

Karlsruher Schriftenreihe
Fahrzeugsystemtechnik

Felix Weber

Beitrag zur Entwicklung von Konstantfluspumpen für Frischbeton unter genauerer Betrachtung der Dickstoffventile



Scientific
Publishing

Felix Weber

**Beitrag zur Entwicklung von Konstantfluspumpen
für Frischbeton unter genauerer Betrachtung
der Dickstoffventile**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
Band 84**

Herausgeber

FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den Teilinstituten Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbautechnologie und Mobile Arbeitsmaschinen.

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

Beitrag zur Entwicklung von Konstantflusspumpen für Frischbeton unter genauerer Betrachtung der Dickstoffventile

von
Felix Weber

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Beitrag zur Entwicklung von Konstantflusspumpen für
Frischbeton unter genauerer Betrachtung der Dickstoffventile

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation
von M.Sc. Felix Weber

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Mai 2020
Erster Gutachter: Univ. Prof. Dr.-Ing Marcus Geimer
Zweiter Gutachter: Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2021 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-6058
ISBN 978-3-7315-1037-6
DOI 10.5445/KSP/1000122506

Vorwort des Herausgebers

Beton ist ein Werkstoff, der heute aus dem Gebäudebau nicht mehr wegzudenken ist. Auf der Baustelle wird er heute häufig in flüssiger Form als Frischbeton verarbeitet. Das Pumpen dieses Dickstoffs stellt nach wie vor eine Herausforderung dar, da bisher keine Frischbetonpumpe am Markt verfügbar ist, die einen konstanten Förderstrom liefern kann. Heutige Frischbetonpumpen besitzen zwei Förderzylinder, die im Gegentakt arbeiten. Sie haben eine Förderlücke, bei der das geförderte Material immer wieder zum Stehen kommt. Hierdurch kommt es zu energetischen Verlusten und Problemen, wie z.B. hohen Maschinenbelastungen oder einer schlechten Bedienqualität.

Die Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik widmet sich Themen der Antriebstechnik und dem effizienten Betrieb von Fahrzeugen. Für die Fahrzeuggattungen Pkw, Nfz, Mobile Arbeitsmaschinen und Bahnfahrzeuge werden in der Schriftenreihe Forschungsarbeiten vorgestellt, die Fahrzeugtechnik auf vier Ebenen beleuchten: das Fahrzeug als komplexes mechatrisches System, die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, das Fahrzeug im Verkehr und Infrastruktur sowie das Fahrzeug in Gesellschaft und Umwelt.

Die Arbeit von Herrn Weber greift im vorliegenden Band 84 das Thema der Konstantstromförderung von Dickstoffen am Beispiel von Betonpumpen auf. Ausgehend von den grundlegenden Anforderungen an die Frischbetonförderung entwickelt er eine Pumpe, für die er mit Hilfe der Simulation eine Schwankung des Förderstroms von nur noch $\pm 2\%$ gegenüber $-100\% / +50\%$ bei herkömmlichen Betonpumpen nachweist. Der Fokus seiner Arbeit liegt dabei auf der Entwicklung eines Schaltventils, mit dessen Hilfe er die Umsteuerung so gestalten kann, dass die geforderte Genauigkeit erreicht wird. Neben der Entwicklung der Pumpe liefert die Arbeit umfangreiche Grundlagen in der Ventiltechnik für zähflüssige Medien mit Feststoffanteilen.

Karlsruhe, im Februar 2019

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Kurzfassung

Auf nahezu jeder Baustelle sind mobile Frischbetonpumpen unterschiedlicher Bauart anzutreffen. Einen Nachteil haben alle Bauarten gemein: eine Förderlücke. Der diskontinuierliche Förderstrom hat negative Folgen für die Bedienqualität, die Maschinenbelastung und den Maschinenwirkungsgrad des Systems Mensch-Maschine-Fördermedium.

In dieser Arbeit wird eine Vielzahl an prinzipiellen Lösungen für eine Frischbetonkonstantflusspumpe entwickelt, welche nach dem Überblendungs-Prinzip arbeiten. Bekannte, zyklisch betätigte Frischbetonventile eignen sich für das angestrebte Pumpsystem nicht. Das Frischbetonventil stellt sich damit als die eigentliche Herausforderung heraus.

Um ein neuartiges Frischbetonventil entwickeln zu können, wird das hierfür benötigte Fachwissen aufgebaut. Die Ventilfunktionen werden analysiert und somit die entscheidenden identifiziert. Die drei entscheidenden Ventilfunktionen werden mithilfe eines Prüfstands untersucht. Die mithilfe der statistischen Versuchsplanung und –auswertung ermittelten zahlreichen Kausalitäten bilden ein Optimierungsproblem. Nach dessen Lösung wird auf dem erlangten Wissen basierend exemplarisch das Zylindersegmentventil entwickelt.

Mithilfe des Zylindersegmentventils wird die bevorzugte prinzipielle Lösung ausgewählt und deren Mechanik, Hydraulik sowie Steuerung entwickelt. Durch eine Mehrdomänensimulation wird die Funktionalität des Gesamtsystems verifiziert und gebietsweise validiert.

Stichworte: Konstantflusspumpe für Frischbeton, Frischbetonventil, statistische Versuchsplanung, virtual Prototyping

Abstract

Mobile fresh-concrete pumps of different types can be found on almost every construction site. All types have one disadvantage in common: interruptions in delivery. The discontinuous output flow rate has negative consequences for the operating quality, the machine load and the machine efficiency of the human-machine conveyed material system.

In this thesis, a number of principle solutions for a fresh-concrete constant-flow pumps are developed, which work according to the cross-fade principle. Known cyclically actuated fresh-concrete valves are not suitable for the intended pumping system. The fresh-concrete valve thus turns out to be the real challenge.

In order to be able to develop a new type of fresh-concrete valve, the necessary expertise is built up. The valve functions are analysed and thus the decisive ones are identified. The three decisive valve functions are examined with the aid of a test rig. The numerous causalities determined with the help of statistical design of experiments and evaluation form an optimization problem. Once this problem has been solved, the cylinder segment valve is developed on the basis of the knowledge gained.

With the help of the cylinder segment valve, the preferred principle solution is selected and its mechanics, hydraulics and control system are developed. By means of a multidomain simulation, the functionality of the overall system is verified and partly validated.

Keywords: constant-flow pump for fresh-concrete, fresh-concrete valve, design of experiments (DOE), virtual prototyping

Danksagung

Die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Beitrag zur Entwicklung von Konstantflusspumpen für Frischbeton unter genauerer Betrachtung der Dickstoffventile“ entstand während meiner Tätigkeit in der Vorentwicklung der Putzmeister Engineering GmbH und am Institut für Fahrzeugsystemtechnik – Institutsteil Mobile Arbeitsmaschinen am Karlsruher Institut für Technologie.

Meinem „Doktorvater“ Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer möchte ich hiermit herzlich danken. Mir haben unsere zahlreichen wissenschaftlichen, konstruktiven Diskussionen sehr geholfen. Außerdem möchte ich mich für die Einbindung ins Institut, die Freiräume sowie das entgegengebrachte Vertrauen bedanken. Des Weiteren bedanke ich mich bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers für die Übernahme des Koreferats

Mein besonderer Dank gilt meinem Vorgesetzten bei der Putzmeister Engineering GmbH, Peter Mögle. Er hat sich immer sehr für mich und mein Thema eingesetzt und mich stets fachlich und persönlich unterstützt. Meinen Kollegen Dr. Knut Kasten, Tobias Huth sowie Ansgar Müller möchte ich ebenfalls danken. Sie haben mich bei der kompletten Arbeit begleitet und waren immer trotz eigener Aufgaben sehr hilfsbereit und interessiert. Ohne ein derart gutes Umfeld wäre diese Arbeit so nicht zustande gekommen.

Ein großes Dankeschön auch den zahlreichen Studenten, welche bei mir Praktika absolviert und Bachelor- und Masterarbeiten geschrieben haben. Sie haben mir in vielen Bereichen wie Beispielsweise der Durchführung aufwändiger Versuche sehr geholfen!

Doch den größten Dank möchte ich meinen Eltern aussprechen. Ihr habt mich seit Kindesalter immer in dem was ich tun wollte unterstützt ohne mich zu drängen. Das gilt auch für die Entscheidung eine Dissertation schreiben zu wollen. Von euch habe ich viele Charaktereigenschaften und Werte mit auf

den Weg bekommen, welche mich zu dem Menschen machen der ich heute bin. Meinen herzlichsten Dank für alles!

Meiner Frau Olaia Manzarbeitia Lazcano möchte ich ganz besonders danken. Du warst immer nachsichtig, wenn ich die Wochenenden in meine Dissertation investiert habe. Und wenn ich mal nicht die Motivation zum Schreiben meiner Dissertation gefunden habe hast du sie mir geliefert. Ohne dich hätte ich das nicht geschafft!

Stuttgart, März 2020

Felix Weber

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	i
Kurzfassung.....	iii
Abstract.....	v
Danksagung.....	vii
Abkürzungsverzeichnis	xiii
Symbolverzeichnis.....	xv
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Technik und Forschung.....	5
2.1 Zusammensetzung und Eigenschaften von Frischbeton	5
2.1.1 Zusammensetzung von Ortbeton und Spritzbeton.....	5
2.1.2 Frischbetoneigenschaften	8
2.2 Fördermittel	11
2.2.1 Systematik der Fördermittel	11
2.2.2 Fördermittel für Dickstoffe.....	14
2.3 Ventile	24
2.3.1 Systematik der Ventile	25
2.3.2 Ventile für Dickstoffe.....	27
2.4 Ventilfunktion: Dichtwirkung aufbauen.....	31
2.4.1 Selbstdichtung von Spalten	32
2.4.2 Durchströmung von Feststoffschüttungen und Filtern	33
2.4.3 Dichtungseffekte an Gleitringdichtungen.....	36
2.5 Ventilfunktion: Dickstoff verdrängen und Fremdkörper zerstören.	39
2.5.1 Werkstoffeigenschaften von Gestein.....	40
2.5.2 Zerstörungsmechanismen	42
3 Forschungshypothese und -fragen	45

4	Situationsanalyse und Anforderungsliste einer Konstantflusspumpe für Frischbeton.....	47
4.1	Anforderungsliste einer Konstantflusspumpe für Frischbeton	47
4.2	Fördermittel für Frischbeton	48
5	Hubkolbenpumpverfahren für Konstantflusspumpen	51
5.1	Systematik der Hubkolbenkonstantflusspumpen	51
5.2	Eignung der Verfahren für Frischbeton	55
6	Suche alternativer Lösungen einer Frischbetonkonstantflusspumpe	57
6.1	Wesenskern.....	57
6.2	Funktionsstruktur.....	59
6.3	Morphologischer Kasten und Wirkstrukturen	60
6.4	Prinzipielle Lösungen	62
6.4.1	Zweite prinzipielle Lösung.....	62
6.4.2	Fünfte prinzipielle Lösung	65
7	Lösungsauswahl und Tragweitenanalyse der prinzipiellen Lösung der Konstantflusspumpe	71
7.1	Bewertung und Auswahl der prinzipiellen Lösungen	71
7.2	Tragweitenanalyse der fünften prinzipiellen Lösung.....	73
8	Frischbetonauslassventil – Situationsanalyse und Problemeingrenzung	75
9	Frischbetonventileigenschaften	79
9.1	Ventilzustände	79
9.2	Identifikation und Analyse der entscheidenden Ventulfunktionen.....	83
9.2.1	Dichtung aufbauen	84
9.2.2	Dickstoff verdrängen und Fremdkörper überwinden.....	87
9.3	Abstraktion des Frischbetonventils.....	92
9.4	Prüfstand für Frischbetonventulfunktionen	94
9.4.1	Dichtmodul.....	95
9.4.2	Abschermodul	97

9.5	Frischbetonventilfunktion: Dichtwirkung aufbauen	99
9.5.1	Versuchsplanung	100
9.5.2	Messergebnisse und Effektdiagramme	105
9.5.3	Statistische Auswertung und Regression	110
9.5.4	Weiterführende Versuche und Beobachtungen	118
9.6	Frischbetonventilfunktion:	
	Dickstoff verdrängen und Fremdkörper abscheren	122
9.6.1	Versuchsplanung	122
9.6.2	Messergebnisse und Effektdiagramme	130
9.6.3	Statistische Auswertung und Regression	134
9.7	Das funktionsgerechte Dickstoffventil	140
9.7.1	Optimierungsproblem der Frischbetonventilfunktionen	141
9.7.2	Gestaltungsregeln zur Konstruktion eines Dickstoffventils	147
10	Frischbetonauslassventil – alternative Lösungssuche und Lösungsauswahl	149
10.1	Anforderungsliste eines Frischbetonauslassventils	149
10.2	Das Zylindersegmentventil	150
11	Funktion der Konstantflussspumpe – Entscheiden und Umsetzen	155
11.1	Mechanik	155
11.2	Bewegungsablauf und dessen Steuerung	157
11.3	Hydraulik	162
12	Virtual Prototyping	167
12.1	Modellbildung und Simulation	167
12.2	Verifikation und gebietsweise Validierung	171
12.3	Analyse der Ergebnisse	177
13	Zusammenfassung und Ausblick	183
	Literaturverzeichnis	187
	Eigene Veröffentlichungen zur Dissertation	197

Betreute studentische Abschlussarbeiten	199
Abbildungsverzeichnis.....	201
Tabellenverzeichnis.....	207
A Anhang.....	211
A.1 Anforderungsliste der Konstantflussspumpe für Frischbeton	211
A.2 Aufbau und Funktionsweise der Primär-Ventildichtung eines Schwenkrohrventils	213
A.3 Übersicht aller Wirkstrukturen der Konstantflussspumpe für Frischbeton.....	214
A.4 Frischbetonrezepturen der Versuche	215
A.5 Messschriebe zum Flüssigkeits- und Gesteinsdruck.....	216
A.6 Messschrieb zum zeitlichen Aufbau des Flüssigkeitsdrucks	217
A.7 Auswertung der Brechwahrscheinlichkeit bei vierstufigem Schnittkantenwinkel	218
A.8 Anforderungsliste des Frischbetonauslassventils	220

Abkürzungsverzeichnis

FSK	Faktorstufenkombinationen
FZ	Förderzylinder
GLRD	Gleitringdichtungen
sic	„sic erat scriptum“ (lat.); „so stand es geschrieben“. Wird im Zusammenhang mit einem Zitat verwendet, um zum Ausdruck zu bringen, dass der Rechtschreibfehler originalgetreu übernommen wurde.
VK-DBV	Vorkompressionsdruckbegrenzungsventil
VP	Versuchsplan
ZSV	Zylindersegmentventil

Symbolverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	m	Länge
$A_{P\text{ ges}}$	m^2	gesamte Partikeloberfläche
b	-	Konsistenzbeiwert von Frischbeton
b_{Spa}	m	Spaltbreite
D	m	Rohrleitungsdurchmesser
D_e	m	äquivalenter Durchmesser
$F_{\text{br, KMD}}$	N	orthogonal zum Brechzahn angreifende Brechkraft
$F_{\text{br, reib}}$	N	tangential zum Brechzahn angreifende Brechkraft
$F_{\text{br, res}}$	N	resultierende Brechkraft
$F_{\text{ver, KMD}}$	N	orthogonal zum Brechzahn angreifende Kraft zum Verschieben von Material
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
H	m	Förderhöhe
h_{Spa}	m	Spalthöhe
I_s	N/m^2	P-L-Index (korreliert mit der Druckfestigkeit)
L	m	Länge der Rohrleitung
l_{Spa}	m	Spalllänge
p_F	Pa	Anteil des Gesamtdrucks aufgrund der Fließgrenze
p_H	Pa	Anteil des Gesamtdrucks aufgrund der Förderhöhe
p_v	Pa	Anteil des Gesamtdrucks aufgrund der Viskosität
Q	m^3/s	Volumenstrom
q_A	m^3/s	Anfangsdurchflussmenge je Zeiteinheit
Q_{F1}	m^3/s	Volumenstrom des ersten Förderzylinders
Q_{F2}	m^3/s	Volumenstrom des zweiten Förderzylinders
$Q_{\text{Ü}}$	m^3/s	Volumenstrom der Überbrückereinheit
V_{ges}	m^3	gesamtes Volumen bzw. Gesamtvolumen einer Feststoffschüttung

$V_{P\text{ ges}}$	m^3	gesamtes Partikelvolumen
γ	$N\ s/m^2$	dynamische Zähigkeit eines Fluides
η	$kg/(m\ s)$	Dynamische Viskosität
ρ	kg/m^3	Dichte
ξ	-	Korrekturbeiwert der Anfangsdurchflussmenge
Δp	Pa	Druckdifferenz

1 Einleitung und Motivation

Auf heutigen Baustellen werden häufig mobile Frischbetonpumpen eingesetzt. Diese erreichen je nach Bauart Förderströme von $200 \text{ m}^3/\text{h}$ [1, S. 12], Förderhöhen bis 606 m [2, S. 57] und Förderdrücke von 220 bar [3, S. 7]. Alle Bauarten weisen eine Förderlücke auf. Förderstrom und -druck (Fördereigenschaften) sind somit zyklischen Schwankungen unterworfen. Dies wirkt sich negativ auf verschiedene Aspekte des Einsatzes aus. [4, S. 28 - 29]

Demgemäß weisen auch die am Markt vorherrschenden Pumpentypen für Frischbeton, Kolbenpumpen mit Schwenkrohrventil (z.B. S-Rohrpumpe) und Rotorpumpen [4, S. 29], eine Förderlücke auf. Abbildung 1.1 zeigt den Frischbetonförderdruck einer S-Rohrpumpe und einer Rotorpumpe über der Zeit. Die Zeiten der Förderlücken (FL) sind im unteren Diagrammbereich gekennzeichnet.

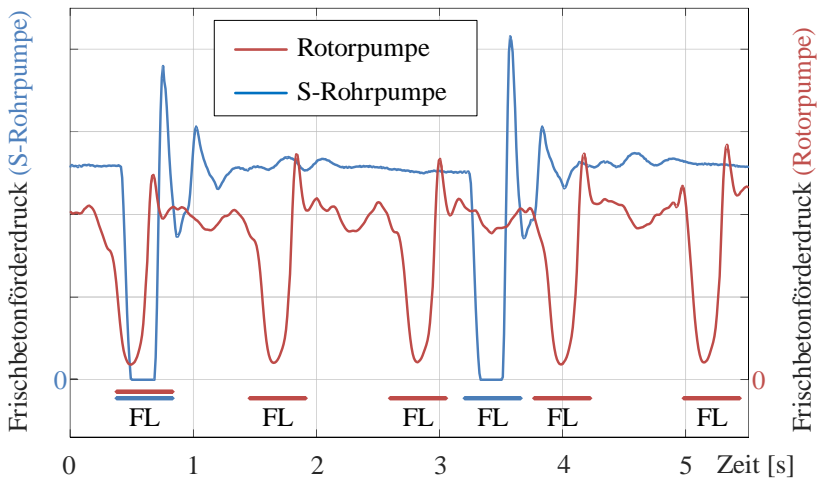


Abbildung 1.1: Frischbetonförderdruck einer S-Rohrpumpe und einer Rotorpumpe über der Zeit; Förderlücken durch FL gekennzeichnet (angelehnt an [4, S. 29] bzw. [5, S. 29])

Derzeit ist keine Frischbetonpumpe mit konstanten Fördereigenschaften auf dem Markt verfügbar [4, S. 29] [6, S. 74-77].

Die pulsierenden Fördereigenschaften haben negative Folgen für die Bedienqualität, die Maschinenbelastung und den Maschinenwirkungsgrad des Systems Mensch-Maschine-Fördermedium [4, S. 28-29]. Es lassen sich folgende Nachteile eines schwankenden Volumenstroms und Förderdrucks unterscheiden:

- Bedienqualität
 - Schwingungen des Endschlauches an der Mastspitze mindern bei Autobetonpumpen die Bedienqualität und gefährden die Arbeitssicherheit. [7, S. 195]
 - Um die Bewegung der Förderleitung beispielsweise bei Hochförderungen zu unterbinden, muss diese fixiert werden, wodurch der Montageaufwand steigt. [8, S. 329-335]
 - Das zyklische Pumpverhalten verursacht laute Geräusche. [8, S. 319-328]
- Maschinenbelastung
 - Die zyklisch schwankende Leistungsanforderung an den Pumpenantrieb erhöht die notwendige Eckleistung gegenüber einer Konstantflusspumpe. [7, S. 195] [9, S. 11]
 - Die periodische Belastung diverser Komponenten, wie z. B. Hydraulikbauteile, Förderleitungen und Rohrkupplungen, reduziert deren Lebensdauer und erhöht somit die Kosten für Ersatzteile und das Risiko von Maschinenausfällen. [7, S. 195] [8, S. 319-328] [10, S. 230]
 - Bei einem schwankenden Förderstrom liegt die maximale Strömungsgeschwindigkeit oberhalb der durchschnittlichen bzw. der einer Konstantflusspumpe. „Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der höheren maximalen Strömungsgeschwindigkeit und der daraus folgenden

höheren Randschichtgeschwindigkeiten der abrasive Verschleiß der Förderrohre und besonders der Rohrbögen zunimmt“ [4, S. 30]. [8, S. 329-335]

- Maschinenwirkungsgrad
 - Durch eine Erhöhung der maximalen Strömungsgeschwindigkeit steigt der Strömungswiderstand. Somit ist der spezifische Energiebedarf bei pulsierender Förderung überhöht. [8, S. 329-335] [4, S. 30]
 - Der genaue Frischbetonvolumenstrom in Spritzbetonpumpen ist nicht bekannt, da der Füllgrad der Förderzylinder bei den am Markt vorherrschenden Pumpentypen nicht gemessen werden kann. Bei einer Konstantflusspumpe mit Vorkompression kann der Füllgrad und somit der Volumenstrom gemessen werden. Der unbekannte und dazu pulsierende Volumenstrom erschwert die Zudosierung von Erstarrungsbeschleuniger¹. Dies kann aufgrund eines erhöhten Verbrauchs an Erstarrungsbeschleuniger zu Mehrkosten führen. Des Weiteren kann eine Fehldosierung zu einer Minderung der Spritzbetonqualität führen.²

Die aufgeführten Nachteile einer pulsierenden Förderung liefern die Motivation zur Erforschung und Entwicklung einer Konstantflusspumpe für Frischbeton.

¹ Sorgt für eine Verkürzung der Zeit bis zum Abbindebeginn von Frischbeton [11, S. 12].

² Quelle: Fachgespräch mit Herr ROBERT SCHWEIZER (BeMo Tunnelling GmbH) am 21.2.2018 auf dem VDBUM-Seminar und E-Mail am 1.3.2018

2 Stand der Technik und Forschung

Im Folgenden wird auf den für diese Arbeit relevanten Stand der Technik und Forschung eingegangen. Anfangs befasst sie sich mit der Zusammensetzung sowie den Eigenschaften von Dickstoffen und Frischbeton (Kapitel 2.1). Darauf folgend werden Aspekte der Dickstoffförderung und die hierbei verwendeten Ventile dargelegt (Kapitel 2.2 und Kapitel 2.3). Im Anschluss werden die zwei wichtigsten Teilfunktionen eines Dickstoffventils analysiert (Kapitel 2.4 und Kapitel 2.5). Hierbei wird nicht nur auf den direkten Stand der Forschung des entsprechenden Gebiets eingegangen, sondern auch Themengebiete betrachtet, welche phenomologisch verwandt sind.

2.1 Zusammensetzung und Eigenschaften von Frischbeton

Als Dickstoff wird im Anlagenbau ein Gemisch aus flüssigen und festen Bestandteilen bezeichnet. Beispiele hierfür sind entwässerte Klärschlämme, Biomaterial, Steinkohleschlämme und Frischbeton. [12, S. 60] [13, S. 19]

Beton ist ein künstlicher Stein und wird häufig als Baustoff verwendet. Frisch angemischt wird dieser als *Frischbeton* bezeichnet und weist eine fließfähige bis steife Konsistenz auf [14, S. 16]. Durch die Hydratation des im Frischbeton enthaltenen Zements bindet der Frischbeton ab und wird fest. Abgebundener Beton wird *Festbeton* genannt [11, S. 5].

2.1.1 Zusammensetzung von Ortbeton und Spritzbeton

Frischbeton, sei es Ort- oder Spritzbeton, ist eine Mischung aus Kies, Sand, Wasser, Zusatzstoffen (z.B. Flugasche) und Zusatzmitteln (z.B. Fließmittel).

Durch die meist pulverigen Zusatzstoffe werden physikalische Eigenschaften wie Wasserhaltefähigkeit, Verarbeitbarkeit, Gefügedichte oder auch Farbgebung beeinflusst [15, S. 16]. Zusatzmittel sind meist flüssig und werden in geringen Mengen dem Frischbeton zugegeben. Sie dienen dazu, physikalische und / oder chemische Eigenschaften von Frisch- und / oder Festbeton anzupassen. Beispiele hierfür sind Betonverflüssiger, Fließmittel oder Luftporenbildner. [11, S. 12] [15, S. 16]

Das Verhältnis aus der Masse des Wassers zu der des Zements wird als W/Z-Wert bezeichnet. Das im Frischbeton enthaltene Wasser benötigt man für den chemischen Prozess des Abbindens von Zement (Hydratation). Bei einem W/Z-Wert von ca. 0,4 wird das im Frischbeton enthaltene Wasser vollständig umgesetzt. Des Weiteren hat der W/Z-Wert einen großen Einfluss auf die Konsistenz des Frischbetons und die Festigkeit des Festbetons. [15, S. 10]

Die Zusammensetzung von Kies und Sand im Frischbeton wird durch die zwei Parameter Größtkorn und Sieblinie (Abbildung 2.1) charakterisiert. Das Größtkorn ist das größte in der Kiesmischung enthaltene Korn.

Durch die Sieblinie wird die Korngrößenverteilung definiert. Abbildung 2.1 zeigt typische Sieblinien nach DIN 1045-2, auf welche in dieser Arbeit zurückgegriffen wird. Die Sieblinie gibt den prozentualen Siebdurchgang für Sieblochweiten an. So ergibt sich aus Abbildung 2.1 beispielsweise, dass bei der Sieblinie C32 12 Vol.-% der Kies- und Sandmischung zwischen 4 und 8 mm groß sind. [16] [15, S. 13]

Ein von der Zusammensetzung unabhängiges Unterscheidungsmerkmal ist die Kornform. Bei dieser wird zwischen gebrochener und demzufolge eckiger und runder Kornform unterschieden. [11, S. 36]

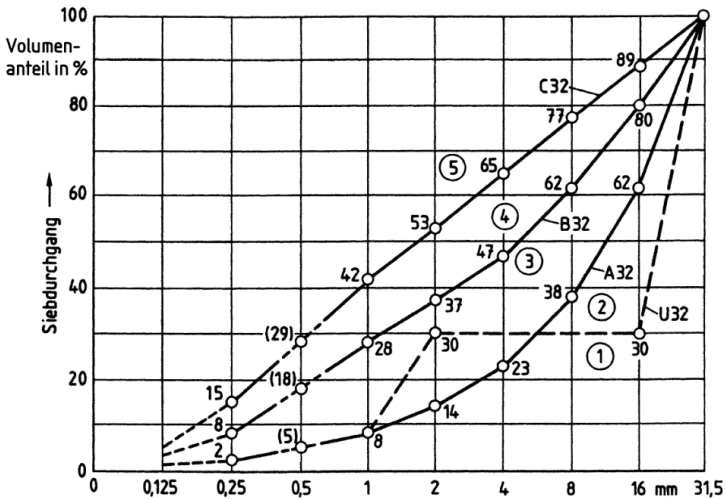


Abbildung 2.1: Sieblinien mit einem Größtkorn von 31,5 mm [16, S. 47]

Ortbeton

Ortbeton ist Beton, welcher auf der Baustelle mithilfe von Schalungen an seinem endgültigen Einsatzort im Bauwerk eingebracht wird [11, S. 30]. Je nachdem ob der Beton auf der Baustelle oder in einem Betonwerk angemischt wird kann dieser in Baustellen- und Transportbeton unterteilt werden [11, S. 30]. Eine weit verbreitete Möglichkeit, Ortbeton auf der Baustelle in die Schalungen einzubringen, ist mithilfe einer Betonpumpe. Das für Ortbeton größte, gängige Größtkorn ist 32 mm groß [11, S. 37].

Spritzbeton

Spritzbeton wird ohne Schalungen direkt auf die zu stärkende Struktur aufgespritzt. Hierzu wird dem Frischbeton in einer Düse Druckluft zugeführt, wodurch dieser beschleunigt wird. Dieses Prinzip findet Anwendung in der Primärsicherung von Stollen- und Tunnelbauten, der Instandsetzung von Betonbauwerken sowie dem Neubau von Freiformen [17, S. 3]. Eine beispielhafte Anwendung ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

Um den Anforderungen dieser Art der Verarbeitung gerecht zu werden, besitzt Spritzbeton ein Größtkorn von lediglich 8 mm und einen gegenüber Ortbeton erhöhten Zementanteil [18, S. 7]. Um ein schnelles Abbinden des aufgetragenen Frischbetons zu erreichen, wird diesem häufig in der Ausbringdüse Erstarungsbeschleuniger (ein Zusatzmittel) zudosiert [19, S. 7]. [20, 181ff]



Abbildung 2.2: Spritzbetonapplikation (Quelle: PUTZMEISTER HOLDING); Beschriftung: (a) Betonmischer, (b) Spritzbetonpumpe, (c) Kompressor, (d) Spritzstrahl des Frischbetons, (e) mit Spritzbeton gesicherter Hang

2.1.2 Frischbetoneigenschaften

Das Bingham-Fluid¹ Frischbeton ist abrasiv, aushärtend, hat einen pH-Wert von ca. 13 und verfügt in der Regel über ein Größtkorn von bis zu 32 mm [22,

¹ „Das Material beginnt erst bei Überschreiten der Fließgrenze τ_F zu fließen. Unterhalb von τ_F verhält es sich wie ein elastischer Körper, darüber wie eine Newtonsche Flüssigkeit (z.B. Zahnpasta, Abwasserschlämme, körnige Suspensionen).“ [21, S. B 53]

S. 998] [12, S. 56] [23, S. 78]. Für die Förderung von Frischbeton relevante Effekte sind Entmischung, Stopfer- sowie Kranzbildung.

Entmischung

Pumpbarer Frischbeton hat die Eigenschaft, dass die festen Bestandteile vollständig von Wasser umgeben und somit gegeneinander beweglich sind. Diese Eigenschaft nennt man *gefügedicht*. Die Übertragung des Drucks im Frischbeton erfolgt somit ausschließlich über die Flüssigkeit. [15, S. 38].

Wenn sich hingegen das heterogene Gemisch Frischbeton in dessen Bestandteile aufspaltet, wird dies *Entmischung* oder umgangssprachlich *Ausbluten* genannt. Dies kann mitunter beim Fördern und Einbringen auftreten [14, S. 111]. An dieser Stelle sind die Entmischungsprozesse in der Fördereinheit und nicht die in der Schalung² von Interesse. Gründe für Entmischungserscheinungen in der Fördereinheit sind ungeeignete Betonzusammensetzungen oder zu kurze Mischzeiten [14, S. 111]. Neben den genannten Mediumeigenschaften kann Entmischung auch durch Eigenschaften der Frischbetonpumpe hervorgerufen werden. Zu diesen zählen unzureichend dichte Frischbetonventile, geringe Strömungsdurchmesser sowie enge Umlenkungen des Frischbetonstroms [25, S. 6, 79] [26, S. 61] [15, S. 39, 49, 52]. In einer Frischbetonpumpe bzw. den Förderrohren kann Entmischung sowohl zu Stopfer- als auch Kranzbildung führen [26, S. 61].

Stopferbildung

Wenn sich ein Stopfer in der Frischbetonpumpe bzw. deren Förderrohren bildet, kommt die Förderung zum Erliegen. Die meist händische Behebung des Stopfers führt zu einer Gefahrensituation und zu Zeitverlust. [27, S. 158]

Stopfer können sich aufgrund von Entmischung des Frischbetons bilden. Ein weiterer Auslöser für einen Stopfer kann das Ausmagern bzw. Austrocknen des Frischbetons sein, welcher beim Anpumpen als erstes durch die trockene

² Weiterführende Literatur [24]

Förderleitung fließt. [15, S. 55] Es handelt sich demzufolge um eine Art Verkeilung der Betonzuschläge in der Förderleitung.

Abbildung 2.3 zeigt zwei radiale Schnitte durch Festbetonkerne aus Förderleitungen. Bei der mit (a) gekennzeichneten Schnittfläche ist es zu einem Stopfer gekommen. Die Gefügedichte ist gegenüber dem Normalzustand (b) erhöht.

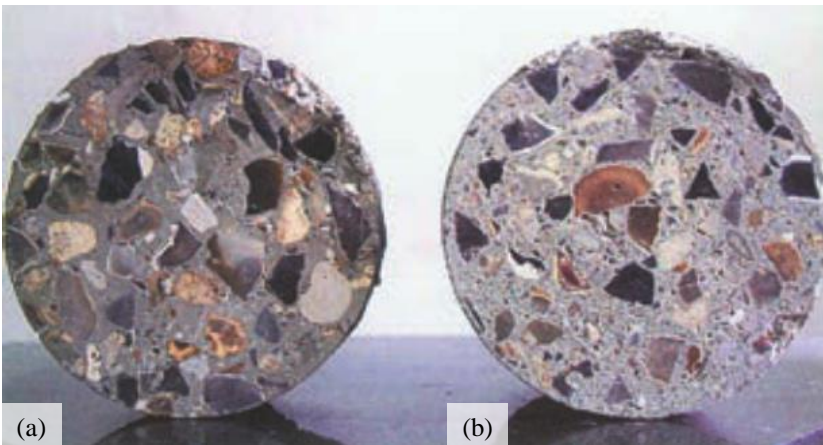


Abbildung 2.3: Radialer Schnitt durch den Betonstrang; (a) Stopfer; (b) Normalzustand [28, S. 121]

Kranzbildung

An Leckagestellen, wie unzureichend dichten Frischbetonventilen oder auch Rohrstößen, kann es zur Kranzbildung kommen. Diese wird des Weiteren durch Absätze an nicht bündigen Rohrstößen oder Frischbetonventilen begünstigt. Ein Kranz ist eine Ablagerung von Zement und Sand an einer Bauteilwandung in der Betonströmung. Diese Ablagerung baut sich während des Betriebs der Frischbetonpumpe weiter auf. Durch eine starke Verengung des Förderquerschnitts kann ein Kranz einen Stopfer zur Folge haben. [15, S. 49, 52] [25, S. 79, 82f]

2.2 Fördermittel

Als Fördermittel werden die „jeweiligen technischen Transportmittel beschrieben, die innerhalb von örtlich begrenzten und zusammenhängenden Betriebsbereichen [...] das Fördern bewerkstelligen“ [29, S. 119].

In dem folgenden Kapitel zu Fördermitteln wird erst ein mediumübergreifender Überblick über die Fördermittel gegeben. Darauf folgend werden Fördermittel für Frischbeton vorgestellt.

2.2.1 Systematik der Fördermittel

Um die Aufgabe des Förderns zu bewältigen werden je nach Medium, Förderstrom und Förderdruck unterschiedliche Fördermittel verwendet. Abbildung 2.4 zeigt einen allgemeinen, medienunabhängigen Überblick. Diese Gruppe der Fördermittel lässt sich wiederum in die zwei Gruppen *Überdruckförderer* und *Gleichdruckförderer* unterteilen.

Fördermittel

Unterteilung nach Druckverhältnis

Überdruckförderer / Rohrförderer

Unterteilung nach Art der Energieübertragung

Verdrängungspumpe [30]

Unterteilung nach Kolbenbewegung

Hubverdränger / Hubkolben [30]

Unterteilung nach Art des Hubkolbens [33]

Stufenkolbenpumpe [33 S.27, 37 S.5]

Tauch-, Plungerkolbenpumpe [33 S.26]

Scheibenkolbenpumpe [33 S.26, 37 S.2]

Membranpumpe [37 S.6f]

Ventilkolbenpumpe [33 S.27]
z.B. Pferdekopfpumpe

Rotationsverdränger / Rotationskolben [30] /
Kammerförderer [34 S.19]

Unterteilung nach Art des Rotationskolbens

Schlauchpumpe [37 S.12]

Schieberpumpe [37 S.10]
z.B. Drehschieberpumpe

Hüllkörperpumpe [37 S.11]
z.B. exzent. Förderschnecke [37 S.12]

Wälzkörperpumpe [37 S.11]
z.B. Zahnradpumpe [37 S.11]

Strömungspumpe [31]

Unterteilung nach Durchströmungsrichtungen

Radial durchströmt [31 S.28]

Diagonal durchströmt [31 S.28]

Axial durchströmt [31 S.28]

Schlepppumpe angel. [35] [36 S.15]

z.B. zentr. Schneckenförderer

Gleichdruckförderer / Offenförderer

Unterteilung nach Fördercharakteristik

Stetigförderer [32 S.3]

*Unterteilung nach Funktionsprinzip und
Kraftübertragung [38 S.211]*

Mechanische Stetigförderer mit
Zugmittel [32 S.211]

Unterteilung nach Zugmitteltyp

Bandförderer [38 S.1]

Becherwerk [38 S.1]

Kettenförderer [38 S.1]

Hängeförderer [38 S.1]

Mechanische Stetigförderer ohne
Zugmittel [32 S.211]

*Unterteilung nach mechanisch ange-
triebenem Transportmittel [32 S.267]*

Rollenförderer [32 S.267]

Förderer mit Schnecken [38 S.8]

Schwingungsförderer [32 S.276]

Schwerkraftförderer [32 S.211]
z.B. Rutsche [32 S.211]

Strömungsförderer [32 S.211]
z.B. pneumatische Förderer [32 S.211]

Unstetigförderer [32 S.3]

z.B. Kran [32 S.4], Pendelseilbahn [32 S.4]

Abbildung 2.4: Systematik der Fördermittel (In Anlehnung an [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38])

Überdruckförderer

Bei Überdruckförderern fließt das zu fördernde Medium durch ein Rohr. Aufgrund des Strömungswiderstands stellt sich ein Druckgefälle zwischen Ein- und Ausgang des Rohres ein. Verglichen mit dem Umgebungsdruck herrscht in der Rohrleitung ein Überdruck. *Verdrängerpumpen* erzeugen den Volumenstrom mithilfe eines sich zyklisch vergrößernden und verkleinernden Raumes, welchen Ventile abwechselnd mit dem Einlass und dem Auslass verbinden. Demzufolge hat eine Verdrängerpumpe eine periodische Förderung, bei welcher durch mechanische Arbeit das Medium komprimiert und somit dessen innere Energie erhöht sowie Ausschleibearbeit verrichtet und das Medium beschleunigt wird. Die Gruppe der Verdrängerpumpen wird abhängig von der Kolbenbewegung in *Hubverdränger* und *Rotationsverdränger* unterteilt [30, S. 2]. *Strömungspumpen* fördern das Arbeitsmedium durch die Beschleunigung des Fluides aufgrund von Umlenkung in dem drehenden Laufrad mit anschließender Umsetzung der Geschwindigkeit in Druck im stehenden Leitrad [39, S. 189] [31, S. 37]. Eine Strömungspumpe wird demzufolge kontinuierlich durchströmt und wandelt hierbei die mechanische Arbeit über den Zwischenschritt der kinetischen Energie in potentielle Energie um [39, S. 189].

Bei der dritten Gruppe der Überdruckförderer handelt es sich um *Schleppumpen*. Der Begriff der Schleppumpen soll an dieser Stelle eingeführt werden, da deren Funktion im Gegensatz zu Strömungspumpen nicht auf dynamischen Effekten, sondern auf Reibungskräften und somit auf Schleppeffekten zwischen sich relativ zueinander bewegenden Oberflächen beruht [36, S. 15].

Gleichdruckförderer

Gleichdruckförderer kommen ohne eine geschlossene Rohrleitung aus. Bei diesem offenen Fördermittel herrscht demzufolge im Gegensatz zu den Überdruckförderern kein Druckgefälle entlang der Förderstrecke. Gleichdruckförderer lassen sich abhängig von ihrer Fördercharakteristik in *Stetigförderer* und *Unstetigförderer* unterteilen [32, S. 3]. Stetigförderer erzeugen einen kontinuierlichen Förderstrom [32, S. 3]. Weiter lassen sie sich anhand ihres Funktionsprinzips und der Art der Kraftübertragung in *mechanische Stetigförderer mit Zugmittel*, *mechanische Stetigförderer ohne Zugmittel*, *Schwerkraft-*

förderer und *Strömungsförderer* unterteilen [32, S. 211]. Unstetigförderer weisen einen diskontinuierlichen, zyklischen Förderstrom auf [32, S. 3].

2.2.2 Fördermittel für Dickstoffe

Im folgenden Kapitel wird die Entwicklung der Frischbetonförderung erläutert. Die heute am weitesten verbreiteten Förderprinzipien für Frischbeton sind zum einen die Rotorpumpe und zum anderen die Kolbenpumpe mit Schwenkrohrventil. Prinzipien der Dickstoffförderung aus dem Bereich der Rohrförderer, welche keine Förderlücke aufweisen, verfügen über zahlreiche Vorteile. Im letzten Absatz dieses Kapitels werden Förderverfahren für Dickstoffe vorgestellt, welche konstante Fördereigenschaften haben.

Entwicklung der Frischbetonförderung

Im Laufe des 20. Jahrhunderts nimmt die Verwendung von Beton als Baustoff und somit die zu transportierende und einzubringende Frischbetonmenge zu. Durch diesen Trend angetrieben entwickelt sich die Beton- und deren Förder-technik immer weiter voran. Hierbei gilt, dass meist erst durch die Etablierung einer neuen Betonart die Entwicklung einer neuen Frischbetonfördermethode ermöglicht wird. Stampfbeton wird mit Eimern und Karren transportiert, der darauffolgende Gussbeton mithilfe von Gießtürmen, mit Rinnensystemen und Förderbandsystemen. Für den heutigen Rüttelbeton setzt sich die Trog-, Rohr- und Bandförderung durch. [2, S. 12-15] [40]

Die erste Pumpe, welche Frischbeton durch Rohre fördert, wird 1907 gebaut und arbeitet mit Pressluft [25, S. 3f]. GIESE und HELL entwickelten 1927 die erste im Baustellenumfeld funktionsfähige Frischbetonpumpe. Diese arbeitet mit Förderkolben und wurde mehr als hundertmal gebaut (Abbildung 2.11, Seite 23). [25, S. 4-6] [2, S. 15] [12, S. 12]

Kolbenpumpe mit Schwenkrohrventil und Rotorpumpe

In den vergangenen Jahrzehnten wurden zahlreiche Frischbetonpumpen entwickelt, welche immer höhere Förderdrücke und Förderströme erreichen. Die heute am Markt vorherrschenden Pumpentypen für Frischbeton sind

Kolbenpumpen mit Schwenkrohrventilen und Rotorpumpen. Je nach Land und Anwendung werden auch Fließbänder³ für die Frischbetonförderung eingesetzt, welche zu den Gleichdruckförderern zählen. Da die Gleichdruckförderer für diese Arbeit nicht relevant sind, wird auf sie nicht näher eingegangen (siehe Kapitel 4).

Kolbenpumpen (Abbildung 2.5) besitzen zwei Förderkolben (a), mit welchen periodisch Frischbeton gefördert wird. Mithilfe eines Schwenkrohrventils (b) werden zyklisch wechselnd der ausstoßende Zylinder mit der Förderleitung und der ansaugende mit dem mit Frischbeton gefüllten Trichter (c) verbunden.

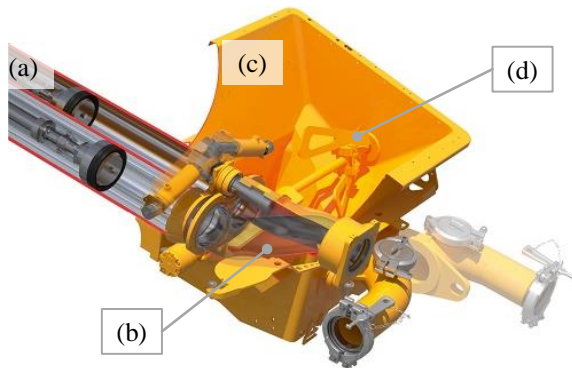


Abbildung 2.5: Kolbenpumpe mit Schwenkrohrventil (Schnittansicht); Beschriftung: (a) Förderkolben, (b) Schwenkrohrventil (hier S-Rohr), (c) Trichter, (d) Rührwerk [42]

Je nach Hersteller wird eine andere Bauart des Schwenkrohrventils eingesetzt. Die Grundfunktion dieser Baugruppe bleibt allerdings erhalten. Mithilfe des beschriebenen Förderprinzips werden Förderdrücke von 220 bar [3, S. 7] und Förderströme von 200 m³/h [1, S. 12] erreicht.

³ Weiterführende Informationen: [27, S. 182ff] [41] [40].

An einem realen Förderzylinder einer Frischbetonpumpe ist zu beobachten, dass dieser nach Beendigung des Ansaughubs nicht komplett mit Medium gefüllt ist (Abbildung 2.6 oben). Im Weiteren wird auf diesen Effekt, welcher für die folgende Arbeit relevant ist, genauer eingegangen.

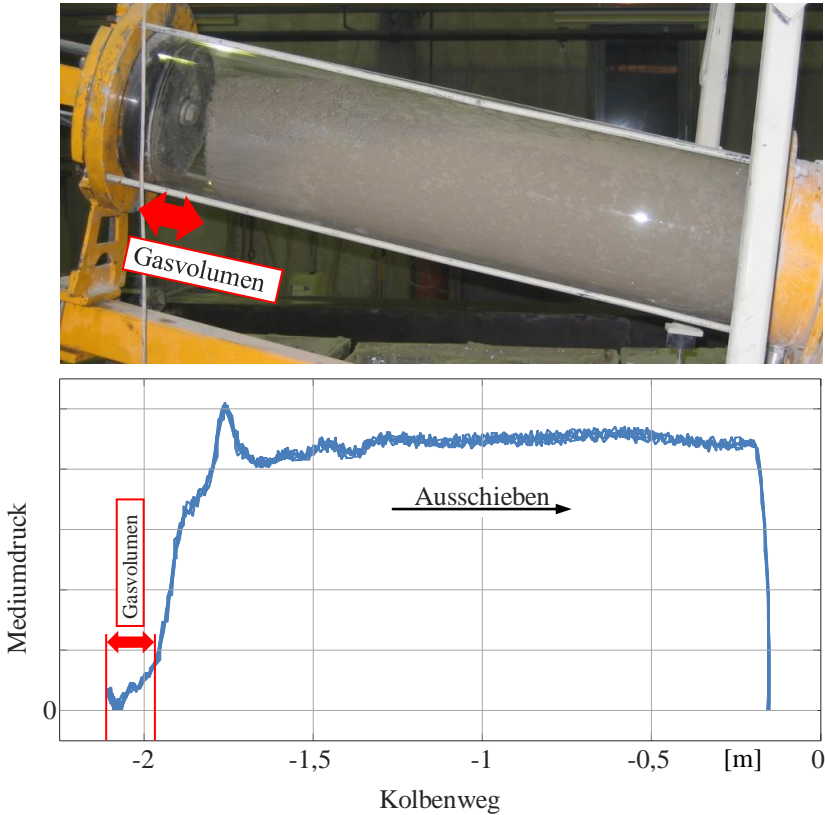


Abbildung 2.6: Realer Förderzylinder; oben: Förderzylinder aus Glas, welcher mit Frischbeton und einer Gasblase gefüllt ist (Projekt von PUTZMEISTER ENGINEERING GMBH 2006); unten: Messung des Mediumdrucks eines ausschiebenden Kolbens über dem Kolbenweg (Projekt von PUTZMEISTER ENGINEERING GMBH; [4, S. 32])

Die Frischbetonfront löst sich im Laufe des Ansaughubs von der Oberfläche des Förderkolbens ab und es bildet sich ein Gasvolumen, welches unter Unterdruck ($1 - 0,3$ bar absolut) steht. Wenn die Ausschiebewegung des Kolbens beginnt, wird anfangs nur das Gasvolumen komprimiert. Medium- bzw. Hydraulikdruck steigen nur geringfügig an. Ist das Gas allerdings komprimiert, tiff der Förderkolben auf die Frischbetonfront. Der Mediumdruck steigt daraufhin schlagartig an (Abbildung 2.6 unten). [4, S. 34]

Als Füllgrad wird das Verhältnis zwischen Volumen des angesaugten Mediums und gesamtem Zylindervolumen bezeichnet. Durch einen Vergleich von theoretisch und real gepumpter Frischbetonmenge kann gezeigt werden, dass sich der Füllgrad meistens im Bereich von 85 bis 90 % bewegt.

Rotorpumpen (Abbildung 2.7) arbeiten nach einem der Peristaltik nachempfundenen Prinzip. Ein Pumpenschlauch (a), welcher mit Frischbeton gefüllt ist, wird an einer Stelle durch eine Rolle zusammengedrückt und die Abquetschstelle fortbewegt (b). Mit einer Rotorpumpe für Frischbeton werden Förderströme von bis zu $58 \text{ m}^3/\text{h}$ und Förderdrücke von bis zu 25 bar erreicht [43]. [26, S. 55] [44, S. 169]

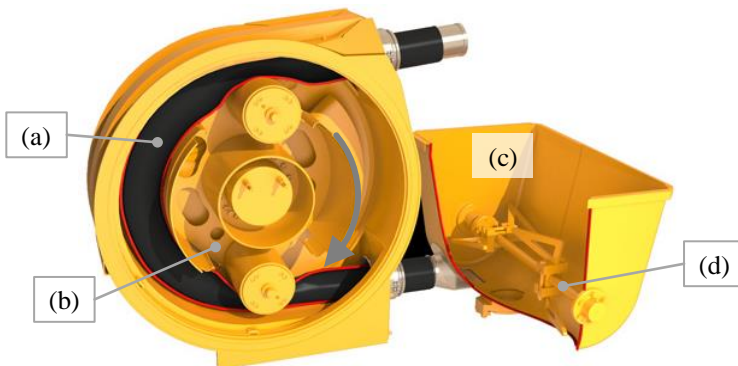


Abbildung 2.7: Rotorpumpe (Schnittansicht) Beschriftung: (a) Pumpenschlauch, (b) Rotor mit zwei Abdrückrollen, (c) Trichter, (d) Rührwerk [43]

Beide Förderprinzipien haben gemein, dass sie prinzipbedingt eine Förderlücke aufweisen (Abbildung 1.1: Frischbetonförderdruck einer S-Rohrpumpe und einer Rotorpumpe über der Zeit). Bei der Kolbenpumpe kann der Förderdruckeinbruch auf folgende Gründe des Volumennstromeinbruchs zurückgeführt werden. Zum einen kann während der Umschaltphase des Frischbetonventils kein Frischbeton in die Förderleitung ausgeschoben werden. Zum anderen sind die Förderzylinder nach dem Ansaugen nicht komplett gefüllt (Füllgrad 85-90%). Die Volumenstromschwankungen und die daraus resultierenden Druckeinbrüche der Rotorpumpe sind auf zwei konstruktive Besonderheiten zurückzuführen. Durch das Ausheben der Abdrückrolle am Ende des Pumpenschlauchs wird ein Volumen im Pumpenschlauch freigegeben, welches erst gefüllt werden muss und somit zu einer Volumenstromschwankung führt. Des Weiteren verfügen die Rotorpumpen über einen Umschlingungswinkel von kleiner 180° , um Druckspitzen in dem sonst abgeschlossenen Schlauchsegment zu vermeiden. Dies führt dazu, dass es eine Rotorstellung gibt, in welcher Material zurückströmen kann. [45] [4, S. 29]

Das Ausmaß der Schwankungen des Förderdrucks wird als Fördergüte bezeichnet und durch zwei Kennzahlen dargestellt. Hierbei ist α_{\max} als Verhältnis von maximalem zu eingeschwungenem und α_{\min} als Verhältnis von minimalem zu eingeschwungenem Förderdruck definiert. Wenn ein konstanter Förderdruck vorliegt ist somit $\alpha_{\max} = \alpha_{\min} = 1$. Bei einer konventionellen Kolbenpumpe sowie einer Rotorpumpe ergeben sich Fördergüten, welche stark von eins abweichen und im Extremfall Werte von $\alpha_{\max} = 1,5$ und $\alpha_{\min} = 0$ annehmen können.

Kontinuierlich fördernde Dickstoffpumpen

Heute bekannte Dickstoffpumpprinzipien nach dem Hubkolbenprinzip mit kontinuierlichen⁴ oder konstanten⁵ Fördereigenschaften lassen sich anhand ihres Förderverfahrens in zwei Kategorien einteilen und werden definiert als: *Überblendungs-Prinzip* und *Förder-Überbrücker-Prinzip*.

⁴ Kein Abfall von Druck und Förderstrom auf null

⁵ Kein Einbruch von Druck und Förderstrom

Überblendungs-Prinzip

Bei dem Überblendungs-Prinzip gibt es eine zeitliche Übergangsphase, während der der volle Förderzylinder bereits anfängt zu fördern und der fast leere Förderzylinder langsam zu fördern aufhört (weiterführende Informationen in Kapitel 5.1). Diese Phase wird im Folgenden als *Überblendungsphase* bezeichnet.

Das Überblendungs-Prinzip wird bei zahlreichen Pumpen angewendet. Beispiele hierfür sind [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57] und [58]. Im Folgenden werden zwei dieser Prinzipien exemplarisch erläutert.

Bei dem ersten Prinzip nach (US 8,827,657 B1 [46])⁶ bzw. (EP 0 808 422 B1 [59])⁷ (Abbildung 2.8) wird ein Schwenkrohrventil mit breiter Einlassöffnung eingesetzt. Dieses hat seitlich angeordnete Bleche zur Verhinderung eines Kurzschlussstroms während des Umschaltens. Bei diesem Schwenkrohrventil kann während der Förderphase (Abbildung 2.8 (c) I, V) durch den einen Förderzylinder Material in das Schwenkrohrventil ausgeschoben werden, während der andere Förderzylinder Frischbeton ansaugt.

Wenn das Schwenkrohrventil in der Mittelstellung ist, wird während der Überblendungsphase (Abbildung 2.8 (c) III) die Ausschiebegeschwindigkeit des einen Förderzylinders in dem Maße reduziert wie die des anderen erhöht wird. Somit ergibt sich in Summe ein konstanter Volumenstrom.

Im Gegensatz zu dem konventionellen Funktionsprinzip einer Kolbenpumpe mit Schwenkrohrventil wird bei diesem das Schwenkrohrventil unter vollem Förderdruck umgeschaltet [49, S. 2]. Hierbei muss es zudem aufgrund der seitlich angeordneten Bleche und des vergrößerten Abstands der Förderzylinder einen weiteren Weg zurücklegen. Dies führt an den sich relativ zueinander bewegenden Dichtflächen zu einem hohen Verschleiß [49, S. 2]. Ein weiterer Nachteil ist, dass das Schwenkrohrventil während des Umschaltens unter

⁶Trapezförmige Öffnungen des Förderzylinders

⁷Runde Öffnungen des Förderzylinders

Förderdruck steht und im Vergleich zu dem konventionellen Schwenkrohrventil eine größere Antriebsarbeit zum Umschalten aufgebracht werden muss [49, S. 2]. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass die druckbelastete Fläche (Abbildung 2.8 (c) II, IV) um den Faktor vier größer wird und somit die wirkenden Kräfte um den Faktor vier höher als bei der konventionellen Bauweise sind.

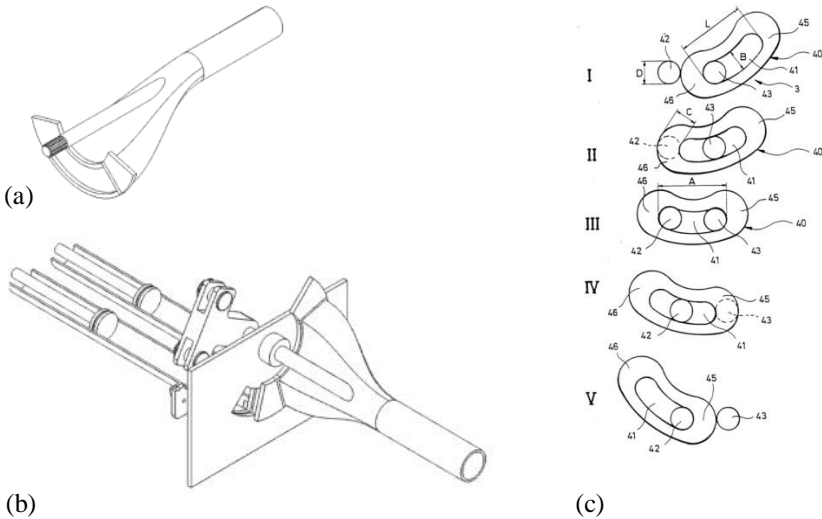


Abbildung 2.8: Prinzip nach (US 8,827,657 B1 [46]) bzw. nach (EP 0 808 422 B1 [59]); (a) Schwenkrohrventil mit breiter Einlassöffnung und seitlich angeordneten Blechen zur Verhinderung eines Kurzschlussstroms während des Umschaltens (US 8,827,657 B1 [46, S. 31]); (b) Schwenkrohrventil mit Brillenplatte, geschnittene Förderzylinder und Förderkolben (US 8,827,657 B1 [46, S. 51]); (c) Schalterschema der den Förderzylindern zugewandten Stirnseite des Schwenkrohrventils (EP 0 808 422 B1 [59, S. 3])

Nach dem zweiten Prinzip nach (DE 10 2009 005 318 B3 [48])⁸, wie in Abbildung 2.9 dargestellt, wird das Überblendungs-Prinzip auch mit zwei Förderzylindern realisiert. Anstelle des Schwenkrohrventils werden pro

⁸Weitere Anmeldungen in anderen Ländern (EP 2 387 667 B1 [49]) und (US 2016/0040659 A1 [50]); Anmelder Schwing

Förderzylinder ein frischbetontaugliches Einlass- und Auslassventil eingesetzt. Durch diesen Aufbau ist es möglich, die Frischbetonventile nur dann zu schalten, wenn über diese keine Druckdifferenz anliegt. Bevor das Einlassventil geöffnet wird, muss das im Förderzylinder befindliche Material dekomprimiert werden. Wenn das Auslassventil hingegen geöffnet werden soll, wird das Material im Förderzylinder vorkomprimiert.

Dies bietet im Gegensatz zu der Ventilbetätigung unter Druckdifferenz (wie in dem vorausgegangenen Prinzip Abbildung 2.8) Vorteile in den Aspekten Verschleiß und Betätigungskraft [48, S. 2]. Ein Nachteil dieses Prinzips ist dessen technischer Aufwand für die vier unabhängig schaltbaren Dickstoffventile.

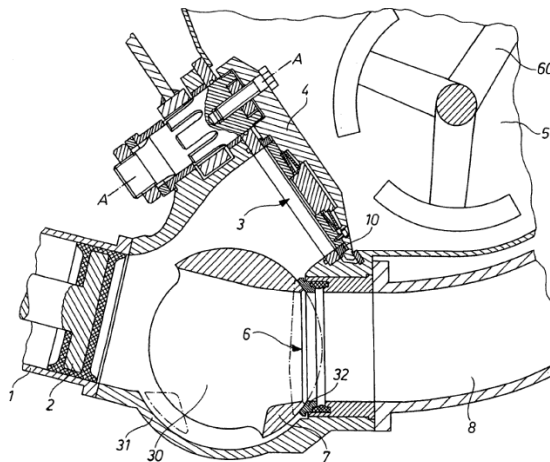


Abbildung 2.9: Prinzip nach (DE 10 2009 005 318 B3 [48]); geschnittene Seitenansicht; Bauteilbeschriftung: 1 Förderzylinder, 4 Einlasschieber, 7 Auslasschieber

Förder-Überbrücker-Prinzip

Bei dem Förder-Überbrücker-Prinzip wird ein pulsierender Mediumstrom gefördert, welcher darauffolgend durch einen zyklisch ansaugenden und

ausstoßenden Überbrückerzylinder ausgeglichen werden soll (weiterführende Informationen in Kapitel 5.1).

Das Förder-Überbrücker-Prinzip ist im Bereich der Dickstoffförderung weit verbreitet. Beispiele hierfür sind [9], [60], [61], [62], [63], [64], [25, S. 5] und [65]. Im Folgenden werden zwei technische Ausführungen dieses Prinzips exemplarisch erläutert.

Die erste Ausführung wird von HUDELMEIER, GEIMER und BAUM in [9]⁹ beschrieben (Abbildung 2.10).

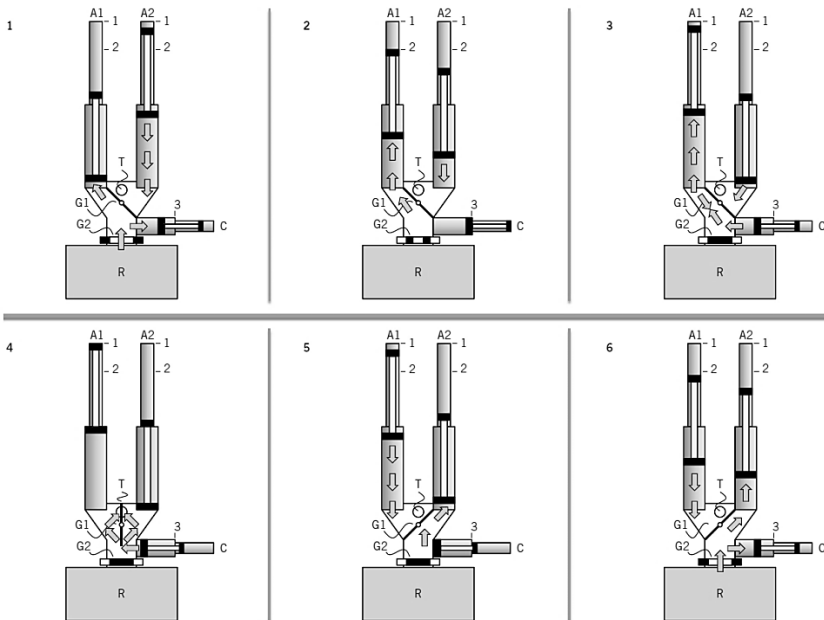


Abbildung 2.10: Arbeitsablauf der Konstantflusspumpe für Frischbeton nach [6, S. 82]

⁹ Weitere Veröffentlichungen zu diesem Prinzip sind [6], [7] und [60].

In dieser Ausführung verfügt die Frischbetonpumpe über zwei Förderzylinder sowie einen dritten, aktiven Zylinder (entspricht Überbrückerzylinder). Durch diesen wird sowohl das Material des gerade gefüllten Förderzylinders vorkomprimiert (Abbildung 2.10 Schritt 3) als auch die Förderlücke überbrückt (Abbildung 2.10 Schritt 4). Ein Einbruch von Förderstrom und Förderdruck wird verhindert. Problematisch bei diesem Ansatz ist der technische Aufwand in Gestalt eines weiteren Zylinders sowie dessen Hydraulik und ein schwer zu dichtendes Drehklappenventil.

Die zweite Ausführung nach GIESE und HELL ist die erste im Baustellenumfeld funktionsfähige Frischbetonpumpe aus dem Jahre 1928 (Abbildung 2.11).

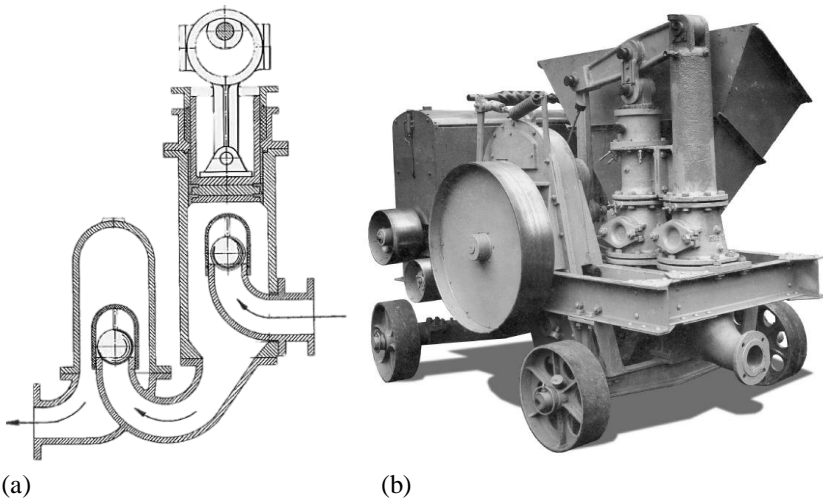


Abbildung 2.11: Frischbetonpumpe nach GIESE und HELL; (a) technische Zeichnung des Funktionsprinzips [25, S. 5]; (b) Foto der Frischbetonpumpe [2, S. 14]

Diese Pumpe verfügt über einen Förderkolben, durch welchen das Material zyklisch angesaugt und ausgestoßen wird. Um die zyklischen Förderstrom zu vergleichmäßigen befindet sich hinter dem zweiten Kugelrückschlagventil ein

Volumen¹⁰, welches teilweise mit Gas gefüllt ist. Wenn Material durch den Förderkolben ausgeschoben wird, wird das Gasvolumen komprimiert. Während der Förderlücke dehnt sich das Gas wiederum aus.

Diese Konstruktion neigt aufgrund der engen Windungen sowie Erweiterungen und Verengungen des Strömungsquerschnittes zu Stopfern. Des Weiteren füllt sich der stehende Förderzylinder während der Betriebszeit langsam mit im Frischbeton gelöster Luft und fördert aus diesem Grund immer weniger Medium. Von den Problemen dieser ersten Konstruktion unabhängig kann festgestellt werden, dass sich ein derartiges, mit Luft gefülltes Volumen zur Schwingungsdämpfung bei der Frischbetonförderung nicht eignet, da der darin befindliche Frischbeton abbinden kann. [25, S. 6]

2.3 Ventile

Im Anlagenbau ist die Aufgabe eines Ventils¹¹ „innerhalb oder am Ende einer mediumführenden Leitung unmittelbar Einfluss auf Volumenstrom, Druck oder Mischungsverhältnis eines oder mehrerer Medien“ [66, S. 80] zu nehmen. Für viele Ventile existieren mehrere Bezeichnungen. In dieser Arbeit wird einheitlich die Nomenklatur nach KROUPA¹² angewendet. Unabhängig davon kann zwischen Ventilen zum Absperrn, Einstellen und Absichern unterschieden werden [67, S. 111]. Hierbei folgen aus der Eignung für eine dieser Aufgaben häufig Nachteile für eine andere [67, S. 110]. Aus diesem Grund gibt es eine Vielzahl an Ventilen.

¹⁰ Häufig als „Druckwindkessel“ bezeichnet

¹¹ Häufig wird das Wort *Armatür* im Sprachgebrauch synonym für das Wort *Ventil* verwendet. Allerdings stammt das „Wort *Armatür* aus der Frühzeit der deutschen Wehrtechnik – der Ritterzeit. Als *Armatür* wurden die technischen Ausrüstungsteile der Blechrüstung bezeichnet. [...] Eine *Armatür* ist ein Ausrüstungsteil, Bedienteil, Anzeigegerät und nicht zuletzt jegliche Art von Beschlag, – aber kein Ventil“ [66, S. 80].

¹² Diese besagt, dass stets „das wichtigste konstruktive Merkmal an erster Stelle benannt [wird], gefolgt von dem Überbegriff des Gegenstands – Ventil“ [66, S. 80]. Demzufolge lautet die korrekte Bezeichnung beispielsweise nicht Klappe sondern Klappenventil.

Im Folgenden wird ein allgemeiner Überblick über Ventile gegeben. Danach werden Ventile für Dickstoffe näher behandelt.

2.3.1 Systematik der Ventile

Eine Systematik, welche die Gesamtheit der Ventile darstellt, zeigt Abbildung 2.12. Die Gruppe der Ventile lässt sich abhängig von der Arbeitsweise des Stellkörpers in drei Gruppen unterteilen. Diese sind *geradlinige Bewegung*, *Drehung um eine Achse* und *Deformation eines flexiblen Körpers*.

Ventile ^[66 S.80]

Unterteilung nach Arbeitsweise des Stellkörpers ^[68 S.6]

Geradlinige Bewegung
[68 S.6] / **Hubventil** ^[66 S.81]

Drehung um eine Achse
[68 S.6] / **Schwenkventil** ^[66 S.81]

Deformation eines flexiblen Stellkörpers
^[68 S.6]

Unterteilung nach Richtung der Stellkörperbewegung bezüglich der Strömungsrichtung
angel. 3 S.6, 7 S.3



Abbildung 2.12: Systematik der Ventile (In Anlehnung an [21], [66], [67], [68], [69], [70])

Die Bauart der Ventile, deren Stellkörper eine geradlinige Bewegung ausführt, kann anhand der Richtung der Stellkörperbewegung in Bezug auf die Strömungsrichtung weiter unterteilt werden. Zu den *strömungsparallelen Hubventilen* bzw. den *Sitzventilen* gehören *Kegelsitzventile*, *Kugelsitzventile* und *Tellersitzventile*. *Strömungsquere Hubventile* bzw. *Schieberventile* lassen sich in *Keilschieberventile* (*Einfaches Keilschieberventil*, *Doppelplattenkeilschieberventil*) und *Plattenschieberventil* (*Einfaches Plattenschieberventil*, *Doppelplattenschieberventil*, *Scheibenabschlusschieberventil*) unterteilen.

Ventile, deren Stellkörper eine Drehung ausführen, werden in *durchströmte* und *umströmte Schwenkventile* unterteilt. Durchströmte Schwenkventile, deren Rotationsachse in Strömungsrichtung zeigt, sind *Schwenkrohrventile*. Wenn die Rotationsachse des Stellkörpers quer zur Strömungsrichtung zeigt, handelt es sich um ein *Hahnventil*. Abhängig von der Form des Stellkörpers lassen sich diese in *Kugelhahnventile* (mit schwimmender Kugel oder mit geführter Kugel) und *Kükenhahnventile* unterteilen. Umströmte Schwenkventile, deren Stellkörper eine Rotationsachse quer zur Strömungsrichtung hat, sind *Drehklappenventile* (exzentrische oder zentrische Drehklappenventile). Wenn die Drehachse des Stellkörpers eines umströmten Schwenkventils hingegen in Strömungsrichtung zeigt, handelt es sich um ein *Einklapp-Scheibenventil*.

Die Gruppe der Ventile, bei welchen der Mediumfluss durch die Deformation eines flexiblen Stellkörpers beeinflusst wird, lassen sich in *strömungsquere* und *strömungsparallele Deformation* unterteilen. Bei strömungsquer deformierten Stellkörpern gibt es *Quetschventile* (fluidisch oder mechanisch betätigt) und *Membran-Tiefsitzventile*. Ventile mit strömungsparallel deformierten Stellgliedern sind *Membran-Mittelstegventile*.

2.3.2 Ventile für Dickstoffe

Bei Ventilen kann zwischen Absperr- und Stellventilen unterschieden werden [67, S. 194, 225]. Für den Einsatz an Dickstoffpumpen werden Absperrventile verwendet. Im offenen Zustand sollen diese eine minimale Drosselung und im geschlossenen Zustand eine hohe Dichtigkeit aufweisen [67, S. 110]. Effekte, welche Betriebssicherheit und Lebensdauer von Dickstoffventilen negativ

beeinflussen, sind „Erosionsverschleiß, Beschädigung und Einklemmen von Feststoffpartikeln zwischen den Dichtflächen, Verkokung, Kristallisation oder Plattierungen an den Dichtflächen, Ablagerung in Toträumen und Blockieren“ [67, S. 321].

Im Folgenden wird auf die verschiedenen Bauarten von Dickstoffventilen sowie deren Eigenschaften bezogen auf die vorstehend aufgeführten Effekte eingegangen.

Kegelsitzventile (Abbildung 2.13, (a)) können unter optimalen Randbedingungen sehr viele Schaltwechsel unbeschadet durchführen. Zu den optimalen Randbedingungen zählt ein sauberes Medium. In der Dickstoffförderung werden Kegelsitzventile mit Hart- bzw. Weichdichtungen bei der Förderung feinkörniger Dickstoffe eingesetzt. Für Dickstoffe mit Fremdkörpern, welche mehrere Zentimeter groß sind, eignen sich Kegelsitzventile hingegen nicht. [10, S. 234] [53, S. 8] [66, S. 139]

Kugelsitzventile bzw. **Kugelrückschlagventile** (Abbildung 2.13, (b)) bieten den Vorteil, selbsttätige Ventile zu sein und keine Aktuatorik zu benötigen. Allerdings eignen sie sich nur für fließfähige Dickstoffe [53, S. 8]. Des Weiteren schließen Kugelsitzventile bei Dickstoffen, welche ein Größtkorn oberhalb von 15 mm besitzen, nicht vollständig [25, S. 9]. In den ersten Frischbetonpumpen wurden Kugelsitzventile eingesetzt, was zu deren Misserfolg führte [26, S. 55] [25, S. 9]. Darüber hinaus bauen Kugelsitzventile für Frischbeton vergleichsweise groß, da auch für die Ringspalte die notwendigen Mindestquerschnitte eingehalten werden müssen. Somit ist diese Ventilbauart für den Einsatz in Frischbeton ungeeignet.

Schieberventile (Abbildung 2.13, (c)) werden ab 1930 häufig als zyklisch betätigte Dickstoffventile eingesetzt und definieren für viele Jahre den Stand der Technik [25] [26, S. 55]. Heute werden sie allerdings nur noch in Anwendungen mit geringeren Zyklenzahlen als früher eingesetzt. Dies kann dadurch erklärt werden, dass Schieberventile über Toträume verfügen, welche sich zusetzen, und Nebendichtungen, welche aufgrund des abrasiven Mediums rasch verschleifen [12, S. 56]. Des Weiteren stellt die Abdichtung der Gleit- und Lagerstellen gegen Eindringen des Fördemediums eine Herausforderung dar [26,

S. 61]. An Lager- und Dichtstellen hat sich die Konstruktion großer Spalte bewährt da deren Funktion selbst bei hohem Verschleiß erhalten bleibt [26, S. 61]. In diesem Fall wird die Dichtung über die selbstdichtende Eigenschaft des Frischbetons gewährleistet. Heute werden Schieberventile nur noch vereinzelt als zyklisch betätigtes Ventil eingesetzt (z.B. EKO-Serie der PUTZMEISTER SOLID PUMPS GMBH [53, S. 8]). Verbreitet sind Schieberventile hingegen in Anwendungen, wo sie vergleichsweise selten geschaltet werden. Ein Beispiel hierfür sind Einrichtungen, welche zur Reinigung in Hochförderanwendungen benötigt werden.

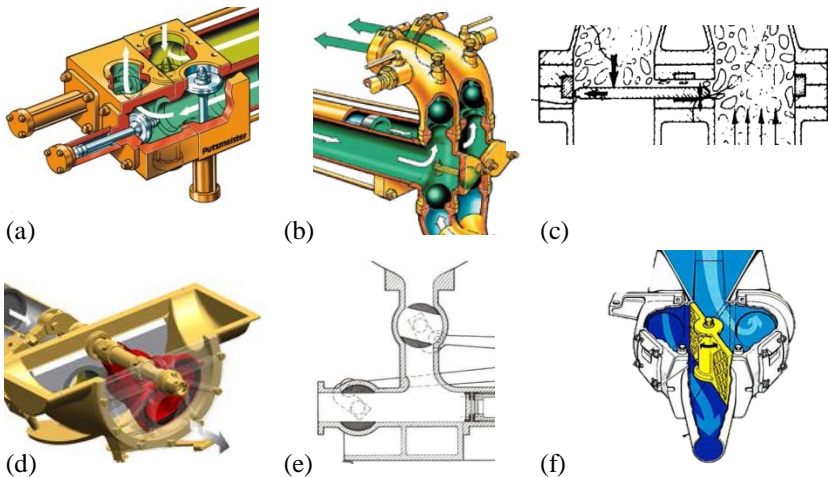


Abbildung 2.13: Ventile für Dickstoff und Frischbeton; (a) Kegelsitzventil (Firma Putzmeister) [53, S. 4], (b) Kugelsitzventil (Firma Putzmeister) [71, S. 4], (c) Schieberventil (Firma Schwing) [26, S. 63], (d) Schwenkrohrventil der Bauart Rock-Schieber (Firma Schwing) [72], (e) Küchenhahnventil (Firma Thomsen) [27, S. 143], (f) Drehklappenventil (Firma Thomsen) [73]

Schwenkrohrventile dominieren den heutigen Markt der Ventile für stark partikelbeladene Dickstoffe mit zyklischer Betätigung. Beispielhaft sind die Bauarten Rock-Schieber (Firma Schwing; Abbildung 2.13, (d)) und S-Rohrweiche (Firma Putzmeister; Abbildung 2.5) zu nennen. Bei Schwenkrohrventilen

treten Axialkräfte und je nach Bauart Drehmomente auf, welche von der Konstruktion des Trichters und der Lager abgefangen werden [26, S. 58]. "Hier besteht die Möglichkeit, Lager und Gleitstellen weitgehend aus dem Betonbereich herauszuholen, außerhalb des Einfülltrichters anzuordnen bzw. im drucklosen Bereich und in Bereichen, die nicht direkt dem Verschleiß ausgesetzt sind" [26, S. 62]. Die wichtigste Abdichtungsstelle des Schwenkrohrventils befindet sich zwischen den Förderzylindern und dem Schwenkrohr [26, S. 62]. Das Verschleißteil, welches sich am Ende des Förderzylinders befindet, wird als Brillenplatte und das auf dem Schwenkkörper als Schneidring bezeichnet. Bei dessen Verschleiß würde ein Spalt zwischen den Dichtflächen entstehen. Um dies zu verhindern, ist der Schneidring axial verschiebbar ausgeführt. Bei zunehmendem Verschleiß wird dieser automatisch¹³ nachgestellt und somit ein Spalt vermieden. [26, S. 62]. [44, S. 171]

Hahnventile (Abbildung 2.13, (e)) wie Kugelhahnventile und Kükenhahnventile sind bei frühen Konstruktionen von Frischbetonpumpen sehr verbreitet. Allerdings verfügen Hahnventile „über große Reibflächen und in gewissen Schaltsituationen über nicht vermeidbare Toträume“ [12, S. 56] [67, S. 241]. Hahnventile konnten aufgrund von „Abdichtungsprobleme bei ständig steigenden Ansprüchen an die Betonpumpen nach höheren Drücken, größeren Fördermengen und Pumpbarkeit schwieriger Betonsorten nicht mehr mithalten“ [26, S. 55]. Somit ist diese Ventilbauart für Frischbeton heute nicht mehr in Verwendung.

Drehklappenventile (Abbildung 2.13, (f)) werden bevorzugt in partikelfreien Medien eingesetzt [66, S. 96]. Für den Einsatz im Dickstofftransport gibt es eine Bauform, bei welcher die Dichtflächen während der Schließbewegung des Stellkörpers mithilfe eines Abblasesystems gereinigt werden [67, S. 322]. In alten Frischbetonpumpen sind Drehklappenventile häufig anzutreffen (z.B. [27, S. 138] [25, S. 17]). Bei Verschleiß der Seitenflächen der Drehklappe wird diese allerdings zunehmend undicht. Infolgedessen sind Ausbluten und daraus

¹³ Erläuterung der automatischen Verschleißnachstellung und druckabhängigen Anpressung im Anhang A.2

resultierende Stopferbildung häufige Probleme bei Frischbetonpumpen mit Drehklappenventilen [2, S. 26].

Quetsch- und **Membranventile** werden für sehr verschmutzte aber auch hochreine Medien eingesetzt [66, S. 81]. Der Verschleiß dieser Ventilbauart bei Nutzung für den Frischbetontransport ist allerdings aufgrund der hohen Drücke und des Größtkorns von bis zu 32 mm derart hoch, dass voraussichtlich nur wenige Schaltzyklen bis zum Ausfall durchgeführt werden könnten [12, S. 56].

Aus der vorrangegangenen Betrachtung der verschiedenen Ventilbauarten und deren Tauglichkeit für Frischbeton wird ersichtlich, dass Frischbeton eine Vielzahl einzigartiger Anforderungen wie Totraumfreiheit und Verschleißbeständigkeit an das Ventil stellt. In der folgenden Arbeit werden diese Anforderungen und die anforderungsgerechte Gestaltung genauer betrachtet.

2.4 Ventilfunktion: Dichtwirkung aufbauen

In jedem Ventil ist die Dichtfunktion von zentraler Bedeutung. „Dichtungen werden benötigt, um den Stoffübergang zwischen [den zwei Ventelseiten] [...] mit gemeinsamer Grenzfläche zu verhindern oder zu begrenzen, sie ‚sperrern‘ die Räume gegeneinander ab. Häufig ist ein hermetisches, vollständiges Sperren nicht möglich und auch nicht erforderlich. Es geht vielmehr darum, die Stoffmengen auf ein zulässiges Maß zu begrenzen“ [74, S. 203].

Bei Frischbetonventilen bzw. Dickstoffventilen im Allgemeinen kann es zu einer lokalen Verstopfung des Dichtspaltes und somit zu einer Selbstdichtung kommen [26, S. 61]. Hierfür relevante Phänomene sind aus der Selbstdichtung von Rissen und Spalten, der Durchströmung von Filtern und Feststoffschüttungen und von Gleitringdichtungen bekannt.

2.4.1 Selbstdichtung von Spalten

Dickstoffe haben teilweise eine selbstdichtende Eigenschaft, sodass durch das Medium Spalte bis zu einer gewissen Höhe abgedichtet werden können. Dieses Phänomen kann sowohl bei berührenden als auch bei berührungslosen Dichtungen auftreten. In beiden Fällen basiert die Verstärkung der Dichtwirkung auf einer mechanischen Verengung des Strömungspfad auf Grund von Absetzen und Verhaken feiner Bestandteile vor und im Dichtspalt [75, S. 519]. [76]

In [77] wird von HORNIG, MEICHSNER und WOLF die Selbstdichtung von Trennrissen in Arbeitsfugen zwischen Betonierabschnitten im Tunnelbau zusammengefasst. Bei dieser Untersuchung wird zwischen zwei Betonkörper eine 3 mm starke Schicht aus mineralischer Dichtungsschlämme eingebracht. Nach einer bestimmten Zeit werden die Betonkörper auseinander bewegt und somit ein 0,3 mm hoher Riss erzeugt. Von der einen Seite wird der Riss mit unter 0,025 MPa Druck stehendem Wasser beaufschlagt.

Der zeitliche Verlauf des Volumenstroms der Leckage ist in Abbildung 2.14 dargestellt. Es ist festzustellen, dass diese einer abklingenden Exponentialfunktion folgt, welche asymptotisch gegen Null läuft. Nach drei Tagen liegt die durchschnittliche Durchflussmenge bei 1 % und nach 14 Tagen bei 1 % der anfänglichen. Es kann eine Selbstdichtung festgestellt werden, welche durch die mineralischen Dichtungsschlämme unterstützt wird. Bei dem Trennriss, welcher nicht mit Dichtungsschlämme behandelt ist kann die Verringerung des Volumenstroms durch die Bildung von Calciumkarbonatkristalle im Trennriss erklärt werden. Die Calciumkarbonatkristalle bilden sich aufgrund einer chemischen Reaktion zwischen Zement und Wasser. ([77, S. 239 f]; Wissenschaftlicher Schriftwechsel¹⁴)

In [75] werden vergleichbare Versuche sowie deren Ergebnisse zu dem Selbstdichtungsvermögen von Jauche, Gülle und Silagesickersäften in Betonbehältern, welche Risse aufweisen, beschrieben.

¹⁴ Wissenschaftlicher Schriftwechsel des Verfassers mit Herrn Dr. Heinz Meichsner im Oktober 2019

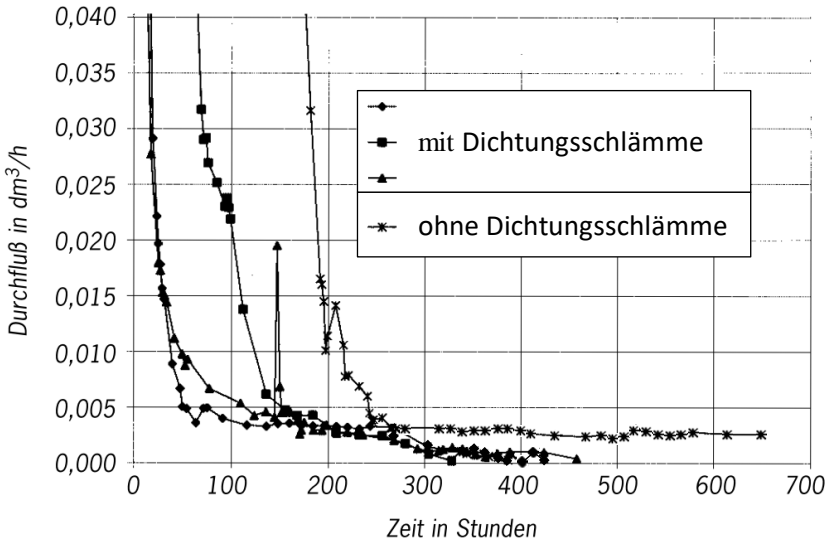


Abbildung 2.14: Leckagestrom über der Zeit durch einen 0,3 mm hohen, 200 mm langen und 500 mm breiten Spalt bei einer Druckdifferenz von 0,025 MPa mit und ohne Dichtungsschlämme (vereinfachte Legende [77, S. 240]; [sic] Darstellung korrigiert¹⁵)

2.4.2 Durchströmung von Feststoffschüttungen und Filtern

Frischbeton kann als partikelbeladener Dickstoff angesehen werden. Dieser kann aufgrund einer Druckdifferenz beispielsweise durch einen Dichtspalt eines Ventils hindurchgepresst werden. Hierbei trennt sich der Dickstoff in seine Phasen auf. Vergleichbares geschieht beim Durchströmen von Feststoffschüttungen und Filtern.

¹⁵ Wissenschaftlicher Schriftwechsel des Verfassers mit Herrn Dr. Heinz Meichsner im Oktober 2019: Bei dem Abdruck des Artikels kam es zu einem Fehler der Markierungen im Liniendiagramm [77, S. 240]. Dieser wurde nach Rücksprache mit Herrn Dr. Heinz Meichsner in dieser Arbeit angepasst.

Feststoffschüttungen

Als Feststoffschüttung beziehungsweise Haufwerk wird eine regellose oder auch geordnete Anordnung von Einzelkörpern bezeichnet [78, S. 247]. Beispiele aus dem verfahrenstechnischen Apparatebau sind Reaktoren, Adsorber und Ionenaustauscher. [78, S. 248-249]

Der Lückengrad bzw. die Porosität werden laut Formel (2.1) als das Verhältnis aus dem Lückenvolumen ($V_{ges} - V_{P ges}$) zu dem gesamten Schichtvolumen (V_{ges}) einer Schüttung definiert [78, S. 250].

$$\varepsilon = \frac{V_{ges} - V_{P ges}}{V_{ges}} \quad (2.1)$$

Bei einer Schüttung aus gleich großen Kugeln ergibt sich ein mittlerer Lückengrad von ca. 0,4. Des Weiteren wird der Lückengrad von dem Abstand der Partikel von der Behälterwand beeinflusst. Dies wird durch Abbildung 2.15 (a) verdeutlicht. [78, S. 251]

Mit Annäherung an die Wand – Abnahme bezogener Wandabstand – nimmt der Lückengrad zu. Direkt an der Wand berühren die Partikel diese nur punktuell [78, S. 251]. Der Lückengrad ist somit eins. Die Ausströmgeschwindigkeit ist direkt an der Wand aufgrund der Haftbedingung gleich null. Da der Lückengrad in unmittelbarer Nähe zur Wand erhöht ist, nimmt an dieser Stelle der Volumenstrom zu [79, S. L20] (Abbildung 2.15 (b)). Diese erhöhte Strömungsgeschwindigkeit in Wandnähe wird als Randgängigkeit bezeichnet [79, S. L20].

Des Weiteren liefert die Literatur zu Feststoffschüttungen einen Zusammenhang zwischen dem Strömungswiderstand einer Feststoffschüttung und dem Kugeldurchmesser des Haufwerks. Dieser besagt, dass mit abnehmendem Kugeldurchmesser der Strömungswiderstand steigt. [78, S. 248-258]

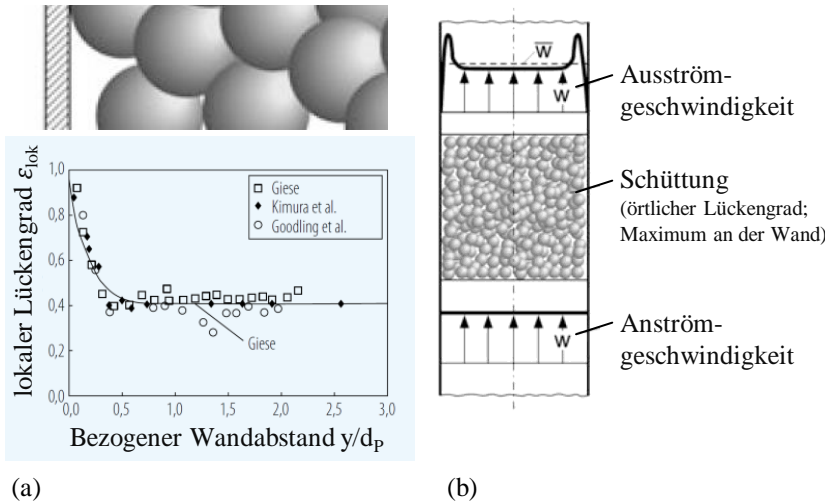


Abbildung 2.15: Durchströmung von Feststoffschüttungen; (a) Abhängigkeit des örtlichen Lückengrades ϵ_{lok} vom bezogenen Wandabstand y/d_p für eine monodisperse Kugelschüttung (oben: [78, S. 251]; unten: [79, S. L20], Beschriftung angepasst); (b) Geschwindigkeitsverteilung in Füllkörperschichten bei örtlich veränderlichem Lückengrad mit einem Maximum nahe der Wand ([78, S. 254], Beschriftung angepasst)

Filter und druckgetriebene Membranverfahren

In zahlreichen technischen Anwendungen werden Filter und druckgetriebene Membranverfahren zum Separieren von Feststoffen aus Flüssigkeits- oder Gasströmen verwendet [78, S. 277]. Die Filterverfahren lassen sich anhand der Prozessführung in *Oberflächen-* und *Tiefenfiltration* unterteilen. [78, S. 278] [80, S. 3] [81, S. 4]

Bei der *Oberflächenfiltration* baut sich auf der Filteroberfläche eine Schicht aus Partikeln auf (Abbildung 2.16). Dieser sogenannte Filterkuchen sorgt erst für die eigentliche Filterwirkung. Mit der Filtrationsdauer werden an der Oberfläche des Filterkuchens weitere Partikel abgeschieden, wodurch die Filterkuchenhöhe steigt. Durch die wachsende Filterkuchenhöhe steigt der Strömungswiderstand und sinkt der Filtratfluss. Aus diesem Grund wird diese Art der Filtration auch als *Dead-End-Filtration* bezeichnet. [78, S. 279, 289]

Bei Filtern kommt es funktionsbedingt während deren Betrieb zur Ablagerung von Partikeln und somit zu einer Veränderung der Porosität. Feine Partikel neigen dazu, weiter in Strömungsrichtung gespült zu werden bis sie sich ablagern und sorgen somit für einen inhomogenen Aufbau des Filterkuchens [82, S. 43]. Durch die sinkende Porosität steigt der Strömungswiderstand. [78, S. 288]

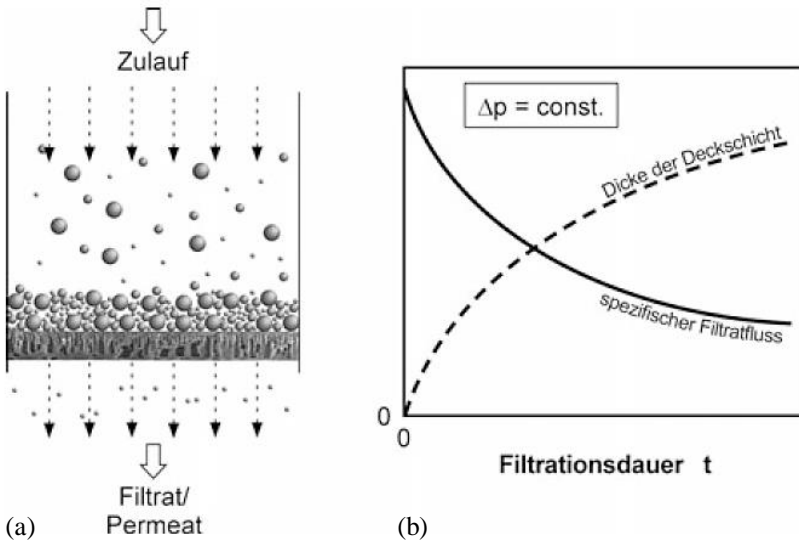


Abbildung 2.16: Oberflächenfiltration; (a) Prinzip der Kuchenfiltration; (b) Dicke der Deckschicht und spezifischer Filtratfluss über der Filtrationsdauer [78, S. 279]

2.4.3 Dichtungseffekte an Gleitringdichtungen

Gleitringdichtungen (GLRD) gehören zu den berührenden, dynamischen Dichtungen für rotatorische Bewegungen. Häufig eingesetzt werden GLRD beispielsweise zur Abdichtung von Pumpenwellen.

Im Wesentlichen besteht eine GLRD (Abbildung 2.17) aus einem rotierenden (1) und einem stationären (2) Gleitring, welche mithilfe einer Feder (3)

aufeinander gepresst werden. Die Dichtfläche zwischen den Gleitringen hat eine Ringform (Abbildung 2.18 (b)). Je nach Betriebszustand schwimmt der axial bewegliche Gleitring aufgrund der Drehbewegung auf. [74, S. 215-217]

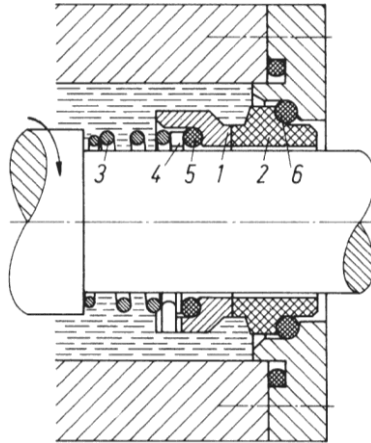


Abbildung 2.17: Axial-Gleitringdichtung (Burgmann). 1 rotierender Gleitring, 2 stationärer Gegenring, 3 Druckfeder, 4 Unterlegtring, 5 Dichtring, 6 Lagerring [21, S. K24]

Abbildung 2.18 zeigt die physikalischen Größen an einem geraden und einem ringförmigen Dichtspalt, die in der weiteren Arbeit verwendet werden. Sowohl eine GLRD als auch einige Frischbetonventile verfügen über ringförmige Dichtflächenpaare (Abbildung 2.18 (b)). Weitere Gemeinsamkeiten der berührenden Dichtungen sind harte Dichtpartner, eine verschleißabhängige Dichtspalthöhe und die radiale Durchströmung des Dichtspalts durch die Leckage. Da eine GLRD vom Aufbau vergleichbar mit einigen Dichtungen an Frischbetonventilen ist, wird im Folgenden auf den Druckverlauf im Dichtspalt einer GLRD und auf die Durchströmung eines geraden Dichtspaltes eingegangen.

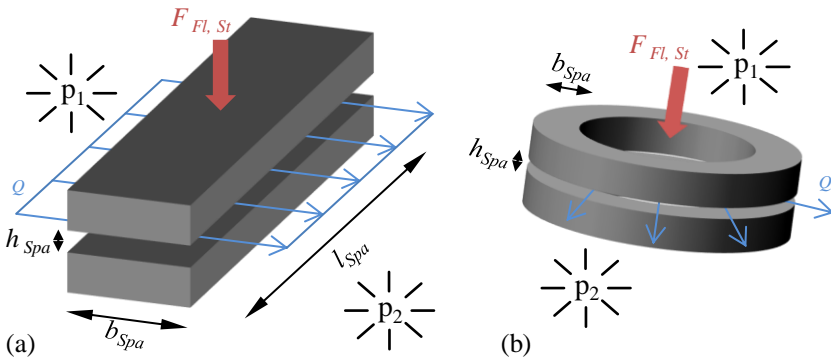


Abbildung 2.18: physikalische Größen an Dichtspalten; (a) gerader Dichtspalt; (b) ringförmiger Dichtspalt

Wie in Abbildung 2.19 dargestellt, liegt bei einer GLRD am Innenradius der ringförmigen Dichtfläche der hohe Druck p_1 an. Am Außenradius herrscht ein niedriger Druck von p_2 . Angetrieben durch diese Druckdifferenz kommt es zu einem radialen Leakagestrom durch den Dichtspalt. Abhängig vom Verlauf des Strömungswiderstands entlang des Dichtspalts bildet sich ein Verlauf des statischen Drucks aus. Aus dem auf die Dichtflächen wirkenden statischen Druck resultiert die Kraft $F_{Fl, st}$. Des Weiteren tritt zwischen den Dichtflächen eine Pressung p_K auf. [74, S. 217-219]

Wenn der Durchmesser einer ringförmigen Dichtfläche im Verhältnis zur Dichtflächenbreite deutlich größer ist kann anstelle der ringförmigen Dichtfläche deren gerade Abwicklung betrachtet werden (Abbildung 2.18; vergleichbare Argumentation [83, S. 24]). Bei einem geraden Dichtspalt ist der längenbezogene Strömungswiderstand konstant. Somit ergibt sich bei einer konstanten Dichtspalthöhe eine lineare Druckabnahme von p_1 auf p_2 (Abbildung 2.19, (a)) [74, S. 219] [84, S. 225] [85, S. 71-72].

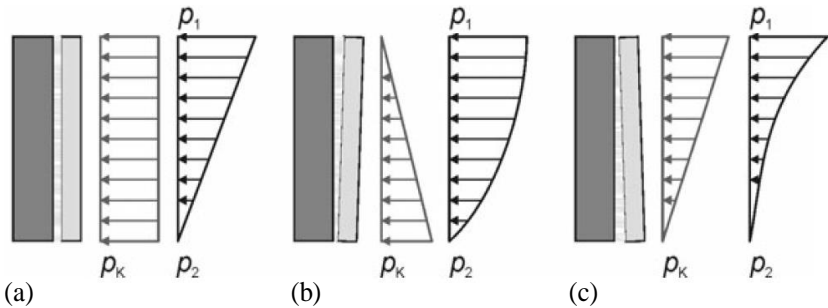


Abbildung 2.19: Pressungsverlauf (p_k) und Verlauf des stat. Drucks (p_1 , p_2) im Dichtspalt eines GLRD bei (a) konstanter, (b) konvergenter und (c) divergenter Dichtspalthöhe [74, S. 217]

Die wesentlichen Abmessungen des Dichtspalts sind die Dichtspalllänge l_{spa} , -breite b_{spa} und -höhe h_{spa} . MÜLLER leitet für einen derartigen Aufbau die Formel (2.2) des Leckagestroms her [83, S. 21-24].

$$Q = \frac{l_{spa} * h_{spa}^3 * \Delta p}{12 * \eta * b_{spa}} \quad (2.2)$$

Diese Formel beschreibt den Leckagevolumenstrom in Abhängigkeit von geometrischen Parametern des Spaltes, der anstehenden Druckdifferenz (Δp) und der dynamischen Zähigkeit (η).

2.5 Ventilfunktion: Dickstoff verdrängen und Fremdkörper zerstören

Neben der Ventilfunktion *Dichtung aufbauen* sind die Funktionen *Dickstoff verdrängen* und *Fremdkörper überwinden* von hoher Bedeutung. Die Funktion *Fremdkörper überwinden* dient dazu, die festen Bestandteile des Dickstoffs zu überwinden, sodass die Dichtflächen weiter angenähert werden können. Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Funktion *Fremdkörper überwinden* umzusetzen, auf welche im weiteren Verlauf der Arbeit eingegangen wird. Eine bei Dickstoffventilen oft verwendete Vorgehensweise ist das *Fremdkörper*

zerstören. Im Fall von Frischbeton handelt es sich bei den zu überwindenden Fremdkörpern um Gestein.

2.5.1 Werkstoffeigenschaften von Gestein

Bei dem Überwinden der Fremdkörper durch Zerstörung spielen dessen Werkstoffeigenschaften eine Rolle.

Verformung von Gestein

Bei kleinen Verformungen bzw. Dehnungen kann bei Gestein ein proportionales Spannungs-Dehnungs-Verhalten angenommen werden. Demzufolge gilt das Hooksche Gesetz (Formel (2.3)). [86, S. 9] [87, S. 21]

$$\sigma_z = E * \varepsilon_z \quad (2.3)$$

In Formel (2.3) steht σ_z für die Spannung in z-Richtung, E für den E-Modul und ε_z für die Dehnung in z-Richtung [87, S. 21]. Der E-Modul von Gestein reicht von ca. 10 000 N/mm² für Sandstein bis ca. 120 000 N/mm² für einige Gabors. Dieser Materialkennwert unterliegt allerdings auch innerhalb einer Gesteinsart hohen Schwankungen und wird durch anisotropes Werkstoffverhalten überlagert. [87, S. 21, 87]

Sprödes und duktiles Materialverhalten

Das Hooksche Gesetz gilt nur bis zu einer gewissen Dehnung. Wird diese überschritten, kommt es zu einem Bruch des Materials. Je nachdem ob die Bruchdehnung klein oder groß ist, wird zwischen sprödem und duktilem Materialverhalten unterschieden [88, S. 159]. Ein Spröbruch ist auf Rissausbreitung und ein duktiler Bruch auf Wandern von Versetzungen¹⁶ zurückzuführen [88, S. 168]. Abhängig von der Deformationsgeschwindigkeit, der Temperatur

¹⁶ „Versetzungen sind die Träger der plastischen Verformung. Es handelt sich dabei um eindimensionale oder linienförmige Gitterfehler, sozusagen ‚Webfehler‘ oder ‚Laufmaschen‘ im Atom- aufbau des Kristallgitters“ [89, S. 14].

und dem Druckniveau kann ein und dasselbe Gestein allerdings sprödes oder duktileres Materialverhalten aufweisen [88, S. 159].

Versagen von Gestein

Als Versagenskriterium für die Zerstörung von Gestein wird bezeichnet, wenn „infolge äußerer und/oder innerer mechanischer Beanspruchungen [...] die atomaren bzw. molekularen Bindungen zerstört werden und dadurch eine freie Oberfläche entsteht“ [90, S. 15]. Um das Eintreten des Versagens vorherzusagen, gibt es eine Vielzahl an Versagenshypothesen [91, S. 46-48]. Für spröde Werkstoffe wird die Hauptspannungshypothese angewendet [91, S. 47]. Diese besagt, dass Versagen eintritt, wenn die größte Hauptnormalspannung die Zugfestigkeit σ_z oder aber die kleinste Hauptnormalspannung die Druckfestigkeit σ_d übersteigt [91, S. 47]. Bei Gestein liegt das Verhältnis aus Zugfestigkeit σ_z und Druckfestigkeit σ_d bei einaxialen Problemen bei 1/10 bis 1/5 [87, S. 22].

Für Versuche, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden, kommen Kalkstein und Basalt zum Einsatz. Diese Gesteine werden für die Herstellung von Frischbeton verwendet und weisen eine unterschiedliche einaxiale Druckfestigkeit auf, wodurch die auftretende Bandbreite repräsentiert wird. Nach [92, S. 265] besitzt Kalkstein eine einaxiale Druckfestigkeit von 80 bis 240 N/mm² und Basalt von 160 bis 400 N/mm².

Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das Werkstoffverhalten

Die Viskosität eines Fluids hat zur Folge, dass der Scherwiderstand mit der Scherrate ansteigt. Für Feststoffe wird hingegen oft angenommen, dass die Scherrate keinen Einfluss auf deren Werkstoffverhalten hat (rate independent). [88, S. 164] Dies gilt allerdings nur in erster Näherung. Mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit ändert sich das Werkstoffverhalten von duktil zu spröde [87, S. 70]. Die Bruchdehnung nimmt somit ab und die Bruchspannung zu (Abbildung 2.20). Dies kann dadurch erklärt werden, dass bei einer hohen Belastungsgeschwindigkeit der sofortige Trennbruch der plastischen Verformung zuvorkommt. [87, S. 70]

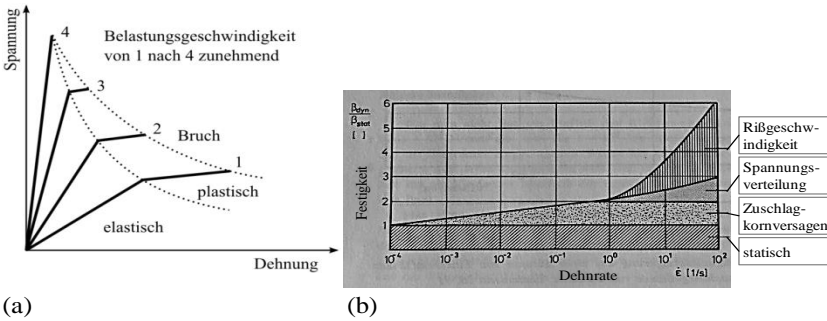


Abbildung 2.20: Belastungsgeschwindigkeitsabhängige Steineigenschaften; (a) Sprödigkeit abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit [87, S. 72]; (b) Ursachen der Festigkeitssteigerung in Abhängigkeit von der Dehngeschwindigkeit ([93, S. 140] Beschriftung angepasst)

2.5.2 Zerstörungsmechanismen

Um Fremdkörper im Dichtspalt eines Dickstoffventils zu überwinden und das Ventil weiter zu schließen, können diese zerstört werden.

Hierzu werden die Fremdkörper entweder abgeschert oder zerdrückt. Abbildung 2.21 zeigt die dazugehörigen Mohr'schen Spannungskreise.

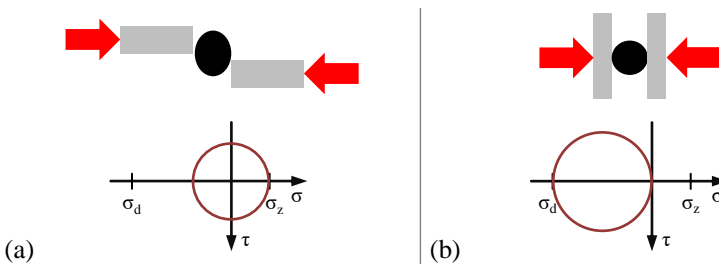


Abbildung 2.21: Zerstörungsmechanismen von Fremdkörpern im Dichtspalt eines Dickstoffventils mit dazugehörigem Mohr'schen Spannungskreis; (a) Fremdkörper abscheren; (b) Fremdkörper zerdrücken (in Anlehnung an [12, S. 85])

Um die spröden Fremdkörper zu zerdrücken, muss nach der Normalspannungshypothese deren Druckfestigkeit σ_d überwunden werden (Abbildung 2.21 (b)). Beim Abscheren versagt der Fremdkörper, wenn seine Scherfestigkeit überschritten ist. Mithilfe des Mohr'schen Spannungskreises wird ersichtlich, dass bei einer reinen Scherbelastung die Hauptspannungen den Scherspannungen entsprechen (Abbildung 2.21 (a)). Nach der Normalspannungshypothese folgt, dass der spröde Fremdkörper unter einer Scherbelastung aufgrund der Überschreitung der Zugfestigkeit σ_z versagt. Da bei Gestein die Zugfestigkeit ein Bruchteil der Druckfestigkeit ist, folgt unter der Annahme, dass die Bruchflächen gleich groß sind, dass die Kraft zum Zerdrücken größer als zum Abscheren ist.

Fremdkörper abscheren

Im Folgenden wird der Schervorgang einer zusammenhängenden Bodenprobe erläutert. Die hierfür verwendeten Versuche sind zum einen der *Triaxialversuch* und zum anderen der *Rahmenscherversuch*. Im Folgenden wird der Rahmenscherversuch erläutert (Abbildung 2.22). Für weiterführende Informationen zu dem Triaxialversuch wird auf die Quellen [88, S. 113-115] und [86, S. 8-9] verwiesen.

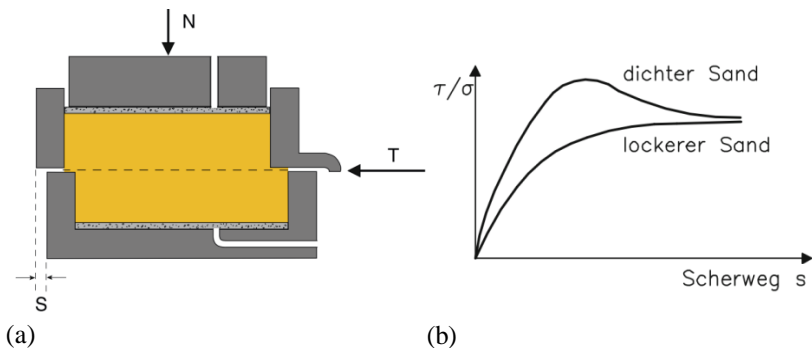


Abbildung 2.22: Rahmenscherverfahren; (a) Prinzipskizze des Rahmenscherversuchs (Normalkraft N , Scherkraft T , Scherweg S) [88, S. 111]; (b) Ergebnisse eines Rahmenscherversuchs mit lockerem und dichtem Sand [88, S. 112]

Bei dem in Abbildung 2.22 dargestellten Rahmenscherversuch wird eine Bodenprobe in einen Kasten eingebracht, welcher aus einer oberen und einer unteren Hälfte besteht. Daraufaufgehend wird eine Normalkraft (N) und eine Scherkraft (T) aufgebracht und der Scherweg (S) gemessen. Der erläuterte Versuch kann entweder kraftgesteuert oder weggesteuert durchgeführt werden. [88, S. 110-112]

Fremdkörper zerdrücken

Zur Abschätzung der Druckfestigkeit von Gesteinsproben wird in der Geotechnik der sogenannte *Punktlastversuch* durchgeführt. Mithilfe des Prüfgeräts wird in die Gesteinsprobe eine definierte Kraft über Kegelspitzen eingeleitet und die Kraft gemessen, bei welcher die Probe zerbricht. [88, S. 160-161] [86, S. 9-10]



Abbildung 2.23: Prinzipskizze des Punktlastversuchs [88, S. 161]

Der P-L-Index I_s korreliert mit der Druckfestigkeit und berechnet sich nach Formel (2.4) aus dem Quotienten aus Bruchkraft F und dem Quadrat des äquivalenten Durchmesser D_e^2 der Gesteinsprobe. [86, S. 9-10]

$$I_s = \frac{F}{D_e^2} \quad (2.4)$$

3 Forschungshypothese und -fragen

Die vorausgegangenen Kapitel legen den Stand der Technik und Forschung in den Bereichen Frischbetoneigenschaften, Dickstoffförderung, Frischbetonventile sowie den Ventilfunktionen *Dichtwirkung aufbauen* und *Dickstoff verdrängen und Fremdkörper zerstören* dar.

Erläutert wird, dass es verschiedene Ansätze für Konstantflussschleusen für Frischbeton gibt. Da diese Ansätze allerdings zahlreiche Nachteile aufweisen, hat keiner dieser die Marktreife erreicht. Es wurde gezeigt, dass dies wiederum auf fehlende, für Frischbeton geeignete, zyklisch betätigte Ventile zurückgeführt werden kann. Um anforderungsgerechte Frischbetonventile entwickeln zu können, ist ein tiefes Verständnis der Teilfunktionen des Ventils und der Wechselwirkungen des Ventils sowie des Arbeitsmediums unerlässlich. Auf phänomenologischer Ebene sind ähnliche Effekte von der Selbstdichtung von Rissen, Filtern, Gleitringdichtungen und den Untersuchungsmethoden für Gestein bekannt. Da sich die Rahmenbedingungen wie Arbeitsmedium, Einwirkungszeitraum, Druck und Riss- bzw. Dichtspaltdimensionen dieser Gebiete allerdings von denen eines Frischbetonventils unterscheiden, lassen sich die Erkenntnisse nicht übertragen. Demzufolge illustrieren die vorhandenen Forschungsergebnisse zwar die Selbstdichtung von Spalten, lassen aber keine konkreten Rückschlüsse auf das Vorhandensein vergleichbarer Phänomene bei der Frischbetonförderung zu. Aus diesem Grund müssen die Frischbetonventilfunktionen genauer untersucht werden. Erst auf dieser zunächst zu schaffenden Basis kann ein anforderungsgerechtes Frischbetonventil und somit eine Konstantflussschleuse entwickelt werden.

Aus dem geschilderten Zusammenhang lässt sich folgende Forschungshypothese ableiten¹:

Es kann ein Ventil für Frischbeton konstruiert werden, mithilfe dessen von zwei Förderzylindern ein konstanter Fördervolumenstrom erzeugt werden kann.

Diese Forschungshypothese ist beantwortet sobald die folgenden Forschungsfragen bestätigt oder widerrufen wurden¹:

1. Welche sind die wesentlichen Anforderungen an das Frischbetonventil?
2. Welche Effekte treten beim Überwinden von Fremdkörpern im Dichtspalt eines Frischbetonventils auf?
3. Welche Effekte treten beim Dichten eines Frischbetonventils auf?
4. Welche Anforderungen werden an ein Frischbetonventil gestellt und welche konstruktiven Lösungen gibt es?
5. Wie kann eine konstruktive Lösung einer Konstantflusspumpe für Frischbeton mit zwei Förderkolben aussehen?

Diese Dissertation beschäftigt sich mit der Bearbeitung dieser fünf Forschungsfragen. Somit leistet sie einen Beitrag zur Entwicklung von Konstantflusspumpen für Frischbeton unter genauerer Betrachtung der Dickstoffventile.

¹Wissenschaftliches Gespräch des Verfassers mit Herrn UNIV. PROF. MARCUS GEIMER im Oktober 2017 und weiteren Terminen

4 Situationsanalyse und Anforderungsliste einer Konstantflusspumpe für Frischbeton

Im Folgenden wird eine systematische Situationsanalyse durchgeführt. Diese dient der Sammlung, Analyse und Strukturierung aller relevanten Informationen. Hierdurch wird die Basis des sich anschließenden Problemlösungsprozesses gelegt. [94, S. 5]

Im ersten Schritt wird die Anforderungsliste der Konstantflusspumpe vorgestellt (Kapitel 4.1). Anschließend wird unter Berücksichtigung der vorgestellten Anforderungsliste diskutiert, welche aus dem Stand der Technik bekannten Fördermittel den Anforderungen gerecht werden (Kapitel 4.2).

4.1 Anforderungsliste einer Konstantflusspumpe für Frischbeton

Die Anforderungsliste ist das Ergebnis der Präzisierungsphase. Diese enthält sämtliche Anforderungen an das Produkt. Somit beinhaltet die Anforderungsliste „nicht nur die Anforderungen, welche die Interessen des Kunden berücksichtigen (Lastenheft), sondern auch solche, die insbesondere die Interessen des Unternehmens wahren (Pflichtenheft). Zudem müssen die im Allgemeinen sehr umfangreichen Marktrahmen, wie z.B. Gesetze, Standards oder Vorschriften, ebenfalls berücksichtigt werden“ [95, S. 320].

Tabelle 4.1 ist ein Auszug der Anforderungsliste der Konstantflusspumpe für Frischbeton, welcher die Hauptaufgaben zeigt. Die vollständige Anforderungsliste, welche neben Hauptaufgaben auch Nebenaufgaben beinhaltet, ist

im Anhang auf Seite 211 zu finden. Erstellt wurde die Anforderungsliste durch eine multidisziplinäre Gruppe von Fachleuten.

Tabelle 4.1: Auszug der Anforderungsliste; Hauptaufgabe der Konstantflusspumpe für Frischbeton (nach [96, S. 14])

Registrierenummer		Produkt:		Bearbeiter:		Datum:		Blatt:		
-		Konstantflusspumpe für Frischbeton		Weber		2.10.2015 (erstellt)		1		
Anforderungsliste I										
Gliederungsteil			Anforderungen				Zugriffsteil			
Aufgabenart	Aufgabenbereich	Beschriebene Angaben (qualitativ)			Zahlenangabe (quantitativ)	Anforderungsart	Quelle			
		Nr.	1		2	3	4	5		
Hauptaufgabe	Druckpulsation / Betriebsweise	1.	Fördergüte von $\alpha_{max} < 1,2$ und $\alpha_{min} > 0,8$ in bestimmten Betriebspunkten (z.B. bei niedrigen und mittleren Förderströmen)			Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.		
		2.	Fördergüte von $\alpha_{max} < 1,2$ und $\alpha_{min} > 0,8$ im kompletten Betriebsspektrum (z.B. auch bei großen Förderströmen)			Wu	Zielvereinb.	P.M. / R.W.		
	pumpbares Material	3.		Beton mit einem Größtkorn von 32 mm pumpbar		Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.		
	Förderdruck	4.			85 bar Beton		Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.	
	Förderstrom	5.	Durch Förderleitung				Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.	
		6.			150 m ³ /h Beton		Fo		P.M. / R.W.	

Die erste Hauptanforderung ist eine Fest-Forderung (Fo) und besagt, dass der Förderdruck in bestimmten Betriebspunkten lediglich eine geringe Pulsation aufweisen darf. In der darauf folgenden Wunsch-Forderung (Wu) wird das Bestreben formuliert, dass der Förderdruck über das komplette Betriebsspektrum eine geringe Pulsation aufweist. Des Weiteren muss die Pumpe in der Lage sein einen Frischbetonvolumenstrom von 150 m³/h mit einem Größtkorn von bis zu 32 mm unter 85 bar durch die Förderleitung zu fördern.

4.2 Fördermittel für Frischbeton

In dem Kapitel Stand der Technik wird ein allgemeiner, medienunabhängiger Überblick der Fördermittel gegeben (Abbildung 2.4; Kapitel 2.2.1). Auf diese Einteilung aufbauend wird im Folgenden diskutiert, welche der vorgestellten Fördermittel sich für die Konstantflusspumpe für Frischbeton eignen. Hierzu

werden mithilfe der Anforderungsliste die für die Frischbetonkonstantflusspumpe nicht geeigneten Fördermittel systematisch ausgeschlossen.

Fördermittel (erste Ebene) lassen sich in Überdruck bzw. Rohrförderer und in Gleichdruck- bzw. Offenförderer unterteilen (zweite Ebene). Es gibt Frischbetonfördereinheiten, welche nach dem Prinzip des Offenförderers arbeitet (z.B. [27, 182-184], [41], [40], Kapitel 2.2.2). In dieser Arbeit soll allerdings das Maschinenkonzept eines Rohrförderers beibehalten werden (siehe Anforderungsliste Nr.: 4, 6, 7).

Auf der dritten Ebene lassen sich die Rohrförderer in Verdrängungspumpen, Strömungspumpen und Schleppumpen unterteilen. Bei Schleppumpen, wie dem zentrischen Schneckenförderer, kann die Förderschnecke durch den Frischbeton zugesetzt werden [25, S. 20]. Aus diesem Grund eignet sich dieses Prinzip nicht für eine Frischbetonpumpe (siehe Anforderungsliste Nr.: 3). Strömungspumpen beruhen auf dynamischen Prinzipien und erfordern prinzipbedingt hohe Strömungsgeschwindigkeiten und starke Strömungsumlenkungen. Da Frischbeton abrasiv ist und in gängigen Anwendungen über ein Größtkorn von 32 mm (siehe Anforderungsliste Nr.: 3) verfügt, sind sowohl hohe Strömungsgeschwindigkeiten, als auch starke Strömungsumlenkungen zu vermeiden, um Pumpenverschleiß zu minimieren (siehe Anforderungsliste Nr.: 13, 14). Somit eignen sich Strömungspumpen nicht zum Fördern von Frischbeton.

Auf Ebene vier lassen sich die Verdrängerpumpen in Hub- und Rotationsverdränger aufteilen. Bei der Bewertung ihrer Eignung für Frischbeton muss beachtet werden, dass bei Hubverdrängern neben der Hubverdrängereinheit zur Erfüllung der Pumpfunktion noch Ventile benötigt werden, welche den Ein- und Auslass des Fördermediums steuern. Rotationsverdränger hingegen benötigen keine separaten Ventile. Die Ventilfunktion wird bei Rotationsverdrängern bereits durch das Zusammenspiel des Verdrängerkörpers mit dem Gehäuse realisiert. Da die Anforderungen, welche das Arbeitsmedium an die Pumpe stellt, wie zum Beispiel Dichtbarkeit der Hochdruck- zur Niederdruckpumpenseite, durch eine Hubverdrängerpumpe in einem höheren Maß erfüllt werden können ist diese zu bevorzugen.

Hubverdrängerpumpen lassen sich auf der fünften Ebene in Stufenkolben-, Tauchkolben-, Scheibenkolben-, Membran- und Ventilkolbenpumpen unterteilen. Bei Stufen- und Tauch- bzw. Plungerkolbenpumpen befindet sich die Dichtung der Hubbewegung am Gehäuse und bewegt sich somit nicht mit. Aus diesem Grund bildet sich zeitweise ein Spalt zwischen Kolben und Gehäuse, in welchem sich das zu fördernde Medium befindet. In diesem Spalt kann sich Frischbeton verkeilen und aushärten. Hierdurch kommt es zu einem raschen Verschleiß der Oberfläche des Kolbens. Da dies im Widerspruch zu der in der Anforderungsliste geforderten hohen Lebensdauer und Zuverlässigkeit steht, werden die Plunger- und Stufenkolbenpumpe verworfen (siehe Anforderungsliste Nr.: 13, 14, 22, 23). Membranpumpen zeichnen sich durch statische Dichtungen zwischen der Membran und dem Pumpengehäuse aus. Die Verdrängung basiert auf einer Verformung der Membran. Nachteilige Eigenschaften für dieses Prinzip sind, dass der Verdrängerhub und somit das Verdrängervolumen vergleichsweise gering ist, und dass es durch die statische Dichtung zu Ablagerungen in Toträumen kommen kann. Somit verbleiben die Scheibenkolbenpumpe und die Ventilkolbenpumpe, bei welchen sich die Dichtung mit dem Kolben mitbewegt. Die zwei Fördermittel unterscheiden sich lediglich in der Position der Ventile. Bei der Ventilkolbenpumpe sitzt eines der Ventile im sich bewegenden Kolben, wohingegen bei der bei der Scheibenkolbenpumpe beide Ventile gehäusefest sind.

5 Hubkolbenpumpverfahren für Konstantflusspumpen

Einleitend wird die allgemeingültige Systematik der Konstantflusspumpen, welche nach dem Hubkolbenprinzip arbeiten, vorgestellt (Kapitel 5.1). Anschließend wird diese mit Hinblick auf die medium- und maschinenseitigen Anforderungen diskutiert (Kapitel 5.2).

5.1 Systematik der Hubkolbenkonstantflusspumpen

Es gibt verschiedene Vorgehensweisen, um einen konstanten oder kontinuierlichen Volumenstrom mithilfe einer Hubkolbenpumpe durch ein Rohr zu fördern. Eine systematische Kategorisierung der zwei zugrundeliegenden Prinzipien ist in Abbildung 5.1 dargestellt. In der Systematik ist eine Unterscheidung einmal nach dem Förderverfahren und einmal nach der Primärer-Ventildichtung möglich. Deren Ausprägungen können beliebig miteinander kombiniert werden. Durch das Förderverfahren wird der Medienstrom bereitgestellt, auf welchen durch die Dickstoffventile Einfluss genommen wird. Die Primärer-Ventildichtung beschreibt hierbei sowohl eine Konstruktionseigenschaft des Ventils als auch ein Betätigungsverfahren desselben.

Förderverfahren

Mithilfe des Förderverfahrens wird ein kontinuierlicher Förderstrom erzeugt. Dies kann zum einen mit dem *Förder-Überbrücker-Prinzip* und zum anderen mit dem *Überblendungs-Prinzip* umgesetzt werden.

Förder-Überbrücker-Prinzip

Bei dem Förder-Überbrücker-Prinzip wird durch eine Fördereinheit (z.B. durch eine S-Rohr-Pumpe) ein pulsierender Förderstrom erzeugt (Abbildung

5.1: Förder-Überbrücker-Prinzip, Q_{F1} und Q_{F2}). Eine nachgeschaltete Überbrückereinheit saugt den Frischbeton derart an und stößt diesen wieder aus, sodass nach der Überbrückereinheit ein konstanter Förderstrom fließt (Abbildung 5.1: Förder-Überbrücker-Prinzip, $Q_{\ddot{U}}$ und Q_F). Bei diesem Verfahren muss während der Förderphase der Überbrückereinheit darauf geachtet werden, dass es nicht zu einem Rückstrom des Dickstoffs zur Fördereinheit kommen kann. Im Falle einer S-Rohr-Pumpe als Fördereinheit muss demzufolge ein zusätzliches Frischbetonventil in die Förderleitung eingebaut werden. Die Funktion des Überbrückers (Abbildung 5.1: Förder-Überbrücker-Prinzip, $Q_{\ddot{U}}$) kann durch einen weiteren Förderkolben gewährleistet werden, welcher in einem zusätzlichen Förderzylinder läuft und durch einen separaten Aktuator betätigt wird.

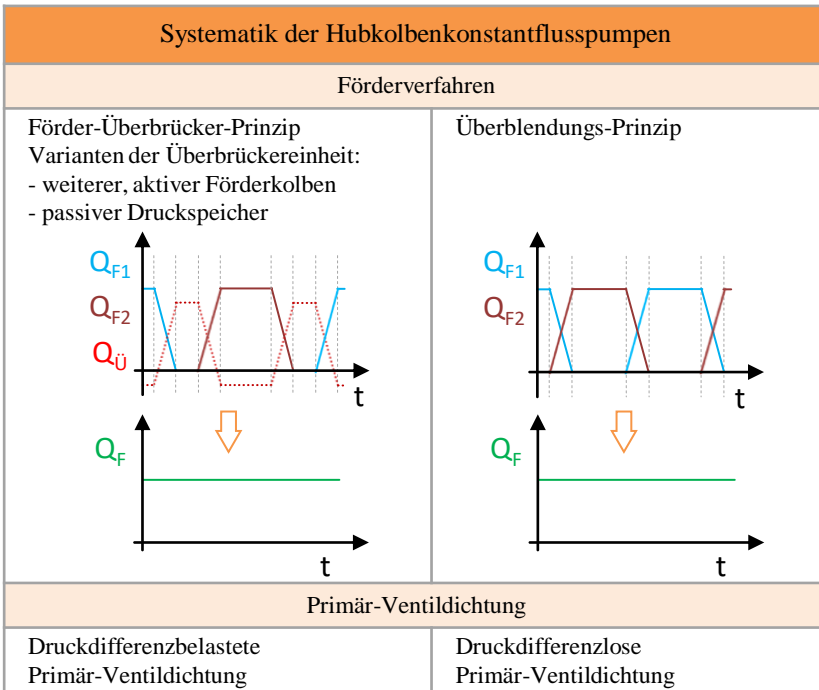


Abbildung 5.1: Systematik der Hubkolbenkonstantflusspumpen

Es handelt sich also um eine aktive Ausführung, da der Kolben aktiv bewegt und entsprechend geregelt werden muss (Beispiel: Seite 22, Abbildung 2.10). Eine andere Möglichkeit bietet ein Druckspeicher, welcher je nach Förderdruck selbstständig be- oder entladen wird. Hierbei handelt es sich um eine passive Überbrückereinheit (Beispiel: Seite 23, Abbildung 2.11).

Überblendungs-Prinzip

Bei dem Überblendungs-Prinzip gibt es mindestens zwei Hubverdrängereinheiten, welche abwechselnd zyklisch ansaugen und ausstoßen (Abbildung 5.1: Überblendungs-Prinzip, Q_{F1} und Q_{F2}). Während die eine Einheit ansaugt (nicht dargestellt) hält die andere Einheit den Förderstrom aufrecht. Wenn der fördernde Zylinder fast ganz entleert ist, wird dessen Förderkolben verlangsamt. Synchron wird der Förderkolben des anderen, komplett gefüllten Förderzylinders beschleunigt. Der während der Übergangs- bzw. Überblendungsphase von beiden Hubverdrängereinheiten in Summe geförderte Volumenstrom entspricht dem in der Alleinförderphase von dem gerade ausstoßenden Förderkolben erzeugten Förderstrom. Es ergibt sich ein konstanter Förderstrom über der Zeit (Abbildung 5.1: Überblendungs-Prinzip, Q_F). Dadurch, dass der Alleinhubphase des ausschubenden Kolbens eine Überblendungsphase folgt, muss der ansaugende Kolben schneller verfahren werden als der ausstoßende Kolben. Industripumpen, welche nach dem Überblendungs-Prinzip arbeiten, erreichen eine Förderung mit Druckeinbrüchen während der Überblendung von weniger als 10 % des Förderdrucks [52, S. 318]. (Beispiel: Seite 20, Abbildung 2.8 und Seite 21, Abbildung 2.9)

Primär-Ventildichtung

Das zweite Unterscheidungsmerkmal bezieht sich auf die *Primär-Ventildichtung*. Als Primär-Ventildichtung wird die Dichtung des Ventils definiert¹, welche die beiden Medium führenden Seiten des Ventils voneinander trennt (Abbildung 5.2). Aufgabe der *Sekundär-Ventildichtung* ist es, das bewegliche Ventilglied zur Umwelt abzudichten. Je nach Bauform des Ventils können

¹ In Anlehnung an die Unterteilung in Haupt- und Nebenabdichtung einer Dichtung nach [85, S. 7].

primäre und sekundäre Ventildichtung auch in einer Dichtung realisiert werden (Primär-Sekundär-Ventildichtung).

- Primär-Ventildichtung
- Sekundär-Ventildichtung
- Primär-Sekundär-Ventildichtung

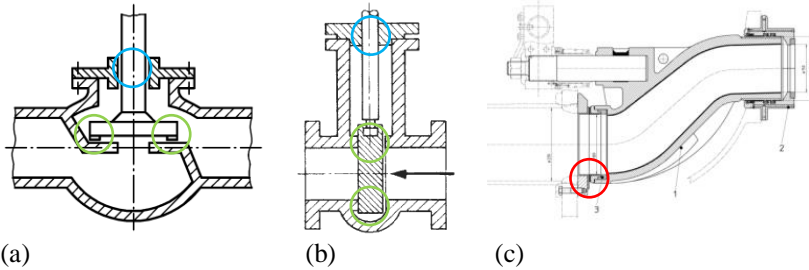


Abbildung 5.2: Beispiele für Primäre-, Sekundäre- und Primär-Sekundäre-Ventildichtungen; (a) Sitzventil [21, S. K21]; (b) Einfaches Plattenschieberventil [68, S. 7]; (c) Schwenkrohrventil (Firma PUTZMEISTER)

Für eine *druckdifferenzlose Primär-Ventildichtung* müssen zwei notwendige Bedingungen erfüllt sein. Bei der ersten, notwendigen Bedingung handelt es sich um eine Verfahrensbedingung. Das Ventil darf nicht geöffnet werden, wenn eine Druckdifferenz über dieses anliegt oder geschlossen werden, wenn das Ventil durchströmt wird. Bei der zweiten, notwendigen Bedingung handelt es sich um eine konstruktive Bedingung. Es muss sich bei der Ventildichtung um eine rein Primäre-Ventildichtung und keine Primär-Sekundäre-Ventildichtung handeln. Wenn eine der zwei notwendigen Bedingungen nicht erfüllt ist handelt es sich zwangsläufig um eine druckdifferenzbelastete Primär-Ventildichtung. (Weitere Beispiele: Kapitel 2.2.2).

5.2 Eignung der Verfahren für Frischbeton

Im Folgenden wird die Tauglichkeit der vorgestellten Förderverfahren und Primär-Ventildichtungs-Arten zum kontinuierlichen Pumpen von Frischbeton diskutiert. Abschließend wird das zu bevorzugende Vorgehen ausgewählt.

Um das Förderverfahren nach dem Förder-Überbrücker-Prinzip umzusetzen, werden neben der Fördereinheit eine zusätzliche Überbrückereinheit und gegebenenfalls ein zusätzliches Dickstoffventil benötigt. Dieses verhindert den Rückfluss des Dickstoffs in den Trichter und ermöglicht somit erst eine kontinuierliche Förderung [9, S. 60]. Mit der gestiegenen Anzahl an Komponenten, welche Großteils in Frischbetonkontakt stehen, steigen auch der Wartungsaufwand und die Komplexität des Gesamtsystems. Mithilfe eines Druckspeichers können starke Einbrüche des Förderdrucks vermindert und eine kontinuierliche Förderung gewährleistet werden. Eine konstante Förderung ist damit allerdings nicht erreichbar, da ein Druckspeicher keinen konstanten Volumenstrom bei einem konstanten Druck liefern kann, sondern es einen Zusammenhang zwischen Speicherinhalt und Speicherdruck gibt [7, S. 197]². Die Variante, die Überbrückereinheit als passiven Druckspeicher auszuführen, ist für das Arbeitsmedium Frischbeton aus einem weiteren Grund ungeeignet: Es kann kein regelmäßiger Austausch des Frischbetons gewährleistet werden weshalb dieser im Druckspeicher gegebenenfalls abbindet [25, S. 7]. Darüberhinaus sind derartige Druckspeicher groß, schwer und anspruchsvoll in Handhabung und Wartung [52] [97].

Bei der Variante, die Überbrückereinheit als weiteren, aktiven Förderzylinder mit Förderkolben und hydraulischem Antrieb auszuführen, können die beim Druckspeicher beschriebenen Probleme aus konstruktiven Gründen gar nicht auftreten bzw. können steuerungstechnisch vermieden werden. Allerdings steigt der konstruktive und steuerungstechnische Aufwand durch den dritten Zylinder und das zusätzliche Frischbetonventil.

² Diskussion mit Herrn UNIV. PROF. MARCUS GEIMER am 26.5.2017

Zur Umsetzung des Überblendungs-Prinzips müssen die Frischbetonventile derart konfiguriert werden, dass während der Überblendungsphase ein zeitgleiches Ausschleiben des Frischbetons durch beide Förderkolben möglich ist. Des Weiteren müssen die hydraulischen Antriebe der Förderkolben unabhängig voneinander angesteuert werden können. Es nimmt demzufolge auch bei diesem Förderverfahren die Komplexität des Gesamtsystems zu. Auch die Frischbetonventile ändern sich im Vergleich zu den heutigen Systemen. Andererseits kann auf die Überbrückereinheit verzichtet werden, welche für das Förder-Überbrücker-Prinzip notwendig ist. Hierdurch bleibt die Anzahl an Komponenten, welche in Frischbetonkontakt stehen, unverändert.

Bei der Primär-Ventildichtung wirkt sich das Vorhandensein einer Druckdifferenz auf zahlreiche Faktoren aus. Wenn die Primär-Ventildichtung druckdifferenzbelastet ist, muss im Vergleich zu einer druckdifferenzlosen eine höhere Betätigungskraft zum Bewegen des Ventilglieds aufgewendet werden. Es wird also ein stärkerer Aktuator benötigt und es kommt zu einem erhöhten Verschleiß der Dichtpartner. Sobald das Ventil einen schmalen Spalt in Durchflussrichtung geöffnet ist, wird es bei Vorherrschen einer Druckdifferenz zu einer Strömung durch den Spalt kommen. Diese Strömung kann bei dem Arbeitsmedium Frischbeton zu Strahlverschleiß führen, welcher meist in kurzer Zeit einen Ausfall des betreffenden Bauteils zur Folge hat. Wenn eine druckdifferenzbelastete Primär-Ventildichtung betätigt wird, kommt es zu einem Druckausgleich zwischen den zwei unterschiedlichen Druckniveaus [9, S. 57]. Somit führt zwangsläufig der Einsatz einer druckdifferenzbelasteten Primär-Ventildichtung zu einer Verschlechterung der Fördergüte.

Zusammenfassend betrachtet ist erstens das Überblendungs-Prinzip dem Förder-Überbrücker-Prinzip zur konstanten Förderung von Frischbeton vorzuziehen, da der Komplexitätszuwachs geringer und je nach Variante die Fördergüte höher ist. Zweitens ist eine druckdifferenzlose einer druckdifferenzbelasteten Primär-Ventildichtung vorzuziehen da hierdurch eine längere Lebensdauer, geringere Betätigungskräfte und eine kontinuierlichere Förderung ermöglicht werden.

6 Suche alternativer Lösungen einer Frischbetonkonstantflüsspumpe

Bei einer Neukonstruktion ist ein systematisches und analytisches Vorgehen unverzichtbar. Aus diesem Grund werden im Folgenden Vorgehensweisen aus der „Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, VDI 2222“ [96] sowie „Pahl/Beitz Konstruktionslehre“ [95] angewendet.

Im ersten Schritt wird das Problem abstrahiert und so dessen *Wesenskern* ermittelt und der Umsatz von Energie, Stoff und Signal durch diesen betrachtet (Kapitel 6.1). Darauf folgend wird durch das Aufspalten der Gesamtfunktion in mehrere Funktionen mithilfe der *Funktionsstruktur* die Komplexität der Konstantflüsspumpe reduziert (Kapitel 6.2). Im Anschluss werden für die identifizierten Funktionen Effekttträger¹ gesucht, in einem *morphologischen Kasten*² dargestellt und zu *Wirkstrukturen* kombiniert (Kapitel 6.3). Abschließend werden beispielhaft Wirkstrukturen zu *prinzipiellen Lösungen* weiterentwickelt (Kapitel 6.4). [95] [98] [96]

6.1 Wesenskern

Durch die Reduktion der Aufgabe auf deren Wesenskern werden mithilfe des Input-Output-Modells Vorfixierungen aufgelöst und konventionelle Vorstellungen abgelegt [98, S. 233]. „Das ‚Input-Output-Modell‘ ist insbesondere für Produkte geeignet, bei denen ein Prozessablauf oder der Durchlauf eines Gutes durch das Produkt eine Rolle spielt“ [95, S. 346]. Der Wesenskern der Konstantflüsspumpe ist es, einen konstanten Frischbetonstrom durch ein

¹ Entspricht möglichen Lösungen der Funktionen

² Auch als Ordnungsschema bezeichnet

Förderrohr zu erzeugen. In Abbildung 6.1 ist der Umsatz an Energie, Stoff und Signal des Wesenskerns dargestellt (Input-Output-Modell).

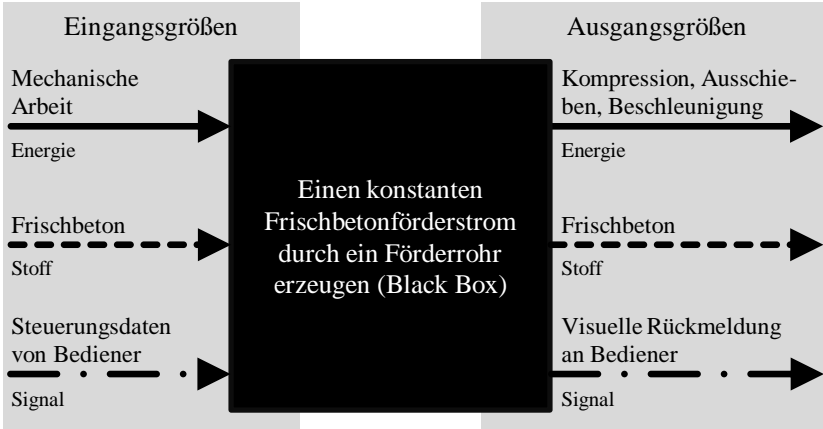


Abbildung 6.1: Input-Output-Modell des Wesenskerns der Konstantflusspumpe (angelehnt an [88, S. 240])

Innerhalb der Systemgrenze des Input-Output-Modells liegt die Frischbetonpumpe sowie deren Steuergerät, jedoch nicht der Verbrennungs- bzw. Elektromotor für dessen Betrieb. Somit sind die Eingangsgrößen Energie in Form von mechanischer Arbeit durch eine sich drehende Motorwelle, Frischbeton und Steuerungsdaten, welche durch den Bediener vorgegeben werden. Durch die als Black Box abstrahierte Funktion des Systems wird Frischbeton unter Förderdruck ausgeschoben. Die Kompression des Fördermediums erhöht dessen innere Energie. Des Weiteren wird Ausschiebearbeit verrichtet und das Medium beschleunigt, also dessen kinetische Energie erhöht. Das Ausgangssignal an den Bediener ist hierbei visuell in Form des strömenden Fördermediums.

6.2 Funktionsstruktur

Die bisher als Wesenskern beschriebene Funktion der Konstantflusspumpe kann durch das Aufstellen der Funktionsstruktur nach dem Input-Output-Modell (Abbildung 6.2) schrittweise in mehrere Funktionen unterteilt werden³. Hierdurch wird die Komplexität verringert und „die hierarchische Abhängigkeit der Funktionen untereinander“ [95, S. 345] wiedergegeben.

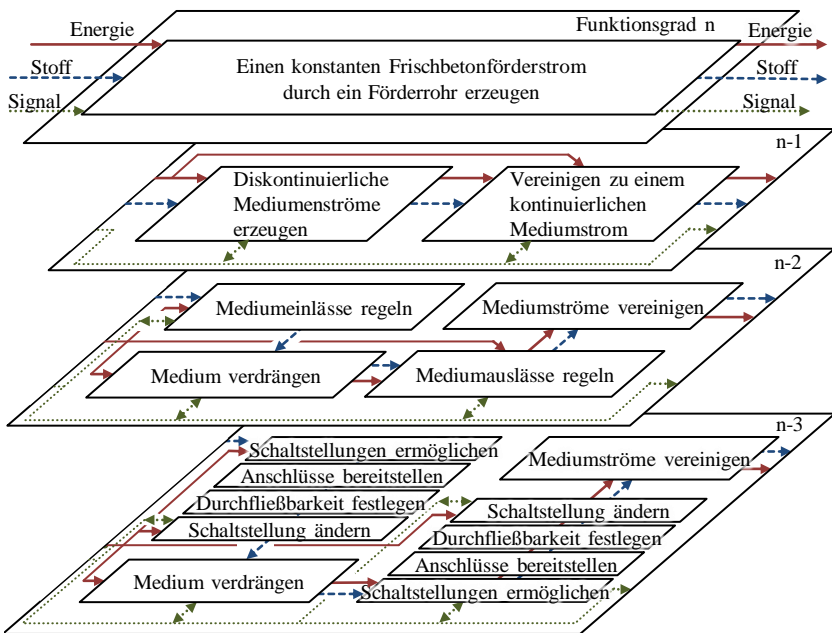


Abbildung 6.2: Funktionsstruktur der Konstantflusspumpe nach dem Input-Output-Modell [95, 244, 345], [96, S. 17]

³ Dieser Analyseschritt wurde im Rahmen einer Expertendiskussion mit der Fachgruppe der PUTZMEISTER ENGINEERING GMBH, welche sich mit der Entwicklung der Frischbetonpumpe beschäftigt, erarbeitet.

Der Wesenskern (Funktionsgrad n) lässt sich nach dem Förder-Überbrücker-Prinzip in die zwei Funktionen *Diskontinuierliche Mediumströme erzeugen* und *Vereinigen zu einem kontinuierlichen Mediumstrom* unterteilen (Funktionsgrad $n-1$). Um einen diskontinuierlichen Mediumstrom zu erzeugen, müssen zum einen die Medieumeinlässe in separate Räume geregelt werden und zum anderen muss das Medium aus diesen Räumen verdrängt werden. Zur Vereinigung der diskontinuierlichen Mediumströme zu einem kontinuierlichen Volumenstrom ist es nötig, die Mediumauslässe zu regeln und die austretenden Medienströme zu vereinigen (Funktionsgrad $n-2$). Auf der Ebene mit dem Funktionsgrad $n-3$ werden die Funktionen *Medieumeinlässe regeln* und *Medieumauslässe regeln* jeweils weiter in die Funktionen *Schaltstellungen ermöglichen*, *Durchfließbarkeit festlegen*, *Schaltstellungen ändern* und *Anschlüsse bereitstellen* aufgeteilt.

6.3 Morphologischer Kasten und Wirkstrukturen

Die in der Konstantflusspumpe zu realisierenden Funktionen aus der vorangegangenen Funktionsstruktur nach dem Input-Output-Modell sind Grundlage des folgenden morphologischen Kastens (Tabelle 6.1).

Um die Funktionen *Medieumeinlässe regeln* und *Medieumauslässe regeln* gestaltungsabhängig darstellen zu können, wird an dieser Stelle auf die hydraulische Notation zurückgegriffen. Das Ventilglied kann in bis zu vier verschiedene Positionen gebracht werden, um verschiedene Schaltstellungen zu ermöglichen. Des Weiteren kann das Ventil zwischen zwei und sechs Anschlüsse haben. Die Durchfließbarkeit kann pro Schaltstellung und Anschlusskombination die Ausprägungen eine Richtung, beide Richtungen oder verschlossen annehmen. Die Schaltstellungen können druckdifferenzbetätigt, elektrisch fremdbetätigt, mechanisch fremdbetätigt, hydraulisch fremdbetätigt oder pneumatisch fremdbetätigt geändert werden. Um Medium mithilfe des Hubkolbenprinzips zu verdrängen, kann entweder der komplette Förderraum durch die Hubkolbenbewegung verschoben werden, oder es kann durch die

Hubkolbenbewegung das Volumen des Förderraums verändert werden. Zur Vereinigung der Mediumströme kann entweder ein Rohrsystem mit mehreren Einlässen und einem Auslass (y-Rohr) verwendet werden, oder diese Funktion wird bereits in das Auslassventil integriert.

Tabelle 6.1: Morphologischer Kasten mit beispielhaft eingezeichneter Wirkstruktur Nr. 2 und Nr. 5; angelehnt an [96, S. 19]

Funktion	Effektträger						
Mediuminlässe regeln	Schatstellungen ermöglichen	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>		
	Anschlüsse bereitstellen	2	3	4	5	6	
	Durchfließbarkeit festlegen	eine Richtung ↑	beide Richtungen ↑	verschlossen ↓			
	Schaltstellung ändern	druckdifferenzbetätigt	elektrisch fremdbetätigt	mechanisch fremdbetätigt	hydraulisch fremdbetätigt	pneumatisch fremdbetätigt	
Medium verdrängen	durch Hubbew. Förderraum verschieben 	durch Hubbew. Volumen ändern 					
Mediumauslässe regeln	Schatstellungen ermöglichen	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>		
	Anschlüsse bereitstellen	2	3	4	5	6	
	Durchfließbarkeit festlegen	eine Richtung ↑	beide Richtungen ↑	verschlossen ↓			
	Schaltstellung ändern	druckdifferenzbetätigt	elektrisch fremdbetätigt	mechanisch fremdbetätigt	hydraulisch fremdbetätigt	pneumatisch fremdbetätigt	
Mediumströme vereinigen	y-Rohr nach Auslassventil	in Auslassventil integriert					

WS 5

WS 2

Durch eine Kombination der Effektträger werden Wirkstrukturen erzeugt. Bei dem vorliegenden morphologischen Kasten ist darauf zu achten, dass pro Schaltstellung, welche ermöglicht wird, die Durchfließbarkeit festgelegt werden muss. Aus diesem Grund werden teilweise pro Funktion mehrere Effektträger ausgewählt. Dieses Vorgehen ist auch in [99, S. 7] und [100, S. 209] zu finden und ermöglicht einen übersichtlichen, kompakten morphologischen Kasten trotz eines komplexen Sachverhalts. Um diese Vorgehensweise

darzustellen, verzweigt sich der eingezeichnete Pfad stellenweise. Jede Wirkstruktur für sich realisiert die Gesamtlösung bzw. den Wesenskern. „Dabei können nur solche Wirkprinzipien zu einer Funktionsverknüpfung kombiniert werden, die miteinander verträglich⁴ sind“ [98, S. 259]. Des Weiteren wird bereits in diesem Schritt darauf geachtet, dass keine Wirkstrukturen erzeugt werden, welche offensichtlich den Bedingungen der Anforderungsliste nicht gerecht werden können [98, S. 160]. In Tabelle 6.1 sind exemplarisch die Wirkstrukturen WS2 und WS 5 eingezeichnet. Eine Übersicht aller in diesem Schritt synthetisierten Wirkstrukturen ist im Anhang auf Seite 214 dargestellt.

6.4 Prinzipielle Lösungen

Um einen Vergleich der Wirkstrukturen zu ermöglichen, müssen diese weiter ausgearbeitet werden [98, S. 266]. In Workshops mit Fachgruppen der PUTZMEISTER ENGINEERING GMBH werden unter dem Einsatz der Galeriemethode⁵ die Wirkstrukturen konkretisiert. Die konkretisierten Wirkstrukturen werden als *prinzipielle Lösungen* bezeichnet. Im Folgenden werden beispielhaft die zweite und fünfte prinzipielle Lösung vorgestellt.

6.4.1 Zweite prinzipielle Lösung

Die zweite Wirkstruktur ergibt sich durch eine Kombination von Effekträgern des morphologischen Kastens und wird zur zweiten prinzipiellen Lösung weiterentwickelt. In diesem Kapitel wird deren Pumpensystem, Arbeitsablauf und konstruktive Detaillierung erklärt.

⁴ Verträglich beinhaltet physikalisch verträglich („störungsfreier Energie-, Stoff- und / oder Signalfluss“ [98, S. 259]) und geometrisch verträglich („kollisionsfreiheit in geometrischer Hinsicht“ [98, S. 259])

⁵ „Die Galeriemethode nach Hellfritz (1978) verbindet Einzelarbeit mit Gruppenarbeit und eignet sich besonders bei Gestaltungsproblemen“ [95, S. 357].

Pumpensystem

An dieser Stelle wird das von Frischbeton durchströmte Pumpensystem anhand eines an die in der Hydraulik übliche Notation angelehnten Plans erläutert (Abbildung 6.3). Bei der zweiten prinzipiellen Lösung sind die Fördereinheiten seriell angeordnet. Es wird also nicht Medium gefördert, indem das Volumen durch eine Hubbewegung verändert wird, sondern es wird der komplette Förderraum verschoben.

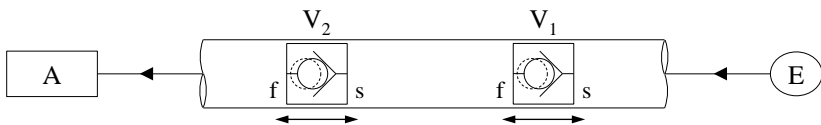


Abbildung 6.3: Pumpensystem der zweiten prinzipiellen Lösung in Anlehnung an Hydrauliknotation; E: Einlass, A: Auslass, V_1 : erstes Ventil, V_2 : zweites Ventil

Zur Umsetzung dieser Funktion gibt es zwei Rückschlagventile, welche in der Fördereinheit hin und her bewegt werden. Somit fördert phasenweise das eine und phasenweise das andere Ventil. Da den Frischbetonventilen in dieser Anordnung nicht die Funktion eines reinen Einlass- bzw. Auslassventils zugeschrieben werden kann, werden diese im Folgenden als erstes und zweites Ventil (V_1 , V_2) bezeichnet. Durch die Ventile kann der Durchfluss entweder gesperrt (s) oder freigegeben (f) werden.

Arbeitsablauf

Im Arbeitsablauf der zweiten prinzipiellen Lösung (Abbildung 6.4) wird schrittweise ein Pumpenzyklus dargestellt. Im ersten Schritt (1 in Abbildung 6.4) ist das zweite Ventil geschlossen (s) und wird samt Rohr nach links geschoben. Hierdurch wird Medium gefördert. Zeitgleich wird das erste geöffnete (f) Ventil samt weiterem Rohr nach rechts verfahren. Das Volumen zwischen dem ersten und zweiten Ventil vergrößert sich und Medium wird angesaugt. Wenn das erste Ventil ganz nach rechts zum unteren Totpunkt (UT) gefahren ist, wird es geschlossen und sodann nach links gefahren, um das

Material im Zwischenraum vor zu komprimieren (2. in Abbildung 6.4). Wenn das Material im Zwischenraum unter Förderdruck steht, fährt das erste Ventil mit Fördergeschwindigkeit nach links und das zweite Ventil wird geöffnet. Bei geöffnetem zweitem Ventil wird dieses nach rechts bewegt (3. in Abbildung 6.4).

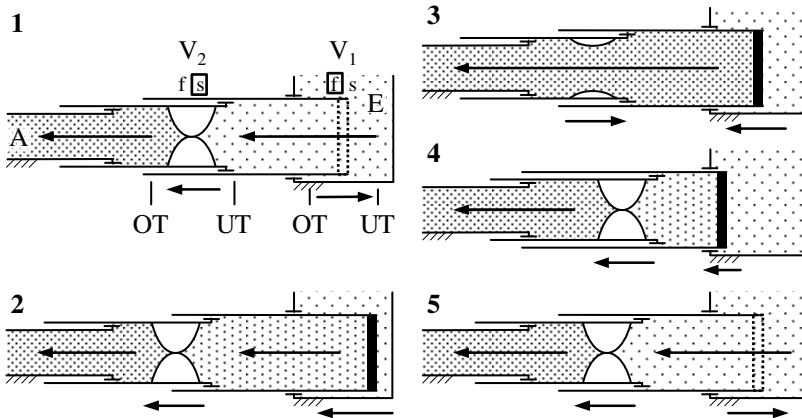


Abbildung 6.4: Arbeitsablauf der zweiten prinzipiellen Lösung

Wenn das zweite Ventil im unteren Totpunkt angekommen ist wird dieses im vierten Schritt (4 in Abbildung 6.4) geschlossen und mit Fördergeschwindigkeit nach links bewegt. Somit übernimmt das zweite Ventil die Förderung des Mediums. Das erste Ventil wird verlangsamt wodurch das Material im Zwischenraum dekomprimiert wird. Wenn sich die Drücke angeglichen haben (5. in Abbildung 6.4) wird das erste Ventil geöffnet und nach rechts bewegt. Der Pumpenzyklus beginnt von vorne.

Konstruktive Detaillierung

Die konstruktive Realisierung des Pumpensystems ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Die Dickstoffpumpe besteht aus zwei Rohren, welche mithilfe von jeweils zwei Differentialhydraulikzylindern unabhängig voneinander verschoben

ben werden. Mit dem trichterseitigen, ersten Rohr ist das erste Ventil verbunden und mit dem zweiten Rohr das zweite Ventil. Das erste Rohr wird bei dessen Hubbewegung auf der einen Seite in den Trichter geschoben und auf der anderen Seite in das zweite bewegliche Rohr. In das zweite bewegliche Rohr taucht bei dessen Bewegung ein maschinenfestes Rohr ein. Dieses stellt den Übergang zum Pumpenausgang dar. Da es im Trichter seitlich des ersten beweglichen Rohrs ausreichend Platz gibt, wird für das erste Ventil ein Einklapp-Scheibenventil verwendet. Als zweites Ventil, welches beengten Platzverhältnissen unterworfen ist, wird ein fluidisch betätigtes Quetschventil eingesetzt.

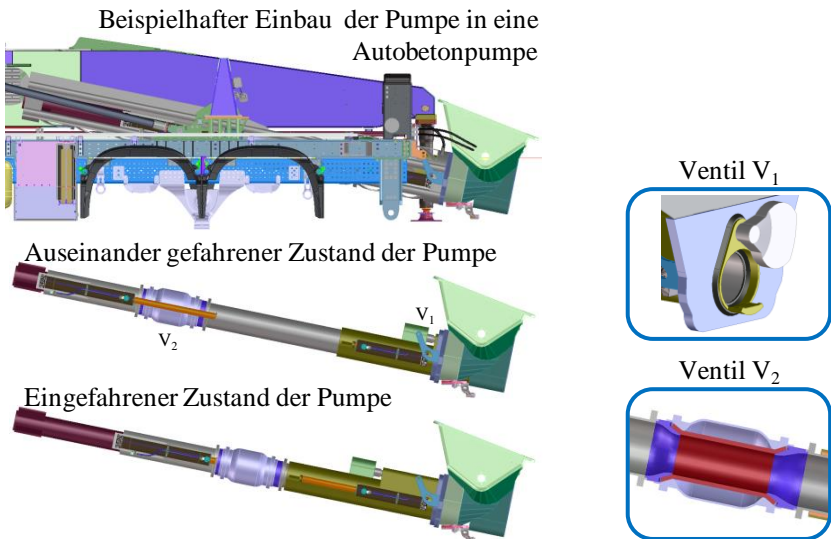


Abbildung 6.5: Konstruktive Detaillierung der zweiten prinzipiellen Lösung

6.4.2 Fünfte prinzipielle Lösung

Die fünfte prinzipielle Lösung entspricht der Wirkstruktur, welche im morphologischen Kasten (Tabelle 6.1) mit WS 5 gekennzeichneten ist. Im Folgenden

werden das Pumpensystem, der Arbeitsablauf und die konstruktive Detaillierung der fünften prinzipiellen Lösung vorgestellt.

Pumpensystem

Abbildung 6.6 zeigt das Pumpensystem der fünften prinzipiellen Lösung in Hydrauliknotation. Die zwei Einlassventile (EV_L , EV_R) verfügen jeweils über zwei Anschlüsse sowie zwei Schaltstellungen (2/2-Wegeventil), welche den Ventildurchfluss entweder sperren (s) oder freigeben (f) können. Die Einlassventile regeln den Fluss zwischen dem Frischbetonreservoir und dem jeweiligen Förderzylinder. Durch die zwei Förderzylinder (FZ_L , FZ_R) mit den darin gleitenden Förderkolben werden die Effekträger *durch Hubbewegung Volumen ändern* und somit die Funktion *Medium verdrängen* umgesetzt (Tabelle 6.1).

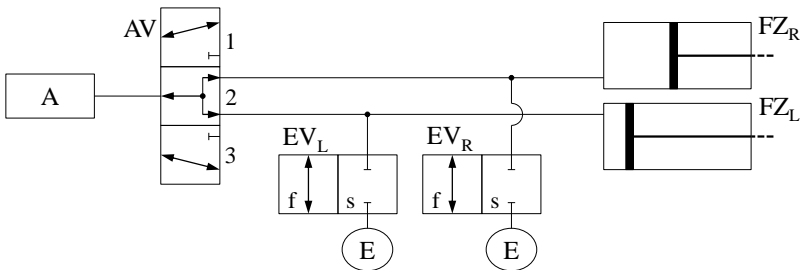


Abbildung 6.6: Pumpensystem der fünften prinzipiellen Lösung in Anlehnung an Hydrauliknotation; E: Einlass, A: Auslass, EV_L : linkes Einlassventil, EV_R : rechtes Einlassventil, AV: zentrales Auslassventil, FZ_L : linker Förderzylinder, FZ_R : rechter Förderzylinder

Das zentrale Auslassventil (AV) verfügt über drei Anschlüsse und drei Schaltstellungen (3/3-Wegeventil). Je nach Ventilstellung werden der eine (1), der andere (3) oder beide (2) Förderzylinder mit dem Auslass verbunden. Ein nicht mit dem Auslass verbundener Förderzylinder wird durch das Auslassventil abgesperrt (FZ_L in AV-Stellung 1; FZ_R in AV-Stellung 3). [4, S. 30]

Arbeitsablauf

Im ersten Schritt des Arbeitsablaufs fährt der rechte Förderkolben (FZ_R) zurück und saugt somit Frischbeton aus dem Reservoir durch das geöffnete (f) Einlassventil (EV_R) an (1. in Abbildung 6.7). Währenddessen schiebt der linke Förderkolben das Medium durch das Auslassventil (AV) hindurch in den Auslass. Das linke Einlassventil (EV_L) ist dabei geschlossen (s). Sobald der rechte Förderzylinder komplett gefüllt ist, wird dessen Einlassventil geschlossen und dann der im Förderzylinder befindliche Frischbeton vorkomprimiert (2. in Abbildung 6.7).

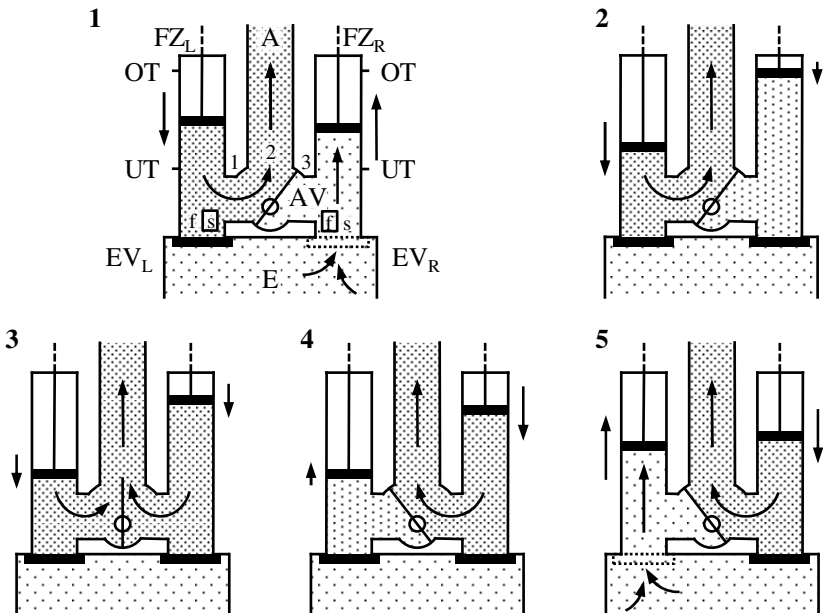


Abbildung 6.7: Arbeitsablauf der fünften prinzipiellen Lösung

In beiden Förderzylindern und dem die Ventile umgebenden Druckgehäuse herrscht somit nahezu der gleiche Druck. Im dritten Schritt wird das

Auslassventil in die zweite bzw. mittlere Ventilstellung gebracht, wodurch eine Verbindung zwischen allen drei Ventilanschlüssen besteht. Der linke Förderkolben wird abgebremst und der rechte Förderkolben derart beschleunigt, dass der gemeinsam geförderte Mediumstrom konstant bleibt. Sobald der linke Förderkolben steht, wird das Auslassventil in Position eins gebracht (4. in Abbildung 6.7). Durch Zurückfahren des linken Kolbens wird der Förderdruck in dem dazugehörigen Förderzylinder auf Umgebungsdruck abgebaut. Das linke Einlassventil wird geöffnet und die Ansaugphase beginnt (5. in Abbildung 6.7). Der beschriebene Zyklus wird mit getauschten Rollen wiederholt. [4, S. 30-31]

Konstruktive Detaillierung

Abbildung 6.8 zeigt die konstruktive Detaillierung des Pumpensystems der fünften prinzipiellen Lösung (Abbildung 6.6).

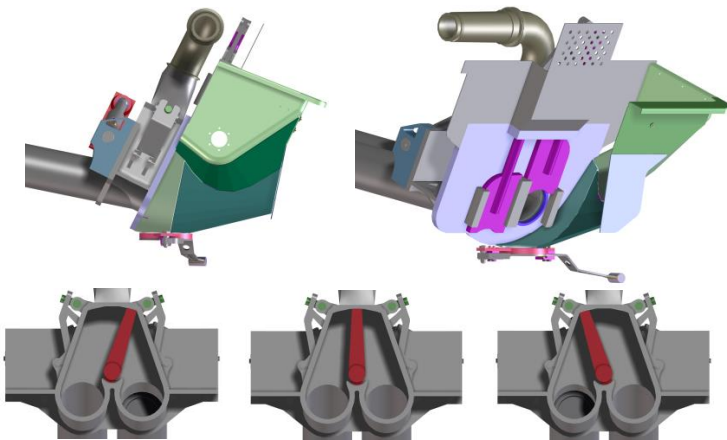


Abbildung 6.8: Konstruktive Detaillierung der fünften prinzipiellen Lösung

Die Frischbetonpumpe verfügt über zwei parallel zueinander angeordnete Förderzylinder mit Förderkolben. Innerhalb des Trichters, welcher als

Vorratsbehälter für den Frischbeton dient, sind die Einlassventile angeordnet. Als Einlassventile werden zwei Einklapp-Scheibenventile eingesetzt. Als zentrales Auslassventil dient ein zentrisches Drehklappenventil, wodurch die Funktion des 3/3-Wegeventils realisiert wird.

7 Lösungsauswahl und Tragweitenanalyse der prinzipiellen Lösung der Konstantflusspumpe

In diesem Kapitel werden die prinzipiellen Lösungen bewertet und die geeignetste ausgewählt. Abschließend wird die Tragweite der Entscheidung und der daraus folgenden Chancen und Risiken diskutiert [94, S. 5].

7.1 Bewertung und Auswahl der prinzipiellen Lösungen

Die Bewertung der prinzipiellen Lösungen der Konstantflusspumpe für Frischbeton ist in Tabelle 7.1 dargestellt. Die Kriterien zur Bewertung werden aus den Anforderungen der Anforderungsliste (Anhang S. 211) abgeleitet [98, S. 269]. Bei der Bewertung von prinzipiellen Lösungen ist zu erwarten, dass dies aufgrund des geringen Konkretisierungsgrades nur mit einer niedrigen Trennschärfe möglich ist. Da zur Erhöhung der Trennschärfe die prinzipiellen Lösungen aufwendig weiter konkretisiert werden müssten, soll – was grundsätzlich möglich ist – eine auf dem vorliegenden Informationsstand basierende Bewertung vorgenommen werden. Bei dieser Art der Bewertung wird die Wahrscheinlichkeit bewertet, dass die Anforderungen nach einer weiteren Detaillierung erfüllt werden. [98, S. 268-269] Diesem Gedanken folgend wird nach [98] aufgrund des geringen Detailgrads auf eine Gewichtung der Kriterien verzichtet. Des Weiteren wird anstelle einer Punkteskala, welche eine feine Untergliederung ermöglicht, lediglich mit den Stufen von 0 (unbefriedigend) bis 4 (sehr gut; ideal) bewertet [101, S. 4] [98, S. 271].

Tabelle 7.1: Bewertung der prinzipiellen Lösungen der Konstantflusspumpe für Frischbeton (in Anlehnung an [98, S. 287]; Hauptaufgabe Ha, Nebenaufgabe Na)

Bewertungsliste für: Konstantflusspumpe für Frischbeton		Bearbeiter: Weber	Datum: 8.11.2016 (erstellt)	Blatt: 1	
Kriterien- nummer	Bewertungskriterium	Anforderungsliste		Prinzipielle Lösung	
		Anforderungs- nummer	Aufgabenart	PL2	PL5
1.	niedrige Druckpulsation des Fördermediums	1. - 2.	Ha	2	2
2.	Frischbeton mit einem Größtkorn von 32 mm zuverlässig pumpbar	3.	Ha	1	3
3.	Förderdruck von 85 bar	4.	Ha	2	2
4.	Förderstrom von 150 m ³ /h	5.	Ha	1	3
5.	geringer Bauraumbedarf	6. - 8.	Na	3	2
6.	niedrige Kosten	9.	Na	2	1
7.	hohe Lebensdauer	10. - 13.	Na	0	2
8.	Betrieb mit dem Leistungsangebot eines Lkws möglich	14.	Na	3	3
9.	niedriges Gewicht	15. - 16.	Na	3	2
10.	geringe Maschinenkomplexität / Bauteilanzahl	17.	Na	1	1
11.	reinigungsfreundlich	18. - 19.	Na	1	3
12.	gute Verfügbarkeit der Komponenten	20.	Na	2	2
13.	hohe Zuverlässigkeit	21.	Na	1	3
14.	wartungsfreundlich	22. - 24.	Na	1	3
		Summe		23	32
		Durchschnitt		1,64	2,29
		Rangfolge		3	1
Bemerkung / Begründung					
2. PL2	V ₂ gibt Bauraum der sich bewegenden Einheit vor; kleines V ₂ anzustreben				
4. PL2	Überhöhte Strömungsgeschwindigkeit durch V ₁ wenn V ₂ fördert				
6. PL5	Konstruktion enthält Druckgehäuse und drei Frischbetonventile				
7. PL2	V ₂ sowie zahlreiche Relativbewegungen als kritisch einzuordnen				
9. PL2	Kein Druckgehäuse notwendig				
11. PL5	Beide Förderzylinder sowie Auslassventil erreichbar				
13. PL5	Förderzylinder bekannt; EVe basieren auf bekannten Prinzipien; ZSV als Auslassventil				

Aus der Bewertung geht hervor, dass die prinzipielle Lösung mit der Nummer fünf die Kriterien im höchsten Umfang erfüllt. Aus diesem Grund wird diese prinzipielle Lösung ausgewählt und weiter verfolgt.

7.2 Tragweitenanalyse der fünften prinzipiellen Lösung

Im Rahmen der Tragweitenanalyse werden die Chancen und Risiken der ausgewählten prinzipiellen Lösung im Detail identifiziert und gegebenenfalls genauer untersucht [94, S. 5]. Hierzu wird innerhalb von mehreren Terminen mit einer multidisziplinären Gruppe eine Produkt-FMEA¹ durchgeführt. Es werden zahlreiche Punkte identifiziert und gesondert betrachtet bzw. im weiteren Vorgehen berücksichtigt. Tabelle 7.2 zeigt einen Auszug der Produkt-FMEA. Im ersten Schritt wird eine Bewertung des möglichen Fehlers vorgenommen. Danach werden Maßnahmen zur Verringerung der Risikoprioritätszahl definiert. Zwei der identifizierten Punkte könnten nur mithilfe sehr kostenintensiver Versuche genauer betrachtet werden. Da die Kosten der Versuche vergleichbar hoch wie die des Funktionsmusters sind, wird von einer gesonderten Untersuchung abgesehen. Um das Risiko anderer Punkte wie beispielsweise Zeile 124 in Tabelle 7.2 zu mindern werden kleine Versuche durchgeführt. Abschließend wird zusammenfassend festgestellt, dass keine Risiken identifiziert werden, welche zum Verwerfen der prinzipiellen Lösung führen. Demzufolge wird die prinzipielle Lösung weiter verfolgt.

¹ Produkt-FMEA: „Weiterentwicklung der Konstruktions-FMEA mit der Teile, Teilsysteme und komplette Systeme betrachtet werden. [...] Die Produkt-FMEA kann, je nach Definition im Vorfeld, den Kundenbetrieb, die Konstruktion, die Schnittstellen oder den Service während dem gesamten Produktentstehungsprozess betrachten.“ [102, S. 13]

Tabelle 7.2: Produkt-FMEA Konstantflusspumpe für Frischbeton; erstellt in 21 Terminen 20.5.2016 – 4.11.2016; multidisziplinäres Team aus Putzmeister Engineering GmbH (in Anlehnung an FMEA Formblatt VDA [102, S. 233])

FMEA									FMEA-Nr.: 1
Produkt-FMEA									Seite: 1
Typ/Modell/Fertigung: Konstantflusspumpe			Sach-Nr.: 1 Änderungsstand: 21			Verantwortlicher: F. Weber Firma: Putzmeister Engineering			Abt.: EFD Datum: 04.11.2016
Nr.	Mögliche Fehlerfolgen	B Bedeutung	Möglicher Fehler	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen dV = direkte Verm. aV = auswirkungs begrenzendes Verm.	A auftr. tensw.	Entdeckungsmaßnahmen	E Entdeckungs-wahr.	RPZ
2. Systemelement / System: Druckgehäuse									
2. Funktion: Strömung führen									
53					Anfang 8.6.2016				
54	Versagen des Druckbehälters	9	Risse im Druckbehälter	Beanspruchung durch abrasiven Verschleiß	bis jetzt keine Vermeidungsmaßnahmen ergriffen	8	Keine Entdeckungs-m. vor Funktions-muster	10	720
55					Aktionsplanung 8.6.2016				
56		9			kritische Stellen identifizieren und entsprechend schützen	4	Keine Entdeckungs-m. vor Funktions-muster	10	360
4. Systemelement / System: Zylindersegmentventil									
4. Funktion: Auslass steuern									
121					Anfang 31.8.2016				
122	Es kann nicht mehr gepumpt werden	8	Auslassventil kann nicht umgeschaltet werden	Der Frischbeton, welcher im Druckgehäuse ist wird mit zunehmendem Druck "dickflüssiger". Beton kann nicht mehr verdrängt werden	keine	10	Keine Entdeckungs-m. vor Funktions-muster	10	800
123					Anfang 31.8.2016				
124		8			Entsprechend der Erkenntnisse aus den rechten Aktivitäten den Antrieb auslegen	3	Versuch mit Rührwerk, welches in Druckgehäuse Beton rührt durchführen	3	72

8 Frischbetonauslassventil – Situationsanalyse und Problemeingrenzung

Ein Frischbetonventil in einer Frischbetonpumpe wird mehrere hunderttausend Mal geschaltet, muss Drücken von bis zu 85 bar und einem Fördermedium, welches abrasiv und aushärtend ist sowie über ein Größtkorn von 32 mm verfügt, standhalten [12, S. 56]. Bekannte Frischbetonventile, die diesen Anforderungen genügen, sind beispielsweise verschiedene Schwenkrohrventile (Überblick in Kapitel 2.3). Abbildung 8.1 zeigt das Pumpensystem einer Frischbetonpumpe mit Schwenkrohrventil.

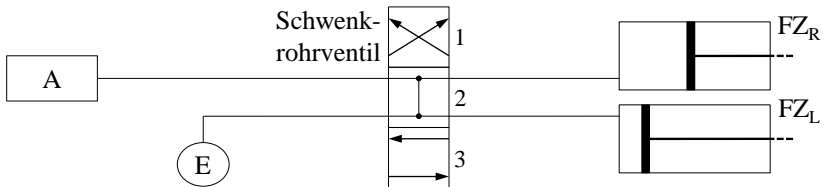


Abbildung 8.1: Pumpensystem einer Frischbetonpumpe mit Schwenkrohrventil

Mithilfe des Schwenkrohrventils kann der eine oder der andere Förderzylinder mit der Förderleitung verbunden werden. Der Förderzylinder, welcher gerade nicht mit der Förderleitung verbunden ist, kann Frischbeton aus dem Trichter ansaugen. Während des Überganges der ersten zur dritten Schaltstellung wird die unvermeidbare, zweite Schaltstellung durchfahren. Bei dieser sind alle Anschlüsse miteinander verbunden. Dies hat zur Folge, dass der Mediumdruck am Auslass auf Umgebungsdruck abfällt.

Die heutigen Schwenkrohrventile sind das Produkt jahrzehntelanger, iterativer Entwicklung. Von Mängeln angetrieben, werden bei jeder Pumpengeneration

kleine Änderungen vorgenommen und deren Auswirkungen beobachtet. In der Produktgenerationsentwicklung wird zwischen Übernahmevariation, Gestaltvariation und Prinzipvariation unterschieden [103, S. 4 - 5]. Die Entwicklung der Schwenkrohrventile bewegt sich im Gebiet der Übernahme- und Gestaltvariation. Hierbei werden bestehende Lösungen aus vorhergehenden Referenzsystemen übernommen und lediglich an Schnittstellen angepasst oder aber die Gestalt geändert [103, S. 4 - 5]. Die Änderung des zugrundeliegenden Lösungsprinzips - und somit eine Prinzipvariation - ist nicht vorzufinden. Es gibt demzufolge zwar funktionierende Schwenkrohrventile allerdings sind deren Teilfunktionen und Wirkzusammenhänge nicht bekannt bzw. erforscht.

Bereits in einem Artikel aus dem Jahre 1985 wird festgestellt, dass „die Entwicklung der Betonpumpen von den ersten mißglückten [sic] Versuchen bis zu den heutigen Produkten im wesentlichen [sic] die Entwicklungsgeschichte der Betonschiebersysteme ist“ [26, S. 55]. Auch sind die "Mißerfolge [sic] mit den ersten Betonpumpen [...] im wesentlichen [sic] durch die Verwendung selbststeuernder Ein- und Auslassventile und den ungünstigen Strömungsverhältnissen in den Ventilgehäusen [...] zu erklären" [26, S. 55].

Für die ausgewählte fünfte prinzipielle Lösung werden als Einlassventile 2/2-Wegeventile beziehungsweise als zentrales Auslassventil ein 3/3-Wegeventile benötigt. Weder ein Schwenkrohrventil noch andere Frischbetonventile des Stands der Technik (Kapitel 2.3) können die Grundfunktion und die heutigen technischen Anforderungen erfüllen. Beispielsweise bei einem Quetschventil wird Aufgrund des hohen Mediumdrucks sowie der Größtkörner von 32 mm von einem Hersteller¹ von Quetschventilen ein sehr hoher Verschleiß vorhergesagt. Des Weiteren werden in alten Frischbetonpumpen zentrische Drehklappen eingesetzt. Von diesen ist allerdings bekannt, dass deren Standzeit ungenügend ist (Kapitel 2.3). Es ist denkbar, das Verschleißproblem der vier Seiten des rechteckigen Drehklappenventils durch gefederte und somit nachstellende Verschleißbleche zu verbessern. Allerdings existiert für die

¹ Diskussion mit der Firma FLOWROX OY am 9.12.2015

Ecken², in welchen die Verschleißbleche zusammentreffen, keine Lösung, welche sich für den Einsatz in Frischbeton eignet. Da keines der bekannten Frischbetonventile den Anforderungen gerecht wird, muss ein neues Frischbetonventil entwickelt werden.

In der folgenden Problemeingrenzung wird der eigentliche Kern des Problems herausgearbeitet [94, S. 5]. Es hat sich herausgestellt, dass auf die zuverlässige Funktion des Frischbetonventils besonderes Augenmerk gelegt werden muss. Dies gilt in erhöhtem Maße für das Frischbetonauslassventil. Beispielsweise stehen bei diesem die Ventilseiten zeitweise unter Drücken, welche oberhalb des Umgebungsdrucks liegen. Somit muss das Bauteil, durch welches die Antriebskraft des Stellkörpers übertragen wird (z.B. Spindel, Welle, Zapfen [67, S. 150]), durch eine Sekundär-Ventildichtung abgedichtet werden. Bei einem Frischbetoneinlassventil steht die eine Ventilseite immer unter Umgebungsdruck wodurch die Sekundär-Ventildichtung des Stellkörpers vereinfacht wird.

Um ein Frischbetonventil mit einem erheblichen Anteil von Prinzipvariation zu entwickeln, welches sich als Auslassventil eignet, müssen die Anforderungen an dieses im Detail bekannt sein. Des Weiteren ist ein tiefes Verständnis der Teilfunktionen wie zum Beispiel der Dichtfunktion des Frischbetonventils sowie der Wirkzusammenhänge notwendig. Der Kern des Problems ist demzufolge die mangelnde Erforschung der Frischbetonventileigenschaften (Vergleich Kapitel: 3 Forschungshypothese und -fragen).

Aus diesem Grund werden im Folgenden die einzelnen Ventilfunktionen identifiziert und genauer untersucht. Auf diesen Überlegungen und Erkenntnissen basierend wird darauffolgend ein Frischbetonauslassventil entwickelt und erst damit die Realisierung einer Konstantflusspumpe für Frischbeton ermöglicht.

² Sich bewegende Teile, welche nicht durch runde Dichtungen laufen sind allgemein eine Herausforderung. Dies gilt besonders für Ecken in welchen mehrere Dichtebenen zusammenlaufen. Ein Beispiel hierfür ist der Wankel-Motor, dessen Kolben über Dichtstreifen und Dichtbolzen verfügte und dessen Dichtung ungenügend ist. (Dichtung des Wankel-Motors [104, S. 497])

9 Frischbetonventileigenschaften

Wie zuvor dargelegt, ist das Auslassventil die Kernkomponente der Frischbetonkonstantflusspumpe. Um eine anforderungsgerechte Kontruktion zu ermöglichen, werden im Folgenden die bislang weitgehend unbekanntenen Anforderungen erforscht. Hierzu wird im ersten Schritt die Funktion eines Ventils abstrahiert und analysiert (Kapitel 9.1, 9.2 und 9.3). Darauffolgend wird der Prüfstand für Frischbetonventilfunktionen vorgestellt mithilfe dessen die entscheidenden Ventilfunktionen experimentell untersucht werden (Kapitel 9.4). Es werden statistisch aussagekräftige, effiziente Versuchspläne aufgestellt und entsprechende Versuche durchgeführt (Kapitel 9.5 und 9.6). Abschließend wird das sich ergebende Optimierungsproblem diskutiert (Kapitel 9.7).

9.1 Ventilzustände

Um die entscheidenden Ventilfunktionen zu identifizieren, werden im Folgenden die Zustände betrachtet und untersucht, welche ein Ventil während dessen Betrieb durchläuft.

Es wird zwischen Ventiltakten und Ventilphasen unterschieden. Während eines Ventiltakts bewegt sich mindestens ein Ventilkörper, was zu einer transienten Dickstoffströmung führt. Bei einer Ventilphase bewegt sich hingegen kein Ventilkörper, sodass sich ein stationäres Strömungsprofil ausbildet.

Ein sich in der Offenphase befindliches Ventil wird durch einen Schließtakt in die Geschlossenphase und sodann durch den Öffnungstakt wieder in die Offenphase überführt.

Im Folgenden werden zunächst die Offenphase und der Schließtakt (Abbildung 9.1) und sodann die Geschlossenphase und der Öffnungstakt (Abbildung 9.2) genauer diskutiert und hieraus die dabei auftretenden Anforderungen an ein Ventil abgeleitet. Auf der linken Seite der Abbildungen ist schematisch die

Entwicklung der Dichtspalthöhe über die Zeit während des Schließ- bzw. Öffnungsprozesses dargestellt. (Erweiterung zu [105, S. 19])

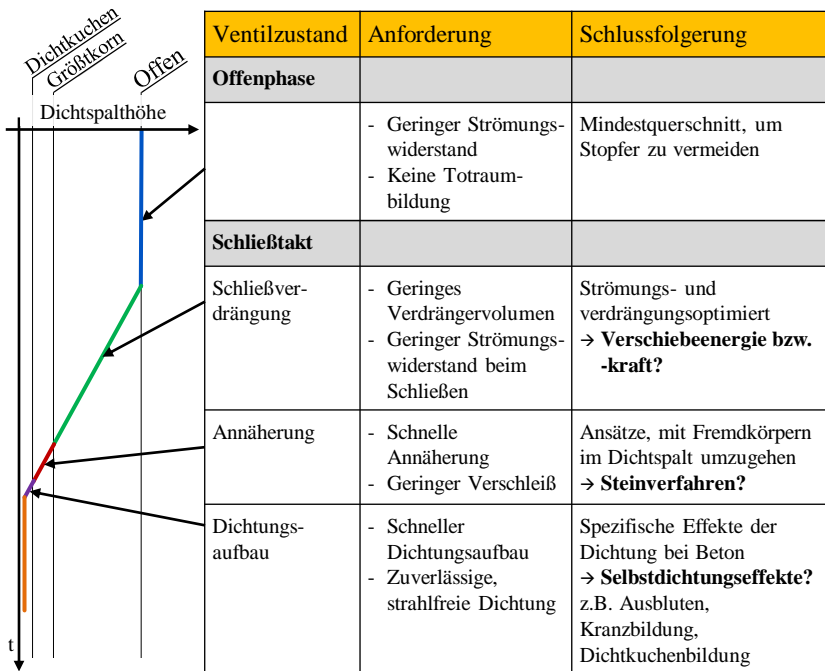


Abbildung 9.1: Analyse der in einem sich schließenden Dickstoffventil ablaufenden Prozesse (in Anlehnung an [12, S. 58])

Während der Offenphase des Ventils wird dieses vom Dickstoff durchströmt. Hieraus lassen sich die Anforderungen nach einem geringen Strömungswiderstand (bzw. hoher Kv-Wert) und Totraumarmut ableiten. Ein Mindestquerschnitt darf nicht unterschritten werden, da es sonst an der Engstelle zu Stopfern (Kapitel 2.1.2) kommen kann. Der Schließtakt lässt sich in Schließverdrängung, Annäherung und Dichtungsaufbau unterteilen. Die Dichtspalthöhe wird während der Schließverdrängung auf den Größtkorndurchmesser reduziert. Diese Teilfunktion wird als *Dickstoff verdrängen*

bezeichnet. Während dieser Bewegung soll der Ventilkörper möglichst wenig Volumen verdrängen und hierbei nur einen niedrigen Strömungswiderstand bieten, sodass für die Schließverdrängung nur eine geringe Betätigungskraft bzw. Verschiebeenergie benötigt wird. Wenn das Ventil weiter geschlossen wird, befindet sich dieses in der Annäherung. Bei dieser wird das Größtkorn überwunden und die Dichtspalthöhe weiter verringert (Teilfunktion: *Fremkörper überwinden*). Von Interesse ist dabei, dass während der Annäherung die im Dickstoff befindlichen Feststoffzuschläge schnell, verschleißarm und unter Aufwendung von niedrigen Betätigungskräften überwunden werden. Hierbei dürfen die Medium Eigenschaften nicht nachhaltig geändert werden. Die möglichen Ansätze, die Feststoffzuschläge zu überwinden, werden hier als Steinverfahren definiert. Der letzte Teiltakt ist der Dichtungsaufbau. Dieser erfolgt, indem die Dichtspalthöhe weiter verringert wird, bis eine Dichtung aufgebaut werden kann. Diese Ventilfunktion wird als *Dichtung aufbauen* bezeichnet. Dickstoffe haben teilweise eine selbstdichtende Eigenschaft, sodass durch das Medium selbst gewisse Spalte abgedichtet werden können (Vergleich: Kapitel 2.4). Der den Spalt abdichtende Dickstoff wird als Dichtkuchen¹ definiert.

Während der Öffnung eines Ventils werden die in Abbildung 9.2 dargestellten Phasen und Takte durchlaufen. In der Geschlossenphase sollen zum einen die beiden Ventileiten zueinander abgedichtet und zum anderen Toträume, in welchen sich Material absetzen könnte, vermieden werden. Der Öffnungstakt lässt sich in Dichtungsaufhebung, Druckausgleich und Öffnungsverdrängung unterteilen. Wenn sich die Dichtspalthöhe vergrößert, beginnt die Dichtungsaufhebung. Diese soll schnell erfolgen, um eine kurze Schaltzeit zu ermöglichen. Des Weiteren ist relevant, dass das Ventil derart gestaltet ist, dass Anbackungen vermieden werden. Wenn eine Druckdifferenz zwischen den zwei Ventileiten herrscht, hat dies bei einem hinreichend großen Spalt eine Ausgleichsströmung zur Folge. Hierbei kommt es zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten, welche durch das abrasive Medium zu Strahlverschleiß führen können. Um diesen zu vermeiden sollte der Ausgleichsstrahl von funktionsrelevanten Flächen ferngehalten bzw. davor abgelenkt werden. Wenn das Ventil erst betätigt wird, wenn zwischen dessen Öffnungen kein

¹ In Anlehnung an Filterkuchen (Kapitel 2.4.2)

Differenzdruck mehr ansteht, entfällt dieser Teiltakt und somit die Gefahr des Strahlverschleißes. Bei weiterer Vergrößerung des Dichtspaltspalts folgt die Öffnungsverdrängung. Um von dieser möglichst schnell und unter Aufwendung geringer Betätigungskräfte wieder in die Offenphase zu gelangen, soll das Ventil ein niedriges Verdrängervolumen und einen niedrigen Strömungswiderstand besitzen.

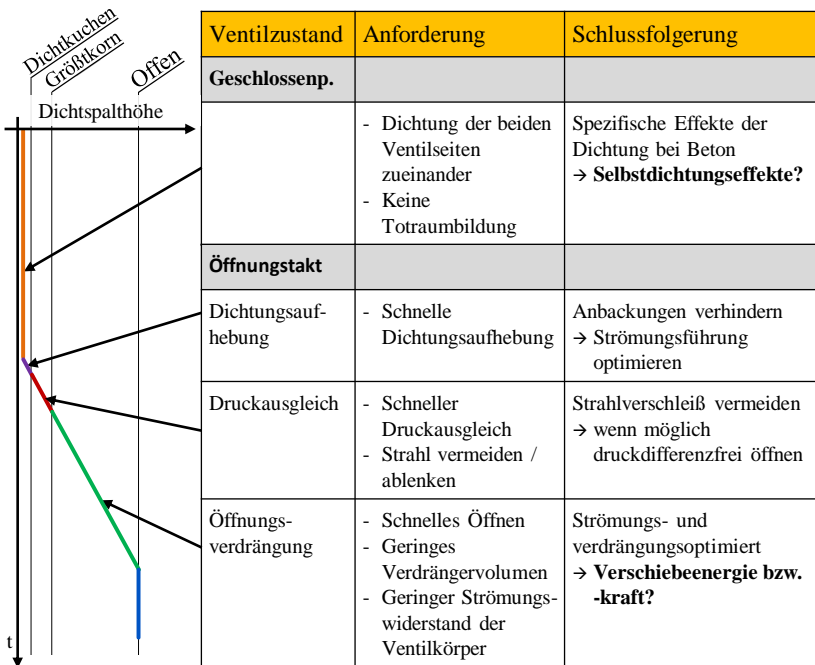


Abbildung 9.2: Analyse der in einem sich öffnenden Dickstoffventil ablaufenden Prozesse

9.2 Identifikation und Analyse der entscheidenden Ventilfunktionen

Durch die vorausgegangene Analyse der Ventiltakte und -phasen werden die drei für ein Dickstoffventil entscheidenden, während des Schließtaktes ablaufenden Ventilfunktionen identifiziert: *Dickstoff verdrängen*, *Fremdkörper überwinden* und *Dichtung aufbauen*.

Während der Schließverdrängung werden die Dichtflächen angenähert und der Dickstoff ausgeschoben. In dem Annäherungstakt müssen die Steine zwischen den Dichtflächen überwunden werden, sodass der Abstand der Dichtflächen weiter verringert werden kann. Falls dies nicht gelingt und ein hoher Spalt zwischen den Dichtflächen bestehen bleibt, kann dies zu Strahlverschleiß führen, welcher einen raschen Ausfall des Ventils zur Folge hat. Abbildung 9.3 zeigt beispielhaft die Folgen von Strahlverschleiß an einem demontierten Schneidring. Das Material des Schneidrings ist stellenweise abgetragen und die Oberfläche uneben.



Abbildung 9.3: Schneidring mit Strahlverschleiß (PUTZMEISTER ENGINEERING GMBH)

Um die Fremdkörper zu überwinden gibt es Steinverfahren, welche im Folgenden vorgestellt werden.

In dem Takt des Dichtungsaufbaus muss die Höhe des Dichtspalts weiter verringert werden, sodass eine Dichtwirkung erreicht wird und somit die zwei Ventiltseiten zueinander abgedichtet sind. Wenn keine hinreichende Dichtwirkung erzielt wird, kommt es zu einer Trennung der flüssigen und feinkörnigen von der grobkörnigen Phase. Da Frischbeton nur als homogenes Gemisch fließfähig ist, führt ein undichtes Ventil zwangsläufig zu Verstopfungen der Rohrleistung.

9.2.1 Dichtung aufbauen

Die Ventiltfunktion *Dichtung aufbauen* beruht auf dem mediumabhängigen Phänomen der Selbstdichtung. Unter Selbstdichtung wird die Eigenschaft eines Materials verstanden, Spalte und Risse abdichten zu können. Bei einem Spalt, durch welchen ein derartiges Medium fließt, kommt es anfangs zu einem großen Leckagestrom, welcher über die Zeit abnimmt. Es baut sich eine Dichtung aus dem Material selbst auf.

Aus dem Stand der Forschung im Bereich der Durchströmung von Feststoffschüttungen und Kuchenfiltern wird im Folgenden das Dichtkuchenmodell abgeleitet (Abbildung 9.4). Dieses beschreibt den Aufbau einer Dichtung durch Selbstdichtung. Im Weiteren wird das aufgestellte Modell mithilfe der folgenden Versuche validiert, präzisiert oder verworfen.

In Abbildung 9.4 (a) ist die Ausgangssituation mit einem ungefüllten Dichtspalt zu sehen. Im Folgenden wird das Material in den Dichtspalt gedrückt. Das mittlere Bild zeigt einen von Material durchströmten Dichtspalt. Es haben sich bereits erste Partikel vor und in dem Dichtspalt verklemmt.

Nachdem sich Anfangs nur große Partikel ablagern, setzen sich mit feiner werdendem Dichtkuchen zunehmend feine Partikel ab (Abbildung 9.4 (b)). Der Strömungswiderstand und somit die Dichtwirkung nehmen zu. Abbildung 9.4 (c) zeigt vor und in dem Spalt einen ausgebildeten Dichtkuchen, welcher den Leckagefluss deutlich reduziert (Vergleich: *Dead-End-Filtration* in Kapitel 2.4.2). Ob vor und in dem Dichtspalt ein Dichtkuchen aufgebaut wird und in

welchem Verhältnis diese Dichtkuchen zueinander stehen, ist noch nicht bekannt und wird im Folgenden genauer untersucht.

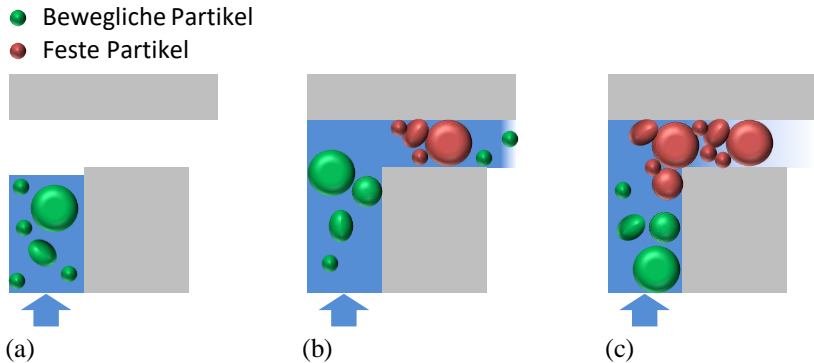


Abbildung 9.4: Dichtkuchenmodell; Modell des Aufbaus eines Dichtkuchens vor und im Dichtspalt bei selbstdichtendem Material; (a) Ausgangssituation; (b) große Leckage, Dichtkuchen im Aufbau; (c) geringe Leckage, Dichtkuchen aufgebaut

Durch die Druckdifferenz zwischen Innen- (p_1) und Außenseite (p_2) angetrieben bildet sich ein Leckagestrom von Flüssigkeit und Feinstbestandteilen durch den Dichtspalt aus. Die Höhe des Leckagestroms wird von dem vorherrschenden Strömungswiderstand im Dichtspalt - also den Eigenschaften des Dichtkuchens - beeinflusst. Da durch den Dichtkuchen der Strömungswiderstand erhöht wird, sinkt der Leckagestrom. Bei der Durchströmung eines sauberen Dichtspalts wird bei Gleitringdichtungen näherungsweise von einem linearen Druckabbau ausgegangen (Abbildung 9.5 (a); [74, S. 217]; Kapitel 2.4.3). Bei einem Frischbetonventil ist aufgrund des Dichtkuchens vor und eventuell in dem Dichtspalt von einem davon abweichenden Druckverlauf auszugehen. Da das Dichtkuchenmodell ein erster Versuch ist, die Selbstdichtung theoretisch zu analysieren, ist nicht bekannt, wie genau der Dichtkuchen aufgebaut ist. Somit sind abhängig von dem angenommenen Dichtkuchenaufbau verschiedene Druckverläufe denkbar (Abbildung 9.5 (b)).

Der sich im Dichtspalt ausbildende Druckverlauf wirkt auf die Dichtflächen und drückt diese auseinander. Bei einer selbstverstärkenden Dichtung kann die Höhe der schließenden Kraft über den Systemaufbau eingestellt werden. Wenn die druckbedingte Öffnungskraft die schließende übersteigt, wächst folglich die Dichtspalthöhe und die Leckage. Wenn hingegen die schließende Kraft die öffnende deutlich übersteigt, werden Dichtspalthöhe und Leckage vermindert. Wird das Ventil unter Differenzdruck geöffnet, macht dies allerdings sehr hohe Betätigungskräfte erforderlich. In diesem Fall muss folglich ein Kompromiss zwischen Leckagestrom und Betätigungskraft gefunden werden. (Aufbau der selbst verstärkenden Dichtung eines Schwenkrohrventils: Anhang A.2)

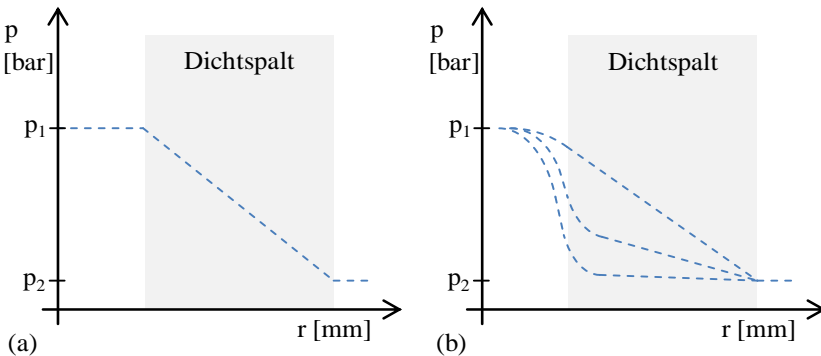


Abbildung 9.5: Druckverlauf über die Dichtspaltbreite; (a) Wasser (nach [74, S. 217]);
(b) Frischbeton (Annahme)

In Kapitel 9.5 werden das entwickelte Dichtkuchenmodell und die Überlegungen zum Druckverlauf über der Dichtspaltbreite mithilfe von Versuchen validiert.

9.2.2 Dickstoff verdrängen und Fremdkörper überwinden

Während der Schließverdrängung wird Frischbeton ausgeschoben. Darauf folgend werden im Laufe der Annäherung die sich im Dichtspalt befindlichen Feststoffzuschläge überwunden. Mögliche Vorgehensweisen hierzu werden in den Steinverfahren dargestellt (Abbildung 9.6). Es gibt drei grundsätzlich verschiedene Vorgehensweisen, wie mit im Dichtspalt vorhandenen Feststoffzuschlägen während der Annäherung der Dichtpartner umgegangen werden kann: *zerstören*, *integrieren* oder *entfernen*.

1. Fremdkörper **zerstören**

1.1 Fremdkörper zerdrücken; Bruchstücke bleiben im Dichtspalt



1.2 Fremdkörper abscheren; Bruchstücke ausschieben



2. Fremdkörper in Dichtung **integrieren**

2.1 Elastische Dichtpartner, in welche die Fremdkörper eingebettet bzw. integriert werden



2.2 Stopfer gezielt erzeugen und wieder beheben, um ein Ventil zu realisieren



3. Fremdkörper aus dem Dichtspalt **entfernen**

3.1 Mechanisch ausschieben



3.2 Fluidisches Ausspülen bzw. Ausblasen



3.3 Einsaugen



Abbildung 9.6: Steinverfahren; Vorgehensweisen zur Überwindung sich im Dichtspalt befindlicher Partikel [12, S. 58]

Bei dem Zerstören der Steine werden diese zwischen den Ventilbauteilen eingeklemmt und je nach Bauart entweder zerdrückt oder abgescheren. Eine andere Möglichkeit besteht darin, entweder die Fremdkörper in die elastische Dichtung zu integrieren oder eine Verstopfung gezielt zu erzeugen und damit die Dichtfunktion zu realisieren bevor sie wieder aufgehoben wird. Die dritte

mögliche Vorgehensweise ist, den Fremdkörper aus dem Dichtspalt zu entfernen. Dies kann entweder durch ein mechanisches Ausschieben, ein fluidisches Ausspülen bzw. Ausblasen oder aber durch Einsaugen realisiert werden.

Fremdkörper zerstören

Wenn sich ein Ventil schließt können je nach Bauart Fremdkörper abgeschoren oder zerdrückt werden. Um diese zwei Vorgehensweisen gegenüberzustellen werden jeweils fünf ca. 32 mm große, gebrochene Basaltsteine mit hoher Scherfestigkeit² in einem Prüfstand zerdrückt bzw. abgeschoren. Abbildung 9.7 zeigt den Verlauf der Kräfte über dem Abstand zweier Scherkanten bzw. Brechflächen beim Zerstören der Steine.

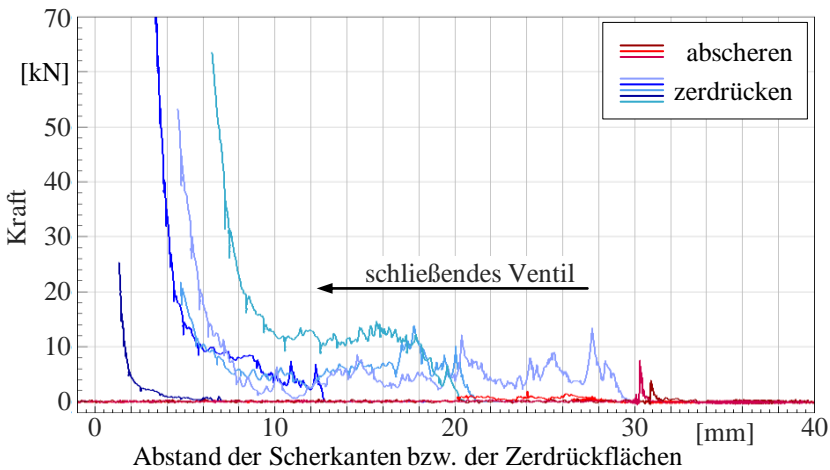


Abbildung 9.7: Kraft über den Abstand der Scherkanten bzw. der Zerdrückflächen; jeweils fünf feste 32 mm Steine zerdrückt und abgeschert

Bereits zum ersten Zerdrücken der Steine wird hierfür eine höhere Kraft als zum Abscheren benötigt. Aufgrund der Höhe der benötigten Kräfte und

² Basalt; Scherfestigkeit von 85 – 212,5 MPa [106, S. 53].

Energien sowie des Restspalts hat das Steinverfahren Abscheren Vorteile gegenüber dem Zerdrücken.

Fremdkörper in Dichtung integrieren

Es gibt zwei Möglichkeiten, Fremdkörper in die Dichtung zu integrieren. Die erste Möglichkeit ist die Verwendung elastischer Dichtungspartner. Dieses Prinzip wird beispielsweise bei Rotorpumpen angewendet. Bei dem Einbetten der Partikel kommt es zu einer starken Deformation und infolgedessen zu einem Verschleiß der Dichtflächen. Abbildung 9.8 zeigt einen verschlissenen Rotorpumpenschlauch. Die Verschleißteile einer S-Rohr-Pumpe (Steinverfahren 1.2 Steine abscheren) haben circa eine um den Faktor acht längere Standzeit als ein Rotorpumpenschlauch.



Abbildung 9.8: Verschlissener Rotorpumpenschlauch (10 Cent-Münze zum Größenvergleich); Funktion nach dem Steinverfahren 2.1 Elastische Partner, in welche die Fremdkörper eingebettet bzw. integriert werden

Bei der zweiten Möglichkeit, die Fremdkörper in die Dichtung zu integrieren, wird gezielt ein Stopfer erzeugt und wieder aufgehoben, um die Ventilfunktion zu erfüllen. Abbildung 9.9 zeigt ein handbetätigtes Ventil, welches nach diesem Prinzip arbeitet.

Bei diesem werden mehrere Stifte in ein Rohr geschoben, sodass sich ein Stopfer bildet. Die Zuverlässigkeit dieses Ventils ist nicht bekannt. Da sich Stopfer unkontrolliert bilden und wieder auflösen ist davon auszugehen, dass die Betriebssicherheit dieses Systems nicht für ein zyklisches Schalten, sondern

lediglich für ein einmaliges Absperren beispielsweise vor der Reinigung geeignet ist.



Abbildung 9.9: Handbetätigtes Sperrventil ; Funktion nach dem Steinverfahren 2.2 Stopfer gezielt erzeugen und wieder aufheben (PUTZMEISTER ENGINEERING GMBH)

Fremdkörper aus dem Dichtspalt entfernen

Bei der Vorgehensweise, die Fremdkörper mithilfe einer Mechanik aus dem Dichtspalt auszuschieben, stellt sich die Frage nach der Standzeit einer derartigen Konstruktion. Es ist davon auszugehen, dass ein „Finger“, welcher beispielsweise den Dichtspalt eines Tellersitzventils reinigt, einem enormen Verschleiß unterworfen ist. Eine Lösungsvariante, welche ohne graze Mechanik auskommt, besteht darin, den Teller eines Tellersitzventils während dessen Schließtakt zu drehen. Bei einer schnellen Drehbewegung kommt es voraussichtlich zu einem beschleunigten Verschleißverhalten. Aus diesem Grund sollen die Fremdkörper durch eine vergleichsweise langsame Drehbewegung des Tellers herausgerollt werden.

Das Entfernen der Fremdkörper aus dem Dichtspalt durch die Drehung des Tellers eines Tellersitzventils wird mithilfe eines abstrahierten Tellersitzventils und Frischbeton untersucht. In einem Teil der Versuchsläufe können die Steine im Dichtspalt entfernt und das Ventil geschlossen werden. Es ist allerdings auch zu erkennen, dass in manchen Versuchsdurchläufen ein Restspalt

verbleibt, da nicht alle Steine ausgeschoben werden können. Durch dieses Vorgehen wird zwar ein Teil der Steine ausgeschoben, allerdings müssen die verbleibenden Steine zum Schließen des Ventils unter hohem Kraftaufwand zerdrückt werden. Aus diesem Grund wird diese Vorgehensweise verworfen.

Das fluidische Ausspülen bzw. Ausblasen kann entweder mit einer Flüssigkeit oder einem Gas³ umgesetzt werden. Der Einsatz einer Flüssigkeit bringt den Nachteil mit sich, dass bereits bei kleinsten Mengen die Eigenschaften des Frischbetons verändert werden, was nicht akzeptabel ist (Anforderungsliste; Anhang A.8). Um dieses Problem zu lösen, kann Gas verwendet werden, welches in den Ventilen der Pumpe eingebracht wird und am Zielort der Förderung aus dem Medium wieder entweicht. Bei diesem Vorgehen ist allerdings zu beachten, dass in dem komprimierten Gas Energie gespeichert ist und sich das Gas auf dem Weg zum Zielort mit abnehmendem Druck ausdehnt. Der Einsatz von Gas zum Ausblasen der Steine wird aus sicherheitstechnischen und energetischen Gründen verworfen.

Die dritte Möglichkeit, die Fremdkörper aus dem Dichtspalt zu entfernen, ist, diese einzusaugen. Bei einer Pumpe kann der Sog mithilfe der Fördereinheit erzeugt werden. Es ist allerdings nicht nachgewiesen, dass durch die Hubkolben der Frischbetonpumpe eine Unterdruckblase derart im Dichtspalt erzeugt werden kann, dass diese die sich im Dichtspalt befindlichen Fremdkörper einsaugt.

Zusammenfassung

Das Steinverfahren, welches sich aus sicherheitstechnischen, energetischen und verschleißtechnischen Gründen am besten für den Einsatz in einem Frischbetonventil eignet, ist das *Zerstören* der Fremdkörper *durch Abscheren*. Dieses wird heute schon an Frischbetonventilen, wie beispielsweise der S-Rohrweiche, eingesetzt. Allerdings ist diese Vorgehensweise unerforscht. Es sind keine Werte der Qualitätsmerkmale, wie beispielsweise die Häufigkeit wie oft ein Stein bei einem sich schließenden Frischbetonventil überhaupt abgeschert wird und welche Kraft bzw. Energie hierfür aufgewendet werden muss, bekannt.

³Stand der Technik: Ausblssystem bei einem einfachen Plattenschieberventil [67, S. 322].

Des Weiteren weiß man nicht, wie sich verschiedene Faktoren, wie zum Beispiel der Winkel zwischen den Scherkanten oder die Schließgeschwindigkeit, auf die Qualitätsmerkmale auswirken. Diese Fragen werden in Kapitel 9.6 genauer betrachtet.

9.3 Abstraktion des Frischbetonventils

Zur Erforschung der Ventilfunktionen *Dickstoff verdrängen*, *Fremkörper überwinden* und *Dichtung aufbauen* werden Versuche durchgeführt. Die Versuche sollen keine ventilspezifischen Erkenntnisse liefern, welche nicht auf eine andere Ventiltbauart übertragen werden können. Durch die Untersuchungen der entscheidenden Ventilfunktionen sollen vielmehr die Zusammenhänge auf Effektebene erforscht werden.

Im Folgenden werden die Faktoren identifiziert, welche für die allgemeingültige Untersuchung der entscheidenden Ventilfunktionen relevant sind. Diese müssen am Prüfstand eingestellt werden können.

Zur Untersuchung der Teilfunktion *Dichtung aufbauen* ist es notwendig, die Dichtspaltbreite zu variieren. Des Weiteren muss der Druck des zu testenden Mediums eingestellt werden können. Am Prüfstand sollen sowohl neue als auch verschlissene Dichtpartner abgebildet werden können. Im Neuzustand liegen die Dichtpartner flächig auf (Abbildung 9.10). Es kann eine Pressung aufgebracht werden.

Bei verschlissenen Dichtpartnern ist deren Oberfläche wellig, sodass sie nur noch punktuellen Kontakt haben. In Abbildung 9.10 ist in der Seitenansicht der verschlissenen Bauteile durch den verschlissenen Dichtspalt hindurch ein roter Körper zu sehen, welcher für das Foto zur besseren Sichtbarkeit des Spaltes angebracht wird. Dieser Zustand der Dichtpartner kann am Prüfstand durch Dichtflächen, welche einen definierten Abstand haben, nachempfunden werden.



Abbildung 9.10: Abstraktion des ringförmigen Dichtspalts und der Abscherkante des Frischbetonventils zum Prüfstand (in Anlehnung an betreute Abschlussarbeit [107, S. 52]; Fotos in Draufsicht [108, S. 4-6])

Um die Teilfunktionen *Dickstoff verdrängen* und *Fremdkörper abscheren* auf Effektebene zu untersuchen, müssen zwei Schneidkanten durch das zu testende Material aneinander vorbei geführt werden. Die hierfür nötige Kraft wird an einer der Kanten gemessen. Des Weiteren ist von Interesse, wie sich der Winkel zwischen den Schneidkanten auf die Brechwahrscheinlichkeit auswirkt. Es wird davon ausgegangen, dass bei einem großen Brechkantenwinkel die Fremdkörper teilweise an den Brechkanten abrutschen und somit nicht gebrochen werden. Weitere Faktoren eines abstrakten Frischbetonventils sind die Schließgeschwindigkeit und der Verschleißzustand bzw. der Abstand, in welchem die Brechkanten aneinander vorbei fahren (Abbildung 9.10).

9.4 Prüfstand für Frischbetonventilfunktionen

Um die geforderte Funktionsvielfalt in dem Prüfstand abbilden zu können, ist dieser modular aufgebaut. Abbildung 9.11 (a) zeigt ein Foto und (b) ein Rendering des CAD-Modells des Prüfstands.

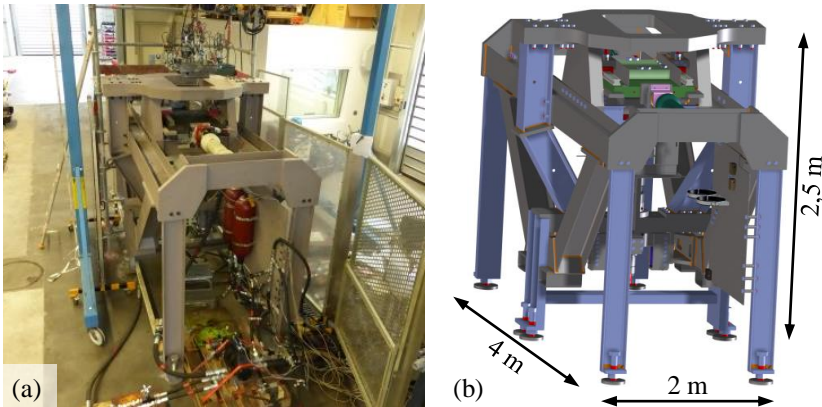


Abbildung 9.11: Prüfstand für Frischbetonventilfunktionen; (a) Foto; (b) Rendering des CAD-Modells (basierend auf betreuter Abschlussarbeit [109])

Das Innenleben des Prüfstands ohne dessen Rahmen ist in Abbildung 9.12 dargestellt. In die Hauptplatte (1) kann das *Abschermodule* zur Untersuchung der Ventilfunktionen *Dickstoff verdrängen* und *Fremdkörper abscheren* eingebaut werden. Alternativ kann das *Dichtmodule* zur genaueren Betrachtung der Ventilfunktion *Dichtung aufbauen* mit der Hauptplatte (1) verschraubt werden. Die Hauptplatte (1) ist mit Linearführungen (2) im Rahmen aufgehängt und wird durch die hydraulischen Plunger (3) verfahren. In dem Förderzylinder (4) befindet sich Frischbeton, welcher mithilfe des Förderkolbens und des hydraulischen Differentialzylinders (5) unter Druck gesetzt wird. Der Förderzylinder ist mit einem Stützrahmen (6) verbunden, welcher sich wiederum über Linearführungen (7) an dem Prüfstandrahmen abstützt. Mithilfe der Einstellschraube

(8) wird die Höhe des Stützrahmens (6) sowie des Förderzylinders (4) verändert.

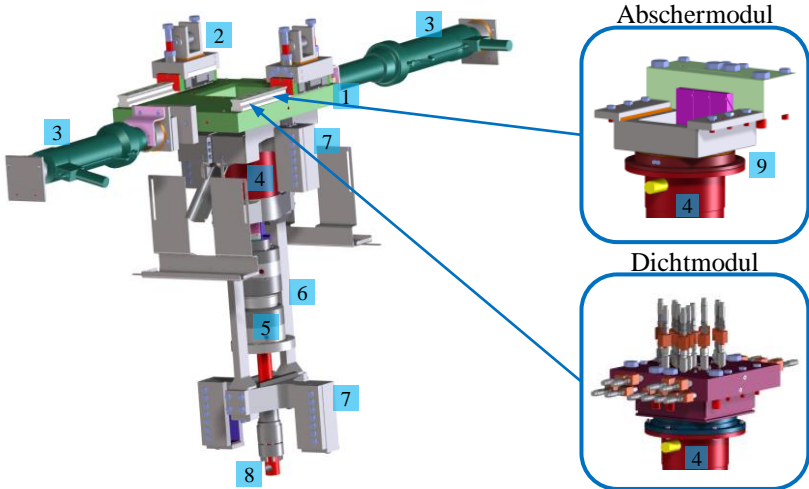


Abbildung 9.12: Prüfstand für Frischbetonventilfunktionen (Rahmenkonstruktion nicht dargestellt) mit Detailaufnahmen des Abschermoduls und des Dichtmoduls; Nummerierte Bauteile: (1) Hauptplatte, (2) Linearführungen der Hauptplatte, (3) hydraulische Plunger, (4) Förderzylinder, (5) hydraulischer Differentialzylinder mit angeflanschem Förderkolben, (6) Stützrahmen des Förderzylinders, (7) Linearführungen des Stützrahmens des Förderzylinders, (8) Einstellschraube, (9) Dichtflächeneinsatz

Durch diesen Mechanismus kann die Höhe des sich zwischen dem Dichtflächeneinsatz (9) und dem Dichtmodul ergebenden Dichtspalts eingestellt werden. Bei dem Abschermodule erfolgt auf analoge Weise die Einstellung der Brechspalthöhe. (betreute Abschlussarbeit [109])

9.4.1 Dichtmodul

Das Dichtmodul (Abbildung 9.13) besteht aus einer oberen und einer unteren Baugruppe.

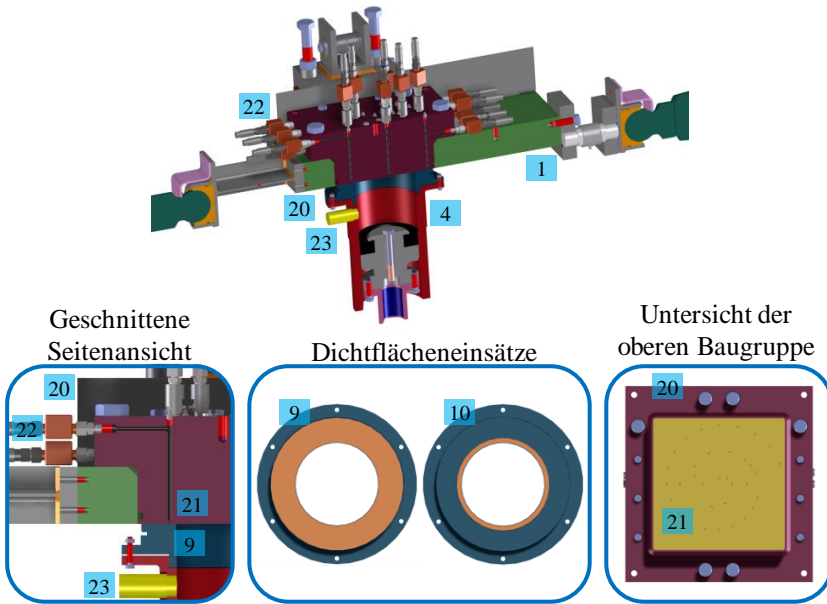


Abbildung 9.13: Geschnittener Prüfstand für Frischbetonventilfunktionen (Rahmenkonstruktion nicht dargestellt) mit Dichtmodul und Detailaufnahmen der geschnittenen Seitenansicht, den Dichtflächeneinsätzen mit schmalem und breitem Dichtspalt und der Untersicht der oberen Baugruppe; Nummerierte Bauteile: (1) Hauptplatte, (4) Förderzylinder, (9) breiter Dichtflächeneinsatz, (10) schmaler Dichtflächeneinsatz, (20) obere Baugruppe des Dichtmoduls, (21) Messbohrung (anfangs dünn, dann dick), (22) Flüssigkeitsdrucksensor, (23) Druckmessdose

Die untere Baugruppe besteht aus einem Dichtflächeneinsatz (20). Dieser wird mit dem Förderzylinder verschraubt. Die Oberseite des Dichtflächeneinsatzes (20) bildet zusammen mit der oberen Baugruppe des Dichtmoduls den Dichtspalt. Mithilfe verschieden breiter Dichtflächeneinsätze (20 o. 21) lässt sich die Breite des Dichtspalts variieren. Durch Betätigung der Einstellschraube (Abbildung 9.12, Nr. 8) wird der Förderzylinder samt Dichtflächeneinsatz vertikal verschoben und somit die Dichtspalthöhe angepasst.

Die obere Baugruppe (20) des Dichtmoduls bildet die Gegenfläche des Dichtspalts. Vor jedem Versuch wird Frischbeton in den Förderzylinder

eingefüllt, dann die obere Baugruppe des Dichtmoduls mit der Hauptplatte verschraubt und danach der Versuch durchgeführt. Zur Messung des Druckverlaufs über die Dichtspaltbreite befinden sich auf der Unterseite des oberen Dichtmoduls Messbohrungspaare (21) (jeweils 2 mm Durchmesser). Die in einer Schneckenform angeordneten Messbohrungen (21) sind mit Fett gefüllt und verbinden jeweils die Bauteiloberfläche mit einem Flüssigkeitsdrucksensor (22). Neben den punktuellen Druckmessstellen gibt es eine Druckmessdose (23). Diese besitzt eine flächige ($d = 16 \text{ mm}$) Messstelle. (betreute Abschlussarbeit [109])

Die bei dem Dichtmodul relevanten Faktoren, Messgrößen und technischen Prüfstandsdaten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 9.1: Verstellbare Faktoren, Messgrößen und technische Prüfstandsdaten des Dichtmoduls

Faktoren		Messgrößen		Technische Prüfstandsdaten	
Frischbeton- druck	0 – 85 bar	Leckage- masse	in Gramm [g]	Maße Prüfstand	4 x 2 x 2,5 m
Dichtspalt- breite	5; 10; 20; 35 mm	Druckmess- modul	34 Messstellen; bis 100 bar	Prüfstands- gewicht	~ 8 t
Höhe des Dichtspalts	0 bis 20 mm	Druckmess- dose	1 Messstelle; bis 100 bar	Volumen des Förderzyl.	8 l
Flächenpress. im Dichtspalt	bis 9 MPa (bzw. N/mm ²)	Höhe des Dichtspalts	0 bis 15 mm	Gewicht oberes Dichtmodul	180 kg
Frischbeton- eigenschaften	Größtkorn, Kornform, ...				

9.4.2 Abschermodul

Das Abschermodul (Abbildung 9.14) besteht ebenfalls aus einer oberen und einer unteren Baugruppe.

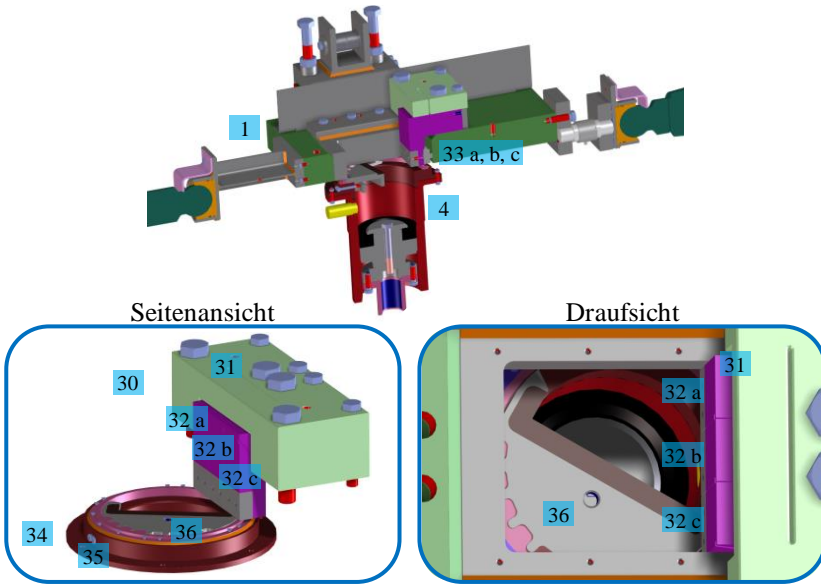


Abbildung 9.14: Geschnittener Prüfstand für Frischbetonventilfunktionen (Rahmenkonstruktion nicht dargestellt) mit Abschermodul und Detailaufnahmen der Seitenansicht des Abschermoduls und Draufsicht des Abschermoduls; Nummerierte Bauteile: (1) Hauptplatte, (4) Förderzylinder, (30) obere Baugruppe, (31) Zahnaufnahme, (32) Zähne, (33) Kraftmessdose des mittleren Zahns, (34) untere Baugruppe, (35) Adapterring der Brechsichel, (36) Brechsichel

Die obere Baugruppe (30) wird in der hydraulisch verfahrbaren Hauptplatte (1) montiert. In der Zahnaufnahme (31) werden die drei Zähne (32 a, b, c) geführt. Hinter jedem Zahn befindet sich eine Kraftmessdose (33 a, b, c) durch welche die Kräfte zum Verdrängen bzw. Abscheren gemessen werden. Um zu verhindern, dass die Zähne herausrutschen, werden diese durch Federn gegen die Kraftmessdosen gedrückt. Dies führt zu einem Offset in der Kraftmessung, welcher bei der Datenauswertung kompensiert wird.

Die untere Baugruppe (34) wird auf dem Förderzylinder (4) montiert und kann durch die Höhenverstellung mittels der Einstellschraube (Abbildung 9.12 Nr. 8) justiert werden. Der Adapterring (35) mit dessen Innenverzahnung wird

mit dem Förderzylinder verschraubt. Die Brechsichel (36) mit deren Außenverzahnung kann in mehreren Positionen mit dem Adapterring (35) formschlüssig verbunden werden. Der sich zwischen der Kante der Brechsichel (36) und den Zähnen (32 a, b, c) ergebende Brechwinkel kann somit in Stufen eingestellt werden. (betreute Abschlussarbeit [109])

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über Faktoren, Messgrößen und technischen Prüfstandsdaten, welche für das Abschermodul relevant sind.

Tabelle 9.2: Verstellbare Faktoren, Messgrößen und tech. Prüfstandsdaten des Abschermoduls

Faktoren		Messgrößen		Technische Prüfstandsdaten	
Geschwindigkeit der Hauptplatte	bis 1,8 m/s	Kraftmessdosen	jeweils bis 50 kN	Maße Prüfstand	4 x 2 x 2,5 m
Höhe des Brechspalts	0 bis 20 mm	Weg der Hauptplatte	30 cm	Prüfstandsgewicht	~ 8 t
Brechwinkel	0; 15; 30; 45°	Höhe des Brechspalts	0 bis 15 mm	Verfahrkraft der Hauptplatte	bis 220 kN
Frischbetoneigenschaften	Größtkorn, Kornform, ...			Gewicht oberes Abschermodul	68 kg
				Zahnbreite	61 mm

9.5 Frischbetonventilfunktion: Dichtwirkung aufbauen

In diesem Kapitel wird die Frischbetonventilfunktion *Dichtung aufbauen* genauer untersucht. Hierzu werden die Versuchsplanung (Kapitel 9.5.1), die Messergebnisse, die Effektdiagramme (Kapitel 9.5.2) und die statistische Auswertung sowie die Regression (Kapitel 9.5.3) beschrieben. Beobachtungen, welche nicht mit einem Versuchsplan analysiert werden können, werden in einem Unterkapitel (Kapitel 9.5.4) zusammengefasst.

Die Erkenntnisse aus diesem und dem folgenden Kapitel (9.6), welches die Ventilfunktionen *Verdrängen* und *Abscheren* behandelt, führen zu einem Optimierungsproblem. Diese Zusammenhänge werden im übernächsten Kapitel (9.7) zusammengefasst und gegeneinander abgewogen.

9.5.1 Versuchsplanung

Zur Planung der Versuche werden die zu variierenden Faktoren sowie ihre Faktorstufen festgelegt. Des Weiteren werden die zu messenden Qualitätsmerkmale definiert. Die Versuchsplanung wird mit der Festlegung bzw. Erstellung geeigneter Versuchspläne beendet.

Faktoren und Faktorstufen

Die mithilfe der Abstraktion des Frischbetonventils (Kapitel 9.3) identifizierten Faktoren lassen sich in „Faktoren der Konstruktion“ und „Faktoren des Mediums“ unterteilen. Faktoren der Konstruktion beschreiben Parameter des Prüfstands, welche an diesem eingestellt bzw. in der Konstruktion eines Ventils umgesetzt werden können. Bei Faktoren des Mediums handelt es sich um veränderliche Größen des Frischbetons. Durch Variation der Frischbetonmischungen kann gewährleistet werden, dass durch die Versuche allgemeingültige Effekte identifiziert werden. Des Weiteren ist von Interesse, wie diese Effekte von der Frischbetonmischung beeinflusst werden. Eine Übersicht der Faktoren und Faktorstufen ist in Tabelle 9.3 dargestellt.

Um eine messbare Änderung der Qualitätsmerkmale zu erhalten, ist es ratsam, die Faktorstufen möglichst groß zu wählen [110, S. 6]. Bei den Faktoren W/Z-Wert, Sieblinie und Größtkorn diene die DIN 1045-2⁴ als Orientierung zur Festlegung der Faktorstufen. Die Faktorstufen der Flächenpressung liegen einmal oberhalb und einmal unterhalb der bei Pumpen der Firma Putzmeister üblichen Flächenpressung (betreute Abschlussarbeit [107, S. 54-55]). Des

⁴ DIN 1045-2 Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; [16].

Weiteren wurden, wie in [110, S. 6] empfohlen, Vorversuche durchgeführt, um geeignete Faktorstufen festzulegen (betreute Abschlussarbeit [107, S. 49-58]).

Tabelle 9.3: Frischbetonventilfunktion Dichtung aufbauen; Faktoren des Prozesses und des Mediums (in Anlehnung an betreute Abschlussarbeit [107, 50, 54, 60])

Faktoren der Konstruktion			Faktoren des Mediums		
	-	+		-	+
Flächenpressung [Mpa]	3	8	W/Z-Wert [-]	0,45	0,55
Spalthöhe [mm]	1	7	Sieblinie [-]	Grob AB	Fein BC
Spaltbreite [mm]	10	55 (35*)	Größtkorn [mm]	8	32
			Kornform [-]	rund	gebrochen
			Förderdruck [bar]	30	85
			Hydratationszeit [min]	20	60

Einer der Faktoren des Prozesses lautet *Dichtspalthöhe*, ein anderer *Flächenpressung*. Durch diese Faktoren können am Prüfstand sowohl neuwertige, ebene als auch verschlissene, wellige Dichtflächen abgebildet werden (Vergleich Abbildung 9.10). Allerdings sind diese zwei Faktoren nicht frei kombinierbar da keine Pressung zwischen den Dichtpartnern bei einem Dichtspalt aufgebracht werden kann. Dieser Konflikt wird im Weiteren als *kollidierende Faktorenkombination* bezeichnet. Um diese Kollision zu vermeiden, werden getrennte Versuchspläne erstellt, welche im Nachhinein zu einem gemeinsamen kombiniert werden (betreute Abschlussarbeit [107, S. 57-58]).

Durch die Kombination der Faktoren des Mediums werden verschiedene Frischbetonmischungen erzeugt, die ein breites Band abdecken. Durch die reine Kombination der Faktorstufen entstehen teilweise Mischungen, welche nicht pumpbar sind. Nicht pumpbare Mischungen sind für die Untersuchung allerdings irrelevant, da diese nicht in Frischbetonventilen eingesetzt werden

* Prüfstandbedingt kann die hohe Pressung maximal bei dem 35 mm breiten Ring aufgebracht werden. Aus diesem Grund wird bei dem Versuchsplan *neu* (Vorgriff) der 35 mm breite Ring eingesetzt.

können und stellen somit kollidierende Faktorkombinationen dar. In der Betonkunde wird bei derartigen Mischungen auf ein Zusatzmittel zurückgegriffen, durch welches beispielsweise Ausbluten verhindert oder die Konsistenz verflüssigt wird (Kapitel 2.1.1). Um eine möglichst große Bandbreite an Frischbetonmischungen abzudecken und trotzdem die Pumpbarkeit zu gewährleisten, werden auch bei den Versuchsmischungen Zusatzmittel eingesetzt (betreute Abschlussarbeit [107, S. 56]). Mithilfe dieses weiteren Freiheitsgrades kann die Kollision der Faktoren vermieden werden. Eine Übersicht der Frischbetonmischungen für Versuchszwecke ist im Anhang (Kapitel A.4) zu finden.

Qualitätsmerkmale

Nach [110, S. 4] wird als Qualitätsmerkmal ein messbares Ergebnis definiert, welches Rückschluss auf die Erfüllung der Funktion des Systems zulässt. Im Folgenden werden die Qualitätsmerkmale der Versuchsreihe *Dichtwirkung aufbauen* festgelegt.

Das erste Qualitätsmerkmal ist die Leckage, welche in bzw. durch den Spalt gepresst wird. Da diese sowohl aus flüssigen als auch aus festen Bestandteilen besteht, wird diese in Form der Leckagemasse in Gramm gemessen. Als weiteres Qualitätsmerkmal ist der Druckverlauf über den Dichtspalt von großem Interesse. Allerdings können bei der statistischen Versuchsplanung bzw. der dazugehörigen Auswertung nur einzelne Zahlenwerte und keine Verläufe ausgewertet werden. (betreute Abschlussarbeit [107, S. 51])

Versuchspläne

Wie bereits herausgearbeitet, können aufgrund der kollidierenden Faktorkombination aus Flächenpressung und Spalthöhe nicht alle Faktoren in einem Versuchsplan untersucht werden. Aus diesem Grund wird das Vorgehen in drei Versuchspläne aufgeteilt (Tabelle 9.4).⁶

⁶ Wissenschaftliches Gespräch des Verfassers mit Herrn CHRISTOPH RECK und Herrn TOBIAS HUTH im April 2017

Tabelle 9.4: Überblick der Faktoren und Versuchspläne (in Anlehnung an betreute Abschlussarbeit [107, S. 60- 80])

Faktor	Versuchsplan		
	neu	verschlissen	kombiniert
der Konstruktion			
Flächenpressung	X		
Spalthöhe		X	
Kontakt der Dichtflächen			X
Spaltbreite	X	X	X
des Mediums			
W/Z-Wert	X	X	X
Sieblinie	X	X	X
Größtkorn	X	X	X
Kornform	X	X	X
Förderdruck	X	X	X
Hydratationszeit	X	X	X

In dem Versuchsplan *neu* werden die Flächenpressung sowie die weiteren Faktoren variiert, allerdings die Dichtspalthöhe vernachlässigt. Bei dem Versuchsplan *verschlissen* werden die Dichtspalthöhe sowie die restlichen Faktoren variiert, allerdings die Pressung nicht berücksichtigt. Um die beiden Versuchspläne in Relation zu setzen, gibt es einen dritten Versuchsplan in welchem die durchgeführten Versuche kombiniert werden. Für diesen Versuchsplan mit der Bezeichnung Versuchsplan *kombiniert* müssen keine weiteren Versuche durchgeführt werden. In diesem Versuchsplan werden die Faktoren *Flächenpressung* und *Spalthöhe* durch den Faktor *Kontakt der Dichtflächen* ersetzt. Dieser hat die zwei Faktorstufen 1 mm und 0 mm bzw. 8 MPa.⁷

Jeder der Versuchspläne verfügt über acht Faktoren, welche jeweils auf zwei Faktorstufen eingestellt werden können. Bei einem vollfaktoriellen

⁷ Wissenschaftliches Gespräch des Verfassers mit Herrn CHRISTOPH RECK und Herrn TOBIAS HUTH im April 2017

Versuchsplan⁸ ergeben sich $2^8 = 256$ unterschiedliche Faktorstufenkombinationen. Bei einem derartigen Versuchsplan können alle Haupteffekte und Wechselwirkungen berechnet werden, ohne dass es zu ihrer Vermengung kommt (ersichtlich aus [112, S. 258]). Allerdings ist ein Versuchsplan mit 256 Faktorstufenkombinationen aus zeitlichen und wirtschaftlichen Gründen nicht vertretbar. Mithilfe der statistischen Versuchsplanung lässt sich aus einem vollfaktoriellen Versuchsplan für vier Faktoren und den entsprechenden Generatoren ein fraktioneller faktorieller Versuchsplan⁹ 2^{8-4} ableiten (betreute Abschlussarbeit [107, S. 51]; [112, S. 709]). Bei diesem sind zum einen die Haupteffekte mit Dreifachwechselwirkungen miteinander vermenget und zum anderen untereinander auch die Zweifachwechselwirkungen (Auflösung¹⁰: IV; [110, S. 6]). Es ergeben sich 16 Faktorstufenkombinationen pro Plan. Der Versuchsaufwand ist demzufolge 1/16 des vollfaktoriellen Versuchsplans. In Summe gibt es bei den drei Versuchsplänen 32 unterschiedliche Faktorkombinationen. Durch die abschließende teilweise Randomisierung¹¹ folgen die in Tabelle 9.5 dargestellten Versuchspläne.

⁸ Vollfaktorieller Versuchsplan (oder auch *Vollständig faktorieller Versuchsplan* [111]): Es werden „alle Kombinationen getestet“ [110, S. 6].

⁹ Fraktionelle faktorielle Versuchspläne: „[...]anstelle von ‚höheren‘ Wechselwirkungen [werden] weitere Faktoren untersucht. Dadurch bleibt die Anzahl der Faktorstufenkombinationen unverändert, während die Anzahl der Faktoren erhöht wird.“ [111, S. 130].

¹⁰ Auflösung: „Beschreibt die schlimmste Vermengung von Effekten und damit das Risiko einer Verfälschung.“ [111, S. 329].

¹¹ Die Reihenfolge, in welche die Versuche durchgeführt werden, wird von jeder Systematik gelöst „und stattdessen eine ‚zufällig ausgewürfelte‘ Reihenfolge genutzt“. Hierdurch wird der Einfluss von systematischen Störungen verringert. [110, S. 88].

Tabelle 9.5: Versuchspläne zur Untersuchung der Frischbetonventilfunktion Dichtwirkung aufbauen: Versuchsplan neu (C = Flächenpressung), Versuchsplan verschlissen (C = Spalthöhe), Versuchsplan kombiniert (C = Kontakt der Dichtflächen) (in Anlehnung an betreute Abschlussarbeit [107, S. 60-80])

		Faktoren							
		A _D	B _D	C _D	D _D	E _D	F _D	G _D	H _D
Durchlaufnummer	Kombinationsnummer	Spaltbreite	Förderdruck	Flächenpressung bzw. Spalthöhe bzw. Kontakt der Dichtflächen	Sieblinie	Größtkorn	Kornform	W/Z-Wert	Hydrationszeit
1	3	-	+	-	-	+	-	+	+
2	11	-	+	-	+	-	+	+	-
3	9	-	-	-	+	+	+	-	+
4	1	-	-	-	-	-	-	-	-
5	7	-	+	+	-	-	+	-	+
6	13	-	-	+	+	-	-	+	+
7	15	-	+	+	+	+	-	-	-
8	5	-	-	+	-	+	+	+	-
9	10	+	-	-	+	+	-	+	-
10	4	+	+	-	-	+	+	-	-
11	2	+	-	-	-	-	+	+	+
12	14	+	-	+	+	-	+	-	-
13	8	+	+	+	-	-	-	+	-
14	6	+	-	+	-	+	-	-	+
15	12	+	+	-	+	-	-	-	+
16	16	+	+	+	+	+	+	+	+

9.5.2 Messergebnisse und Effektdiagramme

Im Folgenden werden die Messergebnisse für das Qualitätsmerkmal *Leckage* in jeweils einem Effektdiagramm pro Versuchsplan dargestellt. Diese Darstellungen visualisieren die Messdaten und geben einen ersten Anhaltspunkt dafür, wie sich die Faktoren auf das Qualitätsmerkmal auswirken. Mithilfe der Effektdiagramme kann allerdings keine abschließende Aussage getroffen werden, welche Effekte als statistisch signifikant anzusehen sind. Dieser

Frage und der Ableitung von Regressionsgleichungen widmet sich das nachfolgende Kapitel (9.5.3).

In den Effektdiagrammen (z.B. Abbildung 9.15) ist durch eine gestrichelte Linie der Mittelwert des Qualitätsmerkmals für den gesamten Versuchsplan dargestellt. Für jeden Faktor können in Abhängigkeit der Faktorstufen die Versuchsergebnisse in Gruppen unterteilt werden (hier – und +). Die Durchschnitte dieser Gruppen werden in dem Effektdiagramm durch einen Punkt gekennzeichnet. Die Gruppenmittelwerte der – und der + Gruppe eines Faktors werden durch eine Linie verbunden, wodurch sich eine sogenannte Hantel ergibt. Mithilfe dieser Darstellung kann eine erste Aussage darüber getroffen werden, wie sich die Veränderung eines Faktors auf das Qualitätsmerkmal auswirkt. In diesem Zusammenhang wird die Differenz zwischen dem Gruppenmittelwert und dem Gesamtmittelwert als Effekt¹² definiert. Hierbei sind die Steigung der Hantel und das Vorzeichen des Effekts voneinander abhängig.

Die Streuung der Messwerte innerhalb der Gruppen einer Faktorstufe wird mithilfe von Boxplots dargestellt. Häufig werden bei Boxplots auch sogenannte Ausreißer dargestellt, welche stark von den restlichen Messwerten abweichen. Im Verständnis der statistischen Versuchsplanung gibt es keine Ausreißer. Jedes Messergebnis kann durch die Einflüsse der Faktoren erklärt werden. Aus diesem Grund werden in den Effektdiagrammen Boxplots nach [113, S. 133] verwendet, welche keine Ausreißer gesondert darstellen.

Abbildung 9.15 zeigt das Effektdiagramm mit Boxplots für den Versuchsplan *neu* und das Qualitätsmerkmal Leckage. Bei diesem Versuchsplan ist einer der Faktoren die zwischen den Dichtflächen auftretende Pressung (Faktor: Flächenpressung C_D). Um die Vergleichbarkeit der drei folgenden Effektdiagramme zu gewährleisten, wird für alle die gleiche Skala der Leckagemasse von 0 bis 400 g gewählt.

¹² Wird in der Literatur häufig als Differenz zwischen den Gruppenmittelwerten definiert. Allerdings eignet sich diese Definition nicht mehr für drei oder mehrstufige Faktoren.

Den größten Effekt und somit auch Einfluss auf die Leckagemasse hat der Faktor W/Z-Wert. Darauf folgen die Spaltbreite, das Größtkorn und die Sieblinie. Demgegenüber haben Kornform, Flächenpressung, Förderdruck und Hydratationszeit nur geringen Einfluss auf die Leckage.

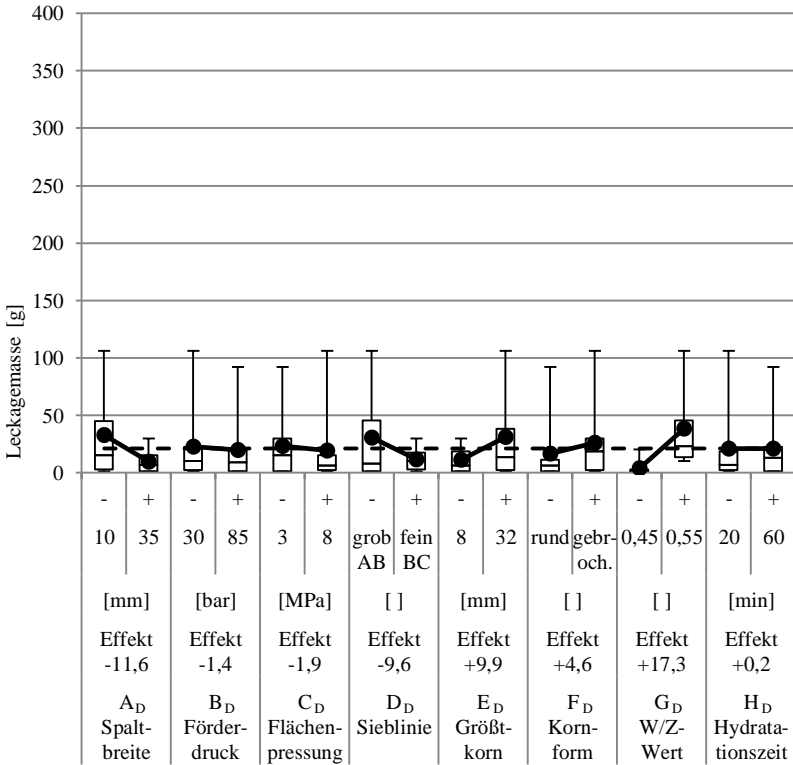


Abbildung 9.15: Versuchsplan *neu*; Effektdiagramm mit Boxplots (Rohdaten aus betreuter Abschlussarbeit [107, 66, 76, 80])

In dem Versuchsplan *verschlissen* ist im Gegensatz zu dem vorherigen ein Spalt zwischen den Dichtflächen. Dessen Höhe ist einer der Faktoren des

Versuchsplans (Faktor: Spalthöhe C_D). Das Effektdiagramm mit Boxplots ist in der Abbildung 9.16 dargestellt.

Es ist festzustellen, dass der Mittelwert der Leckagemasse bei dem Versuchsplan *neu* bei 21,4 g und bei dem Versuchsplan *verschlissen* bei 131,7 g liegt. Den größten Einfluss auf die Leckagemasse hat weiterhin der W/Z-Wert gefolgt von Größtkorn und Spaltbreite. Geringe Einflüsse haben die Faktoren Förderdruck, Spalthöhe, Sieblinie, Kornform und Hydratationszeit.

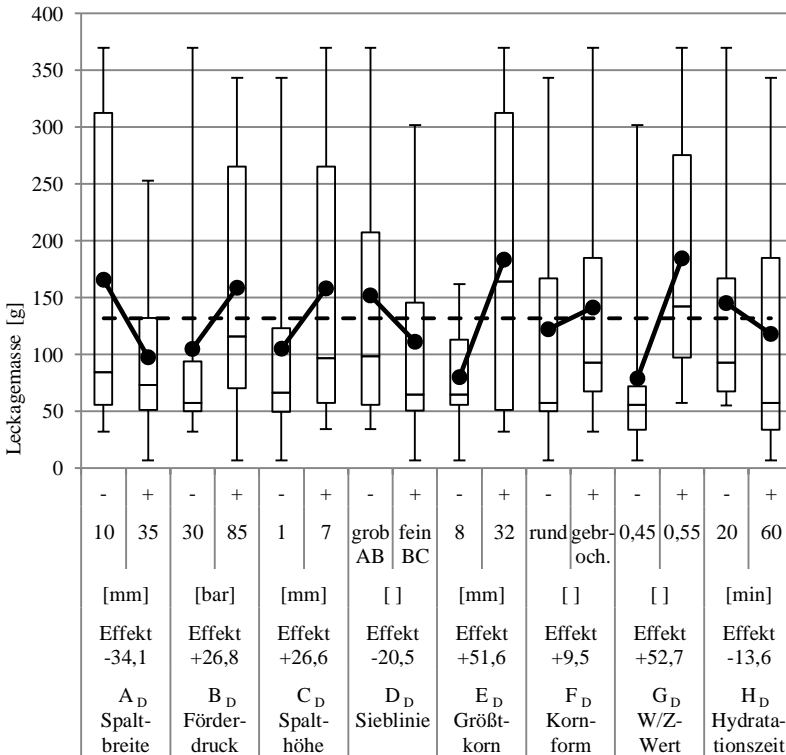


Abbildung 9.16: Versuchsplan *verschlissen*; Effektdiagramm mit Boxplots (Rohdaten aus be-
treuter Abschlussarbeit [107, 66, 76, 80])

Aus den Messungen der zwei vorausgegangenen Versuchsplänen wird der Versuchsplan *kombiniert* zusammengesetzt. Der Faktor C_D lautet bei diesem Versuchsplan Kontakt der Dichtflächen. Seine zwei möglichen Ausprägungen sind zum einen ein Spalt von einem Millimeter Höhe oder zum anderen eine Pressung von acht Megapascal; also keinem Spalt. Für diesen Versuchsplan müssen keine weiteren Versuche durchgeführt werden. Er bildet das vergleichende Bindeglied zwischen den zwei vorausgegangenen Versuchsplänen. Abbildung 9.17 zeigt dessen Effektdiagramm mit Boxplots.

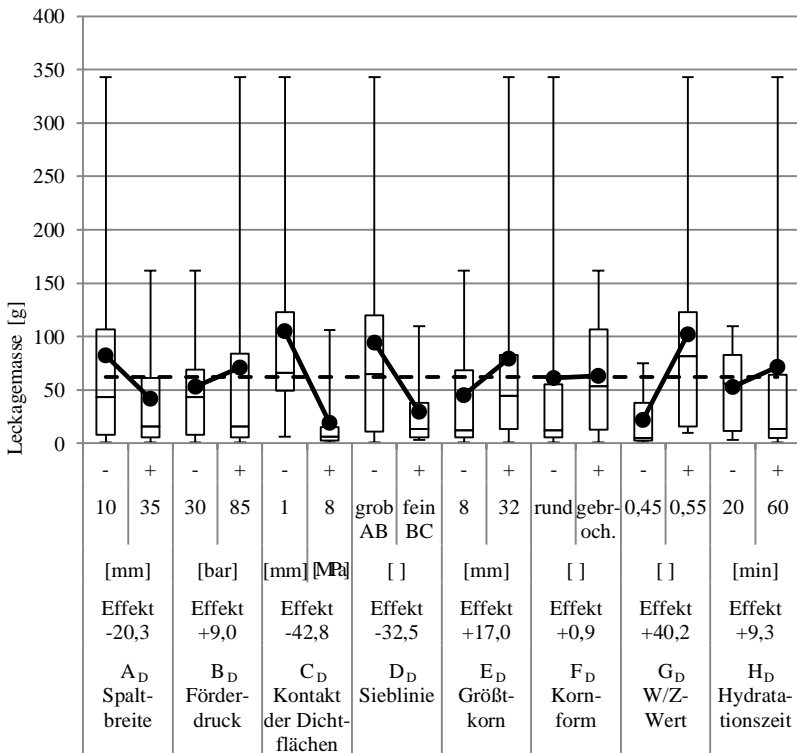


Abbildung 9.17: Versuchsplan *kombiniert*; Effektdiagramm mit Boxplots (Rohdaten aus betreuer Abschlussarbeit [107, 66, 76, 80])

Die größten Einflüsse auf die Leckagemasse haben die Faktoren Kontakt der Dichtfläche, der W/Z-Wert und die Sieblinie. Geringere Effekte haben die Faktoren Spaltbreite, Größtkorn, Hydratationszeit, Förderdruck und Kornform.

9.5.3 Statistische Auswertung und Regression

Mithilfe der folgenden statistischen Auswertung können Aussagen über die Signifikanz der Einflüsse der einzelnen Faktoren auf das Qualitätsmerkmal getroffen werden (analysis of variance; ANOVA). Hierbei wird jeweils die Wahrscheinlichkeit für eine Fehlentscheidung angegeben (α -Fehler). Des Weiteren wird mithilfe von Regressionen ein mathematischer Zusammenhang zwischen einigen Faktoren und dem Qualitätsmerkmal erstellt. Abschließend werden Residuenanalysen durchgeführt, wodurch nachträglich die Richtigkeit der für die statistische Auswertung getroffenen notwendigen Annahmen überprüft wird.

Vorgehen bei ANOVA, Regression und Residuenanalyse

Da für dieses Kapitel das Verständnis einer ANOVA, einer Regression sowie einer Residuenanalyse essenziell ist, werden diese im Folgenden kurz erläutert. Für weiterführende Informationen wird auf [110], [111] und [112] verwiesen.

Zur Erstellung einer ANOVA (z.B. Tabelle 9.6) wird im ersten Schritt die Varianz¹³ der gesamten Messdaten errechnet (Total Summ of Squares; TSS). Diese gesamte Varianz lässt sich pro Faktor jeweils in die Varianz innerhalb der Faktorstufen (Sum of Squares Within Groups; SSW) und zwischen den Faktorstufen (Sum of Squares Between Groups; SSB) unterteilen. Wenn sich ein Boxplot einer Faktorstufe über einen weiten Wertebereich erstreckt, ist somit auch mit einem hohen SSW zu rechnen. Ein großer Effekt führt hingegen zu einem hohen SSB. Das Verhältnis zwischen SSB und TSS eines Faktors oder eines gesamten Regressionsmodells gibt an, wie viel der gesamten Variabilität der Messwerte durch den Faktor bzw. das Regressionsmodell erklärt werden. Dieses Verhältnis wird als *Bestimmtheitsmaß* (auch R-Quadrat; R-Qd)

¹³ Auch als *Rauschen* oder *Streuung* bezeichnet.

bezeichnet. Als Freiheitsgrade¹⁴ (degrees of freedom; DF) wird für Faktoren die Faktorstufenanzahl abzüglich eins und für den Versuchsplan die Anzahl der Messungen abzüglich eins definiert. Durch das Teilen von SSB durch die Anzahl der Freiheitsgrade erhält man die *Mean Squares* eines jeden Faktors, „die man als durchschnittlichen Beitrag pro Freiheitsgrad“ [110, S. 109] auffassen kann. Durch Division der Mean Squares des Faktors durch die des Fehlers (Error) wird „die Stärke des ‚Signals‘ (Faktoreffekts) ins Verhältnis zur Stärke des ‚Rauschens‘ (error = nicht erklärter Teil der Variabilität)“ [110, S. 111] gesetzt. Dieses Verhältnis ist als *F* definiert. Mithilfe der Anzahl der Freiheitsgrade von Faktor und Error sowie des F-Werts des Faktors wird der *p-Wert* ermittelt. Hierzu wird die Annahme getroffen, dass die Residuen normalverteilt und unabhängig sind und somit die F-Verteilung gültig ist. Der *p-Wert* gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass ein solcher oder größerer F-Wert auftritt, obwohl die Messunterschiede nur auf zufälligem Messrauschen beruhen (Entspricht der Wahrscheinlichkeit für den Fehler erster Art). Bei einem hinreichend kleinen *p-Wert* wird die Annahme, dass der F-Wert nur aufgrund von Messrauschen zustande kommt (Entspricht H_0), verworfen und von einem reproduzierbaren Effekt (Entspricht H_1) ausgegangen. [110], [112], [111]

Mithilfe der Ergebnisse des Versuchsplans kann ein mathematisches Modell (Regression) erstellt werden (z.B. Formel (9.1)). Durch diese Regression kann das Qualitätsmerkmal (QM) in Abhängigkeit der Ausprägung (-1 / +1) der Faktoren (A, B) vorhergesagt werden. Die Konstante *c* entspricht dem Mittelwert aller Messungen und die beiden anderen Koeffizienten (k_A , k_B) dem jeweiligen Effekt des Faktors. [110, S. 119]

$$QM_{Regr} = c + k_A * A + k_B * B \quad (9.1)$$

Bei Faktoren, welche drei oder mehr Stufen haben, ist darauf zu achten, dass die Effekte und somit auch die Koeffizienten (k_A , k_B) nicht mehr konstant sind, sondern sich abhängig von der Faktorstufe ändern (z.B. Formel (9.7)). Kennzahlen um die Güte einer Regression zu bewerten sind die Standardabweichung (S), das Bestimmtheitsmaß (R-Qd), das korrigierte Bestimmtheitsmaß

¹⁴ Weiterführende Erläuterungen in [110, S. 108].

(R-Qd(kor)) und das prognostizierte Bestimmtheitsmaß (R-Qd(prog)). Mithilfe des prognostizierten Bestimmtheitsmaßes lässt sich eine Aussage darüber treffen, wie gut die Regression neue Werte des Qualitätsmerkmals prognostiziert [114].

Unter Residuum (ε) wird für eine bestimmte Faktorstufenkombination die Abweichung zwischen dem von der Regression vorhergesagten Wert des Qualitätsmerkmals und dem gemessenen Qualitätsmerkmal verstanden (Formel (9.2)). Hierbei bezeichnet die Laufvariable i die Stufe und j die Messung.

$$QM_{Mess\ i,j} = c + k_A * A_i + \varepsilon_{i,j} \quad (9.2)$$

Durch die Darstellung der Residuen in den sogenannten Residuendiagrammen (z.B. Tabelle 9.7 unten) kann geprüft werden, ob diese unabhängig und normalverteilt sind. Durch diesen Schritt werden die für die Durchführung der ANOVA zu treffenden Annahmen validiert. [110, S. 111-113]

Reduktion der ANOVA und Auswahl einer Regression

Ausgehend von der voll besetzten ANOVA Tabelle wird schrittweise immer der Faktor entfernt, welcher den höchsten p-Wert aufweist. Für jeden der Schritte werden ein Regressionsmodell aus den Hauptfaktoren, sowie den dazugehörigen Kennwerten und ein Residuendiagramm erstellt. Darauf folgend werden die zwei Regressionsmodelle, welche die höchsten Werte für R-Qd(prog) aufweisen, ausgewählt. Von diesen werden weitere Modelle erzeugt, welche neben den Hauptfaktoren noch die zwischen diesen bestehenden Zweifachwechselwirkungen enthalten können (entspricht hierarchischem Regressionsmodell¹⁵). Es wird das Regressionsmodell ausgewählt, welches das höchste R-Qd(prog) aufweist und die Bedingung erfüllt, dass die Residuen normalverteilt und unabhängig sind.

¹⁵ Enthält nur Wechselwirkungen von Hauptfaktoren, welche im Regressionsmodell enthalten sind. [110, S. 117].

9.5.3.1 ANOVA, Regression und Residuenanalyse des Versuchsplans neu

Das im vorausgegangenen Abschnitt beschriebene Vorgehen liefert die in Tabelle 9.6 dargestellte ANOVA, die Regressionsgleichung Formel (9.3), die in Tabelle 9.7 zusammengestellten Regressionskennzahlen und das Residuendiagramm.

Die ausgewählte Regression enthält, wie in der ANOVA-Tabelle dargestellt, den Faktor Spaltbreite, welcher einen p-Wert von 0,043 aufweist (kurz: Spaltbreite_{0,043}). Wenn also davon ausgegangen wird, dass die Spaltbreite einen Einfluss auf die Leckagemasse hat, liegt das Risiko, dass dies in Realität nicht so ist und der F-Wert von mindestens 5,38 nur aufgrund zufälligen Rauschens zustande gekommen ist, bei 4,3 %. Weitere Faktoren des Modells sind die Sieblinie_{0,085}, das Größtkorn_{0,075}, der W/Z-Wert_{0,006} und die Wechselwirkung Spaltbreite*W/Z-Wert_{0,097}.

Tabelle 9.6: ANOVA der ausgewählten Regression für den Versuchsplan neu

ANOVA	Faktor	R-Qd	DF	SSB	MS	F	p
	Spalte	1	2	3	4	5	6
	A _D : Spaltbreite	14,05%	1	2153,0	2153,0	5,38	0,043
	B _D : Förderdruck	0,21%					
	C _D : Flächenpressung	0,39%					
	D _D : Sieblinie	9,55%	1	1463,1	1463,1	3,65	0,085
	E _D : Größtkorn	10,29%	1	1576,1	1576,1	3,94	0,075
	F _D : Kornform	2,20%					
	G _D : W/Z-Wert	31,21%	1	4781,7	4781,7	11,94	0,006
	H _D : Hydratationszeit	0,004%					
	A _{G_D} = B _{C_D} = ...	8,77%	1	1343,2	1343,2	3,36	0,097
	Error		10	4003,5	400,4		
	Total		15	15320,6			
	Error (%-Total)			26,1%			

26,1 % der gesamten Varianz der Messdaten können durch dieses Modell nicht erklärt werden. Diese werden dem Error zugeschrieben. Im Umkehrschluss kann 73,9 % der gesamten Variabilität durch den Einfluss der ausgewählten Faktoren erklärt werden.

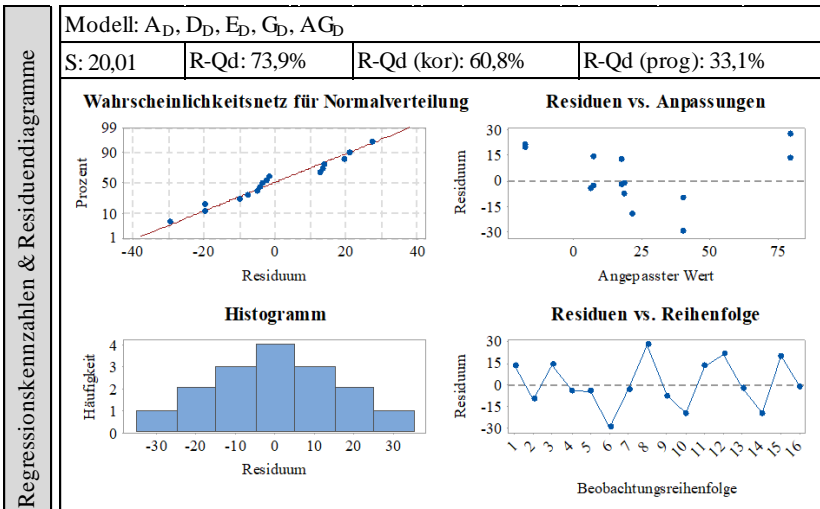
Die Regressionsgleichung lautet:

$$m_{Leck,neu,Regr} = 21,35 - 11,6 * A_D - 9,56 * D_D + 9,92 * E_D + 17,29 * G_D - 9,16 * A_D * G_D \tag{9.3}$$

Die Kodierung der Variablen entspricht der des Versuchsplans (Tabelle 9.3).

Die Regression der Leckagemasse für den Versuchsplan Pressung erreicht ein R-Qd(prog) von 33,1 % (Tabelle 9.7). Die Annahme, dass die Residuen normalverteilt und unabhängig von Beobachtungsreihenfolge und dem von der Regression ausgegebenen Wert des Qualitätsmerkmals (entspricht Anpassung) sind, wird durch das Residuendiagramm validiert.

Tabelle 9.7: Regressionskennzahlen und Residuendiagramm der ausgewählten Regression für den Versuchsplan neu



9.5.3.2 ANOVA, Regression und Residuenanalyse des Versuchsplans verschlissen

In dem Versuchsplan Spalthöhe wird keine Pressung zwischen den Dichtflächen aufgebracht, sondern stattdessen der Spalt zwischen diesen variiert (Faktor C_D). Die ANOVA des ausgewählten Regressionsmodells ist in Tabelle 9.8 dargestellt.

Tabelle 9.8: ANOVA der ausgewählten Regression für den Versuchsplan verschlissen

ANOVA	Faktor	R-Qd	DF	SSB	MS	F	p
	Spalte	1	2	3	4	5	6
A_D : Spaltbreite	8,80%	1	18612	18612	2,74	0,129	
B_D : Förderdruck	5,43%						
C_D : Spalthöhe	5,35%						
D_D : Sieblinie	3,17%						
E_D : Größtkorn	20,16%	1	42611	42611	6,28	0,031	
F_D : Kornform	0,68%						
G_D : W/Z-Wert	21,04%	1	44489	44489	6,56	0,028	
H_D : Hydratationszeit	1,40%						
$A E_D = B F_D = \dots$	14,93%	1	31568	31568	4,65	0,056	
$E G_D = C F_D = \dots$	2,97%	1	6269	6269	0,92	0,359	
Error		10	67853	6785			
Total		15	211403				
Error (%-Total)			32,1%				

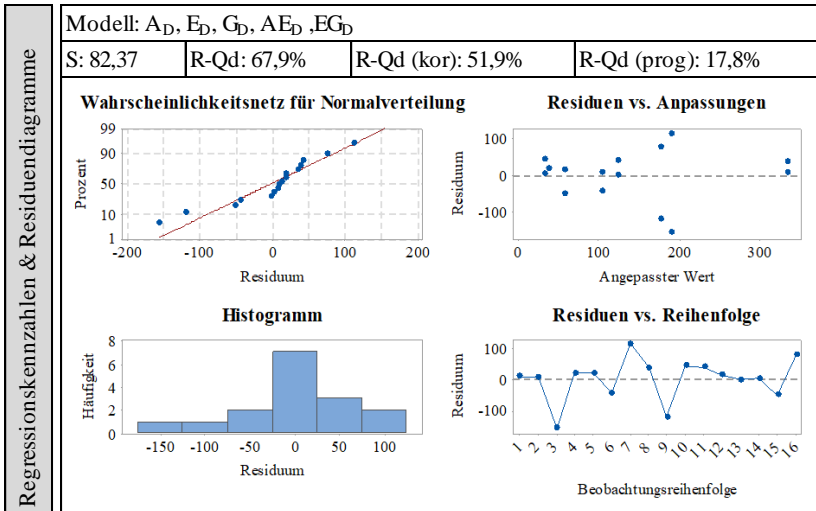
Die Hauptfaktoren des Modells sind Spaltbreite_{0,129}, Größtkorn_{0,031} und W/Z-Wert_{0,028}. Darüber hinaus sind noch folgende zwei Wechselwirkungen Teil der Regression: Spaltbreite*Größtkorn_{0,056} und Größtkorn*W/Z-Wert_{0,359}.

Die Regressionsgleichung ergibt sich somit zu (Formel (9.4)):

$$m_{Leck,verschl,Regr} = 131,7 - 34,1 * A_D + 51,6 * E_D + 52,7 * G_D - 44,4 * A_D * E_D + 19,8 * E_D * G_D \quad (9.4)$$

Die Kennzahlen der Regression (Tabelle 9.9) sind vergleichsweise niedrig. Das Modell eignet sich demzufolge nur eingeschränkt für die Prognose der Leckgemasse neuer Faktorkombinationen.

Tabelle 9.9: Regressionskennzahlen und Residuendiagramm der ausgewählten Regression für den Versuchsplan verschlissen



Normalverteilung und Unabhängigkeit der Residuen, welche zur Erstellung der ANOVA angenommen wurden, sind valide und somit sind die ANOVA und das Regressionsmodell zulässig.

9.5.3.3 ANOVA, Regression und Residuenanalyse des Versuchsplans kombiniert

Der *kombinierte* Versuchsplan ist das Bindeglied der zwei Versuchspläne *neu* und *verschlissen*. Hierfür lautet der Faktor C_D *Kontakt der Dichtflächen*. Tabelle 9.10 zeigt die ANOVA des ausgewählten Regressionsmodells.

Tabelle 9.10: ANOVA der ausgewählten Regression für den Versuchsplan kombiniert

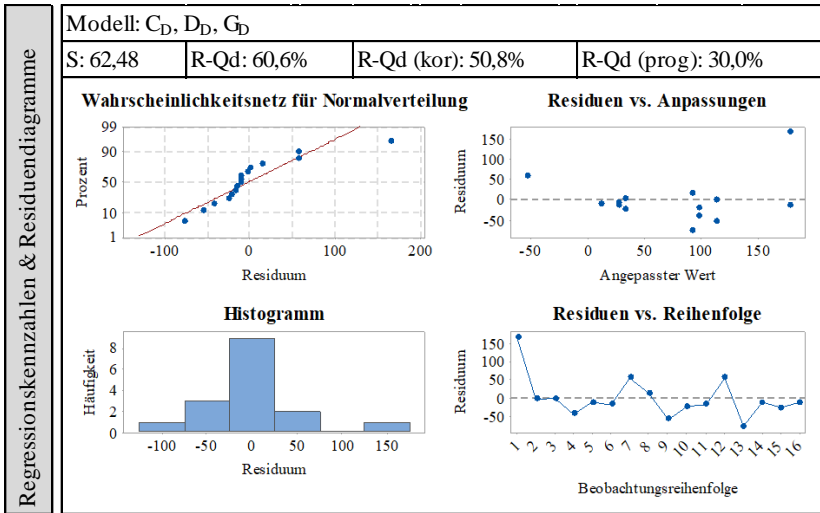
ANOVA	Faktor	R-Qd	DF	SSB	MS	F	p
	Spalte	1	2	3	4	5	6
	A_D : Spaltbreite	5,53%					
	B_D : Förderdruck	1,09%					
	C_D : Kontakt der DF	24,68%	1	29352	29352	7,52	0,018
	D_D : Sieblinie	14,20%	1	16894	16894	4,33	0,060
	E_D : Größtkorn	3,87%					
	F_D : Kornform	0,01%					
	G_D : W/Z-Wert	21,72%	1	25833	25833	6,62	0,024
	H_D : Hydratationszeit	1,16%					
	Error		12	46852	3904		
	Total		15	118930			
	Error (%-Total)			39,4%			

Das Regressionsmodell besteht ausschließlich aus Hauptfaktoren. Diese sind Kontakt der Dichtflächen_{0,018}, Sieblinie_{0,06} und W/Z-Wert_{0,024}. Formel (9.5) zeigt das Regressionsmodell.

$$m_{Leck,kombi, Rger} = 62,3 - 42,8 * C_D - 32,5 * D_D + 40,2 * G_D \quad (9.5)$$

Das prognostizierte Bestimmtheitsmaß (R-Qd(prog)) liegt für die angegebene Regression bei 30% (Tabelle 9.11). Die Residuen liegen nicht direkt auf der Geraden der Abbildung *Wahrscheinlichkeitsnetz für Normalverteilung*, sondern weisen eine leichte Krümmung auf. Nichtsdestotrotz kann von einer Normalverteilung und der Unabhängigkeit der Residuen ausgegangen werden.

Tabelle 9.11: Regressionskennzahlen und Residuendiagramm der ausgewählten Regression für den Versuchsplan kombiniert



9.5.4 Weiterführende Versuche und Beobachtungen

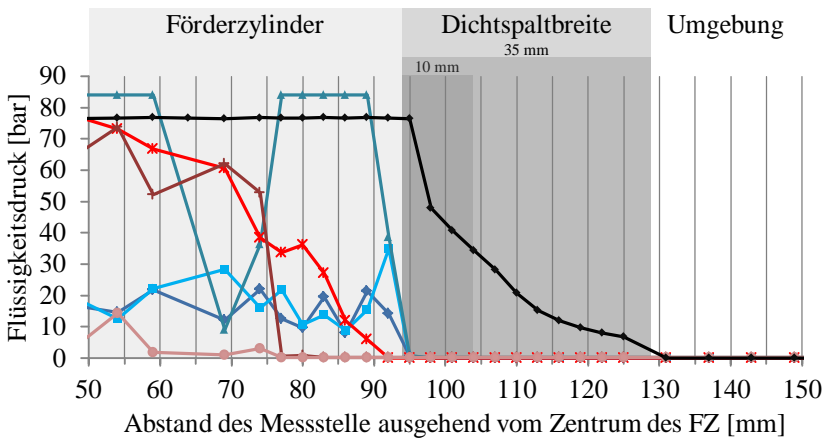
In Versuchsplänen können grundsätzlich nur skalare Größen, wie in diesem Fall die Leckagemasse, untersucht werden. Im Rahmen der Versuche zum Dichten werden allerdings auch weiterführende Untersuchungen und Beobachtungen gemacht. Diese können nicht mithilfe eines Versuchsplans ausgewertet werden, da es sich hierbei nicht um die Optimierung einer skalaren Kenngröße handelt.

Mithilfe des Dichtmoduls (Kapitel 9.4.1, Abbildung 9.13) wird entlang des Dichtspalts der Verlauf des Flüssigkeitsdrucks gemessen. Dieser Druck bewirkt eine den Dichtspalt öffnende Kraft. Des Weiteren wird der Unterschied zwischen Flüssigkeits- und Gesteinsdruck erläutert. Abschließend wird der zeitliche Aufbau des Flüssigkeitsdrucks dargestellt.

Druckverlauf im Dichtspalt

Das Dichtmodul ermöglicht die simultane Messung des Flüssigkeitsdrucks an 34 Messstellen. Radial zum Zentrum des Förderzylinders können drei Messbereiche des Dichtmoduls unterschieden werden. Diese sind: im Förderzylinder, im Dichtspalt und hinter dem Dichtspalt (Umgebung).

Abbildung 9.18 zeigt mit dem Dichtmodul gemessene Verläufe des Flüssigkeitsdrucks aus sieben Versuchen.



	Fördermedium	Dichtspalt		Versuchskennung
		Pressung oder Spalthöhe	Dichtspaltbreite	
	Wasser	Pressung ca. 5 MPa	35 mm	1702_Wassertest
	Frischbeton	Pressung ca. 8 MPa	10 mm	SDFP_FF284_VN13_DN06
	Frischbeton	Pressung ca. 8 MPa	10 mm	SDFP_FF284_VN07_DN05
	Frischbeton	Pressung ca. 8 MPa	35 mm	SDFP_FF284_VN08_DN13
	Frischbeton	Spalthöhe 1 mm	10 mm	SDSH_FF284_VN03_DN01
	Frischbeton	Spalthöhe 7 mm	35 mm	SDSH_FF284_VN16_DN16
	Frischbeton	Spalthöhe 7 mm	35 mm	SDSH_FF284_VN06_DN14

Abbildung 9.18: Verläufe des Flüssigkeitsdrucks über den Dichtspalt (In Erweiterung zu betreuer Abschlussarbeit [107, S. 88-91] und [12, S. 60])

Der Druck des Wassers (schwarze Linie) fällt mit zunehmendem Abstand degressiv ab. Die relative Zunahme der durchströmten Fläche und somit die Abnahme des Strömungswiderstandes ist bei kleineren Radien größer als bei Großen. Aus diesem Grund sinkt der statische Flüssigkeitsdruck bei kleinem Abstand vom Zentrum des Zylinders schneller als bei großem. Dieser Zusammenhang wird bei Gleitringdichtungen vernachlässigt und demzufolge von einem linearen Druckverlauf ausgegangen (Kapitel 2.4.3).

Bei Frischbeton ist hingegen kein langsamer und gleichmäßiger Druckabfall über den Dichtspalt zu erkennen. Bei allen mit Frischbeton durchgeführten Messungen fällt der Flüssigkeitsdruck im Bereich der inneren Kante (bei 94 mm) der Dichtflächen ab. Bereits bei der ersten Messstelle, welche sich in Strömungsrichtung hinter der inneren Kante befindet (bei 95 mm), ist bei allen sechs Versuchen der Flüssigkeitsdruck auf nahezu null bar abgefallen.

In Kapitel 9.2.1 wird aus dem Stand der Forschung im Bereich der Durchströmung von Feststoffschüttungen und der Kuchenfilter ein theoretisches Dichtkuchenmodell für Dickstoff entwickelt (Abbildung 9.4). Bei diesem wird davon ausgegangen, dass sich vor und in dem Dichtspalt erst grobe und dann zunehmend feine Partikel ablagern, den Strömungswiderstand erhöhen und folglich den Leckagestrom vermindern. Mithilfe der Messungen der Drücke im Dichtspalt (Abbildung 9.18) kann diese Annahme eines Dichtkuchens vor dem Dichtspalt validiert werden. Da der Flüssigkeitsdruck im Dichtspalt selbst konstant nahezu null ist, wird die These, dass sich auch in dem Spalt ein Dichtkuchen bildet, verworfen. Der eigentliche Dichtspalt hat demzufolge im Vergleich mit dem Dichtkuchen einen sehr geringen Strömungswiderstand und somit Dichtwirkung.

Des Weiteren fällt auf, dass zwischen den Dichtflächen kein Spalt ist (Abbildung 9.18: Linien in Blautönen), wenn der Flüssigkeitsdruck erst direkt an der Kante abfällt und es einen hohen Druckgradienten gibt. Wenn zwischen den Dichtflächen hingegen ein Spalt ist (Abbildung 9.18: Linien in Rottönen) fällt der Druckgradient deutlich geringer aus und der Flüssigkeitsdruck wird über einen weiteren Bereich vor der inneren Kante der Dichtflächen abgebaut. Auf dieser Basis kann die These formuliert werden, dass ein größerer Spalt zwischen den Dichtflächen zu einem größeren Dichtkuchen führt. Somit fällt in

diesem Fall der Druck über eine weitere Strecke ab (Abbildung 9.18: Linien in Rottönen). Es ist darauf hinzuweisen, dass hierbei eventuell auch Randgängigkeit (Kapitel 2.4.2) eine Rolle spielt, durch welche die Flüssigkeit an der Oberfläche des Dichtmoduls mit geringem Strömungswiderstand abfließen kann. (in Anlehnung an betreute Abschlussarbeit [107, S. 87-88])

Gesteins- und Flüssigkeitsdruck

Frischbeton besitzt eine feste und eine flüssige Phase. Mithilfe des Dichtmoduls kann nur der Druck der Flüssigkeit, welche auf das Fett in dem Messkanal des Dichtmoduls drückt, gemessen werden. Auf die Druckmessdose (Abbildung 9.13), welche eine in den Förderzylinder gerichtete Messfläche besitzt, können hingegen sowohl flüssige als auch feste Bestandteile des Frischbetons drücken.

In einigen Messschrieben¹⁶ fällt auf, dass sich abhängig vom W/Z-Wert des Frischbetons je nach Verwendung entweder eines Druckmoduls oder einer Druckmessdose unterschiedliche Ergebnisse zeigen. Bei einem hohen W/Z-Wert sind die von dem Druckmodul und von der Druckmessdose gemessenen Drücke nahezu identisch. Die mit dem Druckmessmodul gemessenen Werte liegen bei niedrigen W/Z-Werten hingegen deutlich unterhalb der Messwerte der Druckmessdose.

Durch diese Beobachtungen lässt sich schlussfolgern, dass bei unter Druck stehendem Frischbeton, welcher ausreichend Flüssigkeit aufweist, der Druck durch die Flüssigkeit übertragen wird. Die Steine des Frischbetons „schwimmen“ in der Flüssigkeit. Wenn nicht ausreichend viel Flüssigkeit im Frischbeton enthalten ist, wird der Druck durch die festen Bestandteile übertragen. Aus diesem Grund lässt sich Gesteins- und Flüssigkeitsdruck unterscheiden. (ähnlicher Ansatz [15, S. 38])

¹⁶ Messschriebe im Anhang Kapitel A.5

Zeitlicher Aufbau des Flüssigkeitsdrucks

Messschriebe¹⁷ von Versuchen, in welchen die Drücke von Dichtmodul und Druckmessdose über der Zeit dargestellt werden, zeigen, dass der Anstieg des Drucks nach einer Kompression an den verschiedenen Messstellen unterschiedlich schnell gemessen wird. Der mit der Druckmessdose gemessene Druck steigt sehr schnell an. Demgegenüber steigen die mit dem Dichtmodul gemessenen Flüssigkeitsdrücke deutlich langsamer und unterschiedlich an. Es kommt demzufolge zu Strömungserscheinungen innerhalb des Förderzylinders, durch welche erst nach einer gewissen Zeit ein Druckgleichgewicht erreicht wird. Es kann die These aufgestellt werden, dass die Strömungserscheinungen im Zylinder in Strömung im Innern und in direkter Nähe zur Zylinderwand (sogenannte *Randgängigkeit* Kapitel 2.4.2) unterteilt werden kann. Des Weiteren wird der Gesteinsdruck schneller als der Flüssigkeitsdruck aufgebaut. (Vergleich: Kapitel 2.4.2)

9.6 Frischbetonventilfunktion: Dickstoff verdrängen und Fremdkörper abscheren

Im Folgenden werden die Versuchsplanung (Kapitel 9.6.1), die Messergebnisse sowie die Effektdiagramme (Kapitel 9.6.2), die statistische Auswertung und die Regression (Kapitel 9.6.3) beschrieben. Die ermittelten Zusammenhänge werden im nächsten Kapitel (Kapitel 9.7) zusammengefasst und gegeneinander abgewogen.

9.6.1 Versuchsplanung

In Folgenden werden Faktoren sowie deren Faktorstufen, Qualitätsmerkmale und der Versuchsplan vorgestellt.

¹⁷Messschrieb im Anhang Kapitel A.6

Faktoren und Faktorstufen

Wie bereits bei den Versuchen zum Aufbau der Dichtung wird auch bei diesen zwischen *Faktoren der Konstruktion* und *Faktoren des Mediums* unterschieden.

Mithilfe von Vorversuchen wurden die relevanten Faktoren ausgewählt. Des Weiteren wurde mit den Vorversuchen ermittelt, dass gebrochener Kies seltener von den Brechkanten des Prüfstands abrutscht als runder und somit öfter abgeschert wird. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass bei Frischbeton, welcher einen niedrigeren W/Z-Wert hat und somit dickflüssiger ist, seltener sich zwischen den Brechkanten befindliche Steine wegrutschen. Um den für die Versuche des Abscherens ungünstigsten Fall, welcher im Feld auftreten kann, zu untersuchen, wurde somit gebrochenes Material und Frischbeton mit einem niedrigen W/Z-Wert getestet. (betreute Abschlussarbeit [106, S. 46-54])

Die Vorversuche führten zu den in Tabelle 9.12 zusammengefassten Faktoren und Faktorstufen.

Tabelle 9.12: Frischbetonventilfunktion Fremdkörper abscheren; Faktoren der Konstruktion und des Mediums (in Anlehnung an betreute Abschlussarbeit [106, S. 51-54])

Faktoren der Konstruktion					Faktoren des Mediums		
Faktoren	1	2	3	4	Faktoren	-	+
Verfahreneschwindigkeit [m/s]	0,035	0,6	1,2	1,8	Größtkorn [mm]	32	8
Schnittkantenwinkel [°]	0	15	30	45	Scherfestigkeit [-]	weich	hart
	-		+		Sieblinie [-]	Grob AB	Fein BC
Brechspalthöhe [mm]	7		2				

Es werden die drei *Faktoren der Konstruktion* Verfahreneschwindigkeit, Schnittkantenwinkel und Brechspalthöhe unterschieden. Hierbei handelt es sich um in der Konstruktion des Ventils variierebare Faktoren, welche aus diesem Grund von besonderem Interesse sind. Deswegen werden diese teilweise

auf vier Stufen untersucht. Bei der Verfahrensgeschwindigkeit kommen die Abstufungen derart zustande, dass die erste Stufe als quasi statisch angesehen werden kann und die vierte etwas oberhalb der momentan bei der Firma PUTZMEISTER üblichen Verfahrensgeschwindigkeit des Schwenkrohrventils liegt (betreute Abschlussarbeit [106, S. 51]). Die Geschwindigkeitsstufen dazwischen ergeben sich durch die Forderung einer gleichmäßigen Verteilung (betreute Abschlussarbeit [106, S. 51]).

Durch die Faktoren des Mediums werden verschiedene Frischbetonmischungen erzeugt. Wie bereits bei den vorausgegangenen Versuchen ist eine Bedingung für die Mischungen, dass diese pumpbar, also für die Entwicklung eines Frischbetonventils relevant sind. Die Rezepturen der Frischbetone sind im Anhang (Kapitel A.4) zu finden. Bei dem Faktor der Scherfestigkeit wird für Kies oberhalb von 4 mm als weiches Material Kalkstein und als hartes Basalt verwendet. Unterhalb von 4 mm wird die Scherfestigkeit nicht unterschieden. Für Basalt kann eine Scherfestigkeit von 85 – 212,5 MPa und für Kalkstein von 21,25 – 85 MPa angenommen werden. (betreute Abschlussarbeit [106, S. 53])

Qualitätsmerkmale, Versuchsaufbau und -durchführung

Wenn das Abschermodul des Prüfstands für Frischbetonventilfunktionen betrieben wird, werden vier Sensoren verwendet. Zum einen die drei Kraftmessdosen, welche die auf die Brechzähne wirkenden Normalkräfte messen (Abbildung 9.14). Des Weiteren wird mithilfe eines Seilzugs die Position der Hauptplatte (Abbildung 9.12) erfasst. Mithilfe dieser Daten lässt sich pro Kraftmessdose ein Kraft-Weg-Diagramm erstellen. Abbildung 9.19 zeigt ein generisches Kraft-Weg-Diagramm.

Während eines Versuchs wird die Hauptplatte und werden somit die Brechzähne von der Startposition bis in die Endlage verfahren (Abbildung 9.19). Auf diesem Weg schieben die Brechzähne Frischbeton weg, welcher sich in dem Testvolumen befindet. Die hierfür notwendige Kraft ist $F_{\text{ver, KMD}}$. Durch die Integration der Brechkraft über den zurückgelegten Weg ergibt sich die Verschiebeenergie. Dies entspricht der Fläche unterhalb des Kraftverlaufs. Wenn sich die Brechkanten angenähert haben, kann es zu einem Brechen eines Steins

kommen. Auf den Brechzahn wirkt also neben der Kraft zum Verschieben des Frischbetons auch noch die Brechkraft $F_{br, KMD}$.

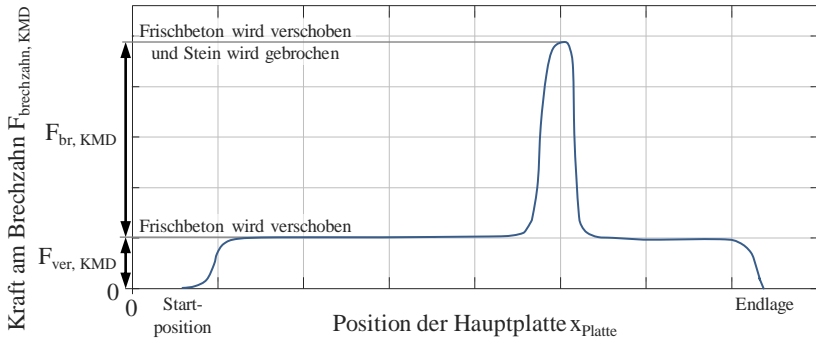


Abbildung 9.19: Generisches Kraft-Weg-Diagramm zur Erläuterung der durch die Kraftmessdose aufgenommenen Verschiebekraft $F_{ver, KMD}$ und Brechkraft $F_{br, KMD}$

Der Winkel, welcher sich zwischen den zwei Schnittkanten ergibt, kann eingestellt werden und stellt den Faktor *Schnittkantenwinkel* dar (Abbildung 9.20). Ein Schnittkantenwinkel größer null führt dazu, dass die Wirklinie der auf den Stein wirkenden, resultierenden Brechkraft nicht im rechten Winkel zu den Brechkanten steht. Da die Brechzähne geführt werden, kann durch die Kraftmessdose nur der normal wirkende Anteil ($F_{br, KMD}$) der resultierenden Brechkraft ($F_{br, res}$) gemessen werden.

Formel (9.6) stellt den Zusammenhang zwischen der unbekanntem Größe $F_{br, res}$ und den bekannten Größen α und $F_{br, KMD}$ dar.

$$F_{br, res} = F_{br, KMD} / \cos(\alpha/2) \quad (9.6)$$

Mithilfe dieser wird die für die Auswertung der Daten relevante Kraft $F_{br, res}$ berechnet.

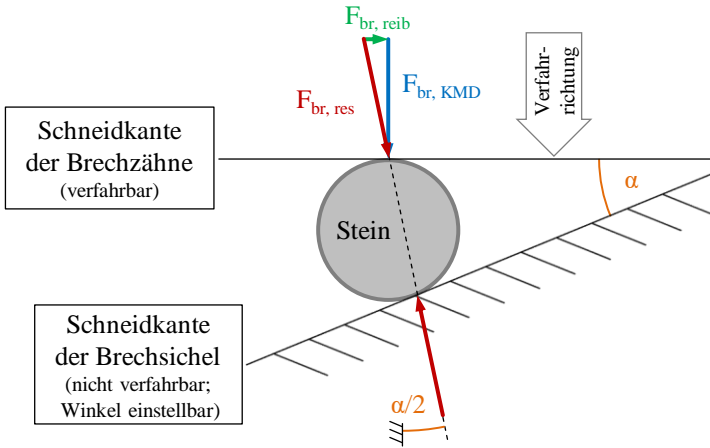


Abbildung 9.20: Kräfte an einem sich zwischen den Schnittkanten befindlichen Stein (korrigierte Fassung von betreuter Abschlussarbeit [106, S. 81])

Es wird allerdings nicht bei jedem Versuchsdurchlauf ein Stein gebrochen. Demzufolge ist es beispielsweise möglich, dass, wie in Abbildung 9.21 dargestellt, nach der Durchführung von sechs Wiederholungsversuchen mit identischer Faktorstufenkombination nur bei zwei Versuchen ein Kraftpeak gemessen, also gebrochen wurde. Wenn der Mittelwert der gemessenen Kräfte aus diesen sechs Kräften berechnet wird, erhält man in dem angeführten Beispiel 5 N. Dies ist nicht repräsentativ.

Resultierende Brechkräfte $F_{br, res}$ [N]						MW
0	0	0	10	0	20	5

QM: Brechwahrscheinlichkeit [-]						MW
0	0	0	1	0	1	2/6

QM: Resultierende Brechkraft ^{WB} [N]						MW
			10		20	30/2

Abbildung 9.21: Vorgehen zum Auftrennen der Messungen in die Qualitätsmerkmale Brechwahrscheinlichkeit und resultierende Brechkraft^{WB}

Die Erklärung für den nicht repräsentativen Mittelwert ist, dass eine Vermischung aus Brechwahrscheinlichkeit und Brechkraft vorliegt. Aus diesem Grund wird die gemessene resultierende Brechkraft wie in Abbildung 9.21 in die zwei Qualitätsmerkmale *Brechwahrscheinlichkeit* und *resultierende Brechkraft^{WB}* aufgeteilt. Somit wurde der Einfluss der Wahrscheinlichkeit auf das Qualitätsmerkmal Brechkraft entfernt (wahrscheinlichkeitsbereinigt).

Der Mittelwert der wahrscheinlichkeitsbereinigten resultierenden Brechkraft (entspricht der resultierenden Brechkraft^{WB}) ergibt sich im Beispiel zu 15 N.¹⁸

Versuchsplan

Mithilfe des Versuchsplans für die Frischbetonventilfunktionen *Dickstoff verdrängen* und *Fremdkörper abscheren* sollen zwei Faktoren auf jeweils vier Stufen und vier weitere Faktoren auf jeweils zwei Stufen untersucht werden (Tabelle 9.12). Die Qualitätsmerkmale sind Verschiebeenergie, Brechwahrscheinlichkeit und Brechkraft. Hierbei gibt es im Gegensatz zu den Versuchsplänen der Frischbetonventilfunktion Dichtung aufbauen keine kollidierende Faktorenkombination. Somit kann die komplette Untersuchung mithilfe eines einzigen Versuchsplans durchgeführt werden.

Als Basis des Versuchsplans dient ein $L_{16}(2^{15})$ Taguchi-Versuchsplan nach KLEIN [115, S. 291]. Mithilfe der Methode zur Zusammenfassung von Spalten¹⁹ wird aus jeweils drei Spalten eine Spalte mit einem vierstufigen Faktor entwickelt. Durch einen Foldover [112, S. 353] wird die Auflösung des Plans erhöht, sodass die Hauptfaktoren nur noch mit Dreifachwechselwirkungen und die Zweifachwechselwirkungen untereinander vermischt sind. Es ergibt sich ein Versuchsplan mit der Bezeichnung $L_{32}(4^2 \times 2^9)$. Da fünf der zweistufigen Spalten nicht belegt werden, kann mithilfe dieser der Einfluss der

¹⁸ Vorgehen in wissenschaftlichem Gespräch des Verfassers mit Herrn Khesrau Arief und Herrn Tobias Huth im Oktober 2017 entwickelt

¹⁹ Die Kombination von zwei zweistufigen Faktoren kodiert einen vierstufigen Faktor. Nachdem der vierstufige Faktor erzeugt wurde, müssen die Ausgangsfaktoren sowie deren Wechselwirkung aus dem Versuchsplan herausgenommen werden. [115, S. 291].

Wechselwirkungen abgeschätzt werden. Nach der teilweisen²⁰ Randomisierung ergibt sich $L_{32}(4^2 \times 2^9)$ Versuchsplan nach Tabelle 9.13. (betreute Abschlussarbeit [106, S. 40, 54-56])

Da nicht bei jedem Versuch ein Stein gebrochen wird, werden, um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten, pro Faktorstufenkombination mehrere Messungen benötigt. Da der Prüfstand über drei getrennte Brechzähne verfügt, können drei Messungen gleichzeitig durchgeführt werden. Nach dem ersten Durchlauf wird der Förderkolben abgesenkt und der sich ergebende Raum mit Material aus der gleichen Mischung aufgefüllt. Daraufhin wird ein weiterer Durchlauf durchgeführt. Dadurch, dass zwei Durchläufe mit jeweils drei Messungen durchgeführt werden, werden insgesamt sechs Wiederholungsmessungen²¹ pro Faktorstufenkombination erzeugt.

²⁰ Ein nacheinander folgendes Einstellen der Geschwindigkeiten 1 und 4 sowie 2 und 3 ist aus technischen Gründen einfacher zu gewährleisten, als wenn diese vollständig randomisiert wären. Aus diesem Grund ist der Versuchsplan nur abschnittsweise randomisiert, was bei der Residuenanalyse beachtet werden muss. Es handelt sich weder um einen Split-Plot [112, S. 621] noch um Blockbildung [110, S. 90].

²¹ Die sechs Messungen einer Faktorstufenkombination werden mit dem Frischbeton einer Mischung durchgeführt. Somit handelt es sich nicht um eine Replikation. Auf der anderen Seite werden drei getrennte Sensoren eingesetzt, wodurch Unterschiede von Sensor zu Sensor und Positionsunterschiede auftreten. Des Weiteren werden die ersten drei und die zweiten drei Messungen nicht zeitgleich, sondern in zwei Durchläufen erzeugt. Aus diesen Gründen handelt es sich nicht um klassische Wiederholungsmessungen im Sinne der Versuchsplanung. (weiterführende Informationen: [116])

Um den Einfluss zu identifizieren, welchen die unterschiedlichen Sensoren und die zwei getrennten Durchläufe auf die Messdaten haben, werden zwei Faktoren eingeführt und entsprechend kodiert. In einem Vorgriff werden die statistischen Kenngrößen dieser Faktoren aus den noch zu erläuternden Messdaten berechnet. Die eingeführten Faktoren weisen p-Werte von 0,649 und 0,957 auf. Da der Einfluss dieser Effekte entsprechend gering bzw. nicht signifikant ist, werden die sechs Messungen einer Faktorenkombination im Folgenden als Wiederholungsmessungen im Sinne der Versuchsplanung angesehen.

Tabelle 9.13: Versuchsplan zur Untersuchung der Frischbetonventilfunktionen Dickstoff verdrängen und Fremdkörper abscheren (in Anlehnung an betreute Abschlussarbeit [106, S. 57-58])

		Faktoren										
		A _B	B _B	C _B	D _B	E _B	F _B	G _B	H _B	I _B	J _B	K _B
Durchlaufn.	Kombinationsn.	Schnittantenw.	Verfahreneschw.	Brechspalthöhe	Größtkorn	Scherfestigkeit	Sieblinie	unbelegt	unbelegt	unbelegt	unbelegt	unbelegt
1	29	1	4	+	-	+	-	+	-	+	+	-
2	21	3	4	-	+	-	+	+	+	-	+	+
3	9	3	1	-	-	-	-	+	-	-	+	-
4	24	3	1	+	-	+	-	-	-	-	+	+
5	4	1	4	-	-	-	-	-	-	+	+	+
6	13	4	1	-	+	-	+	-	+	-	-	+
7	20	4	1	+	+	+	+	+	+	-	-	-
8	32	1	1	-	+	-	+	-	+	+	+	-
9	8	2	4	-	+	-	+	+	+	+	-	-
10	1	1	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+
11	25	2	4	+	+	+	+	-	+	+	-	+
12	12	3	4	+	+	+	+	-	+	-	+	-
13	17	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	16	4	4	+	-	+	-	+	-	-	-	+
15	28	2	1	-	-	-	-	+	-	+	-	+
16	5	2	1	+	-	+	-	-	-	+	-	-
17	11	3	3	+	+	-	-	+	-	+	-	+
18	14	4	2	-	+	+	-	+	-	+	+	-
19	27	2	2	-	-	+	+	-	+	-	+	-
20	18	4	3	-	-	+	+	+	+	+	+	+
21	2	1	2	+	+	-	-	-	-	-	-	-
22	26	2	3	+	+	-	-	+	-	-	+	-
23	6	2	2	+	-	-	+	+	+	-	+	+
24	23	3	2	+	-	-	+	+	+	+	-	-
25	19	4	2	+	+	-	-	-	-	+	+	+
26	30	1	3	+	-	-	+	-	+	-	-	+
27	22	3	3	-	+	+	-	-	-	+	-	-
28	15	4	3	+	-	-	+	-	+	+	+	-
29	10	3	2	-	-	+	+	-	+	+	-	+
30	31	1	2	-	+	+	-	+	-	-	-	+
31	3	1	3	-	-	+	+	+	+	-	-	-
32	7	2	3	-	+	+	-	-	-	-	+	+

Bei dem Qualitätsmerkmal Verschiebeenergie kann bei jeder Messung eine eindeutige Energie gemessen werden. Somit können die sechs Wiederholungsmessungen als solche in der statistischen Auswertung berücksichtigt werden. Bei den Qualitätsmerkmalen Brechwahrscheinlichkeit und Brechkraft ist dies nicht möglich. Die Einzelversuche liefern für die Brechwahrscheinlichkeit ausschließlich die Zahlen eins und null. Diese ausschließlich binäre Ausprägung des Qualitätsmerkmals führt beispielsweise bei der Residuenanalyse (speziell *Residuen vs Anpassung*) zu Problemen. Aus diesem Grund wird aus den sechs Einzelmessungen einer Faktorstufenkombination eine durchschnittliche Brechwahrscheinlichkeit berechnet (Abbildung 9.21), die Grundlage der statistischen Auswertung liefert. Bei dem Qualitätsmerkmal Brechkraft gibt es, da nicht bei jedem Versuchsdurchlauf ein Stein gebrochen wird, unterschiedlich viele Messwerte. Aus diesem Grund wird bei diesem Qualitätsmerkmal wie erläutert (Abbildung 9.21) der wahrscheinlichkeitsbereinigte Durchschnitt berechnet.

9.6.2 Messergebnisse und Effektdiagramme

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der Qualitätsmerkmale Verschiebeenergie, Brechkraft und Brechwahrscheinlichkeit in drei Effektdiagrammen (Abbildung 9.22) dargestellt.

Die Verschiebeenergie ist die Energie, welche dem Material zugeführt wird, um einen Brechzahn 150 mm durch den Frischbeton zu schieben. Hierbei tritt kein Brechen von Zuschlagstoffen auf, da die Brechzähne noch zu weit voneinander entfernt sind.

Den größten Effekt und somit auch Einfluss auf die Verschiebeenergie hat der Faktor Verfahrensgeschwindigkeit. Darauf folgen das Größtkorn, die Sieblinie und die Brechspalthöhe. Der Effekt des Faktors Schnittkantenwinkel weist ein Minimum auf. Den mit Abstand geringsten Effekt hat der Faktor Scherfestigkeit.

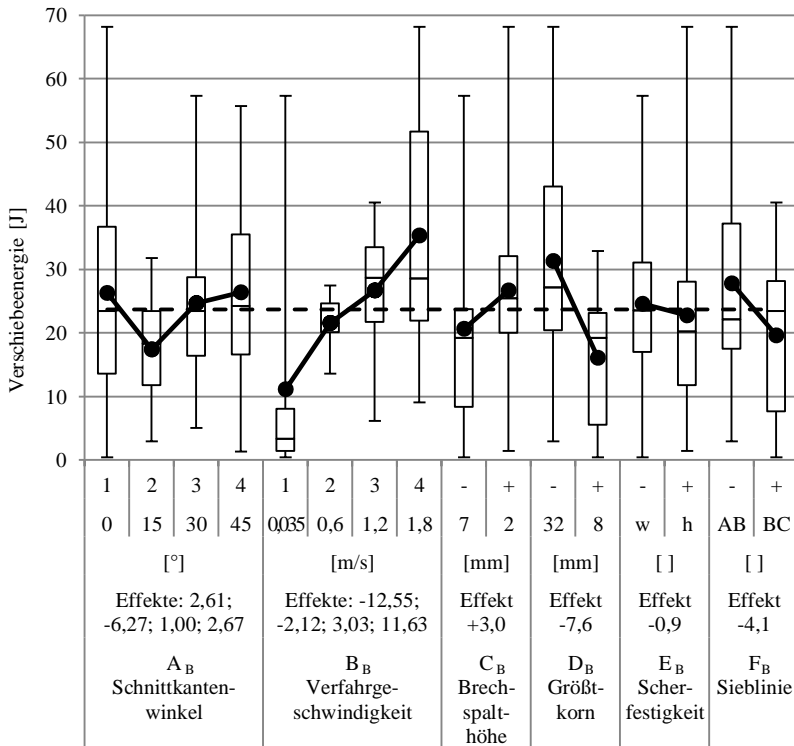


Abbildung 9.22: Qualitätsmerkmal Verschiebeenergie; Effektendiagramm mit Boxplots (Rohdaten aus betreuter Abschlussarbeit [106, S. 63, 74, 82, 90])

Ausgewählte Perzentile der Verschiebeenergie sind in Tabelle 9.14 zu sehen. 90 % der gemessenen Verschiebeenergien lagen unterhalb von 53,69 J und 99 % unterhalb von 95,76 J

Tabelle 9.14: Perzentile des Qualitätsmerkmals Verschiebeenergie

Perzentile	99%	95%	90%	75%	50%	25%
Verschiebeenergie E_{Versch} [J]	93,44	59,55	53,18	31,02	21,59	9,74

Bei dem Qualitätsmerkmal resultierende Brechkraft^{WB} wird wie erläutert jeweils der Durchschnitt aus mehreren Wiederholungsmessungen berechnet, bei welchen gebrochen wird. Das Effektdiagramm mit Boxplots ist in der folgenden Abbildung dargestellt (Abbildung 9.23).

Den größten Einfluss auf die resultierende Brechkraft^{WB} hat das Größtkorn gefolgt von Schnittkantenwinkel und Sieblinie. Faktoren mit geringeren Einflüssen sind Verfahrensgeschwindigkeit, Brechspalthöhe und Scherfestigkeit.

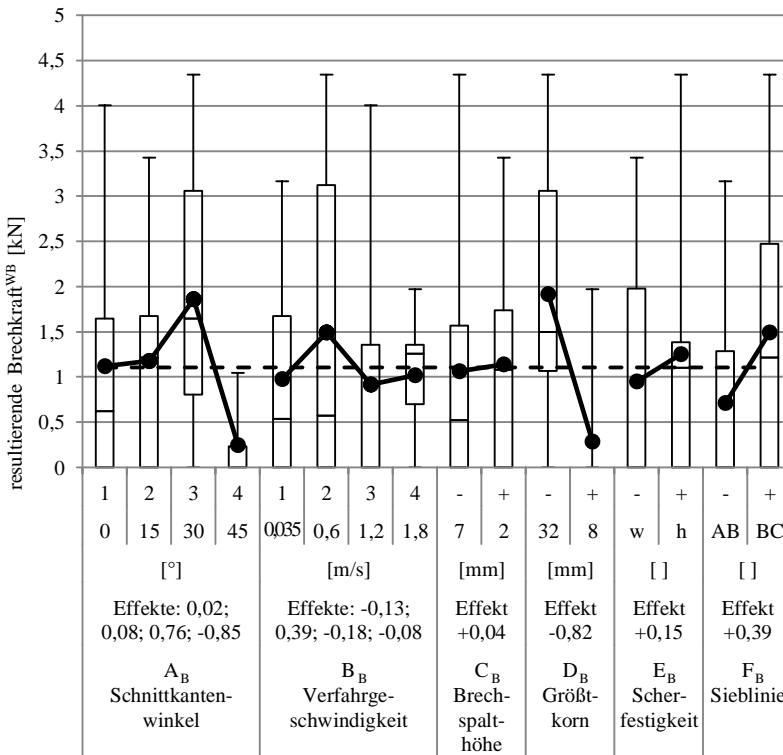


Abbildung 9.23: Qualitätsmerkmal resultierende Brechkraft^{WB}; Effektdiagramm mit Boxplots (Rohdaten aus betreuter Abschlussarbeit [106, S. 63, 74, 82, 90])

Tabelle 9.15 zeigt einige Perzentile der resultierenden Brechkraft^{WB}. 90 % der resultierenden Brechkraft^{WB} liegen unterhalb von 4,09 kN und 99 % unterhalb von 7,99 kN.

Tabelle 9.15: Perzentile des Qualitätsmerkmals resultierende Brechkraft^{WB}

Perzentile	99%	95%	90%	75%	50%	25%
resultierende Brechkraft ^{WB} $F_{br, res}^{WB}$ [kN]	7,99	7,57	4,09	2,17	1,34	1,18

Bei dem Versuchsplan zur Untersuchung der Frischbetonventilfunktionen *Dickstoff verdrängen* und *Fremdkörper abscheren* verfügt der Faktor Schnittkantenwinkel über vier Faktorstufen. Das Effektdiagramm mit Boxplots für das Qualitätsmerkmal Brechwahrscheinlichkeit mit vierstufigem Faktor Schnittkantenwinkel befindet sich im Anhang A.7. Es gab insgesamt 37 von 192 Versuchen bei welchen ein Brechen gemessen werden konnte. Daraus folgt, dass bei dem vierstufigen Faktor mithilfe der Messungen keine statistisch belastbare Aussage bezüglich des Brechwahrscheinlichkeitsverlaufs über die vier Stufen hinweg getroffen werden kann. Dies kann weiter dadurch erklärt werden, dass der Effekt für einen vierstufigen Faktor zu gering, die Streuung zu hoch oder der Versuchsumfang zu gering ist. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle der Versuchsplan für das Qualitätsmerkmal Brechwahrscheinlichkeit derart von 32 auf 16 Faktorstufenkombinationen reduziert, dass der Faktor Schnittkantenwinkel nur noch die zwei voneinander am weitesten entfernten Stufen (0°, 45°) enthält. Durch diese Maßnahme wird zwar die mögliche Aussage verringert aber die Aussagekraft bzw. deren Signifikanz erhöht. Abbildung 9.24 zeigt das dazugehörige Effektdiagramm mit Boxplots.

Die Faktoren Größtkorn, Brechspalthöhe, Schnittkantenwinkel und Scherfestigkeit weisen große Effekte auf. Der Effekt der Sieblinie ist hingegen gering. Bei den niedrigen zwei Geschwindigkeiten der Verfahrensgeschwindigkeit wurden keine Steine gebrochen, sodass die Brechwahrscheinlichkeit für diese 0 % beträgt. Allerdings liegt die Brechwahrscheinlichkeit für diese Faktorstufen in dem vollständigen Versuchsplan (32 FSK; Effektdiagramm Anhang Kapitel A.7) für v_1 bei 27 % und für v_2 bei 15 %. Dies macht deutlich, dass sich die Reduktion des Versuchsplans auf dessen Belastbarkeit auswirkt.

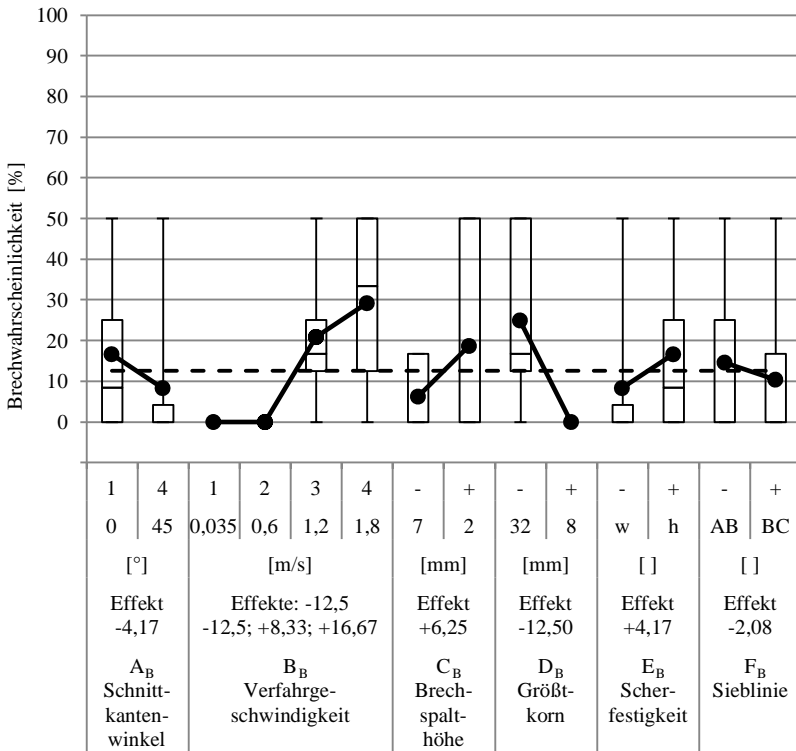


Abbildung 9.24: Qualitätsmerkmal Brechwahrscheinlichkeit; Effektdiagramm mit Boxplots; vier-stufiger Faktor Brechwahrscheinlichkeit (0°, 45°) (Rohdaten aus betreuter Abschlussarbeit [106, S. 63, 74, 82, 90])

Insgesamt werden in den 192 durchgeführten Versuchen mit teilweise unterschiedlichen Faktorstufenkombinationen in 19,3 % der Fälle ein oder mehrere Steine gebrochen.

9.6.3 Statistische Auswertung und Regression

Im Folgenden werden die Messdaten statistisch analysiert. Hierbei wird weitestgehend wie bei den Messdaten der Frischbetonventilfunktion *Dichtwirkung*

aufbauen vorgegangen. Erst wird eine ANOVA durchgeführt und eine Regression erstellt, um abschließend das Vorgehen mithilfe einer Residuenanalyse zu überprüfen.

9.6.3.1 ANOVA, Regression und Residuenanalyse des Qualitätmerkmals Verschiebeenergie

Die ausgewählte Regression enthält, wie in der ANOVA-Tabelle (Tabelle 9.16) dargestellt, vier Hauptfaktoren und eine Wechselwirkung.

Tabelle 9.16: ANOVA des Qualitätmerkmals Verschiebeenergie

ANOVA	Faktor	R-Qd	DF	SSB	MS	F	p
	Spalte	1	2	3	4	5	6
	A _B : Schnittkantenwinkel	4,84%					
	B _B : Verfahrgeschw.	27,32%	3	2450,4	816,8	5,73	0,005
	C _B : Brechspalthöhe	3,28%	1	294,3	294,3	2,06	0,165
	D _B : Größtkorn	20,59%	1	1846,2	1846,2	12,95	0,002
	E _B : Scherfestigkeit	0,30%					
	F _B : Sieblinie	5,92%	1	530,5	530,5	3,72	0,067
	BC _B = ...	7,91%	3	709,6	236,5	1,66	0,205
	Error		22	3136,7	142,6		
	Total		31	8967,6			
	Error (%-Total)			35,0%			

Der Faktor, welcher den größten Prozentsatz der gesamten Variabilität der Messwerte erklären kann, ist die Verfahrgeschwindigkeit_{0,005} (R-Qd = 27,32 %). Weitere Faktoren des Modells sind die Brechspalthöhe_{0,165}, das Größtkorn_{0,002}, die Sieblinie_{0,067} und die Wechselwirkung Verfahrgeschwindigkeit*Brechspalthöhe_{0,205}. Durch das Regressionsmodell können 35 % der Gesamtvariabilität der Messdaten nicht erklärt werden und sind dem Error zuzuschreiben. Die Regressionsgleichung des Qualitätmerkmals Verschiebeenergie ist in Formel (9.7) dargestellt. Die Kodierung der Variablen entspricht der des Versuchsplans (Tabelle 9.12).

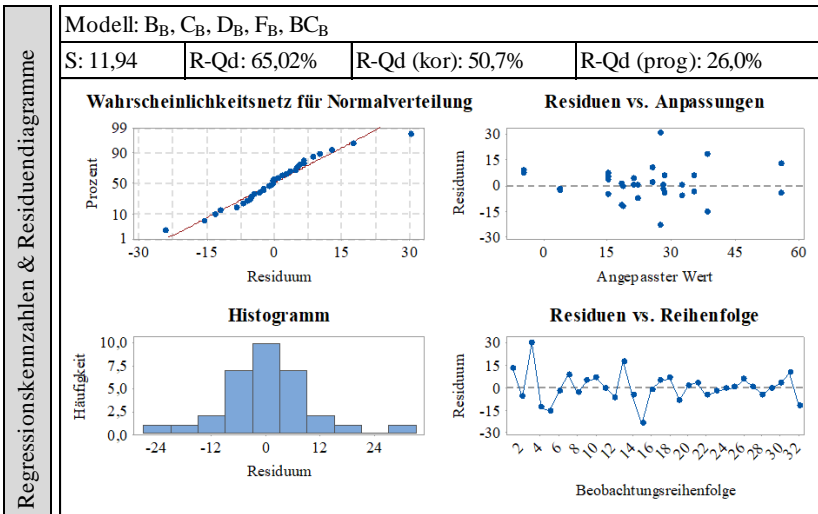
$$E_{Versch, Regr} = 23,69 + 3,03 * C_B - 7,6 * D_B - 4,07 * F_B$$

$$+ [B_B: v_1 \rightarrow -12,54; v_2 \rightarrow -2,12; v_3 \rightarrow 3,03; v_4 \rightarrow 11,63] \quad (9.7)$$

$$+ C_B * [B_B: v_1 \hat{=} -7,38; v_2 \hat{=} -0,05; v_3 \hat{=} 1,89; v_4 \hat{=} 5,54]$$

Durch die Regression der Verschiebeenergie wird ein R-Qd(prog) von 26 % erreicht (Tabelle 9.17). Des Weiteren wurde bei der Erstellung der ANOVA und des Regressionsmodells die Annahme getroffen, dass die Residuen normalverteilt, unabhängig sowohl von der Beobachtungsreihenfolge als auch dem von der Regression ausgegebenen Wert des Qualitätsmerkmals (auch Anpassung genannt) sind.

Tabelle 9.17: Regressionskennzahlen und Residuendiagramm der ausgewählten Regression für das Qualitätsmerkmal Verschiebeenergie



Die Residuendiagramme (Tabelle 9.17) validieren diese Annahme.

9.6.3.2 ANOVA, Regression und Residuenanalyse des Qualitätsmerkmals resultierende Brechkraft^{WB}

Bei dem Qualitätsmerkmal resultierende Brechkraft^{WB} handelt es sich um den Mittelwert der wahrscheinlichkeitsbereinigten, umgerechneten Brechkräfte ($F_{br, res}^{WB}$; Kapitel 9.6.1). Diese treten auf, wenn ein Stein abgeschoren wird. Die ANOVA des ausgewählten Regressionsmodells ist in Tabelle 9.18 dargestellt.

Tabelle 9.18: ANOVA des Qualitätsmerkmals resultierende Brechkraft^{WB}

ANOVA	Faktor	R-Qd	DF	SSB	MS	F	p
	Spalte	1	2	3	4	5	6
	A _B : Schnittkantenw.	19,50%	3	10,51	3,50	5,18	0,006
	B _B : Verfahrgeschwindigkeit	3,10%					
	C _B : Brechspalthöhe	0,08%					
	D _B : Größtkorn	39,51%	1	21,30	21,30	31,47	7,8E-06
	E _B : Scherfestigkeit	1,35%					
	F _B : Sieblinie	8,98%	1	4,84	4,84	7,15	0,013
	DF _B = ...	0,63%	1	0,34	0,34	0,50	0,486
	Error		25	16,92	0,68		
	Total		31	53,91143			
	Error (%-Total)			31,4%			

Schnittkantenwinkel_{0,006}, Größtkorn_{0,000*006} und Sieblinie sind die Hauptfaktoren des Modells. Darüber hinaus enthält dieses noch die Wechselwirkung Größtkorn*Sieblinie_{0,486}.

Die Regressionsgleichung ergibt sich zu:

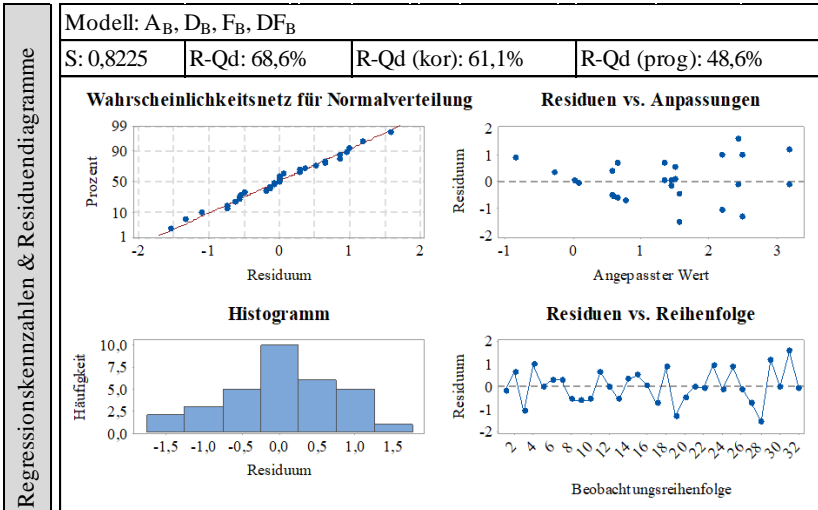
$$F_{Bre, Res, Regr}^{WB} = 1,102 - 0,816 * D_B + 0,389 * F_B - 0,103 * D_B * F_B \quad (9.8)$$

$$+ [A_B: W_1 \rightarrow 0,018; W_2 \rightarrow 0,076; W_3 \rightarrow 0,76; W_4 \rightarrow -0,855]$$

Das prognostizierte Bestimmtheitsmaß (R-Qd(prog)) der Regression ist 48,6 %. Die Normalverteilung und die Unabhängigkeit der Residuen, welche

zur Erstellung der ANOVA angenommen wurden, können durch die Residuumdiagramme (Tabelle 9.19) bestätigt werden. Somit sind die ANOVA und das Regressionsmodell zulässig.

Tabelle 9.19: Regressionskennzahlen und Residuumdiagramm der ausgewählten Regression für das Qualitätsmerkmal resultierende Brechkraft^{WB}



9.6.3.3 ANOVA, Regression und Residuenanalyse des Qualitätsmerkmals Brechwahrscheinlichkeit

Zur Analyse der Brechwahrscheinlichkeit wird der Schnittkantenwinkel wie erläutert von einem vierstufigen zu einem zweistufigen Faktor reduziert. Hierdurch kann ein großer Sprung in den Faktoren erreicht werden. Allerdings führt dieses Vorgehen auch zu einer Reduktion der Datenbasis und somit der Aussagekraft.

Tabelle 9.20 zeigt die ANOVA des ausgewählten Regressionsmodells.

Tabelle 9.20: ANOVA des Qualitätsmerkmals Brechwahrscheinlichkeit (0°, 45°)

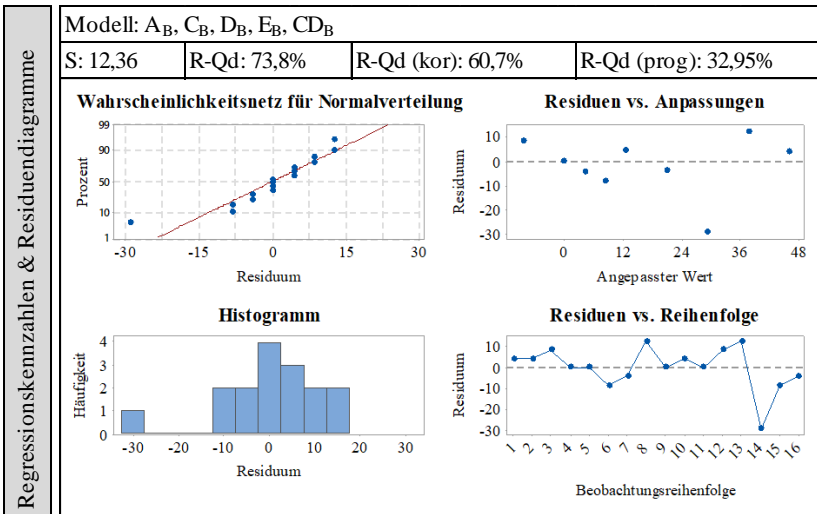
ANOVA	Faktor	R-Qd	DF	SSB	MS	F	p
	Spalte	1	2	3	4	5	6
	A _B : Schnittkantenw.	4,76%	1	277,8	277,8	1,82	0,207
	C _B : Brechspalthöhe	10,71%	1	625,0	625,0	4,09	0,071
	D _B : Größtkorn	42,86%	1	2500,0	2500,0	16,36	0,002
	E _B : Scherfestigkeit	4,76%	1	277,8	277,8	1,82	0,207
	CD _B = ...	10,71%	1	624,9	624,9	4,09	0,071
	Error		10	1527,9	152,8		
	Total		15	5833,33			
	Error (%-Total)			26,2%			

Das Regressionsmodell besteht aus vier Hauptfaktoren und einer Zweifachwechselwirkung zwischen diesen. Die Faktoren sind Schnittkantenwinkel_{0,207}, Brechspalthöhe_{0,071}, Größtkorn_{0,002}, Scherfestigkeit_{0,207} und Brechspalthöhe*Größtkorn_{0,071}. Formel (9.9) ist das Regressionsmodell.

$$P_{Bre, Wahrsch, Regr} = +12,5 + [A_B: W_1 \rightarrow +4,17; W_4 \rightarrow -4,17] + 6,25 * C_B - 12,5 * D_B - 6,25 * C_B * D_B \quad (9.9)$$

Das prognostizierte Bestimmtheitsmaß (R-Qd(prog)) liegt für die angegebene Regression bei 32,95% (Tabelle 9.21). Das Histogramm in Tabelle 9.21 zeigt, wie für eine Normalverteilung zu erwarten, eine Häufung der Residuen bei null. Allerdings ist zu erkennen, dass es ein Residuum von -30 gibt, welches nicht in die Normalverteilung passt. Dieser Messpunkt ist auch in den anderen Diagrammen zu finden. Aufgrund des geringen Umfangs des reduzierten Plans fallen derartige Messpunkte stark ins Gewicht und sorgen für eine Verzerrung der Residuendiagramme. Dies berücksichtigend kann von einer Normalverteilung und der Unabhängigkeit der Residuen ausgegangen werden.

Tabelle 9.21: Regressionskennzahlen und Residuendiagramm der ausgewählten Regression für das Qualitätsmerkmal Brechwahrscheinlichkeit (0°, 45°)



9.7 Das funktionsgerechte Dickstoffventil

Mithilfe des Prüfstands für Frischbetonfunktionen wurden Messungen zu statistischen Versuchsplänen durchgeführt und ausgewertet. Die Auswertung liefert kausale Zusammenhänge zwischen den variierten Faktoren und den gemessenen Qualitätsmerkmalen. Das sich hieraus ergebende Optimierungsproblem wird in Kapitel 9.7.1 diskutiert. Abschließend werden hieraus die Leitregeln zur Konstruktion eines Dickstoffventils formuliert (Kapitel 9.7.2).

9.7.1 Optimierungsproblem der Frischbetonventilfunktionen

In diesem Kapitel werden die ermittelten Kausalitäten der Frischbetonventilfunktionen analysiert und zusammengefasst (Tabelle 9.22, Tabelle 9.23). Aus der Vielzahl an Zusammenhängen ergibt sich ein Optimierungsproblem mit teilweise konträren Anforderungen an die Konstruktion eines derartigen Ventils. Dieses gesamte Optimierungsproblem wird in die drei Teile *Optimierungsproblem der Frischbetonventilfunktion Dichtung aufbauen* sowie *Optimierungsproblem der Frischbetonventilfunktion Dichtstoff verdrängen und Fremdkörper abscheren* und *Optimierungsproblem der übergreifenden Faktoren* unterteilt.

Optimierungsproblem der Frischbetonventilfunktion Dichtung aufbauen

Tabelle 9.22 liefert eine Übersicht der für die drei Versuchspläne der Ventilfunktion *Dichtung aufbauen* relevanten Regressionsparameter sowie deren Wahrscheinlichkeit. Für den Versuchsplan verschlissen sind die Faktoren Größtkorn, Dichtspaltbreite sowie W/Z-Wert Teil der Regression der Leckagemasse und somit im Folgenden relevant. Die Regression der Leckagemasse des Versuchsplans kombiniert enthält die Hauptfaktoren Sieblinie, Kontakt der Dichtflächen und W/Z-Wert. Hauptfaktoren der Regression der Leckagemasse des Versuchsplans neu sind Größtkorn, Sieblinie, Dichtspaltbreite und W/Z-Wert.

Der Wichtigste **Faktor der Konstruktion** ist der Kontakt der Dichtflächen. Dies folgt aus dem Versuchsplan kombiniert, da bei diesem die Dichtspaltbreite und die Pressung irrelevant sind. In den zwei Versuchsplänen, in welchen Kontakt bzw. kein Kontakt zwischen den Dichtflächen besteht, ist hingegen ein breiter Dichtspalt förderlich. Somit ist die Dichtspaltbreite der zweitwichtigste Faktor der Konstruktion. Die Pressung der Dichtflächen ist irrelevant (Tabelle 9.22). An dem Druckverlauf im Dichtspalt (Abbildung 9.18, Seite 119) wird deutlich, dass es entgegen der Erwartungen nur eine geringe druckbelastete Fläche gibt, durch welche der Dichtspalt aufgedrückt wird. Es

bildet sich direkt an der dem Druck zugewandten Dichtspaltseite ein Dichtkuchen aus. Demzufolge ist bei der Flächenpressung ausschließlich relevant, dass diese so stark ist, dass der Kontakt der Dichtflächen erhalten bleibt.

Eine weiterführende Überlegung ist, dass dann, wenn sich ein Fremdkörper zwischen den Dichtflächen befindet, dieser verhindert, dass die Dichtflächen direkten Kontakt haben. Dies führt wie bereits erarbeitet zu einer deutlichen Erhöhung des Leckagestroms. Ein breiter Dichtspalt mindert dagegen die Leckage. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Fremdkörper zwischen den Dichtflächen befindet und somit dessen Kontakt verhindert, sich mit zunehmender Dichtspaltbreite erhöht. Dies bedeutet, dass ein breiterer Dichtspalt die Wahrscheinlichkeit eines sauberen Kontakts der Dichtflächen verringert. Somit ergibt sich ein negativer Einfluss eines breiten Spalts auf einen sauberen Kontakt der Dichtflächen. Wenn diese nicht genauer untersuchte Wechselwirkung häufig auftritt, ist aufgrund des größeren Einflusses dem Kontakt der Dichtflächen gegenüber dem breiten Dichtspalt der Vorrang zu geben. Es kann weiter davon ausgegangen werden, dass diese Wechselwirkung nur bei Medien mit hinreichend großen Partikeln auftritt.

Der **Faktor des Mediums**, welcher in jedem der drei Versuchspläne ein Teil der Regression ist, ist der W/Z-Wert. Wenn der Frischbeton wenig Wasser enthält, kann folglich auch nur wenig Flüssigkeit aus diesem ausgepresst werden. Laut den Versuchsplänen neu und verschlissen wirkt sich ein kleines Größtkorn vermindern auf die austretende Leckagemasse aus. Des Weiteren ergibt die statistische Auswertung für zwei der drei Versuchspläne eine niedrigere Leckagemasse bei einer Frischbetonmischung mit feiner (BC) Sieblinie. Dies kann dadurch erklärt werden, dass der Dichtkuchen bei einem kleinen Größtkorn und einer feinen Sieblinie eine bessere Dichtwirkung aufbaut.

Optimierungsproblem der Frischbetonventilfunktionen Dichtstoff verdrängen und Fremdkörper abscheren

Die Kausalitäten der Frischbetonventilfunktionen *Dickstoff verdrängen* und *Fremdkörper abscheren* sowie deren statistische Kennzahlen sind in Tabelle 9.23 zusammengestellt. Die Tabelle umfasst die drei Qualitätsmerkmale

Verschiebeenergie, Brechwahrscheinlichkeit und resultierende Brechkraft^{WB}. Für das Qualitätsmerkmal Verschiebeenergie sind die Faktoren Verfahrengeschwindigkeit, Größtkorn, Sieblinie sowie Brechspalthöhe Teil der Regression und werden somit im Folgenden näher betrachtet. Die Regression des Qualitätsmerkmals Brechwahrscheinlichkeit enthält die Hauptfaktoren Schnittkantenwinkel, Scherfestigkeit, Größtkorn und Brechspalthöhe. Hauptfaktoren der Regression der resultierenden Brechkraft^{WB} sind Schnittkantenwinkel, Größtkorn und Sieblinie.

Im Folgenden werden die Einflüsse der **Faktoren der Konstruktion** untereinander dargestellt. Durch einen großen Schnittkantenwinkel sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stein zwischen den Schneidkanten abgeschert wird. Dies kann dadurch erklärt werden, dass Fremdkörper, welche zwischen den Schneidkanten eingeklemmt werden, bei einem großen Schneidkantenwinkel an diesen abgleiten. Der abgleitende Stein kann auf diesem Weg entlang der Schneidkanten aus der Schnittebene heraus gleiten und somit dem Abscheren entgehen. Dies führt zu einer niedrigeren Brechwahrscheinlichkeit. Die statistische Auswertung der Versuche zum Qualitätsmerkmal resultierende Brechkraft^{WB} haben ergeben, dass der Faktor Schnittkantenwinkel ein Teil des Regressionsmodells ist. Vor dem Hintergrund, dass die Steine aufgrund einer Punktlast brechen (Vergleich Abbildung 9.20) erscheint ein Einfluss des Schnittkantenwinkels auf die resultierende Brechkraft^{WB} auf den ersten Blick als nicht plausibel. Wenn man aber davon ausgeht, dass bei hohen Schnittkantenwinkeln die Wahrscheinlichkeit steigt, dass ein Stein kurzzeitig eingeklemmt wird und somit für einen geringen Kraftausschlag sorgt und dann herausrutscht, ist der Zusammenhang doch plausibel. Diese These bringt mit sich, dass die angestrebte Wahrscheinlichkeitsbereinigung der resultierenden Brechkraft (Vergleich Abbildung 9.21) nicht komplett möglich ist. Die Verfahrensgeschwindigkeit hat einen starken Einfluss auf die Verschiebeenergie. Dies kann physikalisch dadurch begründet werden, dass bei Erhöhung der Verfahrensgeschwindigkeit die Scherrate im Frischbeton steigt und somit die auf den Brechzahn wirkende Dämpfungskraft zunimmt.

Tabelle 9.22: Zusammenfassung der Erkenntnisse über die Frischbetonventilfunktionen zu einem Optimierungsproblem; Teil 1

Ventilfunktion		Dichtung aufbauen		
Qualitätsmerkmal		Leckagemasse [gr]		
Versuchsplan		verschlissen	kombiniert	neu
Faktoren	Schnittkantenwinkel [°] (A _B)			
	Verfahrgeschwindigkeit [m/s] (B _B)			
	Scherfestigkeit [MPa] (E _B)			
	Größtkorn [mm] (D _B , E _D)	↓ E: <u>-51,6</u> (-1); 51,6 (1) p: 3,1% FS: 8; 32		↓ E: <u>-9,9</u> (-1); 9,9 (1) p: 7,5% FS: 8; 32
	Sieblinie [] (F _B , D _D)		↓ E: 32,5 (-1); <u>-32,5</u> (1) p: 6% FS: AB; BC	↓ E: 9,6 (-1); <u>-9,6</u> (1) p: 8,5% FS: AB; BC
	Brechspalthöhe [mm] (C _B)			
	Dichtspalthöhe [mm] (C _D)			
	Kontakt der Dichtfl. [mm; Mpa] (C _D)		↓ E: 42,8 (-1); <u>-42,8</u> (1) p: 1,8% FS: 1mm; 8 Mpa	
	Pressung zw. Dichtfl. [Mpa] (C _D)			
	Dichtspaltbreite [mm] (A _D)	↑ E: 34,1 (-1); <u>-34,1</u> (1) p: 12,9% FS: 10; 35		↑ E: 11,6 (-1); <u>-11,6</u> (1) p: 4,3% FS: 10; 35
	Förderdruck [bar] (B _D)			
	W/Z-Wert [] (G _D)	↓ E: <u>-52,7</u> (-1); 52,7 (1) p: 2,8% FS: 0,45; 0,55	↓ E: -40,2 (-1); 40,2 (1) p: 2,4% FS: 0,45; 0,55	↓ E: <u>-17,3</u> (-1); 17,3 (1) p: 0,6% FS: 0,45; 0,55
	Hydratationszeit [min] (H _B)			
	Kornform [] (F _D)			
	Im Modell enthaltene Wechselwirkungen	A _B *E _D ; E _B *G _D E: AE:44,4 (-1); 44,4 (1); EG -19,8 (-1); 19,8 (1) p: 5,6%; 35,9%		A _D *G _D E: 9,16 (-1); -9,16 (1) p: 9,7%

Tabelle 9.23: Zusammenfassung der Erkenntnisse über die Frischbetonventilfunktionen zu einem Optimierungsproblem; Teil 2

Dickst. verdrängen	Fremdkörper abscheren			Resultat
Verschiebeenergie [J]	Brechwahrscheinlichkeit [%]		res. Brechkraft* [kN]	
	verdrängen und abscheren			
	4 Stufen	2 Stufen		
	E: -2,6 (1); ...; <u>-10,94</u> (4) p: 9,1% FS: 0; ...; <u>45</u>	+4,2 (1); <u>-4,2</u> (4) p: 20,7%	E: 0,02 (1); ...; <u>-0,85</u> (4) p: 0,6% FS: 0; ...; <u>45</u>	↑ Großer Schnittkantenwinkel ↓ verringert Brechwahrsch. und resultierende Brechkraft ^{WB}
↓ E: <u>-12,6</u> (1); ...; +11,6 (4) p: 0,5% FS: <u>0,035</u> ; ...; 1,8				↓ Niedrige Verfahrgeschwindigkeit ↓ verringert Verschiebeenergie
	E: <u>-6,77</u> (-1); 6,77 (1) p: 2,2%; FS: <u>weich</u> ; <u>hart</u>	<u>-4,17</u> (-1); 4,17 (1) p: 20,7%		
↓ E: 7,6 (-1); <u>-7,6</u> (1) p: 0,2% FS: 32; <u>8</u>	E: 14,06 (-1); <u>-14,06</u> (1) p: 0,003%; FS: 32; <u>8</u>	+12,50 (-1); <u>-12,50</u> (1) p: 0,2%	E: 0,82 (-1); <u>-0,82</u> (1) p: 0,0008% FS: 32; <u>8</u>	↓ Kleines Größtkorn verringert Verschieben., Brechwahrsch., Brechkraft und Leckage
↓ E: 4,1 (-1); <u>-4,1</u> (1) p: 6,7% FS: AB; <u>BC</u>			↑ E: <u>-0,39</u> (-1); 0,39 (1) p: 1,3% FS: <u>AB</u> ; BC	↑ Von QM abhängig ↓
↑ E: <u>-3</u> (-1); 3 (1) p: 16,5% FS: 7; 2	↑ E: <u>-8,85</u> (-1); +8,85 (1) p: 0,4%; FS: 7; 2	<u>-6,25</u> (-1); 6,25 (1) p: 7,1%		↑ Zielkonflikt: - Brechkfunktion: hoher Spalt ↑ - Dichtfunktion: kein Spalt ↓ ↓ Priorisierung der Dichtfunktion
				↑ Breiter Dichtspalt verringert Leckage
				↓ Niedriger W/Z-Wert verringert Leckage
B _B *C _B E: 7,38 (1/-1); ...; +5,54 (4/1) p: 20,5%	DB*CB E: 5,7 (-1); -5,7 (1) p: 4,8%	6,3 (-1); -6,3 (1) p: 7,1%	D _B *F _B E: 0,103 (-1); -0,103 (1) p: 48,6%	

Der dritte Faktor der Konstruktion ist die Brechspalthöhe. Durch eine Erhöhung der Brechspalthöhe sinken Verschiebeenergie sowie Brechwahrscheinlichkeit. Dies liegt daran, dass bei einem hohen Brechspalt die Scherrate im Frischbeton sinkt und kleinere Steine zwischen den Schneidkanten hindurch gleiten können.

Der erste **Faktor des Mediums** ist die Scherfestigkeit. Dieser ist in dem Regressionsmodell der Brechwahrscheinlichkeit enthalten. Es gibt den Ansatz diesen Zusammenhang mithilfe des Dichteunterschiedes der zwei Gesteinsorten und somit durch einen Unterschied der Frischbetonmischung zu begründen (betreute Abschlussarbeit [106, S. 46-54]). Allerdings ist es physikalisch nicht erklärbar, dass die Scherfestigkeit bei sonst identischem Gestein einen Einfluss auf die Brechwahrscheinlichkeit hat. Aus diesem Grund wird dieser Zusammenhang im Rahmen des Optimierungsproblems nicht weiter berücksichtigt (Tabelle 9.23; Einfluss der Scherfestigkeit auf die Brechwahrscheinlichkeit gestrichen). Der zweite Faktor des Mediums ist das Größtkorn. Ein kleines Größtkorn verringert die notwendige Verschiebeenergie, die Brechwahrscheinlichkeit sowie die notwendige resultierende Brechkraft^{WB}. Der letzte Faktor des Mediums ist die Sieblinie. Eine feine Sieblinie (BC) führt zu einer niedrigen Verschiebeenergie wobei eine grobe Sieblinie (AB) geringe Brechkräfte zur Folge hat.

Optimierungsproblem der übergreifenden Faktoren

Die drei Faktoren Brechspalt- bzw. Dichtspalthöhe sowie Sieblinie und Größtkorn sind Teil mehrerer Versuchspläne. Somit handelt es sich um übergreifende Faktoren. Sieblinie und Größtkorn sind Faktoren des Mediums, welche von dem Einsatz der Maschine abhängen. Da das Einsatzgebiet der Maschine nicht eingeschränkt werden soll, wird von einer erneuten Diskussion der betreffenden Kausalitäten abgesehen.

Brechspalthöhe bzw. Dichtspalthöhe ist der **übergreifende Faktor der Konstruktion**. Um eine möglichst geringe Verschiebeenergie und eine geringe Brechwahrscheinlichkeit zu erhalten, ist ein hoher Brechspalt anzustreben. Um die Leckagemasse zu minimieren empfiehlt sich eine niedrige Dichtspalthöhe. Um diese Anforderungen zu erfüllen, muss sich der Ventilkörper erst in einem

großen Abstand tangential über den Ventilsitz bewegen (hohe Brechspalthöhe). Dann wird, wenn sich der Ventilkörper über dem Ventilsitz befindet, durch eine zweite Bewegung der Abstand zwischen den Dichtflächen verringert (niedrige Dichtspalthöhe). Durch die beschriebene Vorgehensweise werden die unterschiedlichen Anforderungen an die Spalthöhe während der verschiedenen Zeitpunkte erfüllt. Allerdings ist die beschriebene Bewegung sehr kompliziert und zum Zerdrücken der Fremdkörper ist mit hohen Betätigungskräften zu rechnen (Abbildung 9.7). Somit bestätigt sich die Unvereinbarkeit der Anforderungen an die Spalthöhe. Die Gewichtung der Anforderungen ist abhängig von der Anwendung. In diesem Konflikt ist die Dichtfunktion stärker zu gewichten. Durch einen erhöhten Leakagestrom entstehen gravierendere Nachteile als durch eine Erhöhung der Verschiebeenergie und der Brechwahrscheinlichkeit.

9.7.2 Gestaltungsregeln zur Konstruktion eines Dickstoffventils

Die statistische Auswertung der Versuche zeigt auf, dass aufgrund zahlreicher Kausalitäten ein sehr komplexes Gesamtproblem besteht. Nach vorangegangener Analyse erfolgt durch vereinfachende, kurze Leitregeln das abschließende Resümee der Überlegungen, welche Anforderungen an ein Dickstoffventil gestellt werden.

Leitregeln zur funktionsgerechten Gestaltung:

1. Funktion: Dichtwirkung aufbauen
 - 1.1. Die Dichtflächen müssen direkten Kontakt haben, da dies einen stark senkenden Einfluss auf die Leakage hat.
 - 1.2. Bei einem pastösen Medium ist ein breiter Dichtspalt förderlich, da durch diesen nachweislich der Leakagefluss verringert wird. Bei partikelbeladenen Medien wird hingegen davon ausgegangen, dass durch die Verbreiterung des Dichtspaltes eines Ventils die Wahrscheinlichkeit steigt, dass Partikel im Dichtspalt klemmen und deren

direkten Kontakt verhindern. Nach dieser These erhöht bei partikel-beladenen Medien ein breiter Dichtspalt den Leckagefluss.

1.3. Die Pressung zwischen den sich berührenden Dichtflächen hat keinen Einfluss auf den Leckagefluss. Die Pressung muss allerdings derart hoch sein, dass sich kein Spalt zwischen diesen bildet. Der im Dichtspalt wirkende Flüssigkeitsdruck, welcher die Dichtflächen auseinander drückt, fällt an der dem hohen Druck zugewandten Kante der Dichtflächen ab. Somit ist die öffnende Kraft gering.

2. Funktionen: Dickstoff verdrängen und Fremdkörper abscheren

2.1. Große Schnittkantenwinkel sind zu bevorzugen. Hierdurch sinkt die Wahrscheinlichkeit, einen Stein zu brechen und die resultierende Brechkraft^{WB}. Beides resultiert in einer verringerten Schnittkantenbelastung.

2.2. Niedrige Verfahrensgeschwindigkeiten sind anzustreben, um die für die Verschiebung des Materials notwendige Energie gering zu halten.

2.3. Wenn die Brechspalthöhe und die Dichtspalthöhe getrennt einstellbar sind, ist eine hohe Brechspalthöhe zu wählen, um die Verschiebeenergie und die Brechwahrscheinlichkeit zu verringern. Sind diese nicht getrennt einstellbar, wird eine geringe Spalthöhe angestrebt, um eine gute Dichtfunktion zu erhalten.

10 Frischbetonauslassventil – alternative Lösungssuche und Lösungsauswahl

Nach der Schließung der Wissenslücke bezüglich der funktionsgerechten Konstruktion im vorstehenden Kapitel wird mithilfe des so gewonnen Wissens das für die Verwirklichung der Frischbetonkonstantflussspumpe erforderliche Frischbetonauslassventil entwickelt.

Im ersten Schritt wird die Anforderungsliste des Frischbetonauslassventils dargestellt. Hierdurch wird die Frage beantwortet, WAS das Produkt können soll (Kapitel 10.1) [95, S. 283]. Die Frage nach dem WIE die Lösung konkret aussieht, wird in dem darauffolgenden Unterkapitel beantwortet (Kapitel 10.2) [95, S. 283]. Da bereits bei der Entwicklung der Konstantflussspumpe ausführlich auf den Prozess der Produktentwicklung eingegangen wird, soll hier direkt das Ergebnis vorgestellt werden.

10.1 Anforderungsliste eines Frischbetonauslassventils

In der Anforderungsliste (Tabelle 10.1) des Frischbetonauslassventils wird zwischen dessen Haupt- und Nebenaufgabe unterschieden. Die Aufgabenbereiche der Hauptaufgabe untergliedern sich in Durchfluss und Leckage, Medium und Förderdruck. Die Nebenaufgaben entsprechen teilweise denen der Konstantflussspumpe. Dies kann dadurch erklärt werden, dass das Frischbetonauslassventil ein Teil der Frischbetonkonstantflussspumpe ist und demzufolge an dieses ähnliche Anforderungen gestellt werden. Tabelle 10. ist lediglich ein Ausschnitt der gesamten Anforderungsliste. Das vollständige Dokument ist im Anhang A.8 zu finden.

Tabelle 10.1: Auszug der Anforderungsliste des Frischbetonauslassventils (nach [96, S. 14])

Registriernummer -		Produkt: Frischbetonauslassventil		Bearbeiter: Weber		Datum: 9.12.2015 (erstellt)		Blatt: 1	
Anforderungsliste II									
Gliederungsteil		Anforderungen				Zugriffsteil			
Aufgabenart	Aufgabenbereich	Beschriebene Angaben (qualitativ)		Zahlenangabe (quantitativ)	Anforderungsart	Quelle		Sachunterlage	Person
		Nr.	1			2	3		
Hauptaufgabe	Durchfluss und Leckage	1.	Druchfluss beeinflussen: absperren oder ermöglichen		Fo				F.W.
		2.		In Schaltstellung "Durchfluss ermöglichen" einen geringen Strömungswiderstand für einen Förderstrom von 150 m ³ /h Beton verursachen	Wu				F.W. / P.M. / R.W.
		3.	In Schaltstellung "abgesperrt" eine technische Dichtheit erzielen		Fo				F.W.
		4.	Leckage durch die Dichtung des Betätigungsmechanismuses nach außen so gering halten, dass diese keine technischen Auswirkung hat bzw. eine Spüleinrichtung vorsehen		Fo				F.W.
	Medium	5.		Den mechanischen Belastungen, welche aus einem Größtkorn von bis zu 32 mm resultieren standhalten.	Fo	Zielvereinb.			P.M. / R.W.

10.2 Das Zylindersegmentventil

Das Resultat der Entwicklung eines Frischbetonauslassventils, in welchem die neu gewonnenen Erkenntnisse angewendet werden, ist das sogenannte Zylindersegmentventil (Abbildung 10.1). Der Stellkörper dieses Ventils hat die Form eines Zylindersegments, woraus sich die Bezeichnung ableitet.

Das Zylindersegmentventil besteht aus einem Ventilglied, welches weiter in ein Schwenkteil und einen Stellkörper unterteilt werden kann. Der Stellkörper wird durch eine Drehung des gesamten Ventilglieds auf dem gewölbten Ventilsitz verschoben. Die Sekundär-Ventildichtung der sich drehenden Welle gegen eindringenden Frischbeton ist aus Schwenkrohrventilen bereits bekannt.

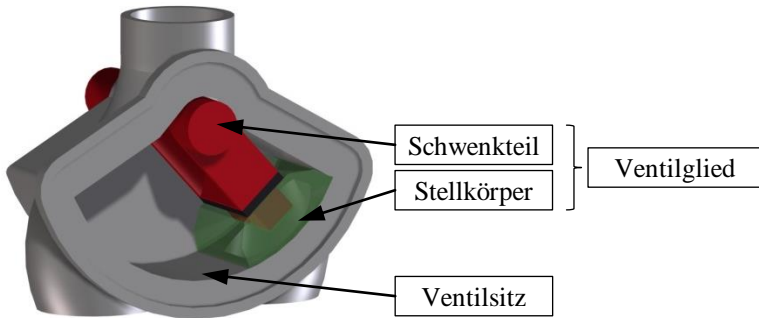


Abbildung 10.1: Das Zylindersegmentventil (angelehnt an [12, S. 60] und [67, S. 150])

Je nach Winkelstellung des Ventilglieds gibt der Stellkörper die Öffnung bzw. die Öffnungen im Ventilsitz frei oder verschließt diese (Abbildung 10.2).



Abbildung 10.2: Die drei Schaltstellungen des Zylindersegmentventils [12, S. 61]

Die Verbindung zwischen Schwenkteil und Stellkörper ist derart ausgeführt, dass zwischen diesen eine radiale Relativbewegung möglich ist. Diese Verbindungsstelle muss gesondert abgedichtet werden. Durch den beschriebenen Aufbau wird bei der Primär-Ventildichtung das Prinzip der selbstverstärk-

enden Dichtung¹ umgesetzt (Abbildung 10.3). Wenn der Mediumdruck auf der Ventillinnenseite (p_1) höher als der auf der Ventilaußenseite (p_2) ist, wird der Stellkörper in den Ventilsitz gedrückt. Herrschen ausgewogene Druckverhältnisse wird der Stellkörper nicht auf den Ventilsitz gepresst und kann somit verschoben werden.

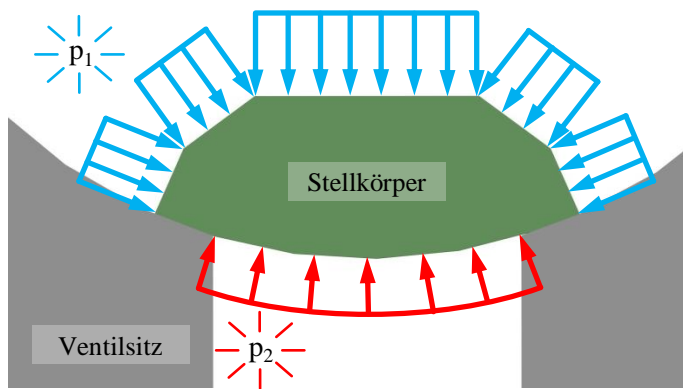


Abbildung 10.3: Der verschleißnachstellende Stellkörper mit selbstverstärkender Dichtung (angelehnt an [12, S. 60])

Messungen zeigen (Abbildung 9.18, Seite 119), dass der Mediumdruck bereits an der dem hohen Druckniveau zugeneigten Kante des Dichtspalts auf das niedrige Druckniveau abfällt. Somit ist die Kraft, welche die Dichtflächen auseinander drückt, nur gering. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Dichtspalthöhe durch ein Zusammenpressen der Dichtpartner reduziert werden kann. Allerdings ist die Reduzierung der Dichtspalthöhe begrenzt, da die Kraft, welche benötigt wird um Steine zu zerdrücken, mit abnehmender Spalthöhe stark ansteigt (Abbildung 9.7, Seite 88). Bei Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte bietet die selbstverstärkende Dichtung demzufolge nur geringe Vorteile. Ein klarer Vorteil ist hingegen, dass durch diesen Aufbau die aus der Druckdifferenz resultierende Kraft nicht über das Schwenkteil und dessen

¹ [67, S. 112]; Allgemein: Prinzip der Selbsthilfe [95, S. 561].

Lagerung, sondern direkt in den Ventilsitz abgeleitet wird. Hierdurch kann das Auslassventil schwächer und leicher ausgeführt werden. Des Weiteren soll das Auslassventil nur bei Druckgleichheit bewegt werden. Da bei Druckdifferenz die Betätigungskräfte deutlich höher als bei einem ausgeglichenen Druckzustand sind, ist eine Selbstregulierung denkbar. Wenn das Ventil unter Druckdifferenz betätigt werden soll, ist eine derart starke Selbstverstärkung zu vermeiden, da sonst Verschleiß und Betätigungskräfte erhöht werden. Ein weiterer Vorteil des radialen Freiheitsgrades ist, dass bei Verschleiß der Dichtflächen diese bis zu einem gewissen Maß selbständig nachgestellt werden.

Um eine geringe Wahrscheinlichkeit zu erhalten, dass Fremdkörper bei dem Schließen des Ventils abgesichert werden, ist ein hoher Brechspalt zu wählen (Kapitel 9.7). Aus der Forderung nach einem geringen Leakagestrom resultiert hingegen die Bestrebung nach einer geringen Dichtspalthöhe (Kapitel 9.7). Da die Brechspalt- und die Dichtspalthöhe in der vorgestellten Konstruktion voneinander abhängen, wird aufgrund einer höheren Priorisierung der Dichtfunktion eine niedrige Spalthöhe gewählt.

Während der Bewegung des Stellkörpers können in den Spalt zwischen diesem und dem Ventilsitz Steine gelangen. Die Steine in dem Dichtspalt verhindern eine Annäherung der Dichtflächen. Untersuchungen zeigen, welche Kraft benötigt wird, um einen Stein zu zerdrücken (Abbildung 9.7, Seite 88). Allerdings ist nicht bekannt, welchen Einfluss es hat, wenn die zwei Flächen während einer Relativbewegung aufeinander gepresst werden. Aus diesem Grund ist bei dem Zylindersegmentventil vorgesehen, dass die Pressung zwischen Stellkörper und Ventilsitz während deren Relativbewegung aktiv eingestellt werden kann.

Während des Schließtaktes müssen die Fremdkörper im Dichtspalt überwunden werden, sodass darauf folgend eine Dichtung aufgebaut werden kann. Um die Fremdkörper zu überwinden, sind verschiedene Vorgehensweisen denkbar (Steinverfahren, Kapitel 9.2.2). Aus verfahrenstechnischen Gründen können diese prinzipiell auf das Zerstören der Fremdkörper (zerdrücken oder abscheren) eingeschränkt werden. Weiter ist das Abscheren der Fremdkörper zu bevorzugen, da hierfür geringere Betätigungskräfte als beim Zerdrücken aufgewendet werden müssen. Untersuchungen zeigen (Tabelle 9.23, Seite 145), dass

ein großer Schnittkantenwinkel zu einer verringerten Brechwahrscheinlichkeit der Fremdkörper führt. Aus diesem Grund werden große Schnittkantenwinkel angestrebt. Auf der anderen Seite beeinflusst die Form der Schnittkanten auch die Form der Dichtfläche. Um sowohl einen großen Schnittkantenwinkel zu erreichen als auch eine möglichst gleichmäßige Dichtspaltbreite zu gewährleisten, ist die Schnittkante des Stellkörpers gerade und die des Ventilsitzes halbkreisförmig. Zum Erzielen niedriger Betätigungskräfte während der Ventilbetätigung darf das Ventilglied bei seiner Verdrehung dem Frischbeton nur eine geringe Angriffsfläche bieten. Außerdem führt eine Reduzierung der Winkelgeschwindigkeit des Ventilglieds zu einer sinkenden Verschiebekraft bzw. Verschiebeenergie (Tabelle 9.23).

[12], [118], [119]

11 Funktion der Konstantflussspumpe – Entscheiden und Umsetzen

Nach der Auswahl der prinzipiellen Lösung folgt nach SPALTEN der Schritt *Entscheiden und Umsetzen*. Ziel ist die Überführung des ausgewählten Prinzips in eine Konstruktion und darauffolgend in die Realität [94].

In diesem Kapitel wird die Funktionsweise der Konstantflussspumpe erläutert. Hierzu wird auf die Mechanik, die Steuerung sowie die Hydraulik der Pumpe eingegangen.

11.1 Mechanik

Das Pumpensystem der ausgewählten prinzipiellen Lösung verfügt über zwei 2/2-Wegeventile als Einlassventile, zwei Förderzylinder und ein 3/3-Wegeventil als zentrales Auslassventil (Abbildung 6.6, Seite 66). Abbildung 11.1 zeigt die Realisierung des Pumpensystems in einer CAD-Konstruktion.

Als Einlassventile werden zwei Einklapp-Scheibenventile verwendet. Die Primär-Ventildichtung basiert auf der eines Schwenkrohrventils der Bauart S-Rohrweiche deren Konstruktion heute bekannt ist. Auch die Dichtung der sich drehenden Ventilwelle (Sekundär-Ventildichtung) ist eine Funktion, welche von Schwenkrohrventilen bekannt ist. Somit wird auch hier auf bestehende technische Lösungen zurückgegriffen. Die Einlassventile sperren (s) den Mediumfluss zwischen Frischbetonreservoir und Förderzylinder oder geben diesen frei (f). Wenn sich ein Einlassventil im gesperrten (s) Zustand befindet, kann ein Druck in dem dazugehörigen Förderzylinder aufgebaut werden. Bei Erhöhung des Mediumdrucks im Förderzylinder stützt sich die Scheibe des Einlassventils an der mittig angeordneten Leiste ab. Hinter den Einlassventilen

befinden sich zwei parallel angeordnete Förderzylinder mit Förderkolben und Antriebszylindern.

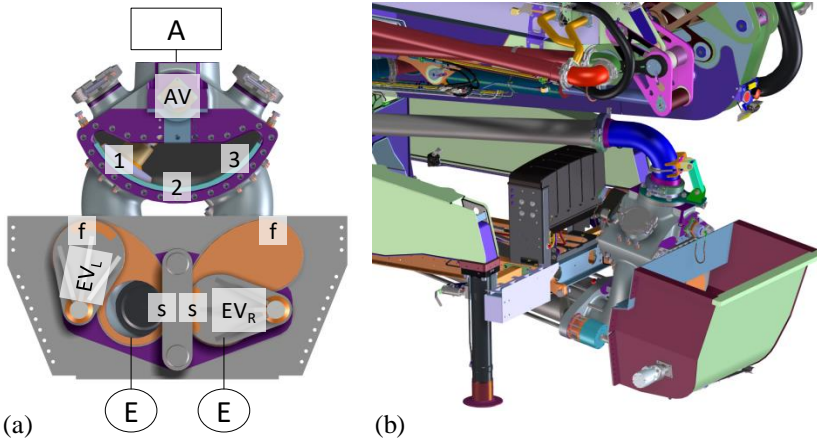


Abbildung 11.1: Konstantflusspumpe; (a) CAD-Konstruktion der Konstantflusspumpe ohne Trichter, (b) CAD-Konstruktion der Konstantflusspumpe und einer herkömmlichen Auto-betonpumpe (in Anlehnung an [4, S. 30])

Als zentrales Auslassventil (AV) wird das im Zuge dieser Arbeit entwickelte Zylindersegmentventil eingesetzt. Je nach Winkelstellung des Ventilglieds kann der rechte (AV in Pos. 1), können beide (AV in Pos. 2) oder kann der linke (AV in Pos. 3) Förderzylinder Medium durch das Zylindersegmentventil hindurch in den Auslass schieben.

[4, S. 30]

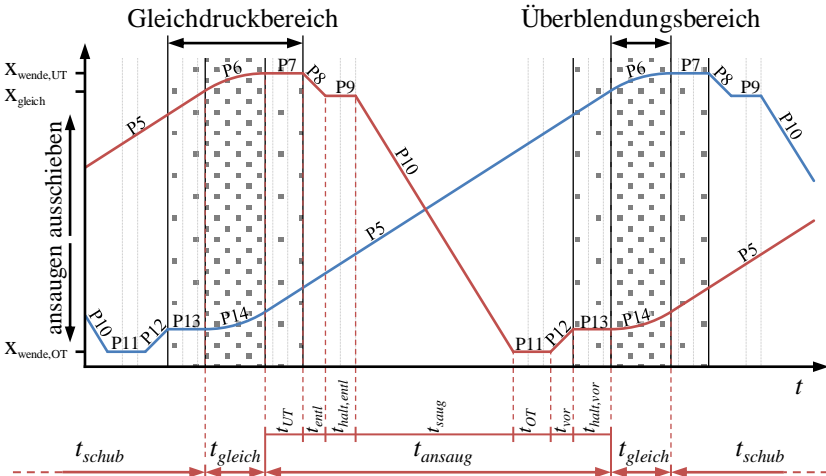
11.2 Bewegungsablauf und dessen Steuerung

Der Bewegungsablauf der Förderkolben, der Einlassventile und des Auslassventils über der Zeit sind in dem Taktdiagramm (Abbildung 11.2) dargestellt. Die Steuerung ist dafür verantwortlich, dass sich die Komponenten der Konstantfluspumpe derart bewegen, wie im Taktdiagramm vorgesehen. Eingangsparameter der Steuerung sind diverse Hydraulikdrücke sowie Winkelstellungen der Frischbetonventile, die Positionen der Antriebskolben und die Information des geforderten Förderstroms. Auf dieser Datenbasis werden durch die Steuerung die Positionen der Kolben und der Frischbetonventile gestellt. Der Ablauf der Steuerung ist in Abbildung 11.4 dargestellt.

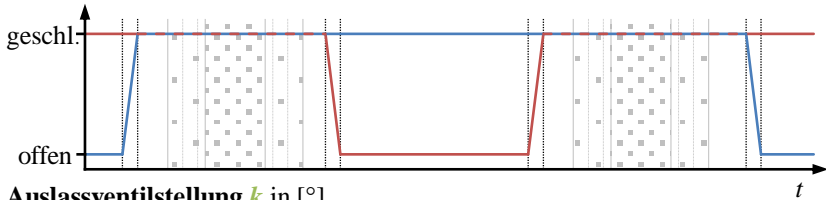
Wie in dem Taktdiagramm (Abbildung 11.2) dargestellt, durchläuft jeder der Förderkolben die Phasen: Vorkompression, Überblendung, Fördern, Überblendung, Dekompression und Ansaugen. Die Stellungen der Frischbetonventile werden in Abhängigkeit der Positionen, Geschwindigkeiten und Hydraulikdrücke der Antriebskolben vorgegeben. Der komplette Durchlauf eines Kolbens durch jeden Betriebszustand wird als Lastspiel bezeichnet.

In der Steuerung wird ein Lastspiel in die zehn Phasen P5 bis P14 unterteilt. Die linke Spalte der Abbildung 11.4 zeigt die Steuerungslogik des linken Förderkolbens und die rechte Spalte analog die des rechten Förderkolbens. Beide Förderkolben durchlaufen zeitlich versetzt die gleichen Phasen. In jeder dieser Phasen gibt es Soll-Werte für die Geschwindigkeiten der Antriebskolben und die Positionen der Betonventile. Außerdem gibt es in jeder Phase eine Abbruchbedingung (Ab. abgekürzt), welche erfüllt sein muss, sodass mit der darauf folgenden Phase fortgefahren werden kann.

Förderkolbenhub h_L, h_R in [mm]



Einlassventilstellung s_L, s_R in [°]



Auslassventilstellung k in [°]

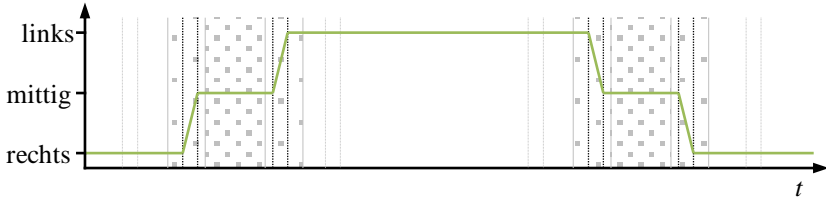


Abbildung 11.2: Takt diagramm der Konstantflusspumpe mit Zeiten und Phasen (in Anlehnung an [4, S. 30])

Neben der Beschreibung der Phasen gibt es in der Abbildung des Steuerungsablaufes (Abbildung 11.4) sechzehn Prinzipskizzen der Konstantflusspumpe als Draufsicht. Die Prinzipskizzen stellen den in den Phasen formulierten

Betriebszustand dar. In der Legende (Abbildung 11.3) wird der Aufbau der Prinzipskizzen genauer erläutert. Im oberen Teil der Skizze wird die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit der zwei Förderkolben dargestellt. In der Mitte der Skizze wird visualisiert, ob sich das Stellglied des Zylindersegmentventil links, mittig oder rechts befindet und somit die Verbindung des linken, keines oder des rechten Förderzylinders zum Auslass sperrt. Im unteren Teil der Prinzipskizze wird mit zwei Linien die Schaltstellung der Einlassventile dargestellt. Hierbei steht eine durchgezogene Linie für ein geschlossenes und eine gepunktete für ein offenes Ventil.



Abbildung 11.3: Legende der Prinzipskizzen aus Abbildung 11.4

Im Startmodus wird die Pumpe in einen definierten Zustand gebracht, aus welchem der normale Pumpbetrieb aufgenommen werden kann. Hierzu werden im Startmodus die Förderzylinder gefüllt und an vordefinierte Positionen gefahren sowie die Frischbetonventile in geeignete Stellung gebracht. Die Steuerung durchläuft die Phasen P1 bis P4. Sobald dies abgeschlossen ist, geht die Pumpe automatisch in den Betriebsmodus über.

Nach Abschluss des Startmodus schiebt der linke Förderkolben mit Schubgeschwindigkeit den Frischbeton durch den Auslass in die Förderleitung (P5). Die Saugbewegung des rechten Förderkolbens wird abgebremst und dessen Einlassventil geschlossen. Somit ist der rechte Förderzylinder ein gefüllter, abgeschlossener Raum (P11). In diesem wird das Material im folgenden Schritt komprimiert, bis es annähernd Förderdruck hat (P12).

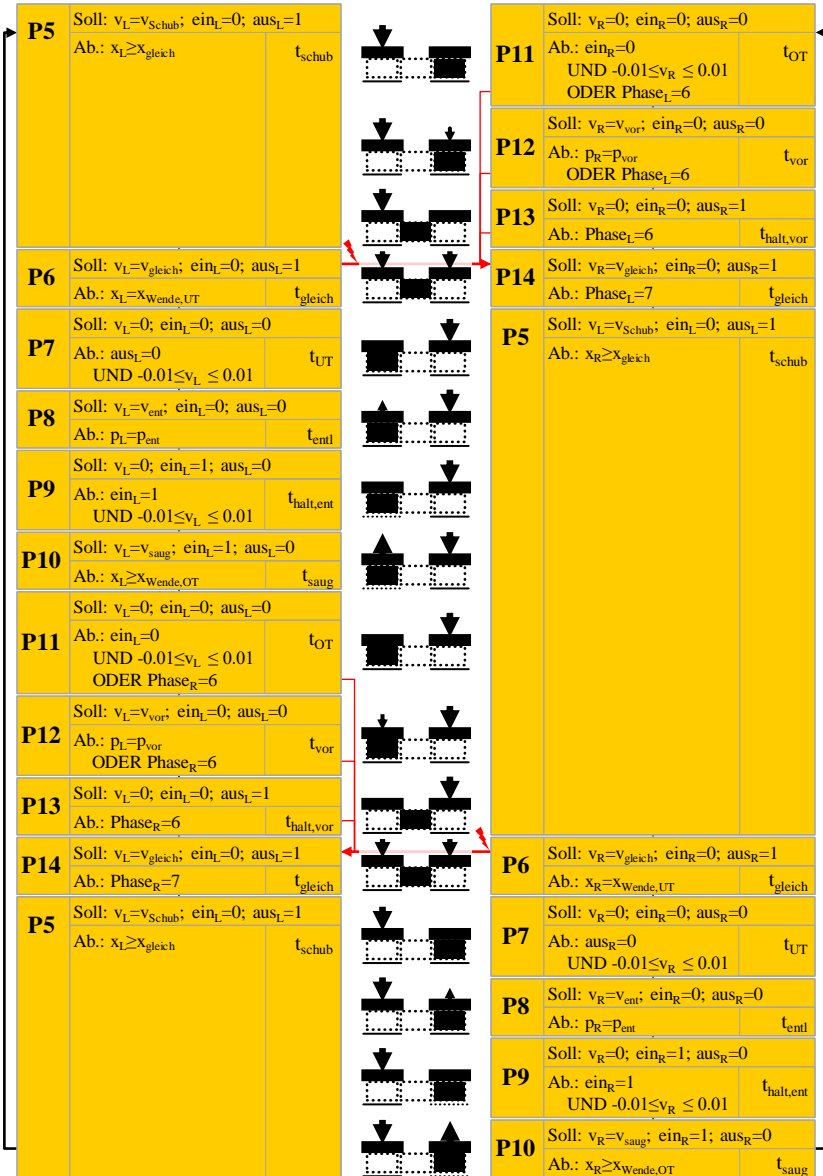


Abbildung 11.4: Steuerungsablauf der Konstantflusspumpe [4, S. 31]

Nachdem die Druckdifferenz zwischen linkem und rechtem Förderzylinder ausgeglichen wurde, wird das Auslassventil in Mittelstellung gebracht (P13). Somit sind beide Auslassöffnungen freigegeben. In dieser Position verharrt der rechte Förderkolben.

Sobald der linke Förderkolben bei der Position x_{gleich} angekommen und somit fast leer ist, wechselt dieser in Phase 6. In dieser wird die Geschwindigkeit des linken Kolbens abgesenkt und die des rechten erhöht, bis Gleichgeschwindigkeit (v_{gleich}) hergestellt ist. Durch den Wechsel des linken Förderkolbens in die sechste Phase werden automatisch die Abbruchbedingungen der Phasen 11, 12 und 13 des rechten Förderkolbens erfüllt, sodass dieser spätestens hierdurch zum Wechsel in Phase 14 gezwungen wird. Somit ist eine Synchronität der Phasen (P6 und P14) gewährleistet. In der vierzehnten Phase wird der rechte Förderkolben auf Gleichgeschwindigkeit beschleunigt (P14). Während dieser Überblendungsphase (Abbildung 11.2) fördern der linke und rechte Förderkolben jeweils mit Gleichgeschwindigkeit, was in Summe zu dem gleichen Volumenstrom führt, wie wenn ein Förderkolben mit der höheren Schubgeschwindigkeit fördert. Neben den konstanten Gleichgeschwindigkeiten kann während der Überblendungsphase auch der eine Förderkolben genauso stark verzögert werden, wie der andere beschleunigt wird (umgesetzt in Abbildung 11.2), sodass sich auch wieder ein konstanter Volumenstrom ergibt. Nach der Zeit t_{gleich} befindet sich der linke Förderkolben an der Position $x_{\text{Wende,UT}}$, wodurch die Abbruchbedingung erfüllt und somit auch die Überblendungsphase beendet ist.

In der darauffolgenden Phase wird der linke Förderkolben abgebremst und dessen Auslassöffnung verschlossen (P7). Durch den Wechsel der linken Seite in die siebte Phase wird die Abbruchbedingung der rechten erfüllt und diese geht in Phase 5 über. Während der fünften Phase sorgt dieser Förderkolben wieder ausschließlich für die Förderung, indem der Förderkolben das Material mit Schubgeschwindigkeit ausschleibt. Der Ausschleibevorgang dauert die Zeit $t_{\text{schub an}}$.

Wenn der linke Förderkolben steht und dessen Auslassventil geschlossen ist, geht dieser in Phase acht über. Danach wird durch ein Zurückfahren des linken Förderkolbens der Förderdruck des Mediums auf Umgebungsdruck abgesenkt (P8). Nach Angleichung der Drücke wird das Einlassventil geöffnet (P9).

Durch das geöffnete Einlassventil hindurch saugt der linke Förderkolben mit der v_{saug} neuen Frischbeton an (P10). Nach der Zeit t_{saug} ist der linke Förderzylinder gefüllt und der Kolben erreicht die Position $x_{\text{Wende,OT}}$, wodurch diese Phase abgebrochen und in Phase 11 gewechselt wird. Daraufhin wird der linke Förderkolben abgebremst und dessen Einlassventil geschlossen (P11). Danach wird der angesaugte Frischbeton vorkomprimiert (P12), sodass keine Druckdifferenz mehr über das Auslassventil ansteht und dieses in der nächsten Phase geöffnet werden kann (P13).

Wenn der rechte Förderkolben die Marke bei x_{gleich} überfahren hat und somit die Gleichhubphase beginnt, schieben der rechte und linke Förderkolben jeweils mit Gleichgeschwindigkeit (v_{gleich}) für die Zeit t_{gleich} gemeinsam Frischbeton aus (P14 und P6). Wenn der rechte Förderzylinder leer ist und der Förderkolben die Position $x_{\text{Wende,UT}}$ erreicht hat, wechselt dieser in Phase sieben und zwingt somit den linken Förderkolben in Phase fünf. Der linke Förderkolben wird auf Schubgeschwindigkeit beschleunigt (P5). Der rechte Förderkolben wird angehalten und der Auslass geschlossen (P7). Sobald der rechte Förderzylinder durch das Auslassventil vom restlichen System getrennt ist, wird der Druck im Förderzylinder durch ein Zurückfahren des Förderkolbens entlastet (P8). Danach wird das rechte Einlassventil geöffnet (P9) und der Förderkolben zum Ansaugen zurück gefahren (P10). Wenn nach der Zeit t_{saug} der rechte Kolben in der Position $x_{\text{Wende,OT}}$ steht wechselt dieser in Phase elf. Somit ist ein Lastspiel durchlaufen und der Zyklus wiederholt sich.

11.3 Hydraulik

Das gesamte Hydrauliksystem der Konstantflusspumpe besteht aus den drei unabhängigen Kreisen zum Antrieb der Förderkolben, zur Betätigung der Frischbetonventile sowie zum Drehen des Rührwerks. Im Folgenden wird detailliert auf die zwei erstgenannten eingegangen. Das Hydrauliksystem des Rührwerks ist heute bekannt und wird aus diesem Grund nicht näher erläutert.

Das Hydrauliksystem zum Antrieb der Förderkolben ist in Abbildung 11.5 dargestellt. Die Bestandteile der einen Fördereinheit sind römisch und die der

anderen arabisch nummeriert. Elemente, welche für beide Fördereinheiten im gleichen Umfang relevant sind, sind durch unterstrichene Nummern gekennzeichnet. Das System besteht aus zwei Antriebspumpen (1, I), zwei Antriebszylindern (2, II) und mehreren Hydraulikkomponenten zur Erfüllung von Nebenfunktionen. Die Antriebspumpen (1, I) werden durch den Motor des Lkws angetrieben. Eine Fördereinheit besteht aus jeweils einer Antriebspumpe (1, I) und einem Antriebszylinder (2, II). Das Hydrauliksystem wird nachfolgend beispielhaft an der Antriebspumpe 1 und dem Antriebszylinder 2 erklärt.

Im Laufe der Förderphase wird Öl durch die Hauptpumpe (1.1) auf die Bodenseite des Antriebszylinders (2.B) gefördert. Hierdurch fahren Kolbenstange und Förderkolben aus; Frischbeton wird ausgeschoben. Aus dem stangenseitigen Anschluss (2.S) wird Öl gedrückt. Um die Kolbenstange einzuziehen und somit Frischbeton anzusaugen, wird die Förderrichtung der Antriebspumpe umgekehrt. Es muss berücksichtigt werden, dass die boden- und stangenseitige Kolbenfläche unterschiedlich groß sind. Somit sind die in und aus den Antriebszylinder fließenden Volumenströme unterschiedlich hoch. Ohne eine Kompensation hat dies während der Förderphase eine Unterversorgung und während der Saugphase eine Überversorgung der Hauptpumpe (1.1) zur Folge. Zur Kompensation wird das überschüssige Öl der Fördereinheit (1+2) während der Saugphase mithilfe des 2/2-Wegeventils (3) einem Schaukel- und Spülkreis zugeführt. Das überschüssige Öl kann bei Bedarf durch das Rückschlagventil IV dem Antriebszylinder II stangenseitig (II.S) zugeführt werden. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich der Antriebszylinder (II) in der Schubphase. Der ergänzende Ölfluss aus der Bodenseite des Antriebszylinders (2.B) fließt auf die Stangenseite des Antriebszylinders (II.S) und verhindert einen Druckeinbruch der Niederdruckseite und daraus folgende Schäden an der Hauptpumpe I.I. Über das Schaukelöl hinaus werden die Niederdruckseiten durch die Speisepumpen (1.2, I.II) mit Öl versorgt. Falls dem Schaukel- und Spülkreislauf durch den einen Antriebszylinder mehr Öl zugeführt wird als der andere benötigt, steigt daraufhin der Druck und das Druckbegrenzungs- bzw. Spülventil (6) öffnet.

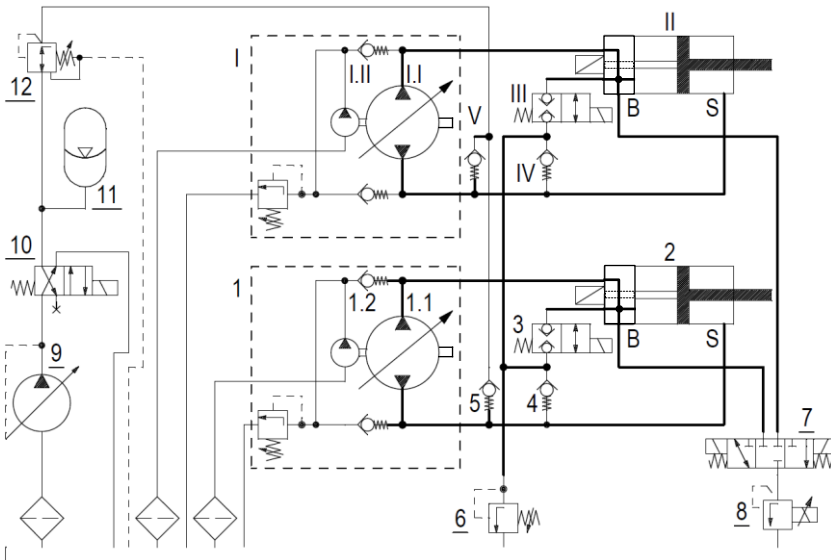


Abbildung 11.5: Plan der Hydraulik zum Antrieb der Förderkolben [4, S. 32]

Wenn der eine Förderkolben fördert und der andere Material vorkomprimiert, fahren beide Kolbenstangen gleichzeitig aus. Während dieses Betriebszustands kann der Ölausgleich mithilfe des Schaukel- und Spülkreises nicht wie beschrieben funktionieren. Die Hauptpumpen (1.1, I.I) drohen zu kavieren. Um einen Schaden zu verhindern, wird bei einem Druckeinbruch Öl aus dem Speicher (11) über ein Druckbegrenzungsventil (12) und Rückschlagventile (5, V) der Niederdruckseiten zugegeben.

Während der Vorkompression wird der Druck des angesaugten Materials dem des Förderstroms angepasst. Eine erste Möglichkeit besteht darin, die Vorkompression mithilfe der Hauptpumpen (1.1, I.I) druckregelt zu realisieren. Dies hat die Nachteile, dass nur eingeschränkt auf einen schwankenden Füllgrad reagiert werden und es aufgrund der Trägheit der Hauptpumpe zu Drucküberschwingern kommen kann. Nachteilig ist weiter, dass es sich um ein vergleichsweise langsames Verfahren handelt. Da die Summe aus Vorkompressions- und Ansaugzeit durch den ausschließenden Förderkolben vorgeschrieben

wird, muss die Ansauggeschwindigkeit erhöht werden, wenn sich die Vorkompressionsphase verlängert. Es wird davon ausgegangen, dass die Ansauggeschwindigkeit einen Einfluss auf den Füllgrad hat. Darüber hinaus wird angenommen, dass es eine optimale Ansauggeschwindigkeit gibt und der Füllgrad nach deren Überschreiten abfällt. Aus diesem Grund wird eine kurze Vorkompressionsphase angestrebt. Bei einer Alternative zu der druckgeregelten Vorkompression liefert die Hauptpumpe ihren maximalen Volumenstrom und der geförderte Ölstrom wird ab einem bestimmten Medium- bzw. Öldruck über ein 3/3-Wegeventil (7) und ein Vorkompressions-Druckbegrenzungsventil (VK-DBV, 8) abgeführt. Bei diesem Verfahren gibt es keine Gefahr von Überschwängern des Mediumdrucks, da das VK-DBV bei Überdruck innerhalb kurzer Zeit öffnet. Nachdem die Hauptpumpe somit auf maximalen Volumenstrom eingestellt werden kann, verkürzt sich die Vorkompressionsphase. Neben den genannten Vorteilen hat das VK-DBV auch einige Nachteile, wie zum Beispiel der technische Mehraufwand. Außerdem kommt es bei hohen Ölströmen über das VK-DBV zu einem Staudruck. Dieser pflanzt sich in einer Erhöhung des Mediumdrucks fort und belastet somit das Zylindersegmentventil zusätzlich. Neben dem technisch höheren Aufwand und der höheren Belastung einer Komponente ist ein weiterer Nachteil, dass die hydraulischen Speicher eine größere Ölmenge sowie Ölstrom liefern müssen. Die Erklärung hierfür ist, dass auf der Niederdruckseite der Pumpe aufgrund der schnellen Vorkompression mehr Öl benötigt wird. Überdies ist es notwendig das über das VK-DBV abgeführte Öl durch die Speicher auszugleichen.

Der zweite Hydraulikkreis, mithilfe dessen die Frischbetonventile betätigt werden, ist in Abbildung 11.6 dargestellt. Über eine Speicherladepumpe (20) wird der Speicher (21) aufgeladen. Die zwei 4/3-Wegeventile (22, 24) regeln den Zufluss der zwei mechanisch in Reihe geschalteten Hydraulikzylinder (23, 25) und somit die Schaltstellung des Auslassventils. Die zwei Schwenkmotoren (Bauart: Drehflügel-Schwenkmotor¹) (27, 29) werden mithilfe der 4/3-Wegeventile (26, 28) geregelt. Um die Schwenkmotoren nicht zu überlasten, wird hierzu der Hydraulikdruck mit einem Druckminderventil (30) abgesenkt.

¹ Weiterführende Informationen [120, S. 104-105].

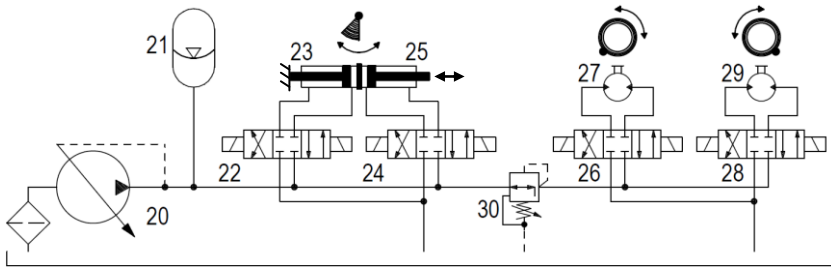


Abbildung 11.6: Plan des Hydraulikkreises zur Betätigung der Frischbetonventile

[4, S. 28-37]

12 Virtual Prototyping

Der Aufbau und die Erprobung von Versuchsmodellen und Prototypen stellen einen zentralen Bestandteil eines Entwicklungsprozesses dar. Durch Produkterprobungen können wichtige Erkenntnisse für eine folgende Serienfertigung gewonnen werden. Da der Aufbau und Test von Prototypen zeit- und kostenintensiv ist, wird allerdings ein möglichst geringer Umfang an physischen Prototypen angestrebt. Um auf der einen Seite die Anzahl der Prototypen zu minimieren und auf der anderen Seite möglichst frühzeitig Erkenntnisse zu erlangen, werden virtuelle Prototypen eingesetzt. Als „Virtual Prototyping“ bezeichnet man die Untersuchung von in der Entwicklung befindlichen Objekten mithilfe eines Rechnermodells. [121, S. 24]

Aufgrund der genannten Vorteile wird die Konstantflusspumpe als physikalisches Mehrdomänensystem modelliert und darauffolgend simuliert. Virtual Prototyping dient an dieser Stelle nicht nur allgemein der Untersuchung des Funktionsprinzips, sondern speziell der Verifikation der Steuerung und des Frischbetonventils.

Im folgenden Kapitel wird auf die Modellbildung und Simulation der Konstantflusspumpe eingegangen (Kapitel 12.1). Darauffolgend werden die Verifikation verschiedener Simulationsteile sowie die Modellgrenzen diskutiert (Kapitel 12.2). Abschließend werden die Ergebnisse vorgestellt und analysiert (Kapitel 12.3).

12.1 Modellbildung und Simulation

Die Simulation der Konstantflusspumpe wird mit MATLAB / SIMULINK / SIMSCAPE R2016a der Firma THE MATHWORKS INC aufgebaut.

Die komplette Simulation der Pumpe lässt sich in die folgenden vier Bereiche Mechanik, Hydraulik, Fördermedium und Steuerung unterteilen. In dem Teil

der Mechanik werden die Mehrkörpermodelle der mechanischen Modelle erzeugt. Der hydraulische Teil bildet alle relevanten Pumpen, Hydraulikventile und Hydraulikzylinder des Hydrauliksystems ab. Bei dem Frischbetonmodell handelt es sich um eine eindimensionale Abbildung der Strömungsmechanik. Durch die Steuerung werden die Komponenten der Pumpe derart angesteuert, dass die Pumpfunktion umgesetzt wird.

Mechanik

Die Mechanik der Konstantflusspumpe wird in dieser Simulation auf die fünf Komponenten Druckgehäuse, zwei Einlassventile, Auslassventil und Einheit aus Antriebs-, Förderkolben und diese verbindende Kolbenstange reduziert. Für diese Komponenten wird aus dem Volumen und der Bauteildichte deren Masse, Massenschwerpunkt und Trägheitsmomente berechnet.

Wenn ein Frischbetonventil geöffnet bzw. geschlossen wird, verändert sich dessen durchströmbare Öffnungsfläche. Diese hat einen Einfluss auf den Strömungswiderstand des Frischbetonventils. In der Simulation wird der Zusammenhang zwischen Position des Frischbetonventils, der sich ergebenden, durchströmbaren Fläche und dem daraus resultierenden Strömungswiderstand abgebildet. Hierzu wird in der Simulation eine Blende mit veränderbarem Querschnitt eingesetzt. Aus der Winkelstellung der Frischbetonventile werden deren durchströmbare Flächen berechnet, welche als Eingangsgröße der verstellbaren Blenden dienen. Diese Vorgehensweise basiert auf der vereinfachenden Annahme, dass die Form der Blendenöffnung bei Frischbeton keinen wesentlichen Einfluss auf dessen Strömungswiderstand hat.

Bei Hubkolbenpumpen wird Medium angesaugt bzw. ausgestoßen, wenn der Förderkolben in dessen Zylinder verfahren wird. Dieses Verhalten wird in der Simulation durch einen translatorischen, hydromechanischen Wandler modelliert. Somit entsteht aus der Bewegung des Kolbens ein Mediumstrom.

Hydraulik

Zur Implementierung der Hydraulik der Konstantflusspumpe werden sowohl Bauteile neu modelliert als auch Modelle von Komponentenherstellern verwendet.

Abbildung 12.1 zeigt das Simulink-Modell eines Differentialzylinders der Pumpe. Diese werden aus jeweils zwei translatorischen, hydromechanischen Umwandlungs-Blöcken mit Kompressibilität sowie parallel geschalteten Anschlag- und Reibungselementen aufgebaut. Neben den zwei hydraulischen Anschlüssen bietet das Modell die mechanischen Anschlüsse der Kolbenstange und des Zylinders. Des Weiteren können die Signale über Position und Geschwindigkeit abgegriffen werden.

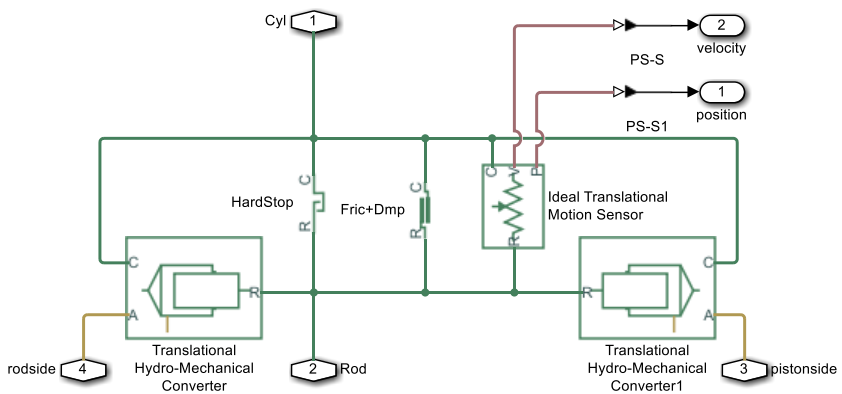


Abbildung 12.1: Simulink-Modell eines Differentialzylinders der Pumpe

Die eingesetzte Hydraulikpumpe besteht aus einer Konstantpumpe zur niederdruckseitigen Speisung und aus einer verstellbaren Hauptpumpe. Das Simulationsmodell wird von dem Pumpenhersteller BOSCH REXROTH AG bereitgestellt.

An Hydraulikventilen werden für die Konstantflusspumpe Rückschlagventile, 2/2-Wege-Sitzventile, Druckbegrenzungsventile und Vorkompressionsdruckbegrenzungsventile verwendet. Die grundsätzlichen Strukturen der Simulationsmodelle dieser Hydraulikventile sind einander sehr ähnlich. Alle Modelle bestehen aus einer Verstellblende, welche die zwei hydraulischen Anschlüsse verbindet. Abhängig von dem Steuersignal oder der über das Ventil anliegenden Druckdifferenz wird die durchflossene Fläche der Blende vorgegeben. Um

ein realistisches Zeitverhalten nachzuempfinden, wird bei der Vorgabe der durchflossenen Fläche ein PT2-Glied eingesetzt.

Fördermedium

Um partikelbeladene Dickstoffe zu simulieren, muss eine Computational-Fluid-Dynamics-Simulation (CFD) mit einer Discrete-Element-Method-Simulation (DEM) gekoppelt werden [122, S. 28ff]. Zur vollständigen Abbildung der Phänomene in den Frischbetonventilen müsste des Weiteren das Abscheren der Steine bzw. Elemente in den Ventilen simuliert werden. Das bereits beschriebene Vorgehen zur Simulation des Arbeitsmediums würde über den Stand der Technik und Forschung hinausgeht. Des Weiteren wären zahlreiche Versuche zur Parametrierung der Simulation notwendig. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Konstantflusspumpen und Dickstoffventilen. Um diesen nicht zu verschieben wird von einer detaillierten Simulation des Frischbetons abgesehen.

In dieser Arbeit wird zur Modellierung des Frischbetons eine vereinfachte 1D-Simulation eines flüssigen Mediums erstellt. Diese bildet die für die Pumpe wichtigsten Medieigenschaften ab. Die Simulation des Mediums umfasst dessen Verhalten in den Rohrleitungen und im Förderzylinder.

Das Modell des Frischbetons in den Rohrleitungen der Pumpe umfasst dessen Strömungswiderstand und Massenträgheit. Nach [13, S. 86] ist der Strömungswiderstand (p) abhängig von geometrischen Parametern der Rohrleitung und Eigenschaften des Betons. Dieser Zusammenhang ist nach [13, S. 86] gegeben durch:

$$p = p_F + p_V + p_H = a \cdot \frac{4 \cdot L}{D} + b \cdot \frac{16 \cdot Q \cdot L}{\pi \cdot D^3} + \rho \cdot g \cdot H \quad (12.1)$$

Der Druck setzt sich zusammen aus den Anteilen aufgrund der Fließgrenze (p_F), der Viskosität (p_V) und der Förderhöhe (p_H). Die einzelnen Parameter sind a der Beiwert für die Fließfähigkeit, L die Länge der Rohrleitung, D der Rohrlungsdurchmesser, b der Konsistenzbeiwert, Q der Volumenstrom des Frischbetons, ρ die Dichte von Frischbeton, g die Erdbeschleunigung und H die Förderhöhe.

Zur Simulation der Hubkolbeneinheiten werden translatorische, hydromechanische Wandler verwendet. Es wird zum einen die Kompressibilität des Frischbetons als auch das gelöste Gas berücksichtigt. Zur Simulation des Füllgrades einer Hubkolbeneinheit wird ab einem bestimmten Kolbenweg kein weiteres Medium mehr in den translatorisch, hydromechanischen Wandler eingesaugt.

Steuerung

Die Steuerung der Simulation wird wie in Kapitel 11.2 (S. 157) erläutert aufgebaut. Mithilfe der Steuerung werden die Bewegungen der Frischbetonventile und der Antriebskolben geregelt.

Bei den Frischbetonventilen handelt es sich um Schaltventile, welche somit nur diskrete und keine kontinuierlichen Schaltstellungen anfahren. Die Aktuatoren fahren hierzu immer in ihre Endlagen, was hydraulisch einfach zu bewerkstelligen ist. Aus diesem Grund werden die hydraulischen Aktuatoren nicht simuliert. Den Frischbetonventilen werden direkt Soll-Positionen vorgegeben. Das Übertragungsverhalten wird als PT2-Glied abgebildet und somit ein realistisches Zeitverhalten erreicht. Im Gegensatz zu den Frischbetonventilen werden mit den Antriebskolben kontinuierliche Positionen angefahren. Dies stellt aus steuerungstechnischer und hydraulischer Sicht eine größere Herausforderung dar, da nicht einfach die Endlagen der Aktuatoren angefahren werden. Aus diesem Grund wird das Hydrauliksystem der Antriebskolben vollständig simuliert. [4, S. 30-32]

12.2 Verifikation und gebietsweise Validierung

„Verifikation ist die Überprüfung, ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde“ [123, S. 14]. Unter einer Validierung versteht man hingegen die „Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und System, die sicherstellen soll, dass das Modell das Verhalten des realen Systems im Hinblick auf die Untersuchungsziele genau genug und fehlerfrei widerspiegelt“ [124, S. 20-21]. Zur

Verifikation des Simulationsmodells der Konstantflusspumpe wird exemplarisch die Plausibilität des Modellverhaltens der Antriebskolben einschließlich ihres Hydrauliksystems, des Betonmodells inklusive der Förderzylinder und des Frischbetonauslassventils analysiert. Eine Validierung ist nur teilweise bei der Simulation des Frischbetons sowie der Förderzylinder möglich. Da im Rahmen dieser Arbeit kein Funktionsmuster aufgebaut wird, fehlen für weitere Validierungen die benötigten Messdaten. Bei der Verifikation bzw. Validierung der Simulation werden im Folgenden auch die Grenzen der Simulation aufgezeigt.

Antriebs- und Förderkolben

Die Förderkolben werden mithilfe der Antriebskolben und deren Hydraulik hin und her bewegt. Diese Bewegung ist von zentraler Bedeutung für die mit der Simulation zu treffenden Aussagen und wird aus diesem Grund detailliert abgebildet sowie verifiziert. In Abbildung 12.2 ist hierzu die Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Antriebskolben über die Zeit für einen idealen Förderstrom von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ und 90 % Füllgrad ohne Vorkompressionsdruckbegrenzungsventil (VK-DBV) dargestellt.

Bei den Positionen der Antriebskolben fällt auf, dass diese stetig sind und keine Schwingungen oder Sprünge aufweisen. Des Weiteren ist am oberen und unteren Totpunkt zu erkennen, dass sich die Positionen langsamer ändern. Dies entspricht weitestgehend dem bereits im Taktdiagramm (Abbildung 11.2) beschriebenen angestrebten Verhalten. Lediglich Trägheiten, Reaktionszeiten und begrenzte Kräfte führen zu geringen Abweichungen und einer stetigen Kennlinie. Die beschriebenen Systemeigenschaften sind erwartungskonform. Im Gegensatz zu den Positionen sind bei den Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Kolben Schwingungen und Überschwinger zu beobachten. Diese treten hauptsächlich bei transienten Zuständen wie beispielsweise der Vorkompressionsphase auf und können mit Trägheiten sowie der Kompressibilität und Kapazität des Hydrauliköls erklärt werden.

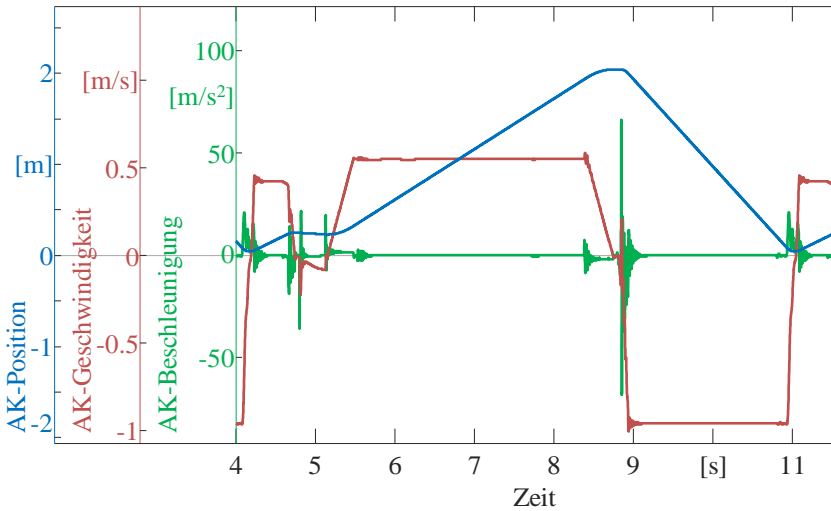


Abbildung 12.2: Simulierte Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Antriebskolben über die Zeit für einen idealen Förderstrom von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ und einem Füllgrad von 90 % ohne VK-DBV

Auch diese Größen haben endliche Werte. Das Systemverhalten der Antriebskolben und dessen Hydrauliksystem ist plausibilisiert und somit als verifiziert anzusehen.

Frischbeton und Förderzylinder

Der Mediumdruck über den Hub des Förderkolbens ist in Abbildung 12.3 dargestellt. Mit der Abbildung wird das Förderverhalten des Förderzylinders und letztlich das Frischbetonmodell verifiziert. Mit Erhöhung des Förderstroms steigt die Förderkolbengeschwindigkeit und demzufolge der Strömungswiderstand. Somit kommt es wie in Abbildung 12.3 dargestellt bei steigendem Förderstrom zu einem erhöhten Förderdruck. Dieses Verhalten ist demzufolge verifiziert.

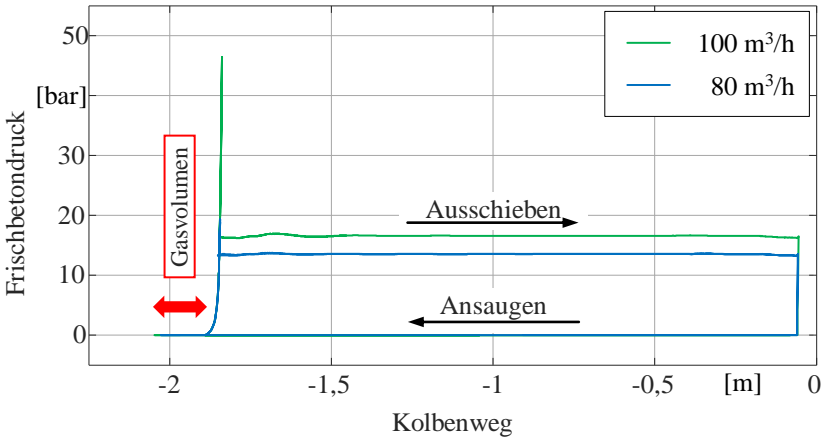


Abbildung 12.3: Simulierter Mediumdruck über den Hub des Förderkolbens für ideale Förderströme von 80 und 100 m³/h und 90 % Füllgrad mit VK-DBV [4, S. 33]

Wenn Frischbeton in den Förderzylinder gesaugt wird, steht dieser anfangs näherungsweise unter Umgebungsdruck. Ab einem gewissen Ansaugweg wird kein weiterer Frischbeton mehr in den Förderzylinder eingesaugt, was dazu führt, dass der Mediumdruck bei der nachfolgenden Vorwärtsbewegung zu Beginn nicht steigt. Wenn der Förderkolben auf die Oberfläche des Frischbetons trifft kommt es zu einer Druckspitze. Durch das beschriebene Verhalten wird der Füllgrad des Zylinders in der Simulation abgebildet. Die Simulation des Mediumdrucks im Förderzylinder (Abbildung 12.3) kann nicht nur als verifiziert sondern auch als validiert angesehen werden, da dessen Messung (Abbildung 2.6 unten; Seite 16) das gleiche charakteristische Verhalten zeigt. Allerdings ist zu bemerken, dass der Druckanstieg beim Ausschieben in Realität langsamer als in der Simulation ist. „Dies kann durch eine Kompression der auch fein verteilten Gasblasen im Frischbeton über einen längeren Weg hinweg erklärt werden“ [4, S. 34].

Zylindersegmentventil bzw. Auslassventil

Als letzter Teil der Simulation wird das Auslassventil genauer betrachtet. Abbildung 12.4 zeigt die in das Auslassventil ein- und ausfließenden Medienströme sowie die jeweiligen Wege der zwei in Reihe geschalteten Auslassventilzylinder.

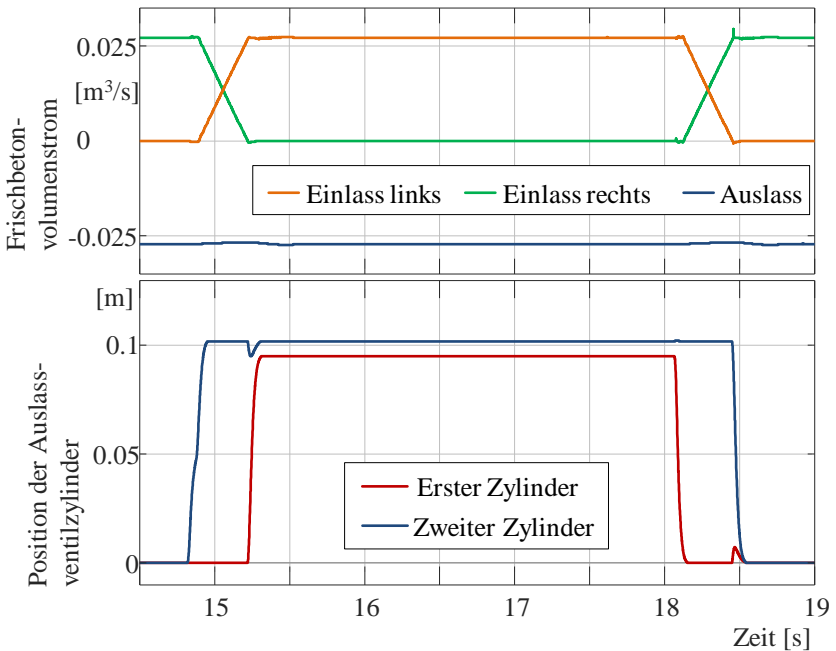


Abbildung 12.4: Simulierte Volumenströme in das Auslassventil und aus diesem heraus sowie die Ventilstellung über die Zeit für einen idealen Förderstrom von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ und einem Füllgrad von 90 % mit VK-DBV

Wie in Kapitel 12.1 erläutert, werden die Frischbetonventile nicht hydraulisch angesteuert, sondern folgen einem Soll-Signal, welches das Zeitverhalten eines PT2-Gliedes aufweist. Wenn ein Betätigungszylinder des Auslassventils ausgefahren ist, befindet sich das Auslassventil in Mittelstellung und gibt seine

beiden Einlassöffnungen frei. Sind beide gleichzeitig ein- oder ausgefahren, ist jeweils einer der beiden Einlassöffnungen des Auslassventils abgesperrt. Hierbei ist zu erkennen, dass durch die Reihenschaltung der Zylinder das Verfahren eines Kolbens je nach Schaltstellung eine Auswirkung auf den anderen Zylinderweg hat.

Wie in der Abbildung 12.4 dargestellt, kann nur ein Volumenstrom in das Auslassventil hinein fließen, wenn die entsprechende Öffnung des Auslassventils freigegeben ist. Die Summe der in das Auslassventil herein fließenden Volumenströme entspricht dem aus diesem heraus fließenden Volumenstrom. Somit weist auch das Auslassventil die physikalisch zu erwartenden Zusammenhänge des Modells auf und ist verifiziert. Des Weiteren zeigt die Simulation, dass sich das System des Zylindersegmentventils für die angestrebte Umsetzung der Konstantflusspumpe für Frischbeton eignet.

Modellgrenzen

Um eine unzulässige Interpretation über die Modellgrenzen hinaus zu vermeiden, werden im Folgenden die Modellgrenzen aufgezeigt. Die Simulation wird hierzu im Weiteren analog zu Kapitel 12.1 in die Bereiche Betonmodell, Mechanikmodell, Hydraulikmodell und Steuerung unterteilt.

Im eindimensionalen Betonmodell werden der Strömungswiderstand in Rohren, der Einfluss der geodätischen Höhe und die Trägheitskräfte berücksichtigt. Strömungsvorgänge in der Pumpe werden hingegen vernachlässigt. Aus diesem Grund kann mithilfe der Simulation keine Aussagen über die Pumpengeometrie gemacht werden. Des Weiteren sind in der Simulation die Frischbetonventile als Blenden mit veränderlicher Durchströmungsfläche modelliert. Hierbei werden zwar die Fließgrenze und die plastische Viskosität des Bingham-Mediums, nicht allerdings weitere Effekte wie beispielsweise die Bildung eines Stopfers bei einer kleinen Durchströmungsfläche berücksichtigt. Eine weitere Modellgrenze ist die Abbildung des Füllgrads. Ein durchschnittlicher Füllgrad der Förderzylinder von 85 bis 90 % ist nachgewiesen. Allerdings ist dieser Wert sehr abhängig vom Medium und desweiteren sind die Schwankungen des Füllgrads von Hub zu Hub nicht bekannt.

Bei dem Mechanikmodell ist zu beachten, dass die Kräfte, welche zum Schließen der Frischbetonventile aufgebracht werden, nicht in der Simulation berücksichtigt werden. Grund hierfür ist, dass diese zum Zeitpunkt der Simulation nicht bekannt sind. Dies spielt allerdings keine Rolle, weil die hydraulische Aktuatorik nicht simuliert wird und demgemäß die aufgewandten Kräfte keine Aussagekraft haben.

Bei der Beurteilung der Modellgrenzen des Hydraulikmodells ist zwischen den Verstellpumpen und dem restlichen Hydrauliksystem zu unterscheiden. Das Modell der Verstellpumpen wurde von der Firma BOSCH REXROTH AG erstellt und validiert. Von den Verstellpumpen abgesehen wurde das Hydrauliksystem im Rahmen dieser Arbeit erstellt und ausschließlich anhand von Datenblättern parametrisiert. Das Verhalten des Gesamtsystems ist verifiziert, allerdings können quantitative Aussagen nur eingeschränkt getroffen werden.

Das Modell der Steuerung ist als Grundlage für die zu entwickelnde Maschinensteuerung anzusehen. Da die hydraulische Verstellpumpe validiert und das dazugehörige Hydrauliksystem vollständig simuliert wird, kann von einem realitätsnahen Systemverhalten ausgegangen werden. Somit kann an dieser Stelle auch eine Aussage über die Tauglichkeit der Steuerung getroffen werden. Da die Aktuatorik der Frischbetonventile nur vereinfacht abgebildet ist, kann die Steuerung an dieser Stelle nur eingeschränkt bewertet werden. Um die Belastbarkeit der Simulationsdaten im Hinblick auf die Steuerung zu erhöhen, muss das komplette Hydrauliksystem sowie Reaktions-, Rechen-, und Kommunikationszeiten detaillierter betrachtet werden.

[4, S. 32-37]

12.3 Analyse der Ergebnisse

Im Folgenden werden Ergebnisse der Simulation vorgestellt und analysiert. Im ersten Schritt wird die in der Simulation erzielte Fördergüte bei unterschiedlichen Förderströmen dargestellt und mit denen einer Schwenkrohr- und Rotorpumpe verglichen. Darauf folgend werden die entscheidenden Betriebs-

zustände Vorkompressionsphase und Überblendungsphase genauer betrachtet. Um ein übergreifendes Verständnis dieser unterschiedlichen Betrachtungsweisen der Konstantflussspumpe zu ermöglichen, werden die Analysen durchgehend mit den Frischbetonvolumenströmen von 80, 100 sowie dem maximal möglichen von 150 m³/h durchgeführt.

Erzielte Fördergüte bei unterschiedlichen Förderströmen

In Abbildung 12.5 ist der Frischbetondruck in den Förderzylindern über der Zeit aufgetragen.

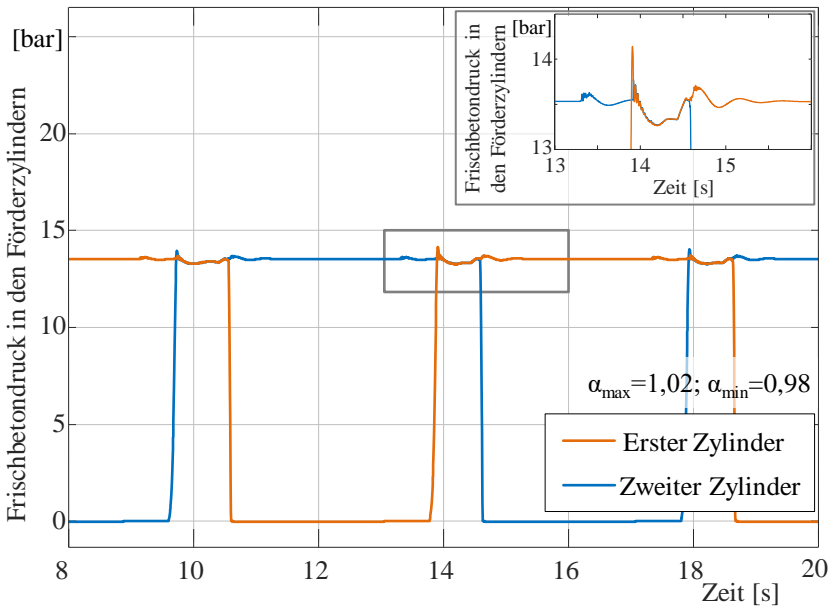


Abbildung 12.5: Simulierter Frischbetonförderdruck in den Förderzylindern über der Zeit für einen Soll-Förderstrom von 80 m³/h und einen Füllgrad von 90 % ohne VK-DBV [4, S. 33]

Auslassventil und Förderkolben sind derart aufeinander abgestimmt, dass die Förderzylinder ausschließlich bei hohem Druckniveau mit dem Auslass

verbunden sind. Die Einhüllende entspricht dem Förderdruck. Der Soll-Förderstrom wird im Folgenden mit $80 \text{ m}^3/\text{h}$ festgelegt, weil dieser in der Mitte des angestrebten Förderspektrums liegt. Die Gleichdruckphase ist dadurch gekennzeichnet, dass in beiden Förderzylindern Förderdruck herrscht. Während dieser Phase findet die Überblendung der Förderung statt (Vergleich: Taktdiagramm, Abbildung 11.2). Es ergibt sich eine Fördergüte von $\alpha_{\max} = 1,02$ und $\alpha_{\min} = 0,98$. Die ist im Vergleich zu Fördergüten konventioneller Kolbenpumpen sowie Rotorpumpen für Frischbeton eine deutliche Verbesserung ($\alpha_{\max} = 1,5$; $\alpha_{\min} = 0$; Vergleich Kapitel 2.2.2, S.14).

In der Simulation entspricht bereits aufgrund des unvermeidbaren Leckagestroms der Hauptpumpe der praktisch geförderte nicht dem Soll-Frischbetonstrom. Durch die simulierte Konstantflusspumpe kann maximal ein Soll-Frischbetonstrom von $150 \text{ m}^3/\text{h}$ gefördert werden. Dieser entspricht einem praktischen Frischbetonstrom von $144 \text{ m}^3/\text{h}$. Abbildung 12.6 zeigt den Frischbetondruck am Pumpenauslass über der Zeit für den maximal möglichen Förderstrom.

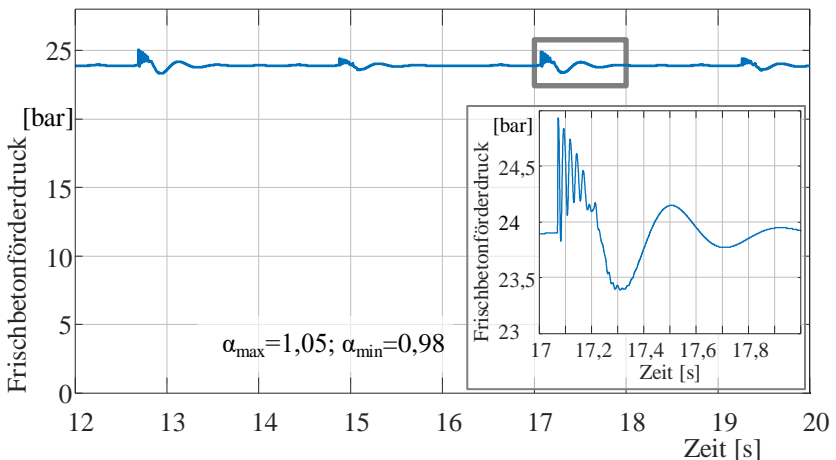


Abbildung 12.6: Simulierter Frischbetonförderdruck über der Zeit für einen Soll-Förderstrom von $150 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. einen praktischen Förderstrom von $144 \text{ m}^3/\text{h}$, Füllgrad 90 % mit VK-DBV und verkürzter Gleichhubphase [4, S. 34]

Die Erhöhung des Förderstroms führt zu einer Zunahme der Druckpulsation. Es wird eine Fördergüte von $\alpha_{\max} = 1,05$ und $\alpha_{\min} = 0,98$ erreicht. Somit liefert die Simulation den Nachweis der Tauglichkeit des Systems der Frischbetonpumpe zur Förderung eines konstanten Volumenstroms.

Vorkompressionsphase

Aus steuerungstechnischer, hydraulischer und mechanischer Sicht sind die Vorkompressionsphase und ihre Ausgestaltung von großer Bedeutung. Wenn das Zylindersegmentventil umgeschaltet wird, bevor der Frischbeton des gefüllten Förderzylinders vorkomprimiert wurde, ist mit einer erhöhten mechanischen Belastung des Ventils aufgrund der selbstverstärkenden Dichtung zu rechnen. Des Weiteren führt eine unzureichende Vorkompression zwangsläufig zu einer deutlichen Verschlechterung der Fördergüte.

Durch die Simulation wird gezeigt, dass abhängig vom Betriebszustand mithilfe des VK-DBVs die Vorkompressionsphase deutlich verkürzt werden kann. Dies hat zur Folge, dass eine langsame Sauggeschwindigkeit erzielt werden kann, wodurch wiederum ein höherer Füllgrad ermöglicht wird. Bei einem Förderstrom von beispielsweise $80 \text{ m}^3/\text{h}$ kann durch das VK-DBV die Sauggeschwindigkeit um 13 % abgesenkt werden ohne die Fördergüte negativ zu beeinflussen. Wenn allerdings hohe Förderströme gefordert werden, reicht die Zeit für einen Druckabbau mithilfe des VK-DBVs nicht aus. Der Geschwindigkeitsvorteil kommt demzufolge in erster Linie bei geringen Förderströmen zum Tragen.

Überblendungsphase

Da es während der Überblendungsphase zu Förderdruckschwankungen kommen kann, ist diese für die Fördergüte von wesentlicher Bedeutung. Aus diesem Grund wird die Überblendungsphase im Folgenden näher betrachtet.

Es wird eine kurze Überblendungsphase angestrebt, sodass für den Saughub ausreichend Zeit bleibt. Ein schneller Saughub führt voraussichtlich zu einer schlechteren Füllung des Förderzylinders, wodurch der Vorkompressionshub verlängert wird. Wird hingegen die Überblendung zu schnell durchgeführt, können die vorgegebenen Geschwindigkeiten der Förderkolben nicht

eingeregelt werden. Dies führt zu einem schwankenden Förderstrom und folglich zu einer Verschlechterung der Fördergüte. Nicht nur die Dauer, sondern auch die Synchronität der Überblendungsphase sind entscheidende Faktoren. Wenn beispielsweise die linke Fördereinheit 0,05 s vor der rechten Fördereinheit mit der Überblendungsphase beginnt, führt dies zu Druckschwankungen wie in Abbildung 12.7 dargestellt.

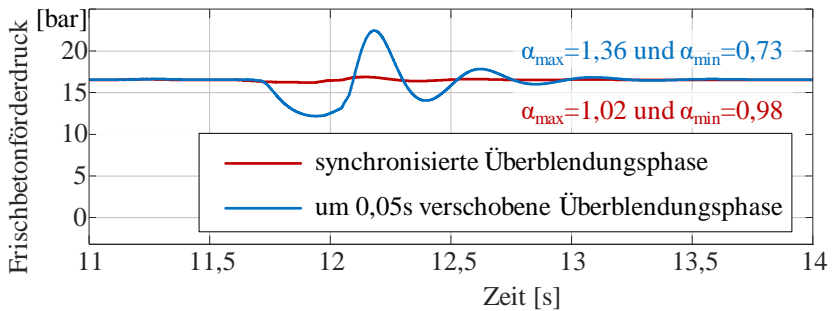


Abbildung 12.7: Simulierter Frischbetonförderdruck bei synchronisierter und um 0,05 s verschobener Überblendungsphase über der Zeit für einen Soll-Förderstrom von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ und Füllgrad von 90 % mit VK-DBV [4, S. 34]

Abschließend wird festgehalten, dass durch das Mehrdomönensystem beziehungsweise den virtuellen Prototypen die Fähigkeit des kompletten Pumpensystems zur nahezu konstanten Förderung von Frischbeton nachgewiesen wurde. Beispielsweise bei einem Soll-Förderstrom von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ und einem Füllgrad von 90 % wird eine Fördergüte von $\alpha_{\max} = 1,02$ und $\alpha_{\min} = 0,98$ erreicht. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Qualität der Überblendungsphase wie auch der Vorkompressionsphase erheblichen Einfluss auf die Fördergüte haben.

[4, S. 32-37]

13 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit liefert einen Beitrag zur Entwicklung von Konstantflussschlepppumpen für Frischbeton unter spezieller Betrachtung der Dickstoffventile.

Alle heute am Markt verfügbaren Frischbetonpumpen weisen eine Förderlücke auf. Demgemäß sind Förderstrom und –druck Schwankungen unterworfen. Diese Schwankungen wirken sich negativ auf Bedienqualität, Maschinenbelastung und Maschinenwirkungsgrad aus.

Im Rahmen dieser Arbeit war es erforderlich, zunächst eine Systematik zur Einteilung von Hubkolbenkonstantflussschlepppumpen zu entwickeln. Die Bewertung der verschiedenen Optionen führte zur Weiterverfolgung des Überblendungs-Prinzips mit druckdifferenzloser Primär-Ventildichtung als zielführend. Bei dem Überblendungs-Prinzip wird ein kontinuierlicher Förderstrom dadurch erreicht, dass es eine Überblendungsphase gibt. In dieser fängt der volle Förderzylinder bereits an zu fördern, während der Förderstrom des fast leeren Förderzylinders im gleichen Maße abnimmt. Die Summe der Förderströme ist konstant. Mithilfe der Analyse des Wesenskerns und eines morphologischen Kastens konnten mehrere prinzipielle Lösungen einer Konstantflussschlepppumpe für Frischbeton synthetisiert werden. Darauf folgend wurde geprüft, ob diese der Anforderungsliste gerecht werden und eine Bewertung vorgenommen. Die am besten geeignete prinzipielle Lösung verfügt über zwei Förderzylinder mit jeweils einem Einlassventil. Über die Einlassventile wird die Verbindung zwischen Frischbetonreservoir und den Förderzylindern freigegeben oder gesperrt. Der Auslass der beiden Förderzylinder zur Förderleitung wird über ein gemeinsames Auslassventil gewährleistet.

In der Situationsanalyse und Problemeingrenzung wurde herausgearbeitet, dass es kein Auslassventil für die Konstantflussschlepppumpe für Frischbeton gibt, welches die benötigte Funktionalität aufweist und allen in diesem Zusammenhang maßgeblichen Anforderungen gerecht wird. Des Weiteren war

festzustellen, dass die notwendige Fachkenntnis zur Konstruktion eines anforderungsgerechten, neuartigen Frischbetonventils fehlt.

Um das System Frischbetonventil und die an dieses gestellten Anforderungen zu verstehen, musste im ersten Schritt eine Analyse der verschiedenen Betriebszustände eines Ventils durchgeführt werden. Hierbei wurden die entscheidenden Funktionen identifiziert: *Dickstoff verdrängen*, *Fremdkörper überwinden* und *Dichtwirkung aufbauen*. Auf der Basis von theoretischen Vorüberlegungen der zu erwartenden Effekte konnte ein Prüfstand für Frischbetonventile entwickelt werden. Der statistischen Versuchsplanung folgten die Versuche zur Untersuchung der drei Teilfunktionen. Der Auswertung der Versuchsergebnisse diente die Anfertigung von Effektdiagrammen, ANOVA Analysen und Regressionen. Diese Auswertungen lieferten kausale Zusammenhänge zwischen den variierten Faktoren und den gemessenen Qualitätsmerkmalen. Hieraus ergibt sich ein Optimierungsproblem. Die Lösung des Optimierungsproblems wurde in sechs Leitregeln für die Konstruktion eines anforderungsgerechten Frischbetonventils zusammengefasst. Eine der Leitregeln besagt beispielsweise, dass, um den austretenden Leakagestrom des Ventils zu minimieren, die Dichtflächen Kontakt haben müssen. Die zwischen den Dichtflächen aufgebrauchte Pressung hat allerdings keinen Einfluss auf den Leakagestrom.

Mithilfe der Leitregeln konnte das Zylindersegmentventil entwickelt werden. Dieses erfüllt neben den erforschten Medienanforderungen auch diejenigen der Funktionalität und kann damit in der ausgewählten Lösung der Konstantflusspumpe für Frischbeton als zentrales Auslassventil eingesetzt werden. Danach wurde die Konstruktion sowie das Steuerungs- und Hydrauliksystem detailliert.

Die Simulation einer Konstantflusspumpe für Frischbeton erfolgte mithilfe einer Mehrdomänensimulation. Die Simulation besteht aus den vier Bereichen Mechanik, Hydraulik, Fördermedium und Steuerung. Die Simulation ergab bei einem Füllgrad von 90% und einem praktischen Förderstrom von 144 m³/h eine Fördergüte von $\alpha_{\max} = 1,05$ und $\alpha_{\min} = 0,98$. Bei konventionellen Kolben- sowie Rotorpumpen werden Fördergüten von $\alpha_{\max} = 1,5$ und $\alpha_{\min} = 0$ erreicht. Somit ist laut Simulation bei der entwickelten Konstantflusspumpe für

Frischbeton mit geringeren Einbrüchen sowie Überschwingern des Förderdrucks als bei konventionellen Pumpen zu rechnen. Die Simulation weist die grundsätzliche Tauglichkeit des gesamten Pumpensystems zur kontinuierlichen Förderung von Frischbeton nach.

Um die Funktion der Konstantflusspumpe für Frischbeton nachzuweisen und das Simulationsmodell zu validieren, muss im nächsten Schritt ein Funktionsmuster aufgebaut werden. Anhand dieses Funktionsmusters kann nicht nur die Funktionsweise der gesamten Frischbetonpumpe, sondern auch die des Zylindersegmentventils genauer untersucht werden. Hierdurch können auch die Forschungsergebnisse zu den Frischbetonventilfunktionen und die Leitregeln validiert werden.

Zu Beginn der Dissertation wurde das herausgearbeitete Forschungsdefizit in einer Forschungshypothese und fünf Forschungsfragen festgehalten. Die vorliegende Dissertation liefert einen Beitrag zur Beantwortung einer jeder dieser Forschungsfragen.

Literaturverzeichnis

- [1] s.n., „Autobetonpumpen: Die intelligenten Kraftpakete“, Putzmeister Concrete Pumps GmbH, Aichtal, 2017.
- [2] Putzmeister Concrete Pumps GmbH, „Putzmeister Post: Ausgabe 74“. Sonderausgabe zum Jubiläum 50 Jahre Putzmeister, Aichtal 74, 2008.
- [3] s.n., „Betontechnik: Maschinen zum Fördern und Pumpen von Beton“, Putzmeister Concrete Pumps GmbH, Aichtal, 2017.
- [4] F. Weber, T. Panitz und M. Geimer, „Konstantflusspumpe für Frischbeton“, *ATZoffhighway*, 6.2018, S. 28–35, 2018.
- [5] F. Weber, T. Panitz und M. Geimer, „Constant-flow Pump for Fresh Concrete“, *ATZ offhighway worldw (ATZoffhighway worldwide)*, 6.2018, S. 28–35, 2018.
- [6] G. Hudelmaier, „Betonpumpen mit 50 % Energieeinsparung“, *ATZoffhighway*, Jg. 2011, Sonderausgabe, S. 74–83, 2011.
- [7] L. Völkler und G. Hudelmaier, Fachtagung Baumaschinentechnik 14.+15. Mai 2009: *Optimierung einer Betonpumpe*, S. 191-202, Dresden, 2009.
- [8] Various, *12th International Conference on Mining with Backfill 2017: Pulsation Free Hydraulically Driven Piston Pump*, S. 319-328, *Denver, Colorado, USA, 19-22 February 2017*. Red Hook, NY: Curran Associates Inc, 2017.
- [9] C. Baum, „Umsetzung des Constant Flow Prinzips in einen funktionsfähigen Prototypen: Abschlussbericht für ein Entwicklungsprojekt gefördert unter dem Az. 27858 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt“. Abschlussbericht, Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2012.
- [10] H. Reiche, W. Berwanger, H. Duddeck, C. Erichsen und U. Estermann, *Taschenbuch für den Tunnelbau 1992: Kompendium der Tunnelbautechnologie Planungshilfe für den Tunnelbau*. Essen: Verlag Glückauf GmbH, 1992.
- [11] T. Hirschi *et al.*, „*Sika Betonhandbuch*“, Herausgeber: Sika Services AG, Zürich, 2004.

- [12] F. Weber, M. Geimer und C. Reck, „Zylindersegmentventil - entwickelt für partikelbeladene Dickstoffe“, *Industriearmaturen*, Jg. 2017, Nr. 2, 56-61, 2017.
- [13] K. Kasten, „Gleitrohr - Rheometer: Ein Verfahren zur Bestimmung der Fließeigenschaften von Dickstoffen in Rohrleitungen“. Dissertation, Institut für Baubetriebswesen, Dresden: Technische Universität Dresden, 2009.
- [14] Holcim (Deutschland) AG, *Betonpraxis - Der Weg zu dauerhaftem Beton*. Sehnde-Höver Niedersachsen, 2009, [e-book online verfügbar] abgerufen am 31.8.2020 <https://tb-nord.de/wp-content/uploads/2014/holcim-download/Betonpraxis.pdf>
- [15] Putzmeister Concrete Pumps GmbH, *Betontechnologie für Betonpumpen*. Aichtal, 2011.
- [16] *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton*, DIN 1045-2, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2001.
- [17] P. Schießl, „Betontechnologie: Spritzbeton“. Skriptum, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, Technische Universität München, München, 2005.
- [18] J. Höfler, J. Schlumpf, M. Jahn, „Sika Spritzbeton Handbuch“, Herausgeber: Sika Services AG, Zürich, 2012
- [19] EFNARC, *EFNARC RICHTLINIE FÜR SPRITZBETON: VORGEHEN BEIM EINBAU VON SPRITZBETON*. Franham, Vereinigtes Königreich, 1999.
- [20] T. H. Cooke, *Concrete pumping and spraying: A practical guide*, 1. Aufl. London: Telford, 1990.
- [21] K.-H. Grote und J. Feldhausen, *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, 22. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [22] S. Jacobsen, L. Haugan, T. A. Hammer und E. Kalogiannidis, „Flow conditions of fresh mortar and concrete in different pipes“, *Cement and Concrete Research*, Jg. 39, Nr. 11, S. 997–1006, 2009.
- [23] J. A. Grubb, H. S. Limaye und A. M. Kakade, „Testing pH of Concrete: Need for a standard procedure“, *Concrete international*, Jg. 2007, Nr. 4, S. 78–83, 2007.

- [24] J.-P. Wagner *et al.*, „Bluten von Frischbeton - Versuchsergebnisse mit dem Eimerverfahren des DBV-Merkblatts“, *beton*, Jg. 2007, Nr. 12, 2007.
- [25] „Das Pumpen von Beton: Die Entwicklung der Betonpumpe, Versuche mit derselben Betriebsanweisung für die Pumpe und Unterlagen zur Bestimmung der Pumpfähigkeit von Beton“. Dissertation, Technische Hochschule Stuttgart, Stuttgart, 1938.
- [26] A. Prawits, „Analyse der Betonschiebersysteme“, *BMT Baumaschine + Bautechnik*, Jg. 1985, Nr. 2, 55-66, 1985.
- [27] J. R. Illingworth, *Movement and Distribution of Concrete*. London: McGraw-Hill, 1972.
- [28] D. Kaplan, *Pompage des bétons*. Paris: Laboratoire central des ponts et chaussées, 2001.
- [29] M. ten Hompel, T. Schmidt, L. Nagel und R. Jünemann, *Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [30] K. Groth, G. Rinne und F. Hage, *Grundzüge des Kolbenmaschinenbaus II: Kompressoren*. Braunschweig: Vieweg Verlagsgesellschaft, 1995.
- [31] H. Sigloch, *Strömungsmaschinen: Grundlagen und Anwendungen ; mit 36 Tabellen*, 3. Aufl. München: Hanser, 2006.
- [32] R. Griemert und P. Römisch, *Fördertechnik: Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen*, 11. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [33] E. Bich und D. Kaselow, *Tiefbohrtechnik: Kolbenpumpen - Kreiselpumpen*. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1977.
- [34] K. Jämlich, „Herstellung von Extrudaten als Grundlage für Snackprodukte und gemahlene Zwieback“, Bachelorarbeit an Hochschule Neubrandenburg, Neubrandenburg, 2010, [e-book online verfügbar] abgerufen am 31.8.2020
https://digibib.hs-nb.de/file/dbhsnb_thesis_0000000739/dbhsnb_derivate_0000001130/Bachelorarbeit-Jmlich-2010.pdf
- [35] K. Hayashida, „Eine Untersuchung der rheologisch bedingten Vorgänge in Kunststoff-Schneckenpressen“, *Rheol Acta*, Jg. 2, Nr. 4, S. 261–273, 1962.

- [36] C. Rauwendaal, *Polymer Extrusion*, 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2014.
- [37] K. Groth, *Grundzüge des Kolbenmaschinenbaus III: Hydraulische Kolbenmaschinen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1996.
- [38] *Stetigförderer Teil 1: Benennungen*, DIN 15201, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1994.
- [39] W. Kalide und H. Sigloch, *Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen: Kolbenmaschinen - Strömungsmaschinen - Kraftwerke*, 10. Aufl. München: Hanser, 2010.
- [40] s.n., „TELEBELT TB 200: MOBILE TELESCOPIC BELT CONVEYOR“, Putzmeister America Inc., Sturtevant, 2013.
- [41] s.n., „LTB: Das Förderband für Fahrmischer“, Liebherr-Mischtechnik GmbH, Bad Schussenried, Germany, 2016.
- [42] Putzmeister Concrete Pumps GmbH, „Die Kolbenpumpe (S-Rohrweiche)“ [Online] abgerufen am 31.8.2020, <http://www.pumi.fr/de/web/europe/technology-detail?technologyProductId=4318959>
- [43] Putzmeister Concrete Pumps GmbH, „Die Rotorpumpe“ [Online] abgerufen am 31.8.2020, <http://www.pumi.fr/de/web/europe/technology-detail?technologyProductId=4318959>
- [44] H. Beitzel, „Systemspezifische Bewertung bei Schieberbauarten von Betonpumpen“, *BMT Baumaschine + Bautechnik*, Jg. 1983, Nr. 4, 169–173, 1983.
- [45] C.M.A. Vasques und J. Dias Rodrigues, Hg., *Vibration and Structural Acoustics Analysis*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011.
- [46] F. W. Priddy, “Concrete Pump System and Method”, Patent, US 8,827,657 B1, United States, Sep 9, 2014.
- [47] s.n., “Verfahren und Vorrichtung zum Fördern von Beton oder anderen Dickstoffen”, Patent, DE 195 03 986 A1, Deutschland DE 195 03 986 A1.
- [48] F. Schwing und S. Schwing, “Verfahren zur Förderung breiiger Massen und Pumpvorrichtungen zur Förderung breiiger Massen”, Patent, DE 10 2009 005 318 B3, Deutschland 10 2009 005 318.2, Sep 30, 2010.
- [49] F. Schwing und S. Schwing, “Verfahren zur Förderung breiiger Massen und Pumpvorrichtung zur Förderung breiiger Massen”, Patent, 10704309.3, Europa EP 2 387 667 B1, Nov 23, 2011.

- [50] F. Schwing und S. Schwing, "PUMP DEVICES FOR FEEDING PASTY MASSES", Patent, US 2016/0040659 A1, Unites States, Feb 11, 2016.
- [51] Weir Minerals Netherlands b.v., „Hydraulic driven piston pumps: First choice for paste pumping“, Herausgeber: Weir Minerals Netherlands b.v., Venlo, 2016, [e-book online verfügbar] abgerufen am 1.9.2020 <https://www.global.weir/assets/files/product%20brochures/brochure%20GEHO-DH-2016-WEB.pdf>
- [52] E. Vlot, Hg., „*Pulsation-Free, Hydraulically-Driven Piston Pump*“, Weir Minerals Netherland b.v. s.l., Minefill 2017: Proceedings of the 12th International Symposium on Mining with Backfill, ISBN: 978-1-5108-3581-8, Denver USA, 2017.
- [53] s.n., „Dickstoffpumpen HSP: Für feinkörnige Dickstoffe mit hohem Feststoffanteil“, Putzmeister Solid Pumps GmbH, Aichtal, 2014.
- [54] F. Schwing, "Zweizylinder-Dickstoffpumpe", Patent, DE 197 35 091 B4, Deutschland, Mrz 2, 2006.
- [55] M. Lenhart, "Kolben-Dickstoffpumpe mit kontinuierlichem Förderstrom", Patent, DE 103 43 802 B4, Deutschland, Dez 6, 2007.
- [56] M. Lenhart, "Kolben-Dickstoffpumpe", Patent, DE 10 2004 009 363 A1, Deutschland, Sep 15, 2005.
- [57] M. Lenhart, "Kolben-Dickstoffpumpe", Patent, DE 10 2004 009 362 B4, Deutschland, Jan 4, 2008.
- [58] F. Schwing, "Dickstoffpumpe, insbesondere für Beton", Patent, DE 29 09 964 A1, Deutschland, Sep 25, 1980.
- [59] G. Hudelmaier, "Verfahren und Vorrichtung zum Fördern von Beton oder anderen Dickstoffen", Patent, EP 0 808 422 B1, Europa 96901212.5, Jan 19, 1996.
- [60] G. Hudelmaier, "Dickstoffpumpe", Patent, Europa EP 1 599 672 B1, Nov 30, 2005.
- [61] Putzmeister Mörtelmaschinen GmbH, „P 13: Mischen - Pumpen - Spritzen“, Aichtal, 2017.
- [62] D. Yuan und C. Jinlong, "Pumping device and engineering machinery", Patent, WO 2013/023454 A1 PTC/CN2012/074041, Feb 21, 2013.

- [63] F. Schwing und S. Schwing, "Pumpvorrichtung und Verfahren zur kontinuierlichen Förderung breiiger Massen", Patent, DE 10 2005 008 938 B4, Deutschland 26.02.2005, Jan 25, 2007.
- [64] A. Caban, "Valve assembly for concrete pumps", Patent, US 3,963,385, United States 574,298, Jun 15, 1976.
- [65] R. Hager, "Pumping apparatus", Patent, US 3,311,065, United States 404,109, Mrz 28, 1967.
- [66] R. Kroupa, *Ventiltechnologie im Anlagenbau*. Weinheim: VCH, 1994.
- [67] H. J. Kecke und P. Kleinschmidt, *Industrie-Rohrleitungsarmaturen*. Düsseldorf: VDI-Verl., 1994.
- [68] *Armaturen – Terminologie: Teil 1: Definition der Grundbauarten*, DIN EN 736-1, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [69] s.n., *Sitzventil*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.hawe.com/de-de/fluidlexikon/sitzventil/>. Zugriff am: Okt. 01 2018.
- [70] W. Volk, *Absperrorgane in Rohrleitungen*. Berlin: Springer-Verlag, 1959.
- [71] s.n., „Solids handling pumps KOV: For high-pressure slurry pumping“, Putzmeister Solid Pumps GmbH, Aichtal, 2014.
- [72] s.n., *Long-stroke pumpkits: Efficient and economical*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.schwing.de/en/technik/pumpkit/>. Zugriff am: Feb. 23 2018.
- [73] s.n., „Thomsen's all new "OPERATOR HAPPY": HP 800 SERIES“, Royal Industries Thomsen Division, Gardena, California, USA HP81174, 1974.
- [74] W. Steinhilper, B. Sauer und A. Albers, *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*, 7. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [75] C. Nacke, U. Hornig und F. Dehn, „Selbstdichtungsverhalten von Trennrissen in Stahlbetonkonstruktionen unter Einwirkung von landwirtschaftlichen Flüssigkeiten“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 109, Nr. 8, S. 516–523, 2014.
- [76] J. Roloff, „Untersuchungen über die Filterkuchenstruktur bei der dynamischen Filtration von Betonsuspensionen sowie über die Filterkuchenabtragung mit oberflächenaktiven und abrasiv wirkenden

- Waschflüssigkeiten“. Dissertation, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal, Clausthal, 1969.
- [77] U. Hornig, H. Meichsner und H.-D. Wolf, „Aus der Forschung: Selbstdichtung von Trennrissen in Arbeitsfugen“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 1998, Nr. 8, S. 35–240, 1998.
- [78] M. Kraume, *Verfahrenstechnik: Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [79] K.-H. Grote und J. Feldhusen, Hg., *Dubbel*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [80] S. Köstler, „Verfahren und Vorrichtung zum Schleusen von pulverförmigem und körnigem Material bei Druckdifferenz“. Dissertation, Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen-Nürnberg, 1991.
- [81] C. Tien, *Principles of filtration*, 1. Aufl. Boston: Elsevier Science, 2012.
- [82] T. Sparks, *Solid-liquid filtration: A user's guide to minimizing cost and environmental impact; maximizing quality and productivity*, 1. Aufl. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [83] H. K. Mueller, *Abdichtung bewegter Maschinenteile: Funktion, Gestaltung, Berechnung, Anwendung*. Waiblingen: Medienverlag, 1990.
- [84] H. K. Müller und B. S. Nau, *Fluid sealing technology: Principles and applications*. New York, NY: M. Dekker, 1998.
- [85] H. K. Müller und W. Haas, „Dichtungstechnik“. Skript, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2015.
- [86] G. Kunze, H. Göhring und K. Jacob, *Baumaschinen: Erdbau- und Tagebaumaschinen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [87] K. Ebenhan, „Mechanischer Eingriff hochfrequent aktivierter Werkzeuge in Festgestein“, Stiftungsprofessur für Baumaschinen, Technische Universität Dresden, Dresden, 2012.
- [88] D. Kolymbas, *Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [89] R. Bürgel, H. A. Richard und A. Riemer, *Werkstoffmechanik: Bauteile sicher beurteilen und Werkstoffe richtig einsetzen*, 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.

- [90] H. Blumenauer und G. Pusch, *Technische Bruchmechanik: Mit 48 Tabellen*. Leipzig, Stuttgart, Weinheim: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie; Wiley-VCH, 2001.
- [91] D. Gross und T. Seeliger, *Bruchmechanik: Mit einer Einführung in die Mikromechanik*, 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [92] D. Reinsch, *Natursteinkunde: Eine Einführung für Bauingenieure, Architekten, Denkmalpfleger und Steinmetze*. Stuttgart: Enke, 1991.
- [93] M. Curbach, „Festigkeitssteigerung von Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten“, Dissertation, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1987.
- [94] A. Albers, N. Reiss, N. Bursac und J. Breitschuh, Hg., „15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development“, NordDesign 10th - 12th August 2016, ISBN 978-1-904670-80-3, Trondheim Norway, 2016.
- [95] J. Feldhusen und K.-H. Grote, *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [96] *Konstruktionsmethodik: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*, VDI 2222, ICS 03.100.40, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1996.
- [97] S. White, *Anatomy of the Mud Pump Pulse: Pulsation analysis and dampeners can help minimize damage to sensitive drilling equipment*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.upstreampumping.com/article/drilling/anatomy-mud-pump-pulse>. Zugriff am: Jun. 24 2018.
- [98] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen und K.-H. Grote, *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung*, 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [99] M. Meier, „Prinzipielle Gesamtlösung, the key to innovation: Vorlesungsskript ZPE, Version 2002, 1. Semester“. Vorlesungsskript, Zentrum für Produkte-Entwicklung, ETH Zürich, Zürich, 2002.
- [100] G. Pahl und W. Beitz, *Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung*, 4. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1997.
- [101] *Konstruktionsmethodik: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, Technisch-wirtschaftliche Bewertung*, VDI 2225, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1998.

- [102] M. Werdich, *FMEA – Einführung und Moderation: Durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung*, 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- [103] A. Albers, B. Nikola, E. Wintergerst, „Produktgenerationsentwicklung - Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive“, Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP): Stuttgart, 19. Juni 2015 ; Hrsg.: H. Binz, 1–10, Fraunhofer Verl., Stuttgart
- [104] W. Eifler, E. Schlücker, U. Spicher und G. Will, *Küttner Kolbenmaschinen: Mit 40 Tabellen sowie zahlreichen Übungen und Beispielen mit Lösungen*, 7. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [105] U. Störk, „Verschleiß selbsttätiger Ventile oszillierender Verdrängerpumpen mit abrasiven Suspensionen“. Dissertation, Lehrstuhl für Apparatetechnik und Chemiemaschinenbau, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen-Nürnberg, 1988.
- [106] K. Arief, „Frischbetonventileffekte: Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung mittels statistischer Versuchsplanung“. Masterarbeit, Teilinstitut für Mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2017.
- [107] C. Reck, „Frischbetonventileffekte: Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung mittels statistischer Versuchsplanung“. Masterarbeit, Hochschule Mannheim, Mannheim, 2017.
- [108] s.n., „S-Rohr-Verschleißteile: Abgehärtet und langlebig“, Putzmeister Concrete Pumps GmbH, Aichtal, 2012.
- [109] C. Spengler, „Entwicklung und Konstruktion eines Prüfstandes zur Untersuchung von Effekten in Frischbetonventilen“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2016.
- [110] K. Siebertz, D. van Bebbber und T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Heidelberg: Springer, 2010.
- [111] W. Kleppmann, *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*, 8. Aufl. München: Hanser, 2013.
- [112] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. Hoboken NJ: John Wiley & Sons Inc, 2013.

- [113] M. Gröger, „Systemintegrierte Analyse konkurrierender Energieversorgungsoptionen auf kommunaler Ebene“. Studie, Logos Verlag Berlin GmbH, Leipzig.
- [114] s.n., *Support für Minitab 18: Interpretieren aller Statistiken für Regression der besten Teilmengen*. [Online] Verfügbar unter: <https://support.minitab.com/de-de/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/how-to/best-subsets-regression/interpret-the-results/all-statistics/#r-sq-pred>. Zugriff am: Jan. 26 2018.
- [115] B. Klein, *Versuchsplanung - DoE: Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik*, 4. Aufl. Berlin: De Gruyter, 2014.
- [116] s.n., *Support für Minitab 18: Wiederholungen und Replikationen in Versuchsplänen*. [Online] Verfügbar unter: <https://support.minitab.com/de-de/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/basics/replicates-and-repeats-in-designed-experiments/>. Zugriff am: Feb. 02 2018.
- [117] S. Meyer, Hg., *Technik Jahrbuch Industriearmaturen Dichtungen 2018*, 1. Aufl. Essen: Vulkan-Verlag GmbH, 2018.
- [118] F. Weber, „Dickstoffventil“, Patent, WO 2018/029099 A1, Feb 15, 2018.
- [119] F. Weber, „Ventil mit schwenkbarem Ventilglied“, Patent, EP 3 282 155 A1, Feb 14, 2018.
- [120] H. J. Matthies und K. T. Renius, *Einführung in die Ölhydraulik*, 7. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012.
- [121] *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, VDI 2206, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2004.
- [122] K. Krenzer, J. Lipowsky, R. Lohse und H. Schäler, „Studie zur Modellbildung bei der Simulation des Herstellungs- und Verarbeitungsverhaltens von Betongemengen: Abschlussbericht 1333“. FVB-Studie, IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH, Weimar, Apr. 2013.
- [123] M. Rabe, S. Spiekermann und S. Wenzel, *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [124] *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*, VDI 3633, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2013.

Eigene Veröffentlichungen zur Dissertation

- [4] F. Weber, T. Panitz und M. Geimer, „Konstantflusspumpe für Frischbeton“, *ATZoffhighway*, 6.2018, S. 28–35, 2018.
- [5] F. Weber, T. Panitz und M. Geimer, „Constant-flow Pump for Fresh Concrete“, *ATZ offhighway worldw (ATZoffhighway worldwide)*, 6.2018, S. 28–35, 2018.
- [12] F. Weber, M. Geimer und C. Reck, „Zylindersegmentventil - entwickelt für partikelbeladene Dickstoffe“, *Industriearmaturen*, Jg. 2017, Nr. 2, 56-61, 2017.
- [118]F. Weber, “Dickstoffventil,” WO 2018/029099 A1, Feb 15, 2018.
- [119]F. Weber, “Ventil mit schwenkbarem Ventilglied,” EP 3 282 155 A1, Feb 14, 2018.

Betreute studentische Abschlussarbeiten

Die folgenden betreuten Abschlussarbeiten sind frei zugänglich

- [106] K. Arief, „Frischbetonventileffekte: Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung mittels statistischer Versuchsplanung“. Masterarbeit, Teilinstitut für Mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2017.
- [107] C. Reck, „Frischbetonventileffekte: Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung mittels statistischer Versuchsplanung“. Masterarbeit, Hochschule Mannheim, Mannheim, 2017.
- [109] C. Spengler, „Entwicklung und Konstruktion eines Prüfstandes zur Untersuchung von Effekten in Frischbetonventilen“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2016.

Die folgende betreute Abschlussarbeit hat einen Sperrvermerk

T. Panitz, „Modellbildung und Simulation eines neuartigen Pumpprinzips für Frischbeton zur Untersuchung der steuerungstechnischen Machbarkeit“. Masterarbeit, Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2017.

Die Ergebnisse dieser Masterarbeit wurden in den Veröffentlichungen [4] und [5] veröffentlicht.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Frischbetonförderdruck einer S-Rohrpumpe und einer Rotorpumpe über der Zeit	1
Abbildung 2.1: Sieblinien mit einem Größtkorn von 31,5 mm [16, S. 47]	7
Abbildung 2.2: Spritzbetonapplikation.....	8
Abbildung 2.3: Radialer Schnitt durch den Betonstrang	10
Abbildung 2.4: Systematik der Fördermittel	12
Abbildung 2.5: Kolbenpumpe mit Schwenkrohrventil (Schnittansicht).....	15
Abbildung 2.6: Realer Förderzylinder.....	16
Abbildung 2.7: Rotorpumpe (Schnittansicht).....	17
Abbildung 2.8: Prinzip nach (US 8,827,657 B1 [46]) bzw. nach (EP 0 808 422 B1 [59])	20
Abbildung 2.9: Prinzip nach (DE 10 2009 005 318 B3 [48]).....	21
Abbildung 2.10: Arbeitsablauf der Konstantflusspumpe für Frischbeton nach [6, S. 82]	22
Abbildung 2.11: Frischbetonpumpe nach GIESE und HELL; (a) technische Zeichnung des Funktionsprinzips [25, S. 5]; (b) Foto der Frischbetonpumpe [2, S. 14]	23
Abbildung 2.12: Systematik der Ventile	26
Abbildung 2.13: Ventile für Dickstoff und Frischbeton.....	29
Abbildung 2.14: Leckagestrom über der Zeit durch einen 0,3 mm hohen, 200 mm langen und 500 mm breiten Spalt bei einer Druckdifferenz von 0,025 MPa mit und ohne Dichtungsschlämme (vereinfachte Legende [77, S. 240]; [sic] Darstellung korrigiert).....	33
Abbildung 2.15: Durchströmung von Feststoffschüttungen.....	35

Abbildung 2.16: Oberflächenfiltration; (a) Prinzip der Kuchenfiltration; (b) Dicke der Deckschicht und spezifischer Filtratfluss über der Filtrationsdauer [78, S. 279].....	36
Abbildung 2.17: Axial-Gleitringdichtung (Burgmann). 1 rotierender Gleitring, 2 stationärer Gegenring, 3 Druckfeder, 4 Unterlegling, 5 Dichtring, 6 Lagerring [21, S. K24].....	37
Abbildung 2.18: physikalische Größen an Dichtspalten; (a) gerader Dichtspalt; (b) ringförmiger Dichtspalt.....	38
Abbildung 2.19: Pressungsverlauf (p_k) und Verlauf des stat. Drucks (p_1 , p_2) im Dichtspalt eines GLRD	39
Abbildung 2.20: Belastungsgeschwindigkeitsabhängige Steineigenschaften	42
Abbildung 2.21: Zerstörungsmechanismen von Fremdkörpern im Dichtspalt eines Dickstoffventils mit dazugehörigem Mohr'schen Spannungskreis	42
Abbildung 2.22: Rahmenscherverfahren.....	43
Abbildung 2.23: Prinzipskizze des Punktlastversuchs [88, S. 161].....	44
Abbildung 5.1: Systematik der Hubkolbenkonstantflusspumpen.....	52
Abbildung 5.2: Beispiele für Primäre-, Sekundäre- und Primär- Sekundäre-Ventildichtungen.....	54
Abbildung 6.1: Input-Output-Modell des Wesenskerns der Konstantflusspumpe (angelehnt an [88, S. 240])	58
Abbildung 6.2: Funktionsstruktur der Konstantflusspumpe nach dem Input-Output-Modell [95, 244, 345], [96, S. 17].....	59
Abbildung 6.3: Pumpensystem der zweiten prinzipiellen Lösung	63
Abbildung 6.4: Arbeitsablauf der zweiten prinzipiellen Lösung.....	64
Abbildung 6.5: Konstruktive Detaillierung der zweiten prinzipiellen Lösung	65
Abbildung 6.6: Pumpensystem der fünften prinzipiellen Lösung	66
Abbildung 6.7: Arbeitsablauf der fünften prinzipiellen Lösung.....	67

Abbildung 6.8: Konstruktive Detaillierung der fünften prinzipiellen Lösung.....	68
Abbildung 8.1: Pumpensystem einer Frischbetonpumpe mit Schwenkrohrventil	75
Abbildung 9.1: Analyse der in einem sich schließenden Dickstoffventil ablaufenden Prozesse (in Anlehnung an [12, S. 58])	80
Abbildung 9.2: Analyse der in einem sich öffnenden Dickstoffventil ablaufenden Prozesse	82
Abbildung 9.3: Schneidring mit Strahlverschleiß (PUTZMEISTER ENGINEERING GMBH).....	83
Abbildung 9.4: Dichtkuchenmodell; Modell des Aufbaus eines Dichtkuchens vor und im Dichtspalt bei selbstdichtendem Material	85
Abbildung 9.5: Druckverlauf über die Dichtspaltbreite; (a) Wasser (nach [74, S. 217]); (b) Frischbeton (Annahme)	86
Abbildung 9.6: Steinverfahren; Vorgehensweisen zur Überwindung sich im Dichtspalt befindlicher Partikel [12, S. 58]	87
Abbildung 9.7: Kraft über den Abstand der Scherkanten bzw. der Zerdrückflächen; jeweils fünf feste 32 mm Steine zerdrückt und abgesichert	88
Abbildung 9.8: Verschlissener Rotorpumpenschlauch.....	89
Abbildung 9.9: Handbetätigtes Sperrventil	90
Abbildung 9.10: Abstraktion des ringförmigen Dichtspalts und der Abscherkante des Frischbetonventils zum Prüfstand	93
Abbildung 9.11: Prüfstand für Frischbetonventilfunktionen; (a) Foto; (b) Rendering des CAD-Modells (basierend auf betreuter Abschlussarbeit [109])	94
Abbildung 9.12: Prüfstand für Frischbetonventilfunktionen (Rahmenkonstruktion nicht dargestellt) mit Detailaufnahmen des Abschermoduls und des Dichtmoduls.....	95

Abbildung 9.13: Geschnittener Prüfstand für Frischbetonventilfunktionen (Rahmenkonstruktion nicht dargestellt) mit Dichtmodul	96
Abbildung 9.14: Geschnittener Prüfstand für Frischbetonventilfunktionen (Rahmenkonstruktion nicht dargestellt) mit Abschermodul	98
Abbildung 9.15: Versuchsplan <i>neu</i> ; Effektdiagramm mit Boxplots (Rohdaten aus betreuter Abschlussarbeit [107, 66, 76, 80])	107
Abbildung 9.16: Versuchsplan <i>verschlissen</i> ; Effektdiagramm mit Boxplots (Rohdaten aus betreuter Abschlussarbeit [107, 66, 76, 80])	108
Abbildung 9.17: Versuchsplan <i>kombiniert</i> ; Effektdiagramm mit Boxplots (Rohdaten aus betreuter Abschlussarbeit [107, 66, 76, 80])	109
Abbildung 9.18: Verläufe des Flüssigkeitsdrucks über den Dichtspalt (In Erweiterung zu betreuter Abschlussarbeit [107, S. 88-91] und [12, S. 60])	119
Abbildung 9.19: Generisches Kraft-Weg-Diagramm zur Erläuterung der durch die Kraftmessdose aufgenommenen Verschiebekraft $F_{\text{ver, KMD}}$ und Brechkraft $F_{\text{br, KMD}}$	125
Abbildung 9.20: Kräfte an einem sich zwischen den Schnittkanten befindlichen Stein (korrigierte Fassung von betreuter Abschlussarbeit [106, S. 81])	126
Abbildung 9.21: Vorgehen zum Auftrennen der Messungen in die Qualitätsmerkmale Brechwahrscheinlichkeit und resultierende Brechkraft ^{WB}	126
Abbildung 9.22: Qualitätsmerkmal Verschiebeenergie; Effektdiagramm mit Boxplots (Rohdaten aus betreuter Abschlussarbeit [106, S. 63, 74, 82, 90])	131
Abbildung 9.23: Qualitätsmerkmal resultierende Brechkraft ^{WB} ; Effektdiagramm mit Boxplots (Rohdaten aus betreuter Abschlussarbeit [106, S. 63, 74, 82, 90])	132

Abbildung 9.24: Qualitätsmerkmal Brechwahrscheinlichkeit; Effektdiagramm mit Boxplots; vierstufiger Faktor Brechtwahrscheinlichkeit (0° , 45°) (Rohdaten aus betreuter Abschlussarbeit [106, S. 63, 74, 82, 90])	134
Abbildung 10.1: Das Zylindersegmentventil (angelehnt an [12, S. 60] und [67, S. 150])	151
Abbildung 10.2: Die drei Schaltstellungen des Zylindersegmentventils [12, S. 61].....	151
Abbildung 10.3: Der verschleißnachstellende Stellkörper mit selbstverstärkender Dichtung (angelehnt an [12, S. 60])	152
Abbildung 11.1: Konstantflusspumpe	156
Abbildung 11.2: Taktdiagramm der Konstantflusspumpe mit Zeiten und Phasen (in Anlehnung an [4, S. 30])	158
Abbildung 11.3: Legende der Prinzipskizzen aus Abbildung 11.4	159
Abbildung 11.4: Steuerungsablauf der Konstantflusspumpe [4, S. 31].....	160
Abbildung 11.5: Plan der Hydraulik zum Antrieb der Förderkolben [4, S. 32]	164
Abbildung 11.6: Plan des Hydraulikkreises zur Betätigung der Frischbetonventile	166
Abbildung 12.1: Simulink-Modell eines Differentialzylinders der Pumpe	169
Abbildung 12.2: Simulierte Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Antriebskolben über die Zeit für einen idealen Förderstrom von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ und einem Füllgrad von 90 % ohne VK-DBV	173
Abbildung 12.3: Simulierter Mediumdruck über den Hub des Förderkolbens für ideale Förderströme von 80 und $100 \text{ m}^3/\text{h}$ und 90 % Füllgrad mit VK-DBV [4, S. 33]	174
Abbildung 12.4: Simulierte Volumenströme in das Auslassventil und aus diesem heraus sowie die Ventilstellung über die Zeit für einen idealen Förderstrom von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ und einem Füllgrad von 90 % mit VK-DBV	175

Abbildung 12.5: Simulierter Frischbetonförderdruck in den Förderzylindern über der Zeit für einen Soll-Förderstrom von 80 m ³ /h und einen Füllgrad von 90 % ohne VK-DBV [4, S. 33].....	178
Abbildung 12.6: Simulierter Frischbetonförderdruck über der Zeit für einen Soll-Förderstrom von 150 m ³ /h bzw. einen praktischen Förderstrom von 144 m ³ /h, Füllgrad 90 % mit VK-DBV und verkürzter Gleichhubphase [4, S. 34].....	179
Abbildung 12.7: Simulierter Frischbetonförderdruck bei synchronisierter und um 0,05 s verschobener Überblendungsphase über der Zeit für einen Soll-Förderstrom von 100 m ³ /h und Füllgrad von 90 % mit VK-DBV [4, S. 34].....	181
Abbildung A.1: Aufbau und Funktionsweise der Primär-Ventildichtung eines Schwenkrohrventils	213
Abbildung A.2: Mit dem Druckmodul und der Druckmessdose in dem Förderzylinder gemessene Mediumdrücke über der Zeit; W/Z-Wert von 0,45	216
Abbildung A.3: Mit dem Druckmodul und der Druckmessdose in dem Förderzylinder gemessene Mediumdrücke über der Zeit; W/Z-Wert von 0,55	216
Abbildung A.4: Mit dem Druckmodul und der Druckmessdose in dem Förderzylinder gemessene Mediumdrücke über der Zeit.....	217
Abbildung A.5: Qualitätsmerkmal Brechwahrscheinlichkeit; Effektdiagramm mit Boxplots; vierstufiger Faktor Brechwahrscheinlichkeit (0°, 15°, 30°, 45°)	218

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Auszug der Anforderungsliste; Hauptaufgabe der Konstantflusspumpe für Frischbeton (nach [96, S. 14]).....	48
Tabelle 6.1: Morphologischer Kasten mit beispielhaft eingezeichneter Wirkstruktur Nr. 2 und Nr. 5; angelehnt an [96, S. 19]	61
Tabelle 7.1: Bewertung der prinzipiellen Lösungen der Konstantflusspumpe für Frischbeton (in Anlehnung an [98, S. 287]; Hauptaufgabe Ha, Nebenaufgabe Na).....	72
Tabelle 7.2: Produkt-FMEA Konstantflusspumpe für Frischbeton; erstellt in 21 Terminen 20.5.2016 – 4.11.2016; multidisziplinäres Team aus Putzmeister Engineering GmbH (in Anlehnung an FMEA Formblatt VDA [102, S. 233])	74
Tabelle 9.1: Verstellbare Faktoren, Messgrößen und technische Prüfstandsdaten des Dichtmoduls	97
Tabelle 9.2: Verstellbare Faktoren, Messgrößen und tech. Prüfstandsdaten des Abschermoduls	99
Tabelle 9.3: Frischbetonventilfunktion Dichtung aufbauen; Faktoren des Prozesses und des Mediums (in Anlehnung an betreute Abschlussarbeit [107, 50, 54, 60]).....	101
Tabelle 9.4: Überblick der Faktoren und Versuchspläne (in Anlehnung an betreute Abschlussarbeit [107, S. 60- 80]).....	103
Tabelle 9.5: Versuchspläne zur Untersuchung der Frischbetonventilfunktion Dichtwirkung aufbauen.....	105
Tabelle 9.6: ANOVA der ausgewählten Regression für den Versuchsplan neu	113
Tabelle 9.7: Regressionskennzahlen und Residuendiagramm der ausgewählten Regression für den Versuchsplan neu.....	114

Tabelle 9.8: ANOVA der ausgewählten Regression für den
 Versuchsplan verschlissen 115

Tabelle 9.9: Regressionskennzahlen und Residuendiagramm der
 ausgewählten Regression für den Versuchsplan verschlissen 116

Tabelle 9.10: ANOVA der ausgewählten Regression für den
 Versuchsplan kombiniert 117

Tabelle 9.11: Regressionskennzahlen und Residuendiagramm der
 ausgewählten Regression für den Versuchsplan kombiniert 118

Tabelle 9.12: Frischbetonventilfunktion Fremdkörper abscheren;
 Faktoren der Konstruktion und des Mediums (in
 Anlehnung an betreute Abschlussarbeit [106, S. 51-54]) 123

Tabelle 9.13: Versuchsplan zur Untersuchung der
 Frischbetonventilfunktionen Dickstoff verdrängen und
 Fremdkörper abscheren (in Anlehnung an betreute
 Abschlussarbeit [106, S. 57-58]) 129

Tabelle 9.14: Perzentile des Qualitätsmerkmals Verschiebeenergie 131

Tabelle 9.15: Perzentile des Qualitätsmerkmals resultierende
 Brechkraft^{WB} 133

Tabelle 9.16: ANOVA des Qualitätsmerkmals Verschiebeenergie 135

Tabelle 9.17: Regressionskennzahlen und Residuendiagramm der
 ausgewählten Regression für das Qualitätsmerkmal
 Verschiebeenergie 136

Tabelle 9.18: ANOVA des Qualitätsmerkmals resultierende
 Brechkraft^{WB} 137

Tabelle 9.19: Regressionskennzahlen und Residuendiagramm der
 ausgewählten Regression für das Qualitätsmerkmal
 resultierende Brechkraft^{WB} 138

Tabelle 9.20: ANOVA des Qualitätsmerkmals
 Brechwahrscheinlichkeit (0°, 45°) 139

Tabelle 9.21: Regressionskennzahlen und Residuendiagramm der
 ausgewählten Regression für das Qualitätsmerkmal
 Brechwahrscheinlichkeit (0°, 45°) 140

Tabelle 9.22: Zusammenfassung der Erkenntnisse über die
 Frischbetonventilfunktionen zu einem
 Optimierungsproblem; Teil 1 144

Tabelle 9.23: Zusammenfassung der Erkenntnisse über die
 Frischbetonventilfunktionen zu einem
 Optimierungsproblem; Teil 2 145

Tabelle 10.1: Auszug der Anforderungsliste des
 Frischbetonauslassventils (nach [96, S. 14]). 150

A Anhang

A.1 Anforderungsliste der Konstantflussspumpe für Frischbeton

Tabelle A.1: Anforderungsliste der Konstantflussspumpe für Frischbeton; Teil 1 (nach [96, S. 14])

Registrierungsnummer		Produkt:		Bearbeiter:		Datum:		Blatt:	
-		Konstantflussspumpe für Frischbeton		Weber		2.10.2015 (erstellt)		1	
Anforderungsliste I									
Gliederungsteil		Anforderungen				Zugriffsteil			
Aufgabenart	Aufgabenbereich	Beschriebene Angaben (qualitativ)			Zahlenangabe (quantitativ)	Anforderungsart	Quelle		
		Nr.	1	2	3		Sachunterlage	Person	
Hauptaufgabe	Druckpulsation / Betriebsweise	1.	Fördergüte von $\alpha_{max} < 1,2$ und $\alpha_{min} > 0,8$ in bestimmten Betriebspunkten (z.B. bei niedrigen und mittleren Förderströmen)			Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.	
		2.	Fördergüte von $\alpha_{max} < 1,2$ und $\alpha_{min} > 0,8$ im kompletten Betriebsspektrum (z.B. auch bei großen Förderströmen)			Wu	Zielvereinb.	P.M. / R.W.	
	pumpbares Material	3.		Beton mit einem Größtkorn von 32 mm pumpbar		Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.	
	Förderdruck	4.		85 bar Beton		Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.	
	Förderstrom	5.	Durch Förderleitung			Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.	
		6.		150 m ³ /h Beton		Fo		P.M. / R.W.	
Nebenaufgabe	Bauraum	7.	Einhaltung des Bauraums der aktuellen Betonpumpe			Wu	Zielvereinb.	P.M. / R.W. / D.J.	
		8.	Einfallhöhe des Trichters wie bei momentaner Betonpumpe	ca. 1450 mm		Wu		C.S.	
		9.	aufzeigen, dass nach einer Überarbeitung der Bauraum einer aktuellen Betonpumpe eingehalten werden kann			Fo		F.W.	
	Kosten	10.	Einhaltung der Produktionskosten der aktuellen Betonpumpe			Wu	Zielvereinb.	P.M. / R.W.	
	Lebensdauer	11.	Funktionsmuster: Bauteile müssen eine derart lange Lebensdauer aufweisen, dass ein Funktionsnachweis möglich ist			Fo		P.M.	
		12.	Funktionsmuster: Bauteile müssen eine derart lange Lebensdauer aufweisen, dass Aussagen über das Verschleißverhalten der Pumpe abgeleitet werden können			Wu		P.M.	

Tabelle A.2: Anforderungsliste der Konstantflusspumpe für Frischbeton; Teil 2 (nach [96, S. 14])

Registriernummer -		Produkt: Konstantflusspumpe für Frischbeton		Bearbeiter: Weber	Datum: 2.10.2015 (erstellt)	Blatt: 2	
Anforderungsliste I							
Gliederungsteil		Anforderungen			Zugriffsteil		
Aufgabenart	Aufgabenbereich	Beschriebene Angaben (qualitativ)		Zahlenangabe (quantitativ)	Anforderungsart	Quelle	
		Nr.	1			2	3
Nebenaufgaben	Lebensdauer	13.	aufzeigen, dass nach einer Überarbeitung die Lebensdauer der Gesamtpumpe vergleichbar mit der momentanen S-Rohrpumpe sein kann		Fo		F.W.
		14.	aufzeigen, dass nach einer Überarbeitung die Lebensdauer der Verschleißteile vergleichbar mit der momentanen S-Rohrpumpe sein kann		Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
	Leistungsangebot	15.	Leistungsangebot eines Lkws nicht überschreiten		Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
	Maschinengewicht	16.	Einhaltung des Gewichts der aktuellen Betonpumpe		Wu	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
		17.	aufzeigen, dass nach einer Überarbeitung das Gewicht vergleichbar mit der momentanen S-Rohrpumpe sein kann		Fo		P.M.
	Maschinenkomplexität / Bauteilanzahl	18.	Maschinenkomplexität und Bauteilanzahl so gering wie möglich halten		Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
	Reinigungsfreundlichkeit	19.	Sicherstellung der Reinigungsfreundlichkeit		Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
		20.	Trichter muss komplettes Förderrohrvolumen + Volumen eines Förderzylinders aufnehmen können	500 - 850 l Trichtervolumen	Fo		R.W.
	Verfügbarkeit	21.	Verfügbarkeit der Komponenten entsprechend der Komponenten des aktuellen Systems		Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
	Zuverlässigkeit	22.	Zuverlässigkeit entsprechend der Komponenten des aktuellen Systems		Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
Wartungsfreundlichkeit	23.	möglichst wenige Verschleißteile		Wu		F.W.	
	24.	möglichst leicht austauschbare Verschleißteile		Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.	
	25.	aufzeigen, dass nach einer Überarbeitung ein Mobilschmiersystem für die zu schmierenden Stellen eingesetzt werden kann		Fo		F.W.	

A.2 Aufbau und Funktionsweise der Primär-Ventildichtung eines Schwenkrohrventils

Die Primär-Ventildichtung eines Schwenkrohrventils der Bauart S-Rohrweiche besteht aus dem S-Rohr, einem Schneidring, einem Automatikring und einer Verschleißbrille. Der Schneidring steckt auf der Öffnung des S-Rohrs und ist axial beweglich.

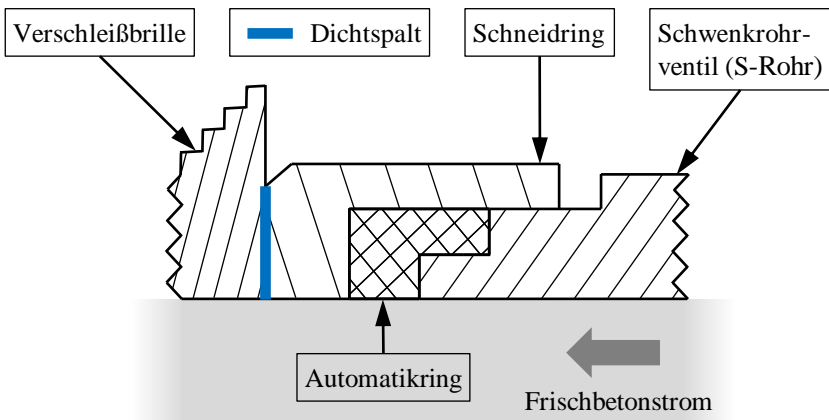


Abbildung A.1: Aufbau und Funktionsweise der Primär-Ventildichtung eines Schwenkrohrventils

Im montierten, drucklosen Zustand ist der Automatikring leicht gequetscht und presst den Schneidring auf die Verschleißbrille auf. Wenn der Frischbeton im Innern des S-Rohrs unter Druck steht wird dieser an den Automatikring weitergegeben und sorgt für einer Verstärkung der Pressung zwischen Schneidring und Verschleißbrille.

A.3 Übersicht aller Wirkstrukturen der Konstantflusspumpe für Frischbeton

Die Lösungen sind mithilfe der Kriterien *Anordnung der Förderzylinder*, *Art der Ventilkopplung* und *Ventilanordnung* kategorisiert.

Tabelle A.3: Übersicht aller Wirkstrukturen

Anordnung FZ	Ventilkopplung	Ventilanordnung	Nr.
Serielle Förderzylinder			
	Zwei einzelne, verschiebbare Ventile		
		Ventilkolbenpumpe	WS1
		Ventilrohrepumpe	WS2
Parallele Förderzylinder			
	Vier einzelne Ventile		
		4-Ventil-Pumpe	WS3
	Gekoppelte Zugänge oder Abgänge		
		Jeweils Ein- und Ausgang eines FZ gekoppelt	WS4
		Zwei einzelne Zugangsventile mit zentralem Ausgang	WS5
		Zwei einzelne Ausgangsventile mit zentralem Zugang	WS6
	Zentrales Schaltorgan		
		Zentrales Schaltorgan mit positiver Überdeckung zum Einlass	WS7
		Zentrales Schaltorgan mit negativer Überdeckung zum Einlass und zusätzlichem Einlassventil	WS8

A.4 Frischbetonrezepturen der Versuche

Tabelle A.4: Im Rahmen der Versuche verwendete Frischbetonrezepturen (eigene Darstellung nach betreuter Abschlussarbeit [107, S. AII])

Sieblinie		Grob (AB)		Fein (BC)		Grob (AB)		Fein (BC)		
		Menge	Anmerkungen	Menge [kg]	Anmerkungen	Menge [kg]	Anmerkungen	Menge [kg]	Anmerkungen	
W/Z-Wert	Stoff									
W/Z 0,45	0/0,25	1,03 kg		1,50 kg		1,26 kg		2,37 kg		
	0,25/0,5	1,58 kg	Bei gebrochenem Korn addieren > Größe 0,3/0,8	2,21 kg	Bei gebrochenem Korn addieren > Größe 0,3/0,8	1,58 kg	Bei gebrochenem Korn addieren > Größe 0,3/0,8	2,05 kg	Bei gebrochenem Korn addieren > Größe 0,3/0,8	
	0,5/1	1,54 kg		2,09 kg		1,58 kg		2,21 kg		
	Zement 2,92 kg	1/2		2,37 kg		2,37 kg		1,42 kg		1,73 kg
	Wasser 1,31 l	2/4	3,71 kg		3,23 kg		1,58 kg		1,89 kg	
		4/8	5,56 kg		4,38 kg		2,37 kg		1,89 kg	
		8/16					2,84 kg		1,89 kg	
		16/32					3,15 kg		1,73 kg	
		Ausbreitmaß	45 cm		45 cm		51 cm		49 cm	
		Fließmittel	50 ml		60 ml		30 ml		80 ml	
Stabilisator		30 ml		30 ml		20 ml		20 ml		
W/Z 0,55	0/0,25	1,03 kg		1,50 kg		1,26 kg		2,37 kg		
	0,25/0,5	1,58 kg	Bei gebrochenem Korn addieren > Größe 0,3/0,8	2,21 kg	Bei gebrochenem Korn addieren > Größe 0,3/0,8	1,58 kg	Bei gebrochenem Korn addieren > Größe 0,3/0,8	2,05 kg	Bei gebrochenem Korn addieren > Größe 0,3/0,8	
	0,5/1	1,54 kg		2,09 kg		1,58 kg		2,21 kg		
	Zement 2,92 kg	1/2		2,37 kg		2,37 kg		1,42 kg		1,73 kg
	Wasser 1,60 l	2/4	3,71 kg		3,23 kg		1,58 kg		1,89 kg	
		4/8	5,56 kg		4,38 kg		2,37 kg		1,89 kg	
		8/16					2,84 kg		1,89 kg	
		16/32					3,15 kg		1,73 kg	
		Ausbreitmaß	48 cm		51 cm		53 cm		57 cm	
		Fließmittel	20 ml		35 ml		15 ml		30 ml	
Stabilisator		45 ml		30 ml		30 ml		20 ml		
Pflichtbedingung: Slipertest fällt mit 3*6,1kg positiv aus!										
ACHTUNG: Maximal 87,5g Fließmittel! (0,2-3 Masse-% des Zementes)										

A.5 Messschriebe zum Flüssigkeits- und Gesteinsdruck

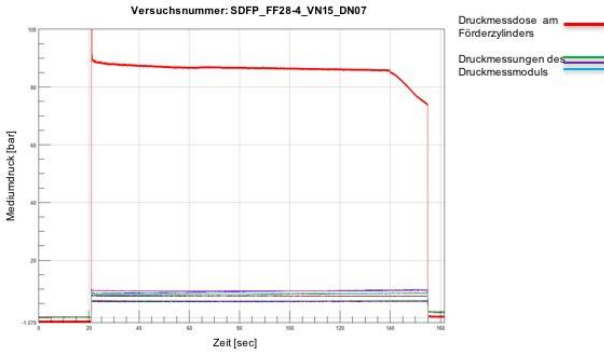


Abbildung A.2: Mit dem Druckmodul und der Druckmessdose in dem Förderzylinder gemessene Mediumdrücke über der Zeit; W/Z-Wert von 0,45; SDFP_FF28-4_VN15_DN07 (betreute Abschlussarbeit [107, S. 93])

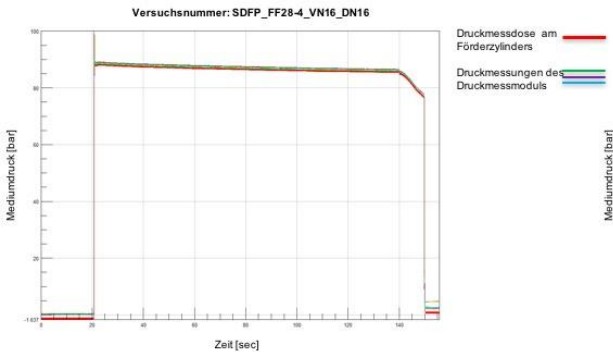


Abbildung A.3: Mit dem Druckmodul und der Druckmessdose in dem Förderzylinder gemessene Mediumdrücke über der Zeit; W/Z-Wert von 0,55; SDFP_FF28-4_VN16_DN16 (betreute Abschlussarbeit [107, S. 93])

A.6 Messschrieb zum zeitlichen Aufbau des Flüssigkeitsdrucks

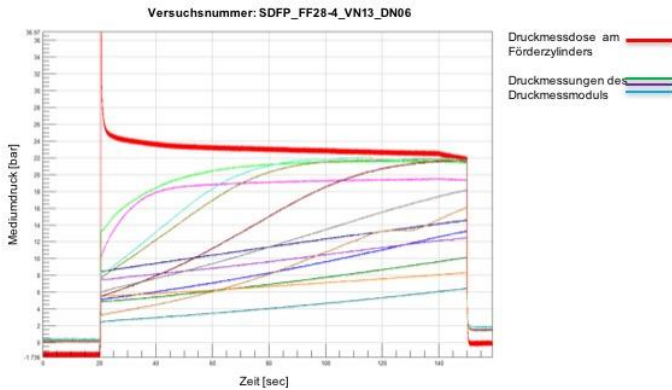


Abbildung A.4: Mit dem Druckmodul und der Druckmessdose in dem Förderzylinder gemessene Mediumdrücke über der Zeit; SDFP_FF28-4_VN13_DN06 (betreute Abschlussarbeit [107, S. 95])

A.7 Auswertung der Brechwahrscheinlichkeit bei vierstufigem Schnittkantenwinkel

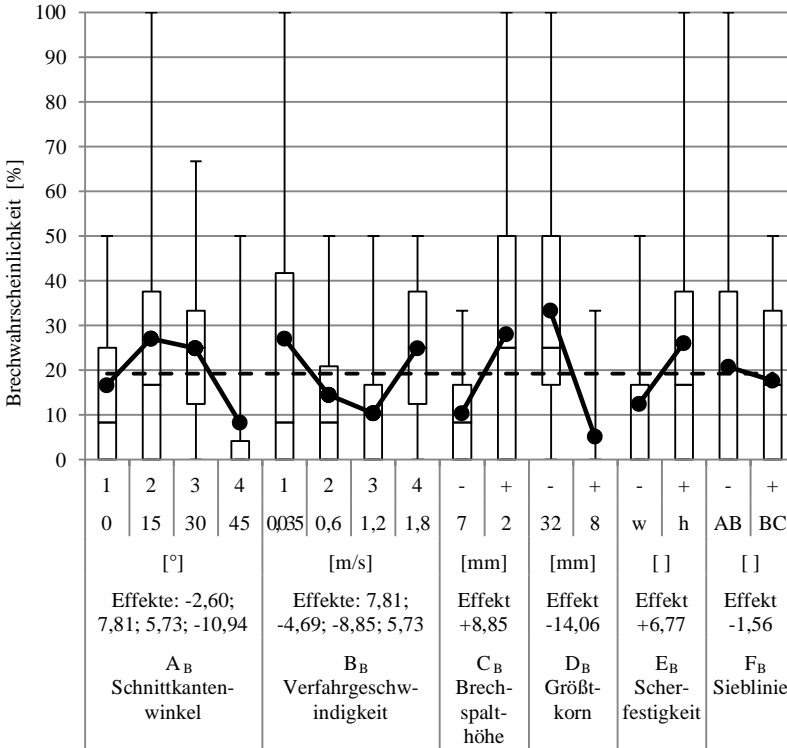
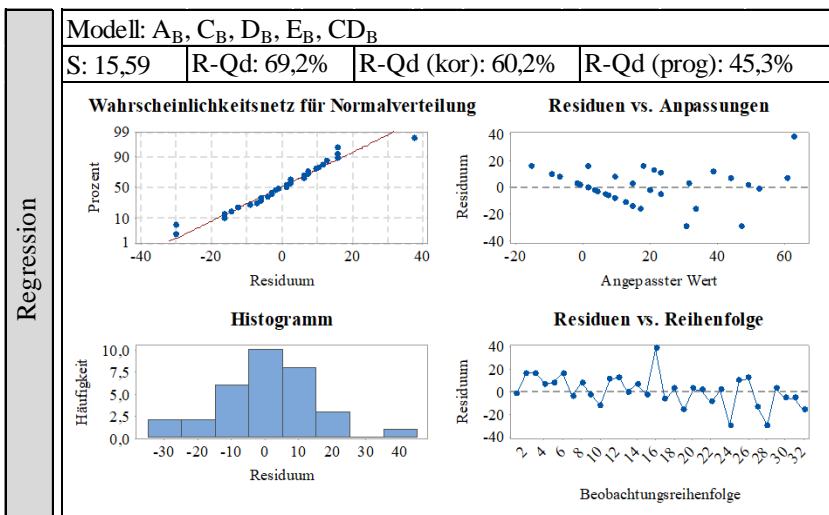


Abbildung A.5: Qualitätsmerkmal Brechwahrscheinlichkeit; Effektendiagramm mit Boxplots; vierstufiger Faktor Brechwahrscheinlichkeit (0°, 15°, 30°, 45°)

Tabelle A.5: ANOVA des Qualitätsmerkmals „Brechtwahrscheinlichkeit“ (0°, 15°, 30°, 45°)

ANOVA	Faktor	R-Qd	DF	SSB	MS	F	p
	Spalte	1	2	3	4	5	6
	A _B : Schnittkantenw.	9,30%	3	1762,2	587,4	2,42	0,091
	B _A : Verfahrensgeschwindigkeit	8,20%					
	C _B : Brechspalthöhe	13,24%	1	2508,7	2508,7	10,32	0,004
	D _B : Größtkorn	33,39%	1	6328,1	6328,1	26,04	3E-05
	E _B : Materialhärte	7,74%	1	1467,0	1467,0	6,04	0,022
	F _B : Sieblinie	0,41%					
	CD _B = ...	5,54%	1	1050,3	1050,3	4,32	0,048
	Error		24	5833,3	243,1		
Total		31	18949,7				
Error (%-Total)			30,8%				

Tabelle A.6: Regressionskennzahlen und Residuendiagramm der ausgewählten Regression für das Qualitätsmerkmal „Brechtwahrscheinlichkeit“ (0°, 15°, 30°, 45°)



A.8 Anforderungsliste des Frischbetonauslassventils

Tabelle A.7: Anforderungsliste des Frischbetonauslassventils; Teil I (nach [96, S. 14])

Registriernummer -		Produkt: Frischbetonauslassventil		Bearbeiter: Weber		Datum: 9.12.2015 (erstellt)		Blatt: 1	
Anforderungsliste II									
Gliederungsteil		Anforderungen				Zugriffsteil			
Aufgabenart	Aufgabenbereich	Beschriebene Angaben (qualitativ)		Zahlenangabe (quantitativ)	Anforderungsart	Quelle		Sachunterlage	Person
		Nr.	1			2	3		
Hauptaufgabe	Durchfluss und Leckage	1.	Druchfluss beeinflussen: absperren oder ermöglichen		Fo				F.W.
		2.		In Schaltstellung "Duchfluss ermöglichen" einen geringen Strömungswiderstand für einen Förderstrom von 150 m³/h Beton verursachen	Wu				F.W. / P.M. / R.W.
		3.	In Schaltstellung "abgesperrt" eine technische Dichtigkeit erzielen		Fo				F.W.
		4.	Leckage durch die Dichtung des Betätigungsmechanismuses nach außen so gering halten, dass diese keine technischen Auswirkung hat bzw. eine Spüleinrichtung vorsehen		Fo				F.W.
	Medium	5.		Den mechanischen Belastungen, welche aus einem Größtkorn von bis zu 32 mm resultieren standhalten.	Fo	Zielvereinb.			P.M. / R.W.
		6.	Toträume vermeiden, sodass das aushärtende Medium sich nicht ablagert		Fo				
		7.	Konstruktion dem abrasiven Materialverhalten anpassen		Fo				
	Förderdruck	8.		Einem beidseitigen Druck von bis zu 85 bar standhalten	Fo	Zielvereinb.			P.M. / R.W.
		9.		Einer Druckdifferenz von bis zu 85 bar standhalten	Fo	Zielvereinb.			P.M. / R.W.
	Nebenaufgabe	Bauraum	10.	Ermöglichen, dass der Bauraum der aktuellen Betonpumpe - von welche das Frischbetonauslassventil ein Teil ist - eingehalten wird		Wu			
11.			aufzeigen, dass nach einer Überarbeitung der Konstantflusspumpe - von welcher das Frischbetonauslassventil ein Teil ist - der Bauraum einer aktuellen Betonpumpe eingehalten werden kann		Fo				F.W.

Tabelle A.8: Anforderungsliste des Frischbetonauslassventils; Teil 2 (nach [96, S. 14])

Registriernummer -		Produkt: Frischbetonauslassventil		Bearbeiter: Weber		Datum: 2.10.2015 (erstellt)		Blatt: 2			
Anforderungsliste II											
Gliederungsteil		Anforderungen				Zugriffsteil					
Aufgabenart	Aufgabenbereich	Beschriebene Angaben (qualitativ)		Zahlenangabe (quantitativ)	Anforderungsart	Quelle					
		Nr.					Sachunterlage	Person			
Nebenaufgaben	Kosten	12.	Die Produktionskosten der Konstantflusspumpe - von welcher das Frischbetonauslassventil ein Teil ist - sollen denen der aktuellen Betonpumpe entsprechen	2	3	4	5	Wu	Zielvereinb.	P.M. / R.W.	
		13.	Funktionsmuster: Bauteile müssen eine derart lange Lebensdauer aufweisen, dass ein Funktionsnachweis möglich ist					Fo		P.M.	
		14.	Funktionsmuster: Bauteile müssen eine derart lange Lebensdauer aufweisen, dass Aussagen über das Verschleißverhalten der Pumpe abgeleitet werden können						Wu		P.M.
	Lebensdauer	15.	aufzeigen, dass nach einer Überarbeitung die Lebensdauer der Gesamtpumpe vergleichbar mit der momentanen S-Rohrpumpe sein kann						Fo		F.W.
		16.	aufzeigen, dass nach einer Überarbeitung die Lebensdauer der Verschleißteile vergleichbar mit der momentanen S-Rohrpumpe sein kann						Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
		17.	Einhaltung des Gewichts der aktuellen Betonpumpe						Wu	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
	Maschinengewicht	18.	aufzeigen, dass nach einer Überarbeitung das Gewicht vergleichbar mit der momentanen S-Rohrpumpe sein kann						Fo		P.M.
		19.	Maschinenkomplexität und Bauteilanzahl so gering wie möglich halten						Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
	Reinigungsfreundlichkeit	20.	Sicherstellung der Reinigungsfreundlichkeit						Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
	Verfügbarkeit	21.	Verfügbarkeit der Komponenten entsprechend der Komponenten des aktuellen Systems						Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
	Zuverlässigkeit	22.	Zuverlässigkeit entsprechend der Komponenten des aktuellen Systems						Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
	Wartungsfreundlichkeit	23.	möglichst wenige Verschleißteile						Wu		F.W.
		24.	möglichst leicht austauschbare Verschleißteile						Fo	Zielvereinb.	P.M. / R.W.
		25.	aufzeigen, dass nach einer Überarbeitung ein Mobilschmiersystem für die zu schmierenden Stellen eingesetzt werden kann						Fo		R.W.

Auf nahezu jeder Baustelle sind mobile Frischbetonpumpen unterschiedlicher Bauart anzutreffen. Einen Nachteil haben alle Bauarten gemein: eine Förderlücke.

In dieser Arbeit wird eine Vielzahl an prinzipiellen Lösungen für eine Frischbetonkonstantflusspumpe entwickelt, welche nach dem Überblendungs-Prinzip arbeiten. Bekannte, zyklisch betätigte Frischbetonventile eignen sich für das angestrebte Pumpsystem nicht. Das Frischbetonventil stellt sich damit als die eigentliche Herausforderung heraus.

Um ein neuartiges Frischbetonventil entwickeln zu können, wird das hierfür benötigte Fachwissen aufgebaut. Die Ventilfunktionen werden analysiert und somit die entscheidenden identifiziert. Die drei entscheidenden Ventilfunktionen werden mithilfe eines Prüfstands untersucht. Die mithilfe der statistischen Versuchsplanung und -auswertung ermittelten zahlreichen Kausalitäten bilden ein Optimierungsproblem. Nach dessen Lösung wird auf dem erlangten Wissen basierend exemplarisch das Zylindersegmentventil entwickelt.

Mithilfe des Zylindersegmentventils wird die bevorzugte prinzipielle Lösung ausgewählt und deren Mechanik, Hydraulik sowie Steuerung entwickelt. Durch eine Mehrdomänensimulation wird die Funktionalität des Gesamtsystems verifiziert und gebietsweise validiert.

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 1** Urs Wiesel
Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsparung im schweren Nutzfahrzeug. 2010
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2** Andreas Huber
Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrtriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladers. 2010
ISBN 978-3-86644-564-2
- Band 3** Maurice Bliesener
Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen. Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement. 2010
ISBN 978-3-86644-536-9
- Band 4** Manuel Boog
Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslastfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten. 2011
ISBN 978-3-86644-600-7
- Band 5** Christian Kraft
Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich. 2011
ISBN 978-3-86644-607-6
- Band 6** Lars Völker
Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation. 2011
ISBN 978-3-86644-611-3
- Band 7** 3. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 17. Februar 2011, Karlsruhe. 2011
ISBN 978-3-86644-599-4

- Band 8** Vladimir Iliev
Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs. 2011
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz
Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk. 2011
ISBN 978-3-86644-701-1
- Band 10** Phillip Thiebes
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. 2012
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler
Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis. 2012
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies
Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen. 2012
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber
Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz. 2012
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik. 27./28. September 2012 in Karlsruhe.** 2012
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** 4. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen 20. Februar 2013, Karlsruhe. 2013
ISBN 978-3-86644-970-1
- Band 16** Hans-Joachim Unrau
Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen. 2013
ISBN 978-3-86644-983-1

- Band 17** nicht erschienen
- Band 18** Stefanie Grollius
Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells. 2013
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke
Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. 2013
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr
Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch. 2014
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova
Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme. 2014
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt
Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. 2014
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann
Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System. 2014
ISBN 978-3-7315-0187-9
- Band 24** Roman Weidemann
Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger. 2014
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei
Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. 2014
ISBN 978-3-7315-0232-6
- Band 26** David Schmitz
Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren. 2014
ISBN 978-3-7315-0264-7

- Band 27** Christian Schwab
Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte. 2014
ISBN 978-3-7315-0281-4
- Band 28** Peter Dengler
Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung. 2015
ISBN 978-3-7315-0295-1
- Band 29** Manuel Bös
Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen. 2015
ISBN 978-3-7315-0310-1
- Band 30** 5. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 25. Februar 2015, Karlsruhe. 2015
ISBN 978-3-7315-0323-1
- Band 31** Michael Eckert
Energieoptimale Fahrdynamikregelung mehrmotoriger Elektrofahrzeuge. 2015
ISBN 978-3-7315-0332-3
- Band 32** Martin Scherer
Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen. Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung mit aufgeprägtem Volumenstrom. 2015
ISBN 978-3-7315-0339-2
- Band 33** Rinaldo Arnold
Automatische Abstimmung der Sekundärseite eines dreiphasigen Systems zur berührungslosen induktiven Energieübertragung. 2015
ISBN 978-3-7315-0355-2
- Band 34** Johannes Gültlinger
Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen. 2015
ISBN 978-3-7315-0358-3

- Band 35** Thorsten Dreher
Energieeffizienz von Konstantdrucksystemen mit sekundärregelten Antrieben beim Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen. 2015
ISBN 978-3-7315-0377-4
- Band 36** Steffen Kölling
Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation von Stromabnehmern. 2015
ISBN 978-3-7315-0387-3
- Band 37** Michael Fritz
Entwicklungswerkzeuge für die Fahrzeugklimatisierung von Nutzfahrzeugen. 2015
ISBN 978-3-7315-0384-2
- Band 38** Ralf Oberfell
Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug. Ein einsatzorientiertes Bewertungs- und Optimierungsverfahren. 2015
ISBN 978-3-7315-0403-0
- Band 39** Christoph Sturm
Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger. 2015
ISBN 978-3-7315-0404-7
- Band 40** Florian Netter
Komplexitätsadaption integrierter Gesamtfahrzeugsimulationen. 2016
ISBN 978-3-7315-0414-6
- Band 41** Markus Springmann
Auslegung eines asynchronen Langstatorlinearmotors mit großem Luftspalt als Straßenbahnantrieb. 2015
ISBN 978-3-7315-0418-4
- Band 42** Alexander Basler
Eine modulare Funktionsarchitektur zur Umsetzung einer gesamtheitlichen Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge. 2015
ISBN 978-3-7315-0421-4
- Band 43** Hans-Georg Wahl
Optimale Regelung eines prädiktiven Energiemanagements von Hybridfahrzeugen. 2015
ISBN 978-3-7315-0422-1

- Band 44** Jennifer Heck
Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen. 2016
ISBN 978-3-7315-0443-6
- Band 45** Moritz Vaillant
Design Space Exploration zur multikriteriellen Optimierung elektrischer Sportwagenantriebsstränge: Variation von Topologie und Komponenteneigenschaften zur Steigerung von Fahrleistungen und Tank-to-Wheel Wirkungsgrad. 2016
ISBN 978-3-7315-0452-8
- Band 46** Philip Nagel
Entwicklung einer Betriebsstrategie zur Energierückgewinnung in hybriden Mehrverbrauchersystemen. 2016
ISBN 978-3-7315-0479-5
- Band 47** Matthias Pfriem
Analyse der Realnutzung von Elektrofahrzeugen in kommerziellen Flotten zur Definition einer bedarfsgerechten Fahrzeugauslegung. 2016
ISBN 978-3-7315-0489-4
- Band 48** Mohanad El-Haji
Ontologie-basierte Definition von Anforderungen an Validierungswerkzeuge in der Fahrzeugtechnik. 2016
ISBN 978-3-7315-0496-2
- Band 49** **9. Kolloquium Mobilhydraulik**
22./23. September 2016 in Karlsruhe. 2016
ISBN 978-3-7315-0573-0
- Band 50** 6. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 15. Februar 2017, Karlsruhe. 2017
ISBN 978-3-7315-0601-0
- Band 51** Fabian Schirmaier
Experimentelle Untersuchung und Simulation des Umformverhaltens nähgewirkter unidirektionaler Kohlenstofffasergelege. 2017
ISBN 978-3-7315-0620-1
- Band 52** Mathias Cabrera Cano
Neuronale Netze mit externen Laguerre-Filtern zur automatischen numerischen Vereinfachung von Getriebemodellen. 2017
ISBN 978-3-7315-0621-8

- Band 53** Arwed Schmidt
Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr. 2017
ISBN 978-3-7315-0633-1
- Band 54** Katharina Knaisch
Untersuchung von Spulensystemen zur induktiven Energieübertragung von Elektrofahrzeugen. Vergleich von Topologien und Entwicklung einer Auslegungsmethodik. 2017
ISBN 978-3-7315-0630-0
- Band 55** Frank Christof Stalter
Ansätze zur akustischen Optimierung von Reifen und Fahrbahnen für Elektrofahrzeuge unter Antriebsmoment. 2017
ISBN 978-3-7315-0645-4
- Band 56** Steffen Rose
Modellbildung und Simulation von mobilen Arbeitsmaschinen. Untersuchungen zu systematischen Modellvereinfachungen in der Simulation von Antriebssystemen am Beispiel Bagger. 2017
ISBN 978-3-7315-0684-3
- Band 57** Ulrich Peckelsen
Objective Tyre Development. Definition and Analysis of Tyre Characteristics and Quantification of their Conflicts. 2017
ISBN 978-3-7315-0713-0
- Band 58** Stefan Haag
Sequentieller Versuch zur HiL-unterstützten Validierung hybrider Antriebssysteme mit gekoppelten Antriebseinheiten. 2018
ISBN 978-3-7315-0752-9
- Band 59** Dirk Hülsebusch
Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung - Analyse und Optimierung der Fahrsicherheit. 2018
ISBN 978-3-7315-0755-0
- Band 60** Christian Pohlandt
Intelligentes Gesamtmaschinenmanagement für elektrische Antriebssysteme. 2018
ISBN 978-3-7315-0774-1
- Band 61** Oliver Maier
Modellbasierte Entwicklung eines aktiven Sicherheitssystems für elektrifizierte Fahrräder. 2018
ISBN 978-3-7315-0778-9

- Band 62** Stephan Rhode
Robust and Regularized Algorithms for Vehicle Tractive Force Prediction and Mass Estimation. 2018
ISBN 978-3-7315-0807-6
- Band 63** Péter Megyesi
Methode zur Einbindung realer Nutzerprofile in die ökologische und ökonomische Bewertung von Fahrzeugkonzepten. 2018
ISBN 978-3-7315-0808-3
- Band 64** Benedikt Reick
Methode zur Analyse und Bewertung von stufenlosen Traktorgetrieben mit mehreren Schnittstellen. 2018
ISBN 978-3-7315-0815-1
- Band 65** Matthias Graf
Entwicklung und Validierung einer neuen Methode zur Charakterisierung des Scherverhaltens von Carbonfasergewebe mit Binderauftrag unter Normalkraft und viskoser Reibung bei hohen Prozesstemperaturen. 2018
ISBN 978-3-7315-0838-0
- Band 66** Christoph Kühn
Simulation von Fahrspielen und Energieflüssen in Nahverkehrssystemen. 2018
ISBN 978-3-7315-0740-6
- Band 67** 7. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 20. Februar 2019, Karlsruhe. 2019
ISBN 978-3-7315-0873-1
- Band 68** Oliver Krauss
Experimentelle Untersuchungen zum Innengeräusch von Fahrzeugluftreifen. 2019
ISBN 978-3-7315-0867-0
- Band 69** Tristan Reich
Beurteilung der Prüfprozesseignung bei Fahrzeugversuchen mit mobilen Arbeitsmaschinen. 2019
ISBN 978-3-7315-0848-9
- Band 70** Matthias Bürckert
Realitätsnahe Bewertung des Einflusses der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf den maximalen Reibschluss zwischen Reifen und Fahrbahn. 2019
ISBN 978-3-7315-0891-5

- Band 71** Matthias Greiner
Verfahren zur Prädiktion des Rollwiderstands bei variablen Betriebsparametern auf Basis standardisierter Rollwiderstandsmessungen. 2019
ISBN 978-3-7315-0898-4
- Band 72** David Hummelberger
Hybride Werkstoffsysteme: Systematische Betrachtung und Bewertung der physikalischen Wirkmechanismen. 2019
ISBN 978-3-7315-0901-1
- Band 73** Michael Kerber
Analyse dynamischer Reifeneigenschaften und deren Auswirkung auf den Schwingungskomfort. 2019
ISBN 978-3-7315-0944-8
- Band 74** Kilian Berthold
Techno-ökonomische Auslegungsmethodik für die Elektrifizierung urbaner Busnetze. 2019
ISBN 978-3-7315-0953-0
- Band 75** Bernd Wassertheurer
Reifenmodellierung für die Fahrdynamiksimulation auf Schnee, Eis und nasser Fahrbahn. 2019
ISBN 978-3-7315-0957-8
- Band 76** Kai-Lukas Bauer
Echtzeit-Strategieplanung für vorausschauendes automatisiertes Fahren. 2020
ISBN 978-3-7315-0949-3
- Band 77** Thomas Schirle
Systementwurf eines elektromechanischen Fahrwerks für Megacitymobilität. 2020
ISBN 978-3-7315-0995-0
- Band 78** Dominik Dörr
Simulation of the thermoforming process of UD fiber-reinforced thermoplastic tape laminates. 2020
ISBN 978-3-7315-0998-1
- Band 79** Dominik Robert Naake
Simulation of damage mechanisms in weave reinforced materials based on multiscale modeling. 2020
ISBN 978-3-7315-1005-5

- Band 80** Martin Hohberg
Experimental investigation and process simulation of the compression molding process of Sheet Molding Compound (SMC) with local reinforcements. 2020
ISBN 978-3-7315-1007-9
- Band 81** Benedikt Fengler
Manufacturing-constrained multi-objective optimization of local patch reinforcements for discontinuous fiber reinforced composite parts. 2020
ISBN 978-3-7315-1006-2
- Band 82** Johannes Masino
Road Condition Estimation with Data Mining Methods using Vehicle Based Sensors. 2020
ISBN 978-3-7315-1004-8
- Band 83** **11. Kolloquium Mobilhydraulik**
10. September 2020, Karlsruhe. 2020
ISBN 978-3-7315-1036-9
- Band 84** Felix Weber
Beitrag zur Entwicklung von Konstantflüsspumpen für Frischbeton unter genauerer Betrachtung der Dickstoffventile. 2021
ISBN 978-3-7315-1037-6

Auf nahezu jeder Baustelle sind mobile Frischbetonpumpen unterschiedlicher Bauart anzutreffen. Einen Nachteil haben alle Bauarten gemein: eine Förderlücke. In dieser Arbeit wird eine Vielzahl an prinzipiellen Lösungen für eine Frischbetonkonstantflusspumpe entwickelt, welche nach dem Überblendungs-Prinzip arbeiten. Bekannte, zyklisch betätigte Frischbetonventile eignen sich für das angestrebte Pumpsystem nicht. Das Frischbetonventil stellt sich damit als die eigentliche Herausforderung heraus.

Um ein neuartiges Frischbetonventil entwickeln zu können, wird das hierfür benötigte Fachwissen aufgebaut. Die Ventilfunktionen werden analysiert und somit die entscheidenden identifiziert. Die drei entscheidenden Ventilfunktionen werden mithilfe eines Prüfstands untersucht. Die mithilfe der statistischen Versuchsplanung und -auswertung ermittelten zahlreichen Kausalitäten bilden ein Optimierungsproblem. Nach dessen Lösung wird auf dem erlangten Wissen basierend exemplarisch das Zylindersegmentventil entwickelt.

Mithilfe des Zylindersegmentventils wird die bevorzugte prinzipielle Lösung ausgewählt und deren Mechanik, Hydraulik sowie Steuerung entwickelt. Durch eine Mehrdomänensimulation wird die Funktionalität des Gesamtsystems verifiziert und gebietsweise validiert.

