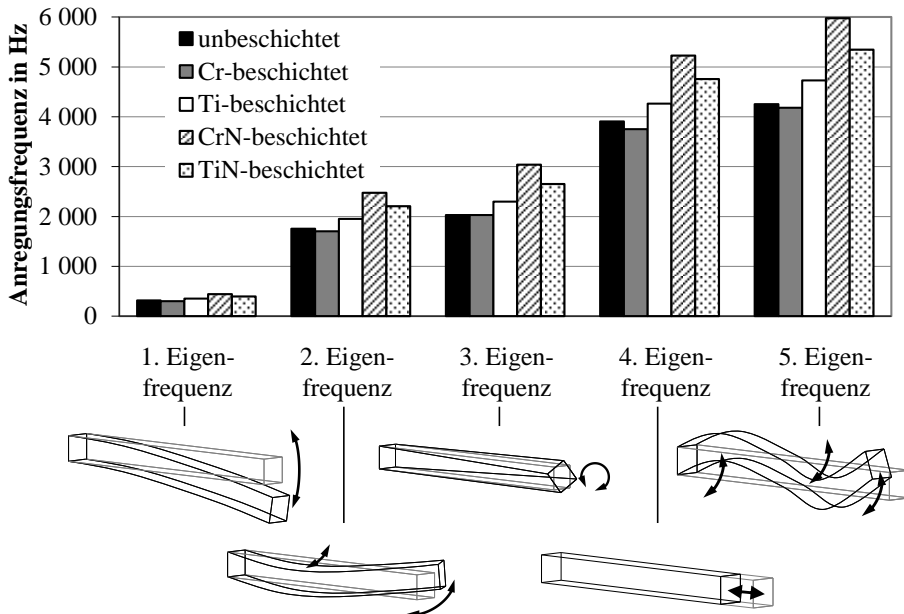


Bild 80: Eigenfrequenzen mit den zugehörigen Schwingungsformen

Der Einfluss der Schichten auf die Höhe der Eigenfrequenzen ist klar ersichtlich. Die Schichten können die Eigenfrequenz der unbeschichteten Probe jedoch nicht nur erhöhen. Wenn die spezifische Steifigkeit (Quotient aus Elastizitätsmodul und Dichte) der Schicht unter der des Substratmaterials liegt (wie beispielsweise bei der reinen Chromschicht), können die Eigenfrequenzen sogar reduziert werden. Durch die Wahl eines geeigneten Schichtmaterials mit günstigen mechanischen Eigenschaften und der sehr präzise wählbaren Schichtdicke kann auch die Eigenfrequenz in gewissen Bereichen eingestellt werden.

### 9.3 Wirtschaftlichkeit

Die Aufwände zur Integration einer Schicht in den Fertigungsprozess eines Bauteils sind wirtschaftlich meist bedeutend. Die dargestellten Auswirkungen auf die Gesamtsteifigkeit von Kunststoffbauteilen werden deshalb eher selten der einzige Grund für die Integration eines Beschichtungsprozesses in die Fertigungskette sein. Sie können jedoch ihr großes Potential ausspielen, wenn ohnehin eine Schicht als zusätzlicher Funktionsträger vorteilhaft oder gar schon im Einsatz ist und die Schicht beziehungsweise das Schichtsystem nur noch angepasst werden muss. Somit entfallen in der Wirtschaftlichkeitsrechnung der zusätzliche Fertigungsschritt inklusive weiterer Aufwände hinsichtlich Transport, Handhabung, Reinigung sowie Chargierung. Der Kostenmehraufwand reduziert sich auf kleinere Faktoren, wie beispielsweise eine etwas längere Beschichtungszeit und die Materialkosten der Targets. Als typische Funktionen von Dünnschichten auf Kunststoffbauteilen sind zu nennen:

- Aufwertung der dekorativen Eigenschaften
- Speicherung von Daten in der Schicht
- Aufwertung der haptischen Eigenschaften
- Erfüllung von optischen Funktionen
- Erhöhung der Biokompatibilität
- Verminderung oder gezielte Beeinflussung der Diffusion von Gasen und Dämpfen
- Abschirmung gegen elektromagnetische Strahlung
- Erhöhung der Oberflächenhärte
- Verminderung von Reibung und Verschleiß

- Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit der Bauteiloberfläche

Als Anwendungsbeispiel zur Kombination mehrerer Funktionen in einem Schichtsystem wird im nächsten Kapitel das Potential für Wälzlagerkäfige erläutert.



## 10 Potential beschichteter Kunststoffe für Wälzlagerkäfige

Ein Anwendungsbeispiel für Kunststoffe mit harten Dünnschichten stellen Wälzlagerkäfige von schnelldrehenden Spindellagern dar (Bild 81). Hierbei ist die Reduktion von Reibung und Verschleiß die Hauptfunktion der Schicht. Durch Verringerung der Reibung kann die kritische Drehzahl des Lagers erhöht werden, da unerwünschte Taumelbewegungen und Instabilitäten des Käfigs (Bild 81, rechts) signifikant von der Reibung abhängen [163]. Der Verschleiß am Käfig beeinflusst das Käfigtaschenspiel beziehungsweise das Bordführungsspiel und somit auch den hydrodynamischen Druckaufbau des Schmierstoffs in den Spalten und kann durch die tribologische Schicht erheblich reduziert werden [164]. Durch Auslegung des Schichtsystems als Barrierschicht kann zusätzlich die Beständigkeit des Kunststoffes gegen aggressive Bestandteile im Schmierstoff erhöht werden.



Bild 81: Kunststoffkäfige von schnelldrehenden Spindellagern (links) mit typischer Verformung bei hohen Drehzahlen in überzeichneter Darstellung (rechts)

Da insbesondere bei schnelldrehenden Lagern sowohl Steifigkeit als auch Käfigmasse die kritische Drehzahl maßgeblich beeinflussen, ist hierbei die Kombination aus harter Zwischenschicht zur Erhöhung der Steifigkeit in Verbindung mit einer tribologisch geeigneten Decklage, beispielsweise aus amorphem Kohlenstoff (DLC) oder Molybdändisulfid, mit dem leichten Kunststoffsubstrat eine vielversprechende Anwendung. Die gewünschte

Versteifung der Gesamtstruktur erfolgt hier bei moderaten Verformungen des Bauteils und somit auch begrenzten Spannungen in der Schicht und an der Grenzfläche zwischen Substrat und Schicht.

Massivkäfige aus Kunststoff werden bereits häufig bei schnelldrehenden Wälzlagern eingesetzt, um möglichst geringe Massenkräfte zu erzielen. Geometrische Gestaltungsfreiheiten aufgrund der Fertigung mittels Spritzgussverfahren erlauben zudem die Realisierung optimierter, tragfähiger Käfigformen. Der Werkstoff Polyamid PA 66 wird bereits in zahlreichen Großserienlagern eingesetzt, häufig auch glasfaserverstärkt für höhere Festigkeit, Steifigkeit und Betriebstemperaturen. Um die tribologischen Eigenschaften von PA 66 zu verbessern, können dem Granulat Partikel der Festschmierstoffe MoS<sub>2</sub> oder Graphit beigemischt werden, welche allerdings die mechanischen Eigenschaften verschlechtern, da sie meist Ausgangspunkt von Rissen und Brüchen sind. Neben diesen Composite-Werkstoffen kann die Reibung zwischen Käfig und Wälzkörper auch durch den Einsatz von PTFE als Käfigwerkstoff reduziert werden, welcher im Vergleich zu PA 66 jedoch eine höhere Dichte, eine geringere Festigkeit und einen geringeren Elastizitätsmodul aufweist.

Ein geeigneter Käfigwerkstoff muss daher eine Vielzahl an Eigenschaften in einem ausgewogenen Verhältnis miteinander vereinen. Durch die PVD-Dünnschichttechnik werden die geometrischen Abweichungen außerdem nicht unkontrolliert beeinflusst. Der Schichtwerkstoff kann durch genaue Einstellung der Beschichtungsprozessparameter und -werkstoffe im Sinne der „Tailored Coatings“ [4] gezielt auf die Anwendung angepasst werden.

Die in diesem Kapitel gezeigten Ergebnisse wurden auszugsweise veröffentlicht in [5, 145, 146] und wissenschaftlich diskutiert.

## 10.1 Tribologische Systemanalyse

### 10.1.1 Reibungskontakte an Wälzlagerkäfigen

Eine Analyse der tribologischen Kontakte von Wälzlagerkäfigen ist notwendig, um die Prüfparameter der Modellversuche möglichst nahe den späteren Anwendungsfällen zu definieren. Die relevanten Kontaktbereiche nach BIRKHOFER et al. [165] sind in Tabelle 16 aufgeführt und zudem in Bild 82 veranschaulicht. Im Rahmen der Modellbildung ist zu beachten, dass sich das Eingriffsverhältnis der Kugel im Tribometerversuch (Kugel-Scheibe-Versuch) teilweise stark vom Anwendungsfall unterscheidet, da sich im Betrieb des Wälzlagers der komplette Umfang der Kugel im Eingriff befindet.

Tabelle 16: Tribologisch relevante Kontakte mit Funktionen eines Rillenkugellagerkäfigs [165]

Kontakt #	Kontaktpartner	Reibungsart	Käfigführung
(1)	Käfigtaschen- vorderkante	Kugel	Gleitreibung radial (bei Wälz- körperführung)
(2)	Käfigtaschen- hinterkante	Kugel	Gleitreibung radial (bei Wälz- körperführung)
(3)	Käfigtaschen- seitenkante	Kugel	Bohrreibung axial
(4)	Käfig	Außen- ring	Gleitreibung radial (bei Außen- bordführung)
(5)	Käfig	Innen- ring	Gleitreibung radial (bei Innen- bordführung)

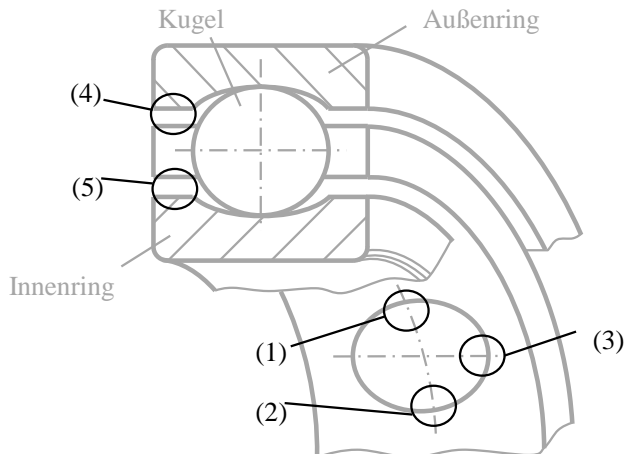


Bild 82: Tribologisch relevante Kontaktstellen eines Rillenkugellagerkäfigs mit Nummerierung aus Tabelle 16

### 10.1.2 Werkstoffe

Meist sind Wälzlagerkäfige in Metall- oder Kunststoffausführung erhältlich. In kleineren Lagern mit Metallkäfigen kommen überwiegend Stahl- oder Messingblech zum Einsatz, während in größeren Lagern die Massivkäfige durch Kaltumformung oder auch spanend hergestellt werden. [166]

Tabelle 17 zeigt die Auswahl der untersuchten Werkstoffe ohne Schicht und soll einen Überblick der gängigen Käfigwerkstoffe ermöglichen. Die teilweise gemittelten Zahlenwerte sind den Datenblättern der jeweiligen Hersteller entnommen. Als Stahlwerkstoff wurde zu Vergleichszwecken ein

üblicher Pressstahl (C8C) herangezogen. Insbesondere die Festigkeitswerte könnten durch die Wahl einer höherwertigen Stahlsorte noch verbessert werden.

Tabelle 17: Untersuchte Werkstoffe ohne Schichtsysteme

Werkstoff	Abkürzung	Dichte $\rho$ in kg/dm <sup>3</sup>	Elastizitätsmodul $E$ in GPa	Zugfestigkeit $R_m$ in MPa
C8C	Stahl	7,9	210,0	400
X6CrNiTi8-10	VA	7,9	200,0	500
CuZn <sub>39</sub> Pb <sub>3</sub>	Messing	8,5	97,0	400
Phenol-Hartgewebe	Hartgewebe	1,3	6,0	60
Polytetrafluorethylen	PTFE	2,2	0,4	25
Polyamid 66 GF 25	PA66GF25	1,3	8,8	180

Tabelle 18: Untersuchte Schichten/Schichtsysteme auf PA66GF25-Substraten

Schicht(system)	Abkürzung	Herstellung
MoS <sub>2</sub> -Gleitlack	MoS <sub>2</sub> -GL	Aufgesprüht, luftgetrocknet
MoS <sub>2</sub> -gesputtert	MoS <sub>2</sub> -sp	Einlagig MoS <sub>2</sub> gesputtert
MoS <sub>2</sub> :Ti/Ti	MoS <sub>2</sub> :Ti	Zwischenschicht: Ti gesputtert Decklage: Titan + MoS <sub>2</sub> gesputtert
MoS <sub>2</sub> :Cr/Cr	MoS <sub>2</sub> :Cr	Zwischenschicht: Cr gesputtert Decklage: Cr + MoS <sub>2</sub> gesputtert
MoS <sub>2</sub> :WC	MoS <sub>2</sub> :WC	Einlagig WC + MoS <sub>2</sub> gesputtert
a-C/Ti	a-C	Zwischenschicht: Ti gesputtert Decklage: Graphit gesputtert
TiCN/Ti	TiCN	Zwischenschicht: Ti gesputtert Decklage: Ti-Graphit gesputtert + Reaktivgas: N <sub>2</sub>

Um das Potential des beschichteten PA66GF25 zu untersuchen, wurden sieben Schichten/Schichtsysteme ausgewählt und abgeschieden (Tabelle 18). Der Fokus liegt hierbei sowohl auf dem Festschmierstoff MoS<sub>2</sub> (welcher durch die Gitterstruktur aber auch durch Dotierungen modifiziert werden kann [167]) als auch auf wasserstoffarmen amorphen Kohlenstoffschichten und Hartstoffschichten, welche ebenfalls für Anwendungen unter ionisierter Strahlung geeignet sind [140].

### 10.1.3 Schmierstoff

Für die tribologischen Versuche wird als Schmierstoff das Mineralöl FVA 1 (nicht additiviert) der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. verwendet. Dieses Referenzöl basiert auf einem solventraffinierten Mineralöl und besitzt nach DIN 51757 bei 15 °C eine Dichte von 848-852 kg/m<sup>3</sup> [168]. Das dünnflüssige Öl mit der Viskositätsklasse ISO VG 15 wurde gewählt, um während der Versuche bei Raumtemperatur eine Viskosität zu gewährleisten, welche mit den Anwendungsfällen im Wälzlager bei Betriebstemperatur vergleichbar ist. [171]

### 10.1.4 Pressungen bei unterschiedlichen Prüfmodi

Wie in Abschnitt 5.6 beschrieben, werden die Tribometerversuche in zwei Prüfmodi durchgeführt. Die Prüfmodi und die einstellenden Pressungen nach HERTZ sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 19: Prüfbedingungen der Tribometerversuche

Prüfmodus	Kugel- $\phi$ in mm	Normalkraft in N	Pressung nach HERTZ in MPa für Werkstoff					
			Stahl	VA	Messing	Hartgewebe	PTFE	PA66GF25
1	4	10	1 845	1 845	1 370	271	45	357
2	10	5	794	794	590	117	20	149

## 10.2 Ergebnisse und Diskussion

Alle beschichteten Oberflächen werden nach der Schichtabscheidung nicht weiter bearbeitet (zum Beispiel poliert), sodass in der Regel die Rauheit durch den Beschichtungsprozess leicht ansteigt. Eine Ausnahme bildet hierbei der aufgesprühte Gleitlack, welcher den Mittenrauwert um 1,35  $\mu\text{m}$

(also um mehr als den Faktor 10) erhöht. Die Ergebnisse der Rauheits- und Schichtdickenmessungen sind in Tabelle 20 zusammengefasst. Alle Tribometerversuche befinden sich in Kombination der Prüfbedingungen und dem Mittenrauwert der verwendeten Kugeln von  $0,014 \mu\text{m}$  überschlägig im Bereich der Grenzreibung. Lediglich die Messingproben kommen bei Prüfmodus 2 durch die glatten Oberflächen in den Übergangsbereich zwischen Grenz- und Mischreibung.

Tabelle 20: Rauheit und Schichtdicke der Proben

Probe	Mittenrauwert $R_a$ in $\mu\text{m}$		Schichtdicke in $\mu\text{m}$	
	Mittelwert	$\sigma$	Mittelwert	$\sigma$
Stahl	0,027	0,012		
VA	0,037	0,029		
Messing	0,022	0,003		
Hartgewebe	0,275	0,007		
PTFE	0,117	0,029		
PA66GF25	0,133	0,006		
MoS <sub>2</sub> -GL	1,483	0,038	6,010	1,401
MoS <sub>2</sub> -sp	0,167	0,038	1,334	0,259
MoS <sub>2</sub> :Ti	0,295	0,035	1,831	0,315
MoS <sub>2</sub> :Cr	0,220	0,028	2,351	0,025
MoS <sub>2</sub> :WC	0,300	0,014	0,918	0,088
a-C	0,125	0,007	2,826 *) 0,807	0,104 0,009
TiCN	0,193	0,006	3,764 *) 0,915	0,087 0,125

\*) davon Zwischenschicht

Die Schichtdicken liegen in (für PVD-/PACVD-Prozesse) üblichen Bereichen zwischen 1 bis  $4 \mu\text{m}$ . Ausnahme bildet auch hier der Gleitlack, welcher die höchste Schichtdicke ( $6 \mu\text{m}$ ) aufweist. Die Zwischenschichtdicken der Proben MoS<sub>2</sub>:Ti und MoS<sub>2</sub>:Cr liegen im Bereich von wenigen 10 nm und sind nicht weiter quantitativ erfasst.

Die gemessenen Reibungszahlen beider Prüfmodi für alle Proben zeigt Bild 83. Die Reibungszahlen der konventionellen Käfigwerkstoffe Stahl, Edelstahl, Messing und Hartgewebe sind im Mittel um den Faktor 2 größer als die der restlichen Proben. Bei diesen Proben zeigt sich auch der hohe Einfluss der Pressungen der unterschiedlichen Prüfmodi. Neben dem PTFE zeigt auch das glasfaserverstärkte Polyamid gute Reibungszahlen im Kontakt mit Stahlkugeln, welche im Prüfmodus 2 durch die gesputterten MoS<sub>2</sub>-sp-, die MoS<sub>2</sub>:Cr- und die a-C-Schichten noch weiter gesenkt werden können. Der MoS<sub>2</sub>-Gleitlack, die MoS<sub>2</sub>:Ti-, die MoS<sub>2</sub>:WC- sowie die TiCN-Schichten haben keinen signifikant verbessernden oder einen nachteiligen Effekt auf die Reibungszahlen von PA66GF25 im Kontakt mit Stahlkugeln.

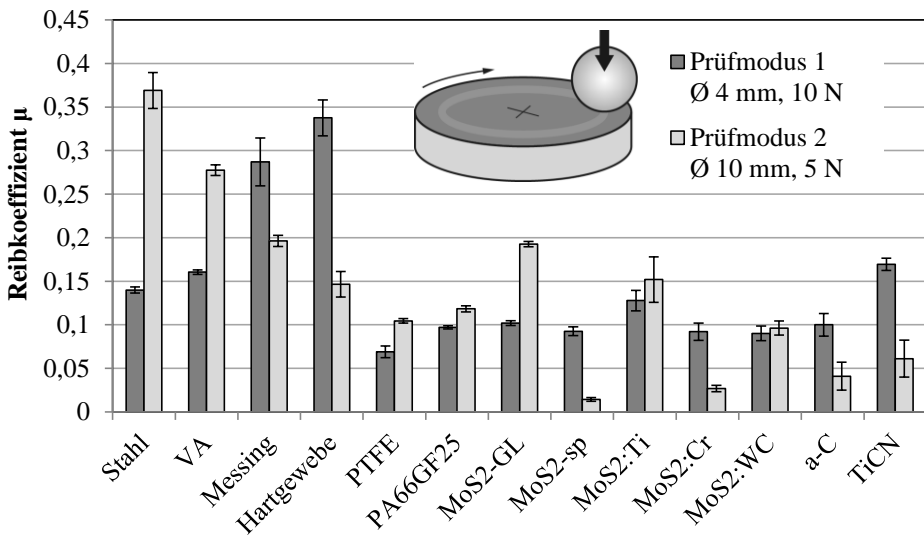


Bild 83: Reibungszahlen im Überblick

Die Verschleißkoeffizienten der Grundkörper sind in Bild 84 dargestellt, wobei die unterschiedlichen Skalen der Ordinaten zu berücksichtigen sind. Für eine bessere Vergleichbarkeit ist der Verschleißwert von PA66GF25 in beiden Diagrammen angetragen.

Während der Verschleiß bei den Stahl- und Edelstahlproben weitestgehend unabhängig von der Pressung und quantitativ auf mittlerem Niveau ist, steigt der Verschleiß bei Messing, Hartgewebe und PTFE bei höheren Pressungen im Prüfmodus 1 extrem an. Das glasfaserverstärkte Polyamid zeigt einen vergleichsweise niedrigen Verschleißkoeffizienten, welcher durch MoS<sub>2</sub>:Cr- und a-C-Schichten deutlich gesenkt wird. Das gesputterte MoS<sub>2</sub> sowie die TiCN-Schicht bewirken einen leichten, hingegen die

MoS<sub>2</sub>:Ti- und MoS<sub>2</sub>:WC-Schicht mitunter einen deutlichen Anstieg des Verschleißkoeffizienten im Vergleich zum PA66GF25.

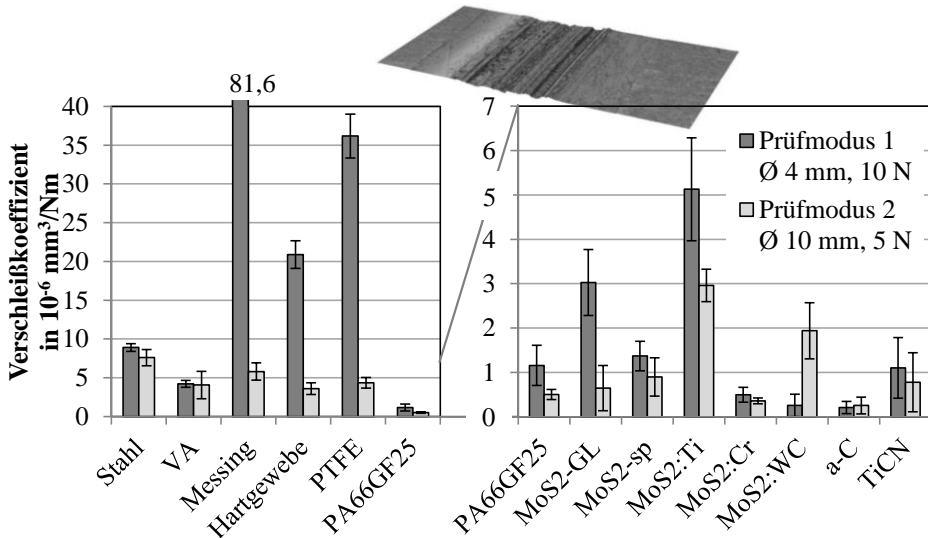


Bild 84: Verschleißkoeffizienten der Grundkörper

Da bei geringen Verschleißbeträgen und großen Kugeldurchmessern die Bestimmung des Verschleißes durch die Kugelsegmente zu Messfehlern führt, welche signifikanten Einfluss auf die Messwerte haben, werden in Bild 85 ausschließlich die Verschleißkoeffizienten der Gegenkörper für Prüfmodus 1 gezeigt.

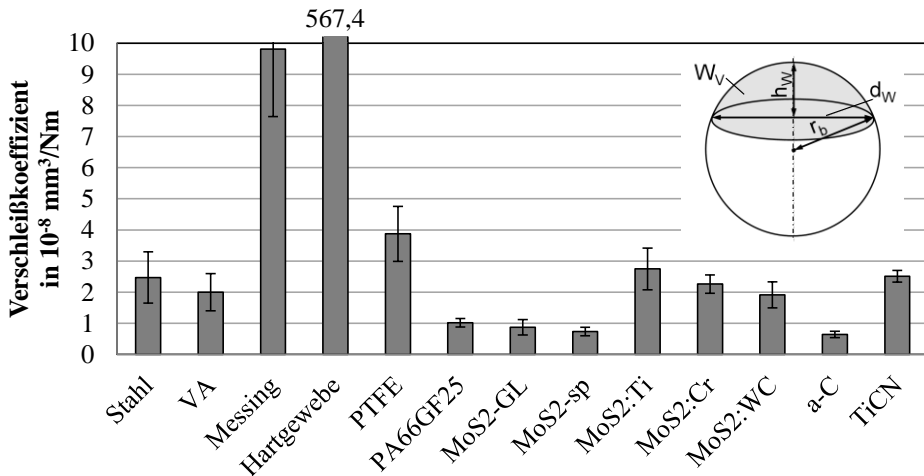


Bild 85: Verschleißkoeffizienten der Kugel-Gegenkörper bei Prüfmodus 1 (Ø 4 mm, 10 N)

Generell ist der Verschleißkoeffizient um zwei Größenordnungen geringer als der Scheibenverschleiß, was im Allgemeinen für eine gute Schonung des Kugel-Gegenkörpers spricht. Einen sehr hohen Kugelverschleiß zeigen die Messing- und im Besonderen die Hartgewebeprobe. Eine besonders gute Schonung der Kugeln ist bei PA66GF25, dem MoS<sub>2</sub>-Gleitlack, der gesputterten MoS<sub>2</sub>-sp- und der a-C-Schicht festzustellen.

Zur Analyse des Verhaltens der Schicht-Substrat-Verbunde unter Last – insbesondere der Schichthaftung – werden im Folgenden repräsentative Auszüge der Auswertung der modifizierten Ritztests gezeigt. Bei allen Ritzspuren kommt es zu plastischer Verformung des Polymersubstrates. Von großem Interesse ist hierbei, wie sich bei elastischer und plastischer Verformung des Substrates die Schicht verhält.

Der aufgesprühte MoS<sub>2</sub>-Gleitlack weist in Bild 86, links eine sehr gute Haftung zum Substrat auf, ohne die Bildung von Rissen oder Abplatzungen bei allen drei Indentern. Lediglich leichte Aufwürfe aufgrund von (dem Indenter vorgelagerten) Druckspannungen sind zu erkennen, welche insbesondere bei Glasfasern zum Falten neigen.

Die gesputterte, nicht dotierte MoS<sub>2</sub>-sp-Schicht zeigt ebenfalls eine gute Adhäsion zum Substrat ohne Abplatzungen. Wie Bild 86 rechts zeigt, bilden sich kohäsive Risse, welche jedoch nicht zu Abplatzungen führen. Das Rissnetzwerk beschränkt sich überwiegend auf die Ritzspur und setzt sich nur sehr vereinzelt im Randbereich fort.

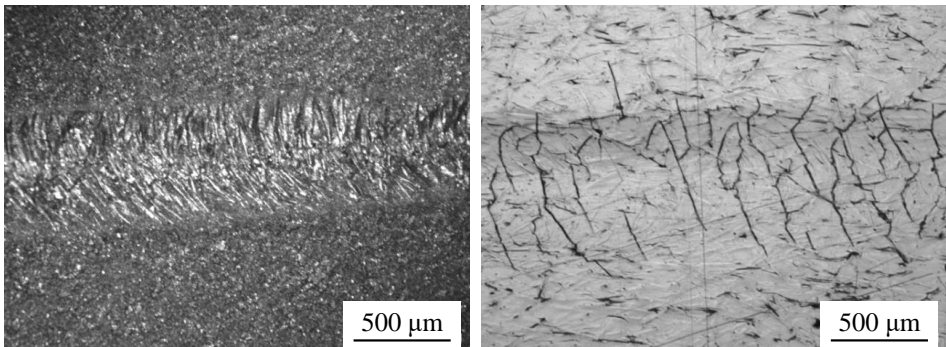


Bild 86: Repräsentative Schädigungsbilder des Ritztests: MoS<sub>2</sub>-GL mit Rockwell-Diamant bei 40-60 N (links), MoS<sub>2</sub>-sp mit Kugelindenter Ø 2,7 mm bei 60-80 N (rechts).

In Bild 87 (links) zeigt die MoS<sub>2</sub>:Ti-Schicht trotz der Ti-Zwischenschicht nur eine sehr geringe Adhäsion zum Substrat und weist bereits bei geringen Belastungen großflächige, über die Ritzspur hinausreichende Grenzflächenabplatzungen auf. Diese werden überlagert von zahlreichen Druckrisen und Aufwürfen.

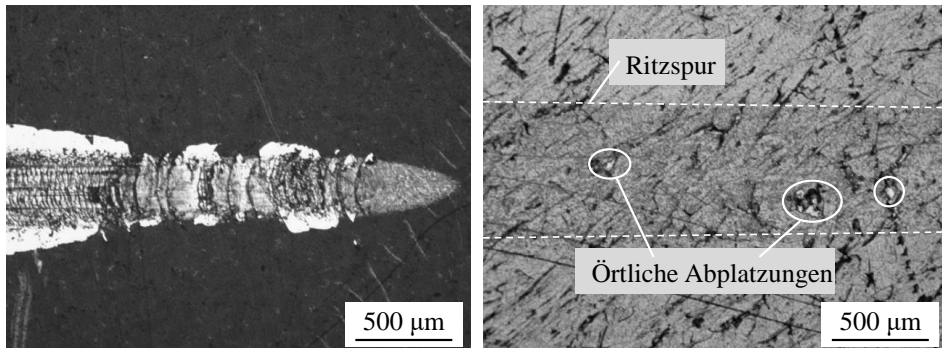


Bild 87: Repräsentative Schädigungsbilder des Ritztests: MoS<sub>2</sub>:Ti mit Kugelindenter Ø 2,7 mm zu Beginn der Lastrampe (links), MoS<sub>2</sub>:Cr mit Kugelindenter Ø 4,0 mm bei 60-80 N (rechts).

Die MoS<sub>2</sub>:Cr-Schicht, bildet nur sehr vereinzelt Risse und Aufwürfe, überwiegend in der Nähe von Glasfasern. Vereinzelt befinden sich dort auch kleine, örtliche Abplatzungen, wie Bild 87 (rechts) zeigt.

Die MoS<sub>2</sub>:WC-Schicht bildet unter Last ein sprödes Rissnetzwerk aus, welches sich auch verhältnismäßig weit im Randbereich fortsetzt. Adhäsive Abplatzungen lassen sich neben den kohäsiven Schädigungen jedoch nicht finden. Selten werden bei den Kugelindentern schuppenartige Schichtfragmente kohäsiv aus der Schicht gebrochen und durch die nachfolgende Ritzspur gefurcht, wie Bild 88 (links) zeigt. Die Schädigungen lassen trotz guter Adhäsion auf einen zu schnellen Übergang des Elastizitätsmoduls vom weichen Substrat zur harten, spröden Schicht schließen („Eierschaleneffekt“).

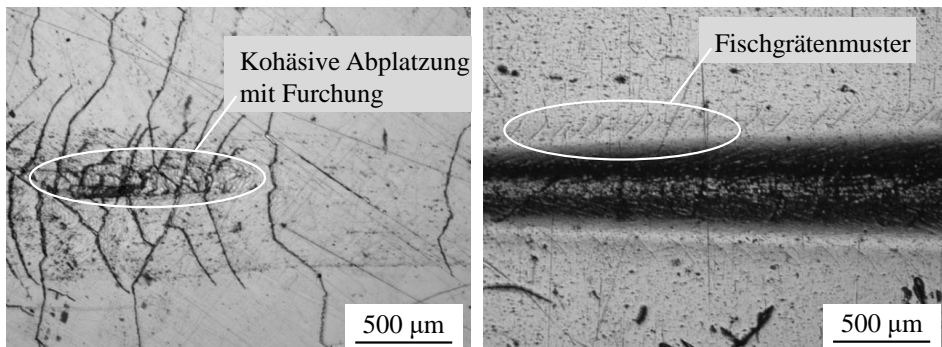


Bild 88: Repräsentative Schädigungsbilder des Ritztests: MoS<sub>2</sub>:WC mit Kugelindenter Ø 4,0 mm bei 30-50 N (links), a-C mit Rockwell-Diamant bei 30-50 N (rechts).

Die Ritzspur der a-C-Schicht zeigt in Bild 88 (rechts), wie auch in den übrigen Ritzspuren, ein sehr gutes Verhalten unter Last ohne adhäsive

Schädigungen. Vereinzelt ist eine Neigung zum „Fischgrätenmuster“ in Form von feinen Rissen an den Grenzen der Ritzspur festzustellen.

Die TiCN-Schicht verhält sich ähnlich zur MoS<sub>2</sub>:WC-Schicht und bildet ein sprödes Rissnetzwerk. In diesem Fall sind die Risse jedoch unabhängig von Last und Indenterform, was auf sehr hohe Eigenspannungen innerhalb der Schicht schließen lässt. Die Adhäsion zwischen Schicht und Substrat ist jedoch gut, da trotz der Risse keine Ausbrüche oder Abplatzungen festzustellen sind.

### 10.3 Bewertung

Tabelle 21: Bewertung und Zusammenfassung der Ergebnisse

Probe	Reibung	Verschleiß Scheibe	Verschleiß Kugel	LBK <sub>Z</sub>	Schicht- haftung	Gesamt- ergebnis
Stahl	o	o	o	o		o
VA	o	o	o	o		o
Messing	o	--	-	o		-
Hartge-	o	-	-	+		-/o
PTFE	+	-	o	--		-/o
PA66GF25	+	+	+	++		+
MoS <sub>2</sub> -GL	o/+	o	+	++	++	+
MoS <sub>2</sub> -sp	++	+	+	++	+	+ / ++
MoS <sub>2</sub> :Ti	+	o	o	++	--	o
MoS <sub>2</sub> :Cr	++	++	o	++	+	+ / ++
MoS <sub>2</sub> :WC	+	+	o	++	o	+
a-C	++	++	++	++	+	++
TiCN	+	+	o	++	-	o/+

Die gezeigten Ergebnisse werden in Tabelle 21 zusammengefasst und bewertet. Die Bewertung erfolgt in dieser allgemeinen Betrachtung ohne Gewichtung und kann, je nach Bedarf und Anwendungsfall zu anderen Ausprägungen und Gesamtergebnissen führen.

Als zusätzliche Bewertungsgröße fließt die dimensionslose Leichtbaukennzahl  $LBK_Z$  mit ein, welche verallgemeinernd für den Zugfall den jeweils ertragbaren Festigkeitskennwert für Zugbelastung  $\sigma_{Z,ertr}$  mit der Dichte  $\rho$  bei konstanter Erdbeschleunigung  $g$  und Länge des angenommenen Zugstabes  $L$  verknüpft:

$$LBK_Z = \frac{\sigma_{Z,ertr}}{\rho \cdot g \cdot L} \quad (36)$$

Für die beschichteten Kunststoffe wird die Leichtbaukennzahl des Substrats verwendet. Der versteifende Effekt durch die harten Dünnschichten aus Kapitel 9 kommt hier noch hinzu.

Die Ergebnisse zeigen, dass bereits unbeschichtetes PA66GF25 ein gutes tribologisches Verhalten aufzeigt, welches wesentlich besser als die anderen konventionellen Käfigwerkstoffe abschneidet, durch den Einsatz von Schichten jedoch noch weiter gesteigert werden kann. Hierbei ist insbesondere die amorphe Kohlenstoffschicht (a-C) mit hervorragenden Ergebnissen für Reibung und Verschleiß sowie das mit Chrom dotierte  $MoS_2:Cr$  und das gesputterte  $MoS_2-sp$  zu nennen. Neben den hervorragenden tribologischen Eigenschaften weisen diese Schichten auch eine gute Haftung zum Substrat auf. Wird zusätzlich durch entsprechende Zwischenschichten die Käfigsteifigkeit verbessert, können beschichtete Wälzlagerkäfige großes Potential für schnelldrehende Anwendungsbereiche mit guten Notlaufeigenschaften bieten.

## 11 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird eine Vorgehensweise zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten vorgestellt und hierfür zunächst der Überblick hinsichtlich des Standes in Forschung und Industrie aufgezeigt. Hieraus leitet sich ein Bedarf an einer methodischen und praktikablen Herangehensweise für die Charakterisierung und Auslegung tribologisch beanspruchter Bauteile ab. Anhand einer Erhebung von Unternehmen unterschiedlicher Beschichtungstechnologien wird zunächst dieser Handlungsbedarf bestätigt und die Teilfrage konkretisiert, wie weitverbreitetes Testequipment genutzt werden kann. Anschließend wird eine Vorgehensweise zur methodischen Entwicklung und Auslegung von beschichteten Bauteilen unter tribologischer Beanspruchung vorgestellt. Diese umfasst die drei wesentlichen Säulen zur effizienten Beteiligung der Domänen an der Entwicklung:

- Produktentwicklung (Definition und Gewichtung der Anforderungen, Festlegung der Produktgestalt, Auslegung, Fertigungsdefinition und Produktprüfung);
- Modellbildung und Simulation (FE-Kontaktsimulation und Metamodelle) sowie
- Technologische Schichtentwicklung und experimentelle Prüfung (Schichtentwicklung, Schichtabscheidetechniken, Charakterisierung und experimentelle Versuche).

Bei der Beantwortung der Teilfrage, wie Testverfahren, Simulationen und Regressionsmodelle angewendet und angepasst werden sollten, wird in der vorliegenden Arbeit für eine Durchführbarkeit von mehrachsigen Spannungsanalysen von beschichteten Bauteilen der Bedarf an einem Verfahren zur Bestimmung des Schicht-Elastizitätsmoduls mit verhältnismäßigem Aufwand bei Nutzung von verbreitetem Testequipment festgestellt. Die vorgestellte Lösung kombiniert experimentelle Indentierungsversuche mit FE-Simulationen zur Kompensation des Substrateinflusses. Um den Anwender beim Abgleich der Indentierungs-Eindringtiefe zwischen Experiment und Simulation bestmöglich zu unterstützen und langwierige Simulationen bei Änderung von weiteren Parametern (wie beispielsweise der Schichtdicke) zu vermeiden, werden hierfür zunächst die FE-Simulationen anhand eines Versuchsplans durchgeführt und in ein Metamodell überführt, welches die Simulationsergebnisse approximiert. Sowohl die FE-

Kontaktsimulationen wie auch beide aufgestellte Metamodelle (RSM und KNN) und die Gesamtergebnisse werden verifiziert und die Sensitivitäten der einzelnen Parameter des Schicht-Substrat-Systems analysiert. Zur Überprüfung der Eignung von experimentellen Messergebnissen für die vorgestellte Methode wird ein Signifikanztest mit entsprechendem Akzeptanzkriterium definiert. Dieser Signifikanztest erlaubt es dem Anwender zukünftig die experimentellen Daten zu überprüfen und die Bestimmung des Elastizitätsmoduls nur durchzuführen, wenn das Akzeptanzkriterium eingehalten wird und somit aussagekräftige und genaue Ergebnisse erzielt werden.

Zur Durchführung von mehrachsigen Spannungsanalysen bei beschichteten Bauteilen wird ein geeignetes Experiment zur Ermittlung der relevanten Spannungskenngrößen benötigt. Als Lösung wird in dieser Arbeit ein darauf angepasster Ritztest mit entsprechend modifizierten Indentern vorgestellt. Hierdurch können Kugeln als Eindringkörper neben der weitverbreiteten Rockwell-Indenterspitze verwendet und über Geometrie und Werkstoff (und somit auch der Reibungszahl) gezielt die Spannungsverteilung beeinflusst werden. Der Anwender hat so zum einen die Möglichkeit, den Ritztest an den späteren Anwendungsfall anzupassen. Zum anderen werden die Spannungen bei Ritztests mit unterschiedlichen Indentern durch FE-Simulationen gemäß der vorgestellten Vorgehensweise nachvollzogen und die Ergebnisse zur Erstellung von Kennwerten für den Schicht-Substrat-Verbund verwendet. Hierfür werden in dieser Arbeit die Einflüsse der einzelnen Parameter auf die Spannungsverteilung aufgezeigt und Entscheidungshilfen für die Auswertung und Zuordnung der Versagenserscheinungsformen mit deren Entstehung gegeben. So tragen die Ergebnisse bei gezielter Parametervariation zu einem besseren Systemverständnis bei. Bei auftretenden Schäden können Rückschlüsse auf den für das Versagen maßgeblichen Spannungszustand gezogen werden. Die Illustration der Einflüsse der einzelnen Systemparameter auf die Spannungszustände helfen den Produktentwicklern, Tribologen und Beschichtungsexperten die richtigen Maßnahmen zur Vermeidung dieser Schäden zu treffen.

Das derzeit ungenutzte Leichtbaupotential für Kunststoffbauteile durch gezielten Einsatz von harten Schichten wird anhand der Verringerung von Durchbiegungen und der Anpassung der Eigenfrequenzen aufgezeigt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist dies besonders relevant, wenn ohnehin eine Schicht aufgebracht wird und die Erhöhung der Bauteilsteifigkeit ohne nennenswerten Mehraufwand genutzt werden kann.

Als vielversprechende Anwendung wird das Potential beschichteter Kunststoffe für Käfige schnelldrehender Wälzlager aufgezeigt. Nach einer Systemanalyse der tribologischen Kontakte des Lagerkäfigs werden die Ergebnisse zahlreicher beschichteter Kunststoffe mit konventionellen Lagerwerkstoffen verglichen und bewertet. Hierbei zeigt sich, dass PA66GF25 bereits ein wesentlich besseres tribologisches Verhalten im Vergleich zu anderen konventionellen Käfigwerkstoffen wie Stahl, VA-Stahl und Messing zeigt. Dieses kann durch den Einsatz von Schichten, insbesondere durch die amorphe Kohlenstoffschicht (a-C) sowie das mit Chrom dotierte  $\text{MoS}_2\text{:Cr}$  und das gesputterte  $\text{MoS}_2\text{-sp}$  noch weiter verbessert werden. Neben den hervorragenden tribologischen Eigenschaften weisen diese Schichten auch eine gute Haftung zum Substrat auf. Wird zusätzlich durch entsprechende Zwischenschichten die Käfigsteifigkeit erhöht, bieten beschichtete Wälzlagerkäfige großes Potential für schnelldrehende Anwendungsbereiche mit guten Notlaufeigenschaften oder im gezielten Trockenlauf zur Vermeidung von Schmierstoffen.

Die vorgestellten Arbeiten sollten in diversen Richtungen weitergeführt und vertieft werden. Die Vorgehensweise zur Charakterisierung und Auslegung sollte in weiteren Werkstoffkombinationen und Anwendungen eingesetzt werden um die Praktikabilität zu bestätigen und die bestehende Validierungsbasis zu erweitern.

Im Bereich der Ermittlung des Schicht-Elastizitätsmoduls wird eine Strategie vorgestellt, welche durch Tausch von Eingangs- mit Ausgangsgröße und Anpassung des Versuchsplans die Unterstützung des Anwenders bei der Auswertung weiter verbessert sowie Zeit und Aufwand weiter reduziert.

Der modifizierte Ritztest eignet sich durch seine Vielseitigkeit und die zahlreichen Möglichkeiten der Anpassung und Einstellung zur Erzeugung diverser Spannungszustände. Neben der in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Nutzung zur Findung der Spannungskennwerte können auch die Belastungen für bestimmte Anwendungsfälle analysiert und anschließend ein oder mehrere Parametersettings des modifizierten Ritztests definiert werden. So liegt ein – dem späteren Anwendungsfall – genau angepasster Gebrauchstauglichkeitstest vor, welcher bei Vergabe von geeigneten Akzeptanzkriterien die Eignung der Schicht hinsichtlich Tragfähigkeit und Schichthaftung durch einen einfachen Modellversuch für ebendiesen Anwendungsfall bestätigen kann. In der Serienproduktion ist somit auch eine hervorragende Möglichkeit für die Qualitätssicherung der Bauteile gegeben, in dem die Tests an entnommenen Musterbauteilen einer Charge oder an verdeckten Stellen durchgeführt werden können.

Das Potential beschichteter Wälzlager sollte im ersten Schritt durch Komponentenversuche bestätigt werden. Hierbei sind neben den tribologischen Verbesserungen insbesondere die bauteilversteifenden Einflüsse der Schichten und die Möglichkeiten zur Steigerung der Grenzdrehzahl zu verifizieren.

## 12 Summary and outlook

In this thesis a method for the characterization and design for strength of the composite of polymer substrates with thin hard films is presented. First an overview regarding the state of the art in research and industry is shown. This results in the need for a methodical and practicable approach for the characterization and design of tribologically stressed components. On the basis of a survey of companies of different coating technologies, this need for action is first validated and the subquestion is specified how widespread test equipment can be used. Subsequently, a procedure for the methodical development and design of coated components under tribological stress is presented. This comprises the three essential components for the efficient participation of the domains in the development:

- Product development (definition and weighting of requirements, determination of product design, dimensioning, production definition and product testing);
- Modelling and simulation (FE contact simulation and meta models) and
- Technological film development and experimental testing (film development, film deposition techniques, characterization and experimental tests).

For answering the subquestion of how test procedures, simulations and regression models should be applied and adapted, the need for a method to determine the Young's modulus of the coatings with reasonable effort when using common test equipment is determined in this thesis for the feasibility of multi-axial stress analyses of coated components. The presented approach combines experimental induction tests with FE-simulations to compensate for the substrate influence. In order to support the user efficiently when comparing the indentation depth between experiment and simulation and to avoid time-consuming simulations when changing further parameters (such as the layer thickness), the FE simulations are first carried out on the basis of an experimental plan and transferred into a metamodel which approximates the simulation results. The FE contact simulations as well as both generated metamodels (RSM and KNN) and the overall results are verified and the sensitivities of the individual parameters of the layer-substrate system are analyzed. To verify the suitability of experimental measurements for the presented method, a significance test with

corresponding acceptance criteria is defined. This significance test allows the user to check the experimental data in further experiments and to determine the modulus of elasticity only if the acceptance criterion is met and thus significant and accurate results are obtained.

To carry out multi-axial stress analyses on coated components, a suitable experiment is required to determine the relevant stress parameters. In this thesis an adapted scratch test with modified inductors is presented. This allows the use of balls as indenters in addition to the widely used Rockwell indenter tip and to influence the stress distribution by geometry and material (and thus also the coefficient of friction). On the one hand, the user has the possibility to adapt the scratch test to the later application. On the other hand, the stresses in scratch tests with different indenters are simulated by means of FE simulations according to the presented procedure and the results are used to generate parameters for the layer-substrate composite. For this purpose, this thesis shows the influences of the individual parameters on the stress distribution and provides decision support for the evaluation and allocation of the forms of failure with their origin. Thus, the results contribute to a better understanding of the system when parameters are varied. If damage occurs, conclusions can be drawn about the stress state that is relevant for the failure. The illustration of the influences of the individual system parameters on the stress states helps product developers, tribologists and coating experts to take the right measures to avoid these damages.

The currently unused lightweight potential for polymer components through the targeted use of hard layers is demonstrated by reducing deflections and adapting the resonant frequencies. From an economic point of view, this is particularly relevant if a layer is applied anyway and the increase in component stiffness can be used without significant additional expense.

The potential of coated polymers for cages of high-speed rolling bearings is shown as a promising application. After a system analysis of the tribological contacts of the bearing cage, the results of numerous coated plastics are compared and evaluated with conventional bearing materials. This shows that PA66GF25 already shows a significantly better tribological behaviour compared to other conventional cage materials such as steel, VA steel and brass. This can be further improved by the use of coatings, especially the amorphous carbon layer (a-C) as well as the chromium-doped MoS<sub>2</sub>:Cr and the sputtered MoS<sub>2</sub>-sp. In addition to the excellent tribological properties, these layers also show good adhesion to the substrate. If the cage rigidity is

additionally increased by appropriate intermediate layers, coated rolling bearing cages offer great potential for fast-rotating applications with good emergency running properties or in targeted dry running conditions to avoid lubricants.

The presented work should be continued and deepened in several ways. The procedure for characterization and design should be used in more material combinations and applications to confirm the feasibility and extend the existing validation basis.

In the field of the determination of the Young's modulus a strategy is presented which further improves the support of the user during the evaluation and further reduces time and effort by exchanging input and output variables and adapting the experimental design.

The modified scratch test is suitable for generating various stress states due to its versatility and the numerous possibilities of adaptation and adjustment. In addition to the use presented in this paper for the determination of stress parameters, the loads for certain applications can be analyzed and subsequently one or more parameter settings of the modified scratch test can be defined. Thus, a suitability for use test is available that is exactly adapted to the later application case. If suitable acceptance criteria are assigned, this test can confirm the suitability of the coating with regard to load carrying capacity and coating adhesion by means of a simple model test for this particular application case. In series production, this also provides an excellent opportunity for quality assurance of the components, in which the tests can be carried out on sample components taken from a batch or at covered locations.

The potential of coated rolling bearings should be confirmed in the first step by component tests. In addition to tribological improvements, the component stiffening influences of the coatings and the possibilities for increasing the limiting speed must be verified.



# Literaturverzeichnis

- [1] PlasticsEurope: The Compelling Facts About Plastics 2009. An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2008. URL: [https://www.plasticseurope.org/application/files/5315/1689/9286/2009CompellingFacts\\_PubSept2009.pdf](https://www.plasticseurope.org/application/files/5315/1689/9286/2009CompellingFacts_PubSept2009.pdf). Abgerufen am: 21.08.2018.
- [2] Heinrich, G.: Von der Kunststoffverarbeitung zu komplexen Materialien. Rundgespräch „Zukunft der Polymerforschung in der DFG-Perspektive“. 15.02.2013, Frankfurt.
- [3] Bonten, C.: Kunststofftechnik : Einführung und Grundlagen. 2. Auflage München: Hanser 2016.
- [4] Tremmel, S.; Hetzner, H.; Sander, T.; Schulz, E.: "Tailored Coatings" - Konstruieren von und Konstruieren mit Beschichtungen. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Design for X. Beiträge zum 19. Symposium. 09.-10.10.2008, Neukirchen.
- [5] Sander, T.; Kröner, J.; Dobrenizki, L.; Tremmel, S.; Wartzack, S.; Hosenfeldt, T.; Musayev, Y.: Energieeffizienz und Ressourcenschonung durch beschichtete Wälzlager. Konstruktion 5 (2014) S. 20-21.
- [6] DIN 50323-1 (zurückgezogen): Tribologie. Begriffe. Berlin: Beuth, 1988.
- [7] Czichos, H.; Habig, K.H.: Tribologie-Handbuch. 3. Auflage Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [8] Habig, K.H.: Werkstofftechnik. Tribologie. In: Dubbel, H. (Begr.); Grote, K.H. (Hrsg.): Taschenbuch für den Maschinenbau. 23. Aufl. Berlin: Springer, 2011.
- [9] Musayev, Y.: Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Stahl/Stahl-Gleitpaarungen für Präzisionsbauteile durch Diffusionschromierung im Vakuum. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2001.
- [10] DIN 50320 (zurückgezogen): Verschleiß. Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Berlin: Beuth, 1979.
- [11] Schultrich, B.: Physikalische Dampfphasenabscheidung. Vakuum in Forschung und Praxis 18 (2006) Nr. 1, S. 34-35.

- [12] Boxmann, R. L.; Zhitomirsky, V. N.: Vacuum arc deposition devices. *Rev. Sci. Instrum.* 77 (2006) Nr. 021101, S. 1-15.
- [13] Robinson, P.; Matthews, A.: Characteristics of a dual purpose cathodic arc / magnetron sputtering system. *Surf. Coat. Technol.* 43/44 (1990) S. 288-298.
- [14] Schultrich, B: Puls-Laser-Deposition (PLD). *Vakuum in Forschung und Praxis.* 19 (2007) Nr. 5, S. 42-43.
- [15] Schultrich, B.: Bedampfen. *Vakuum in Forschung und Praxis* 18 (2006) Nr. 3, S. 38-39.
- [16] Zimmer, O.; Siemroth, J.; Berthold, J.; Hilgers, H.; Hentsch, W.: Gefilterte Bogenbeschichtung – alte Probleme und neue Lösungen. *Vakuum in Forschung und Praxis* 15 (2003) Nr. 4, S. 202-208.
- [17] Boxman, R.L.; Goldsmith, S.: Macroparticle contamination in cathodic arc coatings: generation, transport and control. *Surf. Coat. Technol.* 52 (1992) Nr. 1, S. 39-50.
- [18] Wöhle, J.; Rie, K.-T.: Plasmagestützte Beschichtung von Bauteilen bei niedrigen Temperaturen. *Vakuum in Forschung und Praxis.* 12 (2000) Nr. 6, S. 383-387.
- [19] Hetzner, H.: Systematische Entwicklung amorpher Kohlenstoffschichten unter Berücksichtigung der Anforderungen der Blechmassivumformung. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2014.
- [20] Jehn, H.A.: Einführung. In: Jehn, H.A.; Reiners, G.; Siegel, N.: DIN-Fachbericht 39. Charakterisierung dünner Schichten. 1. Auflage Berlin: Beuth Verlag, 1993, S. 7-11.
- [21] Zimmer, O.: Magnetische und elektrische Steuerung der Vakuumbogenbeschichtung. Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2002.
- [22] Rother, B.; Vetter, J.: Plasmabeschichtungsverfahren und Hartstoffschichten. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1992.
- [23] Wijngaard, J.H.; Schütze, A.: Entwicklungen und Trends in der Beschichtungsindustrie. *Vakuum in Forschung und Praxis* 15 (2003) Nr. 4, S.194-197.
- [24] DIN 4855: Kohlenstoffschichten – DLC-Schichten – Beschreibung der Schichtarchitektur. Berlin: Beuth, 2015.

- [25] Schaufler, C.: Beitrag zur Entwicklung von PVD-Festschmierstoffsystemen für den Betrieb von Maschinenelementen unter extremen Umgebungsbedingungen (Vakuum und hohe Temperaturen). Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2002.
- [26] Scheibe, A.; Bohnet, J.: Oberflächen- und Beschichtungstechnik. PVD-Beschichtungen. Vorlesungsskript. Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung, Institut für industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Universität Stuttgart, 2007.
- [27] Dirks, A.G.; Leamy, H.J.: Columnar microstructures in vapor-deposited thin films. *Thin Solid Films* 47 (1977) Nr. 3, S. 219-233.
- [28] Engell, H.J.: Die Haftfestigkeit von Oberflächenschichten auf Metallen. *Werkstoffe und Korrosion* 11 (1960) Nr. 3, S. 147-151.
- [29] Seperant, F.: Interdiffusion des Aluminium-Magnesium-Systems – Quantitative Analyse und numerische Modellierung. Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2012.
- [30] Krupp, H.: Haftung zwischen Festkörpern. *Chemie-Ing.-Techn.* 41 (1969) Nr. 3, S. 135-136.
- [31] Metzlik, M.S.; Afanas'Eva, R.V.: Die Bedeutung mechano-elektrischer Erscheinungen für die Bestimmung der Oberflächenenergie von Kristallen. *Kristall und Technik* 8 (1973) Nr. 8, S. 907-911.
- [32] Mattox, D.M.: Surface cleaning in thin film technology. *Thin Solid Films* 53 (1978) Nr. 1, S. 81-96.
- [33] Gärtner, H.: Ionenplatinieren. In: Kienel, G.; Röhl, K.: *Vakuum Beschichtung. Band 2. Verfahren und Anlagen.* Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995, S. 107-126.
- [34] Thornton, J.A.: Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings. *J. Vac. Sci. Technol.* 11 (1974) Nr. 4, S. 666-670.
- [35] Messier, R.; Giri, A.P.; Roy, R.A.: Revised structure zone model for thin film physical structure. *J. Vac. Sci. Technol.* A2 (1984) Nr. 2, S. 500-503.
- [36] Movchan, B.A.; Demchishin, A.V.: Study of the structure and properties of thick vacuum condensates of nickel, titanium, tungsten, aluminium oxide and zirconium dioxide. *Phys. Met. Metallogr.* 28 (1969), S. 83-90.

- [37] Thornton, J.A.: High rate thick film growth. *Annu. Rev. Mater. Sci.* 7 (1977) S. 239-260.
- [38] Nicolaus, M.; Schäpers, M.: Grundlagen der Dünnschichttechnologie. In: Bach, F.-W.; et al. (Hrsg.): *Moderne Beschichtungsverfahren*. 1. Auflage Weinheim: Wiley-VCH, 2005, S. 35-55.
- [39] Kaiser, W.: *Kunststoffchemie für Ingenieure : Von der Synthese bis zur Anwendung*. 4. Auflage München: Hanser Verlag, 2016.
- [40] Ehrenstein, G.W.: *Polymer-Werkstoffe: Struktur, Eigenschaften, Anwendung*. 3. Auflage München: Hanser Verlag, 2011.
- [41] Bobzin, K.; Bagcivan, N.; Ewering, M.; Goebels, N.A.; Weiß, R.; Warnke, C.: Entwicklung neuer PVD-Beschichtungen. In: Murrenhoff, H. (Hrsg.): *Umweltverträgliche Tribosysteme. Die Vision einer umweltfreundlichen Werkzeugmaschine*. Berlin: Springer, 2010.
- [42] CemeCon AG: Beschichtungskonstruktion. URL: [http://www.cemecon.de/beschichtungskompetenz/beschichtungskonstruktion/index\\_ger.html](http://www.cemecon.de/beschichtungskompetenz/beschichtungskonstruktion/index_ger.html). Abgerufen am: 29.01.2014.
- [43] Tremmel, S.: Ein Beitrag zur Auslegung beschichteter Bauteile unter zyklischer Beanspruchung im Wälz-Gleit-Kontakt. *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1 Nr. 406*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2010.
- [44] Wielage, B.; Wank, A.; Rupprecht, C.; Schmidt, G.; Stark, S.: Optimierung von Dünnschichtsystemen für hochbeanspruchte Werkzeuge der Umformtechnik. In: Krenkel, W. (Hrsg.): *Verbundwerkstoffe*. 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- [45] Clausner, A.: Bewertung von Verfahren zur Fließspannungsbestimmung in der Nanoindentation. Chemnitz: Universitätsverlag Chemnitz, 2013.
- [46] Tunis, J.; Wang, X.; Li, X.: Experimental and Numerical Investigation into the Adhesion of PVD Coatings on Minting Dies. In: Yu, S.W. (Hrsg.): *13th International Conference on Fracture*. 16.06.-21.06.2013, Beijing, China. Auf Speichermedium: S. 1-15.
- [47] Ehrenstein, G.W.: *Mit Kunststoffen konstruieren*. 3. Auflage München: Hanser Verlag, 2007.
- [48] Richard, H.A.; Sander, M.: *Technische Mechanik. Festigkeitslehre*. 2. Auflage Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2008.

- [49] Hencky, H.: Ermüdung, Bruch, Plastizität. Stahlbau 16 (1943) S. 95-97.
- [50] Issler, L.; Ruoff, H.; Häfele, P.: Festigkeitslehre – Grundlagen. 2. Auflage Berlin: Springer, 2003.
- [51] Clausmeyer, H.: Über die Versprödung von Stahl unter mehrachsiger Beanspruchung. Habilitationsschrift, Technische Hochschule Darmstadt, 1967.
- [52] Sommer, E.: Bruchmechanische Bewertung von Oberflächenrissen. 1. Auflage Berlin: Springer, 1984.
- [53] Mutz, A.: Strukturmechanische Bewertung von Rohrleitungskomponenten und -systemen in Energiewandlungsanlagen unter Berücksichtigung der realen Werkstoffcharakteristik. Universität Stuttgart, Dissertation, 2011.
- [54] Clausmeyer, H.; Kußmaul, K.; Roos, E.: Der Einfluß des Spannungszustandes auf den Versagensablauf angerissener Bauteile aus Stahl. Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 20 (1989) Nr. 4, S. 101-117.
- [55] DIN EN ISO 6892-1: Entwurf: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Berlin: Beuth, 2014.
- [56] DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze. Berlin: Beuth, 2012.
- [57] Field, J.S.; Swain, M.V.: A simple predictive model for spherical indentation. J. Mater. Res. 8 (1993) Nr. 2, S. 297-306.
- [58] Oliver, W.C.; Pharr, G.M.: An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. J. Mater. Res. 7 (1992) Nr. 6, S. 1564-1583.
- [59] Oliver, W.C.; Pharr, G.M.: Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. J. Mater. Res. 19 (2004) Nr. 1, S. 3-20.
- [60] Li, H.; Vlassak, J.J.: Determining the elastic modulus and hardness of an ultra-thin film on a substrate using nanoindentation. J. Mater. Res. 24 (2009) Nr. 3, S. 1114-1126.
- [61] Bückle, H.: Progress in micro-indentation hardness testing. International Materials 4 (1959) Nr. 1, S. 49-100.

- [62] Lebouvier, D.; Gilormini, P.; Felder, E.: A kinematic solution for plain-strain indentation of a bilayer. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 22 (1985) S. 199-210.
- [63] Chudoba, T.; Richter, F.: Investigation of creep behaviour under load during indentation experiments and its influence on hardness and modulus results. *Surf. Coat. Technol.* 148 (2001) S. 191-198.
- [64] Lebouvier, D.; Gilormini, P.; Felder, E.: A kinematic model for plastic indentation of a bilayer. *Thin Solid Films* 172 (1989) S. 227-239.
- [65] Stachowiak, G.W.; Batchelor, A.W.; Stachowiak, G.B.: *Experimental Methods in Tribology*, Tribology Series, 44. 1. Auflage Amsterdam: Elsevier Science, 2004.
- [66] Chen, W.T.: Computation of stresses and displacements in a layered elastic medium. *Int. J. Eng. Sci.* 9 (1971) S. 775-800.
- [67] Chen, W.T.; Engel, P.A.: Impact and contact stress analysis in multilayer media. *Int. J. Solids Struct.* 8 (1972) S. 1257.
- [68] Taube, K.: Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von dünnen Schichten mit einer Ultramikro-Eindruckmethode. *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 18 Nr. 102*. Düsseldorf: VDI, 1991.
- [69] Durst, K.; Göken, M.: Nanoindentierung – Eine Sonde für die lokalen mechanischen Eigenschaften. In: Pohl, M. (Hrsg.): *Met. Sonderband 36* (2004) S. 319-328.
- [70] Doerner, M.F.; Nix, W.D.: A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments. *J. Mater. Res.* 1 (1986) Nr. 4, S. 601-609.
- [71] Schwarzer, N.; Chudoba, T.; Richter, F.: Investigation of ultra thin coatings using nanoindentation. *Surf. Coat. Technol.* 200 (2006), S. 5566-5580.
- [72] DIN EN 1071-3: Hochleistungskeramik - Verfahren zur Prüfung keramischer Schichten - Teil 3: Bestimmung der Haftung und Formen des mechanischen Versagens mit dem Ritztest. Berlin: Beuth, 2005.
- [73] DIN EN ISO 6508-2: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Rockwell - Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung der Prüfmaschinen und Eindringkörper. Berlin: Beuth, 2015.
- [74] Bull, S.J.: Failure mode maps in the thin film scratch adhesion test. *Tribol. Int.* 30 (1997) Nr. 7, S. 491-498.

- [75] Burnett, P.J.; Rickerby, D.S.: The relationship between hardness and scratch adhesion. *Thin Solid Films* 154 (1987) Nr. 1-2, S. 403-416.
- [76] Arnell R.D.: The mechanics of the tribology of thin film systems. *Surf. Coat. Technol.* 43 (44) (1990), S. 674-687.
- [77] Bull, S.J.: Failure modes in scratch adhesion testing. *Surf. Coat. Technol.* 50 (1991) S. 25-32.
- [78] McKay, M.D.; Beckman, R.J.; Conover, W.J.: A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics.* 21 (1979) Nr. 2, S. 239-245. Published: American Statistical Association and American Society for Quality.
- [79] Mc Williams, T.P.: Sensitivity Analysis of Geologic Computer Models: A Formal Procedure Based on Latin Hypercube Sampling. *Mathematical Geology* 19 (1987) Nr. 2, S. 81-90.
- [80] Stockinger, A.: Computer Aided Robust Design – Verknüpfung rechnerunterstützter Entwicklung und virtueller Fertigung als Baustein des Toleranzmanagements. *Fortschritt-Bericht VDI Reihe 1 Nr. 409.* Düsseldorf : VDI-Verlag, 2011.
- [81] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: *Statistische Versuchsplanung, Design of Experiments (DoE).* 1. Auflage Heidelberg: Springer Verlag, 2010.
- [82] Walter, M.S.J.: *Toleranzanalyse und Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen.* *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1 Nr. 437.* Düsseldorf: VDI-Verlag, 2016.
- [83] Box, G.E.P; Wilson, K.B.: On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 13 (1951) Nr. 1, S. 1-45.
- [84] Box, G.E.P.; Draper, N.R.: *Empirical model-building and response surface.* New York: Wiley, 1987.
- [85] Buchholz, P.; Clausen, U.: *Große Netze der Logistik - Die Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs 559.* Berlin: Springer, 2009.
- [86] Simpson, T.W.; Mauery, T.M.; Kort, J.J.; Mistree, F.: Kriging Models for Global Approximation in Simulation-Based Multidisciplinary Design Optimization. *AIAA Journal* 39 (2001) Nr 12, S. 2233-2241.

- [87] Simpson, T.W.; Peplinski, J.D.; Koch, P.N.; Allen, J.K.: Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey and recommendations. *Engineering with Computers* 17 (2001) Nr. 2, S. 129–150.
- [88] Adamy, J.: *Fuzzy Logik, Neuronale Netze und Evolutionäre Algorithmen*. Aachen: Shaker, 2015.
- [89] Zell, A.: *Simulation neuronaler Netze*. 1. Auflage Bonn: Addison-Wesley, 1994.
- [90] Eickhoff, R.: *Fehlertolerante neuronale Netze zur Approximation von Funktionen*. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2007.
- [91] Masters, T.: *Practical neural network recipes in C++*. 1. Auflage San Diego: Academic Press (Morgan Kaufmann Publishers), 1993.
- [92] Heaton, J.: *Introduction to Neural Networks for C#*. 2. Auflage Chesterfield: Heaton Research, 2008.
- [93] Montgomery, D.C.; Runger, G.C.: *Applied statistics and probability for engineers*. 5. Auflage Hoboken: Wiley, 2011.
- [94] Most, T.; Will, J.: *Sensitivity analysis using the Metamodel of Optimal Prognosis*. Weimar Optimization and Stochastic Days 8.0, Weimar, 24-25.11.2011.
- [95] Walter M.; Sprügel T.; Wartzack S.: *Tolerance analysis of systems in motion taking into account interactions between deviations*. Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part B-Journal Of Engineering Manufacture 227 (2013) Nr. 5, S. 709-719.
- [96] Most, T.; Will, J.: *Metamodel of Optimal Prognosis. An automatic approach for variable reduction and optimal metamodel selection*. Weimar Optimization and Stochastic Days 5.0, Weimar, 20-21.11.2008.
- [97] Berndt, R.; Altobelli, C.F.; Sander, M.: *Internationales Marketing-Management*. 4. Auflage Berlin: Springer, 2010.
- [98] Stojek, M.; Stommel, M.; Korte, W.: *Finite-Elemente-Methode für die mechanische Auslegung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*. In: Michaeli, W.: *Finite-Elemente-Methode für die mechanische Auslegung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*. Sonderpublikation der Zeitschrift *Ingenieur-Werkstoffe*. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 2001.

- [99] Kunz, J.: Die Querkontraktionszahl in der Konstruktionspraxis. KunststoffXtra Separatdruck 6 (2011), S. 27-30.
- [100] Chudoba, T.; Griepentrog, M.; Dück, A.; Schneider, D.; Richter, F.: Young's modulus measurements on ultra-thin coatings. J. Mater. Res. 19 (2001) Nr. 1, S 301-314.
- [101] Fischer-Cripps, A.C.: Nanoindentation, 3. Auflage Berlin: Springer, 2011.
- [102] Ollendorf, H.; Schneider, D.: A comparative study of adhesion test methods for hard coatings. Surf. Coat. Technol. 113 (1998) S. 86-102.
- [103] Sander, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: A modified scratch test for the mechanical characterization of scratch resistance and adhesion of thin hard coatings on soft substrates. Surf. Coat. Technol. 206 (2011) S. 1873-1878.
- [104] Lodes, M.A.; Rosiwal, S.M.; Singer, R.F.: Self-Supporting Nanocrystalline Diamond Foils – A New Concept for Crystalline Diamond on any Technical Surface. Key Eng. Mater. 438 (2010) S. 163-169.
- [105] Johnson, K.L.: The correlation of indentation experiments. J. Mech. Phys. Solids 18 (1970) S. 115-126.
- [106] Williams, J.A.: Analytical models of scratch hardness. Tribol. Int. 29 (1996) S. 675-694.
- [107] Xie, Y.; Hawthorne, H.M.: A model for compressive coating stresses in the scratch adhesion test. Surf. Coat. Technol. 141 (2001) S. 15-25.
- [108] Ichimura, H.; Ishii, Y.: Effects of indenter radius on the critical load in scratch testing. Surf. Coat. Technol. 165 (2003) S. 1-7.
- [109] Xie, Y.; Hawthorne, H.M.: Effect of contact geometry on the failure modes of thin coatings in the scratch adhesion test. Surf. Coat. Technol. 155 (2002) S. 121-129.
- [110] DIN 5401: Wälzlager. Kugeln für Wälzlager und allgemeinen Industriebedarf. Berlin: Beuth, 2002.
- [111] Keyence Deutschland GmbH.: Konfokales 3D Laserscanning-Mikroskop – Modellreihe VK-X - VK-X200K – Technische Daten. URL: [https://www.keyence.de/products/measure-sys/3d-measure/vk-x100\\_x200/models/vk-x200k/index](https://www.keyence.de/products/measure-sys/3d-measure/vk-x100_x200/models/vk-x200k/index). Abgerufen am: 21.05.2019.

- [112] DIN EN 1071-2: Hochleistungskeramik - Verfahren zur Prüfung keramischer Schichten - Teil 2: Bestimmung der Schichtdicke mit dem Kalottenschleifverfahren. Berlin: Beuth, 2003.
- [113] DIN EN ISO 12085: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Motifkenngrößen. Berlin: Beuth, 1998.
- [114] DIN EN ISO 14577-2: Metallische Werkstoffe – Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter – Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung der Prüfmaschinen. Berlin: Beuth, 2015.
- [115] ISO 3290-1: Wälzlager - Rollenelemente - Teil 1 : Metallkugeln. Berlin: Beuth, 2014.
- [116] DIN EN ISO 291: Kunststoffe - Normalklimate für Konditionierung und Prüfung. Berlin: Beuth, 2008.
- [117] DIN EN ISO 178: Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften. Berlin: Beuth, 2013.
- [118] EN ISO 1110: Kunststoffe – Polyamide – Beschleunigte Konditionierung von Probekörpern. Berlin: Beuth, 1997.
- [119] o.V.: Abaqus Analysis User's Guide. Abaqus 6.14. URL: <http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/usb/default.htm?start=pto5ch22s07aab13.html>. Abgerufen am: 20.05.2018.
- [120] Stommel, M.; Stojek, M.; Korte, W.: FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen. 1. Auflage München: Hanser Verlag, 2011.
- [121] Chemie Wirtschaftsförderungsgesellschaft GmbH: Campus Datasheet. Ultramid A3K – PA66. URL: <http://www.campusplastics.com>. Abgerufen am: 20.05.2018.
- [122] Matthäus, H.; Matthäus, W.-G.: Statistik und Excel. Elementarer Umgang mit Daten. 1. Auflage Wiesbaden: Springer Spektrum, 2016.
- [123] Döring, N.; Bortz, J.: Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften. 5. Auflage Berlin: Springer, 2016.

- [124] Microsoft Corporation: Microsoft Office – Anwendungen – Excel – TTEST (Funktion). URL: <https://support.office.com/de-de/article/ttest-funktion-1696ffc1-4811-4ofd-9d13-aoeaad83c7ae>. Abgerufen am: 01.07.2018.
- [125] Sander, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.; Determination of the Young's Modulus of Hard Coatings on Soft Polymer Substrates. 40th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films. 29.04.-03.05.2013, San Diego.
- [126] Mathworks inc.: Matlab User's Manual. URL: <http://de.mathworks.com/help/matlab>. Abgerufen am: 20.05.2018.
- [127] Fröhlich, P.: Einführung und praktischer Einsatz von Finite-Element-Programmen. 1. Auflage Berlin: Springer, 1995.
- [128] Sander, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Fast FEM simulations of a hard coated polymer substrate in spherical contact. Posterbeitrag: Friction, Wear and Wear Protection, DGM. 26.-28. Oktober 2011, Karlsruhe.
- [129] Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper. Journal für die reine und angewandte Mathematik 92 (1882) S. 156–171.
- [130] Popov, V.L.: Kontaktmechanik und Reibung - von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik. 3. Auflage Berlin: Springer, 2015.
- [131] Johnson, K.L.: Contact mechanics. 1. Auflage Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [132] Meerkamm, H. (Wiss. Betreuung) In: Schaeffler Technologies GmbH & Co KG (Hrsg.): Schaeffler. Technisches Taschenbuch. 2. Auflage Herzogenaurach: Schaeffler Technical Documentation, 2014.
- [133] Murphey, Y.L.; Guo, H.; Feldkamp, L.A.: Neural Learning from Unbalanced Data. Applied Intelligence 21 (2004) S. 117-128.
- [134] DIN EN ISO 4287: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009). Berlin: Beuth, 2010.
- [135] Lackmann, J.; Villwock, J.: Beanspruchung stabförmiger Bauteile. In: Dubbel, H.; Grote, K.H. (Hrsg.): Taschenbuch für den Maschinenbau. 24. Auflage Berlin: Springer Vieweg, 2014.

- [136] Chemie Wirtschaftsförderungsgesellschaft GmbH: Campus Datasheet. Luran S 776S - ASA. URL: <http://www.campusplastics.com>. Abgerufen am: 20.05.2018.
- [137] Meister, S.; Vetter, K.; Drummer, D.: Mechanische Kennwertermittlung für Mikrobauteile an spritzgegossenen Mikro-Zugprüfkörpern. *Kunststofftechnik* 9 (2013) S. 74-99.
- [138] Hedderich, J.; Sachs, L.: *Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R*. 15. Auflage Berlin: Springer Spektrum, 2016.
- [139] Schultrich, B: Vakuumbogen. *Vakuum in Forschung und Praxis* 19 (2007) Nr. 2, S. 44-45.
- [140] Sander, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Tribological behavior of coated tungsten composites in sliding contact conditions with steel counter bodies. In: NTNU & SINTEF (Hrsg.): *Proceedings of the 15th Nordic Symposium on Tribology NORDTRIB 2012*. 12.-15. Juni 2012, Trondheim.
- [141] Boxman, R.L.; Goldsmith, S.: Cathode-Spot Arc Coatings: Physics, Deposition and Heating Rates, and some Examples. *Surf. Coat. Technol.* 33 (1987), S. 153-167.
- [142] Mesyats, G.A.: Microexplosions on a cathode aroused by plasma-metal interaction. *Journal of Nuclear Materials* 128-129 (1984) S. 618-621.
- [143] Anders, A.: Approaches to rid cathodic arc plasmas of macro- and nanoparticles: a review. *Surf. Coat. Technol.* 120-121 (1999), S. 319-330.
- [144] Vierneusel, B.; Sander, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Potential of arc evaporated TiO<sub>2</sub> as an interlayer and its performance in dry sliding. In: NTNU ; SINTEF (Hrsg.): *Proceedings of the 15th Nordic Symposium on Tribology NORDTRIB 2012*. 12.-15. Juni 2012, Trondheim.
- [145] Sander, T.; Vierneusel, B.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Potential beschichteter Kunststoffe zur Reibungs- und Verschleißreduzierung an Wälzlagerkäfigen. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): *VDI-Berichte 2202 - 10. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen*. 23.-24.04.2013, Schweinfurt. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013, S. 327-339.

- [146] Sander, T.; Vierneusel, B.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Coated polymers for low friction and wear of roller bearing cages in lightweight design. 40th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films. 29.04.-03.05.2013, San Diego.
- [147] Sander, T.; Vierneusel, B.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Tribologische Modelluntersuchungen zu Reibung und Verschleiß an Wälzlagerkäfigwerkstoffen. Wissenschaftliches Kolloquium Wälzlager. 04.04.-05.04.2013, Kaiserslautern.
- [148] Randall, N.X.; Favaro, G.; Frankel, C.H.: The effect of intrinsic parameters on the critical load as measured with the scratch test method. *Surf. Coat. Technol.* 137 (2001) S. 146-151.
- [149] Vitry, V.; Delaunois, F.; Dumortier, C.: Mechanical properties and scratch test resistance of nickel-boron coated aluminium alloy after heat treatments aluminium alloy after heat treatments. *Surf. Coat. Technol.* 202 (2008) S. 3316-3324.
- [150] Burnett, P.J.; Rickerby, D.S.: The scratch adhesion test: An elastic-plastic indentation analysis. *Thin Solid Films* 157 (1988) S. 233-254.
- [151] Je, J.H.; Gyarmati, E.; Naoumidis A.: Scratch adhesion test of reactively sputtered TiN coatings on a soft substrate. *Thin Solid Films* 136 (1986) S. 57-67.
- [152] Perry, A.J.: The adhesion of chemically vapour-deposited hard coatings on steel – The scratch test. *Thin Solid Films* 78 (1981) S. 77-93.
- [153] Laugier, M.: The development of the scratch test technique for the determination of the adhesion of coatings. *Thin Solid Films* (1981) Nr. 76, S. 289-294.
- [154] Park, H. S.; Kwon, D.: An energy approach to quantification of adhesion strength from critical loads in scratch tests. *Thin Solid Films* (1997) 307, S. 156-162.
- [155] Holmberg, K.; Laukkanen, A.; Ronkainen, H.; Wallin, K.; Varjus, S.; Koskinen, J.: Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface. Part I: Modelling stresses and strains. *Surf. Coat. Technol.* 200 (2006) S. 3793-3809.

- [156] Holmberg, K.; Laukkanen, A.; Ronkainen, H.; Wallin, K.; Varjus, S.; Koskinen, J.: Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface. Part II: Material deformations, influence of coating thickness and Young's modulus. Surf. Coat. Technol. 200 (2006) S. 3810-3823.
- [157] Holmberg, K.; Laukkanen, A.; Koskinen, J.; Ronkainen, H.; Wallin, K.; Varjus, S.: Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface. Part III: Fracture toughness calculation and influence of residual stresses. Surf. Coat. Technol. 200 (2006) S. 3824-3844.
- [158] Sander, T., Wartzack, S.: Anforderungen an technische Oberflächen und die Herausforderungen für den Produktentwickler. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.) : Design for X. Beiträge zum 22. DfX-Symposium (Design for X, Tutzing, 11.-12.10.2011). Hamburg: TuTech, 2011, S. 141-152.
- [159] Sander, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Beschichtete Kunststoffe für funktionsintegrierte Leichtbaulösungen – With coated Polymers to Function Integrated Lightweight Design Solutions. Konstruktion 4 (2014) S. 62-66.
- [160] Török, E.; Perry, A.J.; Chollet, L.; Sproul, W.D.: Young's modulus of TiN, TiC, ZrN and HfN. Thin Solid Films 153 (1987) S. 37-43.
- [161] Tran, M.D.; Poublan, J.; Dautzenberg, J.H.: A practical method for the determination of the Young's modulus and residual stresses of PVD thin films. Thin Solid Films 308-309 (1997) S. 310-314.
- [162] Holleck, H.: Material selection for hard coatings. J. Vac. Sci. Technol. A4 (1986) Nr. 6, S. 2661-2669.
- [163] Aul, V.; Sauer, B.: Kriterien zur Bewertung von Käfigorbitalbewegungen. VDI-Berichte 2069. Gleit- und Wälzlagerungen 2009. S. 79-90.
- [164] Kleinlein, E. et al.: Einsatz von Wälzlagern bei extremen Betriebs- und Umgebungsbedingungen. 1. Auflage Renningen-Malmsheim: expert verlag, 1998.
- [165] Birkhofer, H.; Kümmerle, T.: Feststoffgeschmierte Wälzlager. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2012.
- [166] Brändlein, J.; et al.: Die Wälzlagerpraxis. 3. Auflage Mainz: Vereinigte Fachverlage 2009.

- [167] Vierneusel, B.; Tremmel, S.; Wartzack S.: Effects of deposition parameters on hardness and lubrication properties of thin MoS<sub>2</sub> films. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 43 (2012) Nr. 12, S. 1029-1035.
- [168] Schilling, M.; Ege, N.N.: Referenzöle. Referenzöle für Wälz- und Gleitlager-, Zahnrad- und Kupplungsversuche. Forschungsheft 180. Frankfurt/Main: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 1985.
- [169] Sander, T.; Wartzack, S.: Potentiale für den Leichtbau durch Beschichtung von Kunststoffen. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.) : Design for X. Beiträge zum 21. DfX-Symposium (Design for X, Hamburg, 23.-14.09.2010). Hamburg : TuTech, 2010, S. 35-46.
- [170] DIN EN ISO 1463: Metall- und Oxidschichten - Schichtdickenmessung – Mikroskopisches Verfahren. Berlin: Beuth, 2004.
- [171] Kienel, G.: Vakuumbeschichtung 5 – Anwendungen Teil II. 1. Auflage Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.

## Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Tremmel, S.; Hetzner, H.; Sander, T.; Schulz, E.: "Tailored Coatings" - Konstruieren von und Konstruieren mit Beschichtungen. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Design for X. Beiträge zum 19. Symposium. 09.-10.10.2008, Neukirchen.
- [P2] Sander, T.; Wartzack, S.: Potentiale für den Leichtbau durch Beschichtung von Kunststoffen. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.) : Design for X. Beiträge zum 21. DfX-Symposium (Design for X, Hamburg, 23.-14.09.2010). Hamburg : TuTech, 2010, S. 35-46.
- [P3] Sander, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: A modified scratch test for the mechanical characterization of scratch resistance and adhesion of thin hard coatings on soft substrates. Surf. Coat. Technol. 206 (2011) S. 1873-1878.
- [P4] Sander, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Fast FEM simulations of a hard coated polymer substrate in spherical contact. Posterbeitrag: Friction, Wear and Wear Protection, DGM. 26.-28. Oktober 2011, Karlsruhe.
- [P5] Sander, T.; Wartzack, S.: Anforderungen an technische Oberflächen und die Herausforderungen für den Produktentwickler. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.) : Design for X. Beiträge zum 22. DfX-Symposium (Design for X, Tutzing, 11.-12.10.2011). Hamburg: TuTech, 2011, S. 141-152.
- [P6] Sander, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Tribological behavior of coated tungsten composites in sliding contact conditions with steel counter bodies. In: NTNU & SINTEF (Hrsg.): Proceedings of the 15th Nordic Symposium on Tribology NORDTRIB 2012. 12.-15. Juni 2012, Trondheim.
- [P7] Vierneusel, B.; Sander, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Potential of arc evaporated TiO<sub>2</sub> as an interlayer and its performance in dry sliding. In: NTNU & SINTEF (Hrsg.): Proceedings of the 15th

- Nordic Symposium on Tribology NORDTRIB 2012. 12.-15. Juni 2012, Trondheim.
- [P8] Sander, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Determination of the Young's Modulus of Hard Coatings on Soft Polymer Substrates. 40th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films. 29.04.-03.05.2013, San Diego.
- [P9] Sander, T.; Vierneusel, B.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Potential beschichteter Kunststoffe zur Reibungs- und Verschleißreduzierung an Wälzlagerkäfigen. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): VDI-Berichte 2202 - 10. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen. 23.-24.04.2013, Schweinfurt. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013, S. 327-339.
- [P10] Sander, T.; Vierneusel, B.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Coated polymers for low friction and wear of roller bearing cages in light-weight design. Posterbeitrag: 40th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films. 29.04.-03.05.2013, San Diego.
- [P11] Sander, T.; Vierneusel, B.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Tribologische Modelluntersuchungen zu Reibung und Verschleiß an Wälzlagerkäfigwerkstoffen. Wissenschaftliches Kolloquium Wälzlager. 04.04.-05.04.2013, Kaiserslautern.
- [P12] Sander, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Beschichtete Kunststoffe für funktionsintegrierte Leichtbaulösungen – With coated Polymers to Function Integrated Lightweight Design Solutions. Konstruktion 4 (2014), S. 62-66.
- [P13] Sander, T.; Kröner, J.; Dobrenizki, L.; Tremmel, S.; Wartzack, S.; Hosenfeldt, T.; Musayev, Y.: Energieeffizienz und Ressourcenschonung durch beschichtete Wälzlager. Konstruktion 5 (2014), S. 20-21.

### **Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten\***

- [S1] Appel, T.; Sander, T.; Wartzack, S.: Mechanisch-technologische und tribologische Prüfverfahren für Kunststoffe und beschichtete Kunststoffe. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2010.
- [S2] Ehret, A.; Sander, T.; Wartzack, S.: Bestimmung der elastischen Parameter von Schicht-Substrat-Systemen durch den Einsatz von FEM-Simulationen und Metamodellen. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2013.
- [S3] Epp, S.; Sander, T.; Wartzack, S.: Auswahl und Bewertung von Kunststoffen in der Vakuumbeschichtungstechnik. Studienarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2010.
- [S4] Frey, S.; Sander, T.; Wartzack, S.: Entwicklung einer Bewertungssystematik für Werkstoff- und Beschichtungskonzepte für Gleitkontakte für den Einsatz in Medien. Diplomarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [S4] Gesell, P.; Sander, T.; Wartzack, S.: Experimentelle Validierung von analytischen und numerischen Ergebnissen von beschichteten Kunststoffsubstraten. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2011.
- [S5] Hansen, K.; Sander, T.; Wartzack, S.: Charakterisierung von beschichteten Kunststoffsubstraten mit einem modifizierten Kratztest und Vergleich mit konventionellen Charakterisierungsmethoden. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2011.
- [S6] Hansen, K.; Sander, T.; Wartzack, S.: Potential von beschichteten Kunststoffen zur Reibungs- und Verschleißreduzierung an Käfigen rotativer Wälzlager. Masterarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2013.

---

\* Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

- [S7] Hansen, K.; Sander, T.; Wartzack, S.: Potential von beschichteten Kunststoffen zur Reibungs- und Verschleißreduzierung an Käfigen rotativer Wälzlager. Masterarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2013.
- [S8] Heckner, S.; Sander, T.; Wartzack, S.: Kontaktsimulation eines Schicht-Substrat-Systems. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2010.
- [S9] Hullin, P.; Sander, T.; Wartzack, S.: Entwicklung eines chrombasierten Schichtsystems hergestellt durch Vakuumlichtbogenverdampfen. Projektarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2009.
- [S10] Jakubka, A.; Sander, T.; Wartzack, S.: Ermittlung der elastischen Eigenschaften von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [S11] Kett, S.; Sander, T.; Wartzack, S.: Angewandte Verfahren zur Schicht- und Oberflächencharakterisierung in Industrie und Forschung. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2011.
- [S12] Kröner, J.; Sander, T.; Wartzack, S.: Parametrisierte Kontaktsimulation eines Schicht-Substrat-Systems zur Ermittlung elastischer Parameter. Projektarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [S13] Mönius, H.; Sander, T.; Wartzack, S.: Werkstoffe und Dünnschichten in der Medizinaltechnik. Studienarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2011.
- [S14] Mühldorfer, F.; Sander, T.; Wartzack, S.: FEM-Kontaktsimulation eines Ritztests. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2013.
- [S15] Müller, M.; Sander, T.; Wartzack, S.: Konstruktive Überarbeitung und Weiterentwicklung eines Makro-Scratchtesters zur Charakterisierung von beschichteten Oberflächen. Studienarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2012.

- [S16] Oberlander, M.; Sander, T.; Wartzack, S.: Kontaktsimulation eines Schicht-Substrat-Systems. Studienarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [S17] Oberschachtsiek, S.; Sander, T.; Wartzack, S.: Mechanisch-tribologische Charakterisierung PVD-beschichteter Polymere. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [S18] Riedel, J.; Sander, T.; Wartzack, S.: Simulation der mechanischen und tribologischen Beanspruchung beschichteter optischer Datenträger. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2014.
- [S19] Saam, C.; Sander, T.; Wartzack, S.: Beschichtete Bauteile in der Medizinaltechnik und deren Freigabe. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2010.
- [S20] Saur, A.; Sander, T.; Wartzack, S.: Analytische Modelle zur Berechnung der Spannungszustände während Ritztests und Methoden zur Visualisierung der ermittelten Kennwerte. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [S21] Sparrer, J.; Sander, T.; Wartzack, S.: Entwicklung eines klimatisierten Kugel/Scheibe-Tribometers. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [S22] Stens, J.; Sander, T.; Wartzack, S.: Tribologisches Verhalten von beschichteten Wolframsubstraten im Gleitkontakt mit gehärtetem Stahl. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [S23] vom Busch, M.; Sander, T.; Wartzack, S.: Inbetriebnahme und technische Dokumentation eines Makro-Scratch-Testers und Optimierung der Regelungsparameter. Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2014.

## Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2020):  
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, [www.mb.fau.de/diss/](http://www.mb.fau.de/diss/)

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52  
Fertigungstechnik – Erlangen  
ISSN 1431-6226  
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307  
Fertigungstechnik – Erlangen  
ISSN 1431-6226  
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308  
FAU Studien aus dem Maschinenbau  
ISSN 2625-9974  
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

<b>FAPS</b>	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
<b>KTmfk</b>	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
<b>LFT</b>	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
<b>LPT</b>	Lehrstuhl für Photonische Technologien

Band 1: Andreas Hemberger  
Innovationspotentiale in der  
rechnerintegrierten Produktion durch  
wissensbasierte Systeme  
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.  
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe  
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität  
automatisierter Montagesysteme  
durch Sensorintegration und erweiterte  
Steuerungskonzepte  
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.  
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting  
Projektierung von Montagesystemen  
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter  
Nutzungsgradsteigerung von  
Montagesystemen durch den Einsatz  
der Simulationstechnik  
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin  
Aufbau von Modellen zur Lageregelung  
von Industrierobotern  
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss  
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-  
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-  
schneiden  
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz  
Modell zur datenbankgestützten Planung  
automatisierter Montageanlagen  
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier  
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-  
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen  
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele  
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von  
Planungssystemen in der Produktion  
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer  
Technologisch orientierte  
Montageplanung am Beispiel der  
Schraubtechnik  
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.  
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer  
Verteilte Planungssysteme zur  
Flexibilitätssteigerung der  
rechnerintegrierten Teilefertigung  
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam  
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-  
feinplanung  
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen  
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines  
übereutektoiden verschleißfesten Stahls  
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.  
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann  
Untersuchungen zur Anlagen- und  
Prozeßdiagnostik für das Schneiden  
mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.  
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler  
Material- und Datenfluß in einer flexiblen  
Blechbearbeitungszelle  
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake  
Entwicklung eines rechnergestützten  
Diagnosesystems für automatisierte  
Montagezellen  
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel  
Optimierung der Werkzeugbereitstellung  
durch rechnergestützte  
Arbeitsfolgenbestimmung  
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller  
Modellierung und Einsatz von  
Softwaresystemen für rechnergeführte  
Montagezellen  
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende  
Untersuchungen zum Biegeumforme mit  
elastischer Matrize  
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid  
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten  
von Keramikguß mit Industrierobotern  
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.  
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer  
Multiprozessorsteuerung für  
kooperierende Industrieroboter in  
Montagezellen  
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer  
Entwicklung problemspezifischer  
Verfahrensketten in der Montage  
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr  
Beitrag zur optimalen  
Verbindungstechnik in der  
Oberflächenmontage (SMT)  
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief  
Untersuchungen zur Verfahrensfolge  
Laserstrahlschneiden und -schweißen  
in der Rohkarosseriefertigung  
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.  
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim  
Rechnerunterstützte Optimierung  
von Materialflußstrukturen in der  
Elektronikmontage durch Simulation  
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller  
CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von  
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen  
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.  
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer  
Integrierte Informationsverarbeitung  
bei der Montageplanung  
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann  
Entwicklung einer  
CAD/CAM-Prozesskette für die  
Herstellung von Blechbiegeteilen  
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann  
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden  
und -schweißen: Prozeßführung und  
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-  
beitung von Blechformteilen  
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.  
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel  
Flexible Werkstattsteuerung mit  
objektorientierten Softwarestrukturen  
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch  
Planungs- und Steuerungswerkzeuge  
zur impliziten Geräteprogrammierung  
in Roboterzellen  
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther  
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-  
kationsverhaltens von Automatisierungs-  
geräten in flexiblen Produktionszellen  
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless  
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik  
in der Strahlführung einer  
CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.  
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel  
Entwicklung und Einsatz eines Simula-  
tionsverfahrens für operative und  
strategische Probleme der  
Produktionsplanung und -steuerung  
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.  
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann  
Operatives Fertigungscontrolling durch  
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-  
tungsabläufe in der Elektronikfertigung  
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.  
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra  
Entwicklung eines benutzerorientierten  
Werkstattprogrammiersystems für das  
Laserstrahlschneiden  
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.  
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels  
Modellierung und Optimierung von  
Montageanlagen in einem integrierten  
Simulationssystem  
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.  
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel  
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-  
der Durchgangslöcher  
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.  
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz  
Oberflächenfeinbearbeitung  
keramischer Werkstoffe mit  
XeCl-Excimerlaserstrahlung  
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.  
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp  
Rechnerunterstützung bei Test und  
Schulung an Steuerungssoftware von  
SMD-Bestücklinien  
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch  
Wissensbasierte Unterstützung der  
Angebotsbearbeitung in der  
Investitionsgüterindustrie  
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp  
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim  
Schneiden mit einem gepulsten  
Nd:YAG-Laser  
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel  
Optische 3D-Konturerfassung und  
on-line Biegewinkelmessung mit  
dem Lichtschnittverfahren  
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt  
Modulares Planungssystem zur  
Optimierung der Elektronikfertigung  
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner  
Adaptive Diagnose in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann  
Beitrag zur automatisierten  
Handhabungsplanung komplexer  
Blechbiegeteile  
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf  
Zielkostenorientierte Montageplanung  
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher  
Konzept zur rechnerintegrierten  
Materialversorgung in flexiblen  
Fertigungssystemen  
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska  
Wissensbasierte Analyse und  
Klassifizierung von Blechteilen  
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke  
Integrierte Entwicklung neuer  
Produkt- und Produktionstechnologien  
für räumliche spritzgegossene  
Schaltungsträger (3-D MID)  
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller  
Sensorplanung und schnelle  
Sensorregelung für Industrieroboter  
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie  
Zeitbehandlung und  
Multimedia-Unterstützung in  
Feldkommunikationssystemen  
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.  
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel  
Reengineering in der Elektro- und  
Elektronikindustrie  
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn  
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung  
mit Excimerlasern - Systemkomponenten  
und Verfahrensoptimierungen  
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth  
Laserstrahlhartlöten mit  
Zweistrahlschweißtechnik  
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr  
Steuerung und Sensordatenintegration  
für flexible Fertigungszellen mit  
kooperierenden Robotern  
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer  
Berührungslose Formgebung mit  
Laserstrahlung  
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz  
Fertigungsqualität beim  
3D-Laserstrahlschweißen von  
Blechformteilen  
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs  
Integration elektromechanischer  
CA-Anwendungen über einem  
STEP-Produktmodell  
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm  
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung  
in der Elektronikproduktion  
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand  
Prozesse und Systeme zur Bestückung  
räumlicher elektronischer Baugruppen  
(3D-MID)  
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf  
Regelung der Laserstrahlleistung und  
der Fokusparameter einer  
CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser  
Modulares Informationsmanagement  
in der integrierten Produkt- und  
Prozeßplanung  
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl  
Integriertes Automatisierungskonzept  
für den flexiblen Materialfluß in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto  
Transiente Prozesse beim  
Laserstrahlschweißen  
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl  
Erweiterte Informationsbereitstellung  
an offenen CNC-Steuerungen zur  
Prozeß- und Programoptimierung  
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf  
Verbesserte Prozeßführung und  
Prozeßplanung zur Leistungs- und  
Qualitätssteigerung beim  
Spulenwickeln  
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes  
Technologieorientierte Bahnplanung  
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung  
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus  
Laserstrahlumformen von Profilen  
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer  
Adaptive Strahlführungen für  
CO<sub>2</sub>-Laseranlagen  
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber  
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler  
Schraubstationen in der  
automatisierten Montage  
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf  
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen  
in der Umformtechnik  
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke  
Integrierte Planung und Konstruktion  
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung  
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller  
Automatisierte Demontagesysteme  
und recyclinggerechte Produktgestaltung  
elektronischer Baugruppen  
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meißner  
Kaltmassivumformung metallischer  
Kleinstteile - Werkstoffverhalten,  
Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung  
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher  
Prozeß- und Systemtechnik zum  
Laserstrahl-Mikroschweißen  
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind  
Zerstörungsfreie Ermittlung mechani-  
scher Eigenschaften von Feinblechen mit  
dem Wirbelstromverfahren  
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard  
Qualitätssteigerung in der  
Elektronikproduktion durch  
Optimierung der Prozeßführung  
beim Löten komplexer Baugruppen  
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh  
Methodische Einbindung der Simulation  
in die betrieblichen Planungs- und  
Entscheidungsabläufe  
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn  
Meßeinrichtung zur Untersuchung  
der Wirkflächenreibung bei umformtech-  
nischen Prozessen  
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert  
Regelung der Fokusslage beim Schweißen  
mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern unter  
Einsatz von adaptiven Optiken  
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo  
Development and Implementation of  
Hierarchical Control Structures of  
Flexible Production Systems Using High  
Level Petri Nets  
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt  
Effizienzsteigerung bei Demontage  
und Recycling durch flexible  
Demontagetechologien und optimierte  
Produktgestaltung  
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz  
Modelle und effiziente Modellbildung  
zur Qualitätssicherung in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs  
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau  
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals  
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn  
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger  
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher  
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet  
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart  
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans  
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler  
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker  
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein  
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger  
Herstellungs- und Prüfverfahren für  
thermoplastische Schaltungsträger  
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach  
Beitrag zur rechnerunterstützten  
verursachungsgerechten  
Angebotskalkulation von Blechteilen  
mit Hilfe wissensbasierter Methoden  
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach  
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung  
der Anschlußgeometrie elektronischer  
SMT-Bauelemente  
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk  
Simulationsbasierte  
Lebensdauervorhersage für Werkzeuge  
der Kaltmassivumformung  
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl  
Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und  
Anlagenplanung  
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel  
Ermüdungsbruchversagen  
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle  
in der Kaltmassivumformung  
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert  
Simulationsgestützte Prozessauslegung  
für das Innenhochdruck-Umformen  
von Blechpaaren  
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.  
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer  
Modulares Planungswerkzeug zum  
Produktionsmanagement in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-139-3.  
Band 111: Jürgen Göhringer  
Integrierte Telediagnose via Internet  
zum effizienten Service von  
Produktionssystemen  
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-147-4.

Band 105: Thomas Hennige  
Flexible Formgebung von Blechen  
durch Laserstrahlumformen  
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel  
Wissensbasierte Methoden für die  
rechnergestützte Charakterisierung  
und Bewertung innovativer  
Fertigungsprozesse  
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel  
Kommunikationstechnische Integration  
der Prozeßebene in Produktionssysteme  
durch Middleware-Frameworks  
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter  
Verfügbarkeitssteigerung von  
Werkzeugmaschinen durch Einsatz  
mechatronischer Sensorlösungen  
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli  
Integration lokaler CAP-Systeme in  
einen globalen Fertigungsdatenverbund  
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller  
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -  
Prozeßparameter und Modelle zur  
Aktorkonstruktion  
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer  
Integrierte Telediagnose via Internet  
zum effizienten Service von  
Produktionssystemen  
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein  
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-  
tion neuer Bauelementetechnologien in  
die Flachbaugruppenfertigung  
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger  
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten  
alternativer Elektroniklote in der  
Oberflächenmontage (SMT)  
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber  
Justieren vormontierter Systeme mit dem  
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren  
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi  
Analyse und Optimierung von Montage-  
systemen in der Elektronikproduktion  
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein  
Laserstrahlumformen von  
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung  
der Mikrostruktur und  
der mechanischen Eigenschaften  
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi  
Ein informationslogistisches  
Architekturkonzept zur Akquisition  
simulationsrelevanter Daten  
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch  
Rationalisierung und ergonomische  
Optimierung im Innenausbau durch  
den Einsatz moderner  
Automatisierungstechnik  
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt  
Prozeßregelung für das Laserstrahl-  
Punktschweißen in der Elektronikpro-  
duktion  
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Fließpressen metallischer Kleinstteile  
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche  
Methoden zur technologieorientierten  
Programmierung für  
die 3D-Lasermikrobearbeitung  
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel  
Prozeßkontrolle beim  
Laserstrahl-Mikroschweißen  
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel  
Prozeßkontrolle und -steuerung beim  
Laserstrahlschweißen mit den Methoden  
der nichtlinearen Dynamik  
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer  
Laserstrahlunterstützte Erzeugung  
metallischer Leiterstrukturen auf  
Thermoplastsubstraten für die  
MID-Technik  
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein  
Qualität laserstrahl-gefügter  
Mikroverbindungen elektronischer  
Kontakte  
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium  
für Komponenten der Optoelektronik  
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich  
Simultanes Löten von Anschlußkontak-  
ten elektronischer Bauelemente mit  
Diodenlaserstrahlung  
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann  
Erweiterung der Formgebungsgrenzen  
beim Umformen von  
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-  
satz prozessangepasster Platinen  
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch  
3 - D MID Technologie in der  
Automobilelektronik  
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl  
Fertigungsqualität und Umformbarkeit  
laserstrahlgeschweißter Formplatinen  
aus Aluminiumlegierungen  
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk  
Entwicklung eines konfigurierbaren  
Steuerungssystems für die flexible  
Sensorführung von Industrierobotern  
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck  
Neue Sensorik und Aktorik für  
Bearbeitungsköpfe zum  
Laserstrahlschweißen  
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis  
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-  
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-  
men, Trennen und Laserstrahlschweißen  
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und  
multimediale Präsentation  
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner  
Technische Umsetzung produktbezoge-  
ner Instrumente der Umweltpolitik bei  
Elektro- und Elektronikgeräten  
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier  
Strategien für einen produktorientierten  
Einsatz räumlicher spritzgegossener  
Schaltungsträger (3-D MID)  
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich  
Kostensimulation - Simulationsbasierte  
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer  
Produktionssysteme  
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny  
Innenhochdruck-Umformen von Blechen  
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-  
rungen bei erhöhter Temperatur  
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha  
Flexible Montageautomatisierung zur  
Komplettmontage flächenhafter Produkt-  
strukturen durch kooperierende  
Industrieroboter  
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth  
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und  
Verbindungstechnik für mechatronische  
Baugruppen  
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph  
Durchgängige simulationsgestützte  
Planung von Fertigungseinrichtungen der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah  
Simulationsbasierte Bestimmung der  
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das  
Blechbiegen  
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein  
Scherschneiden und Biegen metallischer  
Kleinstteile - Materialeinfluss und  
Materialverhalten  
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff  
Excimerlaserstrahlbiegen dünner  
metallischer Folien mit homogener  
Lichtlinie  
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach  
Rechnergestützte Anpassung von  
Laserstrahlschneidbahnen  
an Bauteilabweichungen  
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl  
System- und Prozesstechnik für das  
simultane Löten mit Diodenlaserstrah-  
lung von elektronischen Bauelementen  
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker  
Tribologische Eigenschaften keramischer  
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer  
Oberflächenendbearbeitung mittels  
Excimerlaserstrahlung  
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger  
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik  
durch innovative maschinenbauliche und  
regelungstechnische Ansätze  
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama  
Effizienzsteigerung in der Montage durch  
marktorientierte Montagestrukturen und  
erweiterte Mitarbeiterkompetenz  
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm  
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-  
wicklung von Konzepten und Methoden  
für die rechnerunterstützte Modellierung  
und Optimierung von komplexen  
Aktorsystemen in der Mikrotechnik  
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini  
Wirkmedienbasierte Blechumformung:  
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss  
von Werkstoff und Bauteilgeometrie  
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein  
Entwurf hochdynamischer Sensor- und  
Regelsysteme für die adaptive  
Laserbearbeitung  
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer  
Entwicklung prozessüberwachender  
Regelkreise für flexible  
Formgebungsprozesse  
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer  
Massivumformen metallischer Kleinst-  
teile bei erhöhter Prozesstemperatur  
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann  
Strategien zur nachhaltigen Optimierung  
von Qualität und Zuverlässigkeit in  
der Fertigung hochintegrierter  
Flachbaugruppen  
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock  
Biegeumformen mit  
Elastomerwerkzeugen Modellierung,  
Prozessauslegung und Abgrenzung des  
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens  
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling  
Qualifizierung einer Prozesskette zum  
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile  
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler  
Großserientauglichkeit trockenschmier-  
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im  
Presswerk Grundlegende Untersuchun-  
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-  
ten und Bauteilversuche  
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto  
Solution Approaches for Planning of  
Assembly Systems in Three-Dimensional  
Virtual Environments  
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger  
Hochleistungssysteme für die Fertigung  
elektronischer Baugruppen auf der Basis  
flexibler Schaltungsträger  
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz  
Laserunterstütztes Biegen höchstfester  
Mehrphasenstähle  
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl  
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des  
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-  
Umformen von Blechen  
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus  
Plattformstrategien - Realisierung  
einer varianz- und kostenoptimierten  
Wertschöpfung  
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser  
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-  
lyse und -modellierung  
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-  
turen mit Aluminiumschaumkern  
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos  
Mechatronische Ansätze zur Optimie-  
rung von Vorschubachsen  
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark  
Auslegung und Fertigung hochpräziser  
Faser-Kollimator-Arrays  
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou  
Kollaboratives Engineering Management  
in der integrierten virtuellen Entwicklung  
der Anlagen für die Elektronikproduktion  
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser  
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen  
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer  
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle  
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz  
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall  
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl  
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik  
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert  
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung  
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller  
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile  
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann  
Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen  
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick  
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen  
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi  
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods  
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp  
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen  
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel  
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter  
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl  
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse  
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo  
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)  
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang  
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion  
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß  
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere  
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker  
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten  
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer  
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse  
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht  
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge  
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß  
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen  
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch  
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten  
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber  
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme  
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick  
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen  
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht  
Werkstoffcharakterisierung und  
Prozessauslegung für die wirkmedienba-  
sierte Doppelblech-Umformung von  
Magnesiumlegierungen  
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl  
Stochastische Simulation zur Werkzeug-  
lebensdaueroptimierung und Präzisions-  
fertigung in der Kaltmassivumformung  
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi  
Innenhochdruck-Umformen verstärkter  
Blech-Rahmenstrukturen  
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff  
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen  
beim Presshärten des höchstfesten  
Vergütungsstahls 22MnB5  
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez  
Simulationsgestützte Methoden zur  
effizienten Gestaltung von Lötprozessen  
in der Elektronikproduktion  
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze  
Automatisierte Montage von makrome-  
chatronischen Modulen zur flexiblen  
Integration in hybride  
Pkw-Bordnetzsysteme  
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter  
Grundlegende Untersuchungen zur  
experimentellen Ermittlung und zur  
Modellierung von Fließortkurven bei  
erhöhten Temperaturen  
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl  
Entwicklung, angepasste Herstellungs-  
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-  
rung von einsetzgerechten elektroni-  
schen Baugruppen  
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter  
Flüssigkeitsfilmen  
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera  
Prozesstechnische Untersuchungen  
zum Rührreibschweißen metallischer  
Werkstoffe  
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler  
Beschreibung und Modellierung  
des Werkstoffverhaltens von  
presshärtbaren Bor-Manganstählen  
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl  
Untersuchungen zur Erhöhung der  
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-  
druck-Umformung von flächigen Halb-  
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten  
Laserstrahlfügeoperationen  
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller  
Modellierung eines nachfrageorientierten  
Produktionskonzeptes für mobile  
Telekommunikationsgeräte  
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf  
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-  
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-  
beitsprozessen in der Elektronikproduk-  
tion  
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich  
Sensoriken zur Schwerpunktlagebestim-  
mung der optischen Prozessemissionen  
beim Laserstrahliefschweißen  
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf  
Entwicklung eines agentenbasierten  
Steuerungssystems zur  
Materialflussorganisation im  
wandelbaren Produktionsumfeld  
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.  
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster  
Laserdurchstrahlschweißen  
transparenter Polymerbauteile  
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler  
Rührreibschweißen von walzplattiertem  
Halbzeug und Aluminiumblech zur  
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-  
Sandwich-Verbundstrukturen  
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt  
Seriennahe Auslegung von Aluminium  
Tailored Heat Treated Blanks  
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann  
Qualitative und quantitative Bewertung  
der Crashtauglichkeit von höchstfesten  
Stählen  
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl  
Größeneffekte bei Biegeprozessen-  
Entwicklung einer Methodik zur  
Identifikation und Quantifizierung  
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud  
Effiziente Prozesskettenauslegung für das  
Umformen lokal wärmebehandelter und  
geschweißter Aluminiumbleche  
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann  
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-  
schweißen thermoplastischer Kunststoffe  
LFT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Kontaktzustand zwischen Werkstück  
und Werkzeug bei umformtechnischen  
Prozessen unter tribologischen  
Gesichtspunkten  
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer  
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation  
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner  
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil  
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler  
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen  
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti  
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren  
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke  
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren  
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke  
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte  
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam  
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery  
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch  
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion  
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald  
Quasi-isothermes Laserstrahlintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK  
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan  
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern  
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner  
Beanspruchungsangepasste  
Kaltmassivumformwerkzeuge durch  
lokal optimierte Werkzeugoberflächen  
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber  
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-  
sagens von Punktschweißverbindungen  
bei höchstfesten Stahlgüten  
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser  
Ein Ansatz zur Herstellung von  
pressgehärteten Karosseriekomponenten  
mit maßgeschneiderten mechanischen  
Eigenschaften: Temperierte Umform-  
werkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimu-  
lation und funktionale Untersuchung  
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak  
Material Adapted Design of Cold Forging  
Tools Exemplified by Powder  
Metallurgical Tool Steels and Ceramics  
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz  
Beschleunigte Simulation des  
Laserstrahlumformens von  
Aluminiumblechen  
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm  
Prozessanalyse und -überwachung des  
Laserstrahlhartlötens mittels optischer  
Sensorik  
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kupper  
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-  
stoffen - Umformverhalten und Grenzen  
der Biegebarkeit  
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß  
Modellbasierte Prozessauslegung für  
die Kaltmassivumformung unter  
Brücksichtigung der Werkzeug- und  
Pressenauffederung  
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth  
Analyse und Optimierung der Entwick-  
lung und Zuverlässigkeit räumlicher  
Schaltungsträger (3D-MID)  
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler  
Ganzheitliche Automatisierung  
mechatronischer Systeme in der Medizin  
am Beispiel Strahlentherapie  
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert  
Automatisiertes Laserstrahllöten  
und -reparaturlöten elektronischer  
Baugruppen  
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr  
Analyse und Beschreibung des  
mechanischen Werkstoffverhaltens  
von presshärtbaren Bor-Manganstählen  
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler  
Prozessdynamik beim  
Laserstrahlschweißen verzinkter  
Stahlbleche im Überlappstoß  
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger  
Seriennahe Auslegung der Prozesskette  
zur wärmeunterstützten Umformung  
von Aluminiumblechwerkstoffen  
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel  
Herstellung prozessangepasster  
Halbzeuge mit variabler Blechdicke  
durch die Anwendung von Verfahren  
der Blechmassivumformung  
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade  
In-vivo Monitoring of Epithelium  
Vessel and Capillary Density for the  
Application of Detection of Clinical  
Shock and Early Signs of Cancer Develop-  
ment  
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse  
Entwicklung und Qualifizierung eines  
Schneidclinchverfahrens  
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz  
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz  
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung  
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl  
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen  
technischen Diagnose  
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm  
Einfluss von Chargenschwankungen  
auf die Verarbeitungsgrenzen von  
Stahlwerkstoffen  
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel  
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau  
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann  
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk  
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin  
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen  
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht  
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen  
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel  
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium  
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen  
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung  
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil  
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren  
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl  
Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik  
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht  
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen  
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch  
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles  
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl  
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen  
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder  
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen  
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt  
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger  
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck  
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation  
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.  
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller  
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen  
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke  
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren  
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner  
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium  
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock  
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition  
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter  
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode  
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl  
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung  
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke  
Transiente physikalische Mechanismen  
bei der Laserablation von dünnen  
Metallschichten  
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz  
Community-basierte Optimierung des  
Anlagenengineerings  
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen  
Qualifizierung des Potentials von  
Verfestigungseffekten zur Erweiterung  
des Umformvermögens aushärtbarer  
Aluminiumlegierungen  
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert  
Erweiterung und Verbesserung von Ver-  
suchs- und Auswertetechniken für die  
Bestimmung von Grenzformänderungs-  
kurven  
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus  
Erstellung eines Werkstofforientierten  
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung  
des Formgebungsvermögens von Alumi-  
niumlegierungen unter Anwendung einer  
zwischeneschalteten Wärmebehandlung  
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec  
Untersuchungen zur Herstellung von  
funktionsoptimierten Bauteilen im  
partiellen Presshärtprozess mittels lokal  
unterschiedlich temperierter Werkzeuge  
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Verschleißcharakterisierung beschichte-  
ter Kaltmassivumformwerkzeuge  
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela  
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-  
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-  
fungsoptimierung und Fehlerdetektion  
an magnetischen Aktoren  
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland  
Entwicklung einer Methode zur Prognose  
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen  
für das direkte Presshärten  
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm  
Strukturierte additive Metallisierung  
durch kaltaktives  
Atmosphärendruckplasma  
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner  
Herstellung beanspruchungsangepasster  
Aluminiumblechhalbzeuge durch  
eine maßgeschneiderte Variation der  
Abkühlgeschwindigkeit nach  
Lösungsglühen  
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas  
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit  
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim  
Kaltfließpressen  
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum  
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles  
for the Generation of Thin Conductive  
Layers on Transparent Substrates  
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider  
Umformtechnische Herstellung  
dünnwandiger Funktionsbauteile  
aus Feinblech durch Verfahren der  
Blechmassivumformung  
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof  
Sematische Modellierung automatisierter  
Produktionssysteme zur Verbesserung  
der IT-Integration zwischen Anlagen-  
Engineering und Steuerungsebene  
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller  
Erarbeitung von Grundlagen zur  
Abbildung des tribologischen Systems  
in der Umformsimulation  
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler  
Einsatz technologischer Versuche zur  
Erweiterung der Versagensvorhersage  
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten  
Stählen  
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig  
Integration des Systemverhaltens von  
Automobil-Hochvoltleitungen in die  
virtuelle Absicherung durch  
strukturmechanische Simulation  
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl  
Automatisierte Datenerfassung für disk-  
ret ereignisorientierte Simulationen in  
der energieflexiblen Fabrik  
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold  
Mikroschockwellenumformung mittels  
ultrakurzer Laserpulse  
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger  
Laserstrahlschweißen thermoplastischer  
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit  
spezifischem Zusatzdraht  
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl  
Methods-Energy Measurement - Eine  
Methode zur Energieplanung für  
Fügeverfahren im Karosseriebau  
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow  
Erweiterung des Unternehmenscontrol-  
lings um die Dimension Energie  
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Herstellung zyklisch-symmetrischer  
Bauteile mit Nebenformelementen durch  
Blechmassivumformung  
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann  
Beitrag zur Untersuchung der  
tribologischen Bedingungen in der  
Blechmassivumformung - Bereitstellung  
von tribologischen Modellversuchen und  
Realisierung von Tailored Surfaces  
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner  
Methodik zur virtuellen Absicherung  
der formgebenden Operation des  
Nasspressprozesses von  
Gelege-Mehrschichtverbunden  
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein  
Der grundoperationsspezifische  
Mindestenergiebedarf als Referenzwert  
zur Bewertung der Energieeffizienz in  
der Produktion  
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos  
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter  
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie  
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis  
Thermisch unterstützte Umformung von  
Aluminiumblechen  
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel  
Flexible Systems for Permanent  
Magnet Assembly and Magnetic Rotor  
Measurement / Flexible Systeme zur  
Montage von Permanentmagneten und  
zur Messung magnetischer Rotoren  
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis  
Schädigungs- und Versagensverhalten  
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter  
Biegebeanspruchung  
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Prozessverhalten von Silizium als  
Werkzeugwerkstoff für das  
Mikroscherschneiden metallischer Folien  
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck  
Zeitliche Pulsformung in der  
Lasermikromaterialbearbeitung –  
Grundlegende Untersuchungen und  
Anwendungen  
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto  
Mechatronic Simulation Approach for  
the Process Planning of Energy-Efficient  
Handling Systems  
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel  
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik  
für verteilte Wicklungen im  
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe  
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić  
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung  
montageführender Werkerinformations-  
systeme simultan zum  
Produktentstehungsprozess  
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus  
Hochpräzise adaptive Steuerung und  
Regelung robotergeführter Prozesse  
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer  
Erzeugung von thermoplastischen  
Werkstoffverbunden mittels simultanem,  
intensitätsselektivem  
Laserstrahlschmelzen  
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger  
Untersuchung einer thermisch unter-  
stützten Fertigungskette zur Herstellung  
umgeformter Bauteile aus der höherfes-  
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020  
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin  
Design of Manufacturing Processes for  
the Cold Bulk Forming of Small Metal  
Components from Metal Strip  
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy  
Experimental Investigation, Modeling,  
Simulation and Optimization of Molded  
Interconnect Devices (MID) Based on  
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-  
mentelle Untersuchung, Modellierung,  
Simulation und Optimierung von Molded  
Interconnect Devices (MID) basierend  
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)  
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr  
Automatisierte Kontaktierungsverfahren  
für flachleiterbasierte  
Pkw-Bordnetzsysteme  
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner  
Charakterisierung und Modellierung  
des spannungszustandsabhängigen  
Werkstoffverhaltens der Magnesium-  
legierung AZ31B für die numerische  
Prozessauslegung  
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar  
A reliable methodology to deduce  
thermo-mechanical flow behaviour of  
hot stamping steels  
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler  
Steuerung von Blechmassivumformpro-  
zessen durch maßgeschneiderte  
tribologische Systeme  
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller  
Untersuchung des kombinierten Trenn-  
und Umformprozesses beim Fügen art-  
ungleicher Werkstoffe mittels  
Schneidclinchverfahren  
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.  
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle  
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-  
technologie für integrierte Leistungs-  
module in harschen Umgebungs-  
bedingungen  
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc  
Eine Simulationsmethode für das  
3-Rollen-Schubbiegen  
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer  
Arbeitsraumüberwachung und autonome  
Bahnplanung für ein sicheres und  
flexibles Roboter-Assistenzsystem  
in der Fertigung  
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer  
Der Einfluss von Poren auf die  
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen  
von Hochleistungs-Leuchtdioden  
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.  
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design

KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz  
Erarbeitung einer Methodik zur  
semiempirischen Ermittlung der  
Umwandlungskinetik durchhärtender  
Wälzlagerstähle für die Wärme-  
behandlungssimulation  
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl  
Modellbasierte Prozesskettenabbildung  
rührreibgeschweißter Aluminium-  
halbzeuge zur umformtechnischen  
Herstellung höchstfester Leichtbau-  
strukturteile  
LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner  
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur  
Lastflexibilisierung durch intelligente  
elektrische Wärmespeicher  
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm  
Verbesserung des Umformverhaltens von  
mehrlagigen Aluminiumblechwerk-  
stoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge  
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer  
Grundsatzuntersuchungen, mathemati-  
sche Modellierung und Ableitung einer  
Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe  
nach dem Spinnenbeinprinzip  
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp  
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung  
transienter optischer Materialeigen-  
schaften bei der Ultrakurzpuls-Laser-  
materialbearbeitung  
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz  
Intralogistics Execution System mit  
integrierten autonomen, servicebasierten  
Transportentitäten  
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner  
Strategien der Produktindividualisierung  
in der produzierenden Industrie im Kon-  
text der Digitalisierung  
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger  
Ein Ansatz zur CAD-integrierten  
muskuloskeletalen Analyse der Mensch-  
Maschine-Interaktion  
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn  
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirekt-  
strukturierter mechatronisch integrierter  
Baugruppen (LDS-MID)  
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab.  
2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann  
Modellbasierte Zustands- und Prozess-  
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-  
sischer Systeme  
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.  
2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Prozess- und Werkstoffverhalten bei  
schwingungsüberlagerter Umformung  
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab.  
2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier  
Ganzheitliches ontologiebasiertes  
Wissensmanagement im Umfeld der  
industriellen Produktion  
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab.  
2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr  
Datenerfassung für die Anwendung  
lernender Algorithmen bei der Herstel-  
lung von Blechformteilen  
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab.  
2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener  
Kaltfließpressen von gerad- und schräg-  
verzahnten Zahnrädern  
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng  
Numerische, analytische und empirische  
Modellierung des Heißscrimpprozesses  
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl  
Erarbeitung eines Prozessverständnisses  
zur Verbesserung der tribologischen  
Bedingungen beim Presshärten  
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti  
Evaluation of failure behaviour  
of sheet metals  
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Herstellung hochfester Aluminiumblech-  
bauteile in einem kombinierten Umform-  
und Abschreckprozess  
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner  
Automatische Bahnplanung für die Auf-  
teilung von Prozessbewegungen in syn-  
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-  
gungen mittels Multi-Roboter-Systemen  
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter  
Qualifizierung des Montageprozesses  
hochminiaturisierter elektronischer Bau-  
elemente  
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser  
Ressourcenorientierte Auftragsregelung  
in einer hybriden Produktion mittels  
betriebsbegleitender Simulation  
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend  
Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen  
LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder  
2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert  
Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung  
KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander  
Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten  
KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4

## Abstract

The tribological requirements are relatively high for plastic components in energy-efficient systems due to the demand of low friction and good wear protection. Numerous established test methods are not suitable for coated plastics because of the very small layer thickness in combination with a comparatively soft polymer as a substrate material.

Based on an approach which is generally applicable to coated systems, in this presented work test methods are selected, adapted and developed which are particularly suited for the characterization of thin hard coatings on soft substrates. The Young's modulus of the coatings is evaluated by a combined method of instrumented indentation test and numerical calculation. By using regression models instead of further FE-simulations it is possible to speed up the subsequent application of the method.

A modified scratch test creates multi-axial stress states which are comprehended by FE-simulations. The mechanical limits of the layer-substrate composite are determined and the effects of parameter modifications are illustrated.

The impact of thin hard layers on the stiffness and the natural frequencies of the whole component is analytically examined and experimentally tested.

The tribological and functional potential for the application on coated roller bearing cages is demonstrated for hard and tribological relevant coatings and compared with common cage materials.

Die tribologischen Anforderungen an Kunststoffbauteile in energieeffizienten Systemen mit optimierter Reibung und Verschleißschutz sind hoch. Durch die geringen Schichtdicken in Kombination mit dem verhältnismäßig weichen Kunststoff als Substratwerkstoff sind zahlreiche etablierte Charakterisierungsverfahren nicht für solche Bauteile geeignet.

Basierend auf einer Vorgehensweise zur Festigkeitsauslegung, werden in der vorgestellten Forschungsarbeit speziell zur Charakterisierung harter Dünnschichten auf weichen Substratmaterialien geeignete Prüfmethode ausgewählt, angepasst und entwickelt. Hierfür wird der Schicht-Elastizitätsmodul mit einem kombinierten Verfahren aus Indentierungen und numerischen Berechnungen ermittelt. Regressionsmodelle ersetzen für zukünftige Anwendungen die FE-Simulationen und beschleunigen weitere Auswertungen.

Ein modifizierter Ritztest erzeugt gezielt mehrachsige Spannungszustände, die mittels FE-Simulationen nachgebildet werden. So werden die mechanischen Grenzen des Schicht-Substrat-Verbundes ermittelt und die Auswirkungen von Parametermodifikationen illustriert. Der Einfluss von dünnen harten Schichten auf die Steifigkeit und die Eigenfrequenzen des gesamten Bauteils wird analytisch und experimentell untersucht.

Für das Anwendungsgebiet der beschichteten Wälzlagerkäfige werden die tribologischen und funktionalen Potentiale für harte und tribologisch relevante Schichten aufgezeigt und gängigen Käfigwerkstoffen gegenübergestellt.

