

Untersuchung der Potentiale zur Modellierung von Walzasphalt mittels der Diskrete Elemente Methode

vorgelegt von
Dipl.- Ing.
Dirk-Niklas Müller
ORCID:0000-0001-9968-9239

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.- Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Cornelia Weltzien
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Henning Jürgen Meyer
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Alfred Ulrich

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 17.12.2020

Berlin 2021

Ich bin ein Teil von euch – ihr seid ein Teil von mir ¹
Für meine Eltern

¹Friedrich Kautz 2011

Dirk-Niklas Müller

Untersuchung der Potentiale zur Modellierung von Walzasphalt mittels der Diskrete Elemente Methode

Technische Universität Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme

Fachgebiet Konstruktion von Maschinensystemen

Dezember 2020

Der vorherrschende Wissensstand über die auftretenden Zusammenhänge beim Einbauprozesses und deren mathematische Beschreibung sind wissenschaftlich nicht sehr gut dokumentiert, was auf mehrere Gründe zurückzuführen ist. Als maßgebliche Gründe lassen sich folgende Ursachen identifizieren: Erstens ist die Tatsache zu nennen, dass der Großteil der Entwicklung bei Straßenfertigern auf Basis von Erfahrungen und gefühlten Empfindungen im betrieblichen Einsatz basiert und eine grundsätzliche wissenschaftliche Betrachtung des Einbauprozesses in der Vergangenheit als nicht notwendig erachtet worden ist bzw. nicht notwendig war (z. B. wegen genügend gut ausgebildetem Personal und/oder moderater Vorgaben der Einbauleistungen). Zum zweiten lässt sich das Einbaugut beim Einbau schwer mathematisch beschreiben. Die Gründe sind die starke Temperaturabhängigkeit und Inhomogenität des Einbaumaterials. Das Verhalten des Einbaugutes ist aber von fundamentaler Bedeutung, da sich beim Einbau ein komplexes Gleichgewicht zwischen der Einbaubohle und dem Material bildet. Den veröffentlichten Forschungsergebnissen, die sich mit dem Einbauprozess beschäftigen, ist gemein, dass die erlangten Erkenntnisgewinne nur durch sehr aufwendige Versuche entstanden sind.

In der vorliegenden Dissertation wird gezeigt, dass es mit experimentellen Untersuchungen (Prüfstands Aufbau und Simulation) möglich ist einen ausgewählten Asphalt-Werkstoff-Parameter zu quantifizieren und zu modellieren. Der Haftreibungsbeiwert innerhalb des Materials wurde als zu untersuchender Werkstoffparameter ausgesucht, da mit diesem Werkstoffparameter Teile des makroskopischen Verhaltens von Asphalt beschrieben werden können. Für den Einbau ist das makromechanische Verhalten des Asphalts entscheidend, da hier der Asphalt transportiert (Kratzkettenförderband und Schnecke) und verdichtet (Einbaubohle) wird. Der Ringscherzellen-Versuch wurde für die Untersuchungen ausgewählt, da der Versuchsaufbau die Kriterien Dichtigkeit, Beheizbarkeit und Möglichkeit der mehrfachen Aufnahme von Messreihen mit er selben Probe erfüllt. Die Versuche wurden bei Temperaturen zwischen 80 °C und 160 °C durchgeführt. Als Modellierungsmethode wurde die Diskrete Elemente Methode verwendet, da mit dieser Methode Inhomogenitäten und kohäsive Stoffeigenschaften abgebildet werden können. Bei der simulativen Untersuchung wurden die Simulationswiederholung, die Korngrößenverteilung, der Vertikalabstand, der Zeitschritt, die Modellierung des Kontaktmodells und der Einfluss der verschiedenen Parameter untersucht. Mit dieser Methode war es möglich den Ringscherzellen-Versuch in eine simulative Umgebung zu überführen und die charakteristischen Eigenschaften nachzubilden.

Stichwörter: Straßenbau, Asphalt-Einbauprozess, Walzasphalt, experimentelle Untersuchung, Rotationsscherzelle, Simulation, Diskrete Elemente Methode, EEPA-Kontaktmodell, Haftreibungsbeiwert

Dirk-Niklas Müller

Investigation of the potentials for modeling rolled asphalt using the Discrete Element Method

Technische Universität Berlin, Faculty V - Mechanical Engineering and Transport Systems
Institute for Machinery Design and System Technology

December 2020

Abstract

The prevailing state of knowledge about the interrelationships occurring during the paving process and their mathematical description are not very well documented scientifically, which is due to several reasons. The following reasons can be identified as the main reasons: Firstly, the fact that the majority of developments in road pavers are based on experience and perceived sensations in operational use and that a fundamental scientific consideration of the paving process has not been considered necessary or was not necessary in the past (e.g. due to sufficiently well-trained personnel and/or moderate specifications of paving performance). Secondly, it is difficult to describe the material to be installed mathematically. The reasons are the strong temperature dependence and inhomogeneity of the installation material. However, the behavior of the material to be paved is of fundamental importance, as a complex equilibrium is formed between the screed and the material during paving. The published research results dealing with the paving process have in common that the knowledge gained has only been gained through very complex experiments.

In the present dissertation it is shown that it is possible to quantify and model a selected asphalt-material parameter with experimental investigations (test bench design and simulation). The coefficient of static friction within the material was chosen as the material parameter to be investigated, since this material parameter can be used to describe parts of the macroscopic behavior of asphalt. For paving, the macromechanical behavior of asphalt is crucial, since this is where the asphalt is transported (scraper chain conveyor and auger) and compacted (paving screed). The ring shear cell test was selected for the investigations because the test setup fulfils the criteria of tightness, heatability and the possibility of multiple recording of test series with the same sample. The tests were performed at temperatures between 80 °C and 160 °C. The Discrete Element Method was used as the modelling method, since this method can be used to model inhomogeneities and cohesive material properties. In the simulative investigation, the simulation repetition, the particle size distribution, the vertical distance, the time step, the modelling of the contact model and the influence of the different parameters were investigated. With this method it was possible to transfer the ring shear cell experiment into a simulative environment and to reproduce the characteristic properties.

Keywords: Road construction, asphalt paving process, rolled asphalt, experimental investigation, rotational shear cell, simulation, discrete element method, EEPA contact model, static friction coefficient

Vorwort

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Henning Meyer bedanken, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat die Dissertation bei Ihm an Fachgebiet anfertigen zu können. Darüber hinaus möchte ich mich bei Ihm für die sehr gute Arbeitsatmosphäre, den gewährten Freiraum und die Unterstützung bedanken.

Bei Herrn Prof. Alfred Ulrich möchte ich mich dafür bedanken, dass er in mir die Freude am Forschen geweckt hat und das er mich für den Straßenbau und den Einbauprozess begeistern konnte.

Ein ganz großer Dank geht an die Kollegen am Fachgebiet (Daniel Wiest, Robert Heuser, Daniela Roost, Jan Krüger, Max Sieting, Cornelia Müssig, Conrad Lange, Sebastian Schröder, Ralf Essig, Thoralf Stein, Tobias Mach, Axel Grimm, Dan-Holm Oestreich, Stefan Pfennig und Jürgen Grotzky) mit denen die Arbeit sehr viel Spaß gemacht hat, durch die ich sehr viel gelernt habe und die mich immer unterstützt haben, egal bei welchem Belang. Darüber hinaus möchte ich mich bei Felix Hornstein bedanken, der bei der Umsetzung für den Prüfstand maßgeblich beteiligt war.

Ich möchte auch Herrn Meurer von der Deutag Ost danken, durch sein Engagement hatte ich in kürzester Zeit die benötigten Schüttgüter und den Bitumen.

Weiterhin möchte ich mich bei meinem Patenonkel Horst Michael, bei Lissa Sum, bei Daniel Wiest und bei Robert Heuser für die Korrektur und kritische Durchsicht der Arbeit bedanken.

Schließlich danke ich ganz herzlich meinen Eltern für die Liebe, Geduld und Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs-und Formelverzeichnis	III
1 Einführung	1
2 Straßenbau und Asphalt	3
2.1 Straßenaufbau	3
2.2 Einbauprozess	5
2.3 Aufbau und Funktion eines Straßenfertigers	7
2.4 Straßenbaustoff Asphalt	10
3 Modellierung von Partikelsystemen	15
3.1 Vorhandene Modellierungsmethoden	15
3.2 Modellierung von Asphalt	17
3.3 Zusammenfassung	19
4 Ziele und Eingrenzungen	20
4.1 Konkretisierung der Ziele	20
4.2 Eingrenzung Asphaltparameter	23
4.3 Eingrenzung experimentelle Untersuchungen	26
5 Diskrete Elemente Methode	31
5.1 Grundlagen	31
5.2 Kontaktmodelle	37
5.3 Kalibrierung	47
5.4 Experimentelle Untersuchungen an Schüttgütern	49
6 Statistische Absicherung der Untersuchungen	52
6.1 Grundsätzliches	52
6.2 Deskriptive Statistik	53
6.3 Wahrscheinlichkeitsverteilungen	54
6.4 Induktive Statistik	56
6.5 Versuchsplanung	58
7 Experimenteller Versuchsaufbau	62
7.1 Physikalischer Versuchsaufbau-Ringscherzellenversuch	62
7.2 Versuchsmaterial	66
7.3 Simulativer Versuchsaufbau	68

8	Analyse der Ergebnisse	79
8.1	Ergebnisse der physikalischen Untersuchung	79
8.2	Ergebnisse der Simulation	87
8.3	Diskussion der Ergebnisse im Kontext zur Forschungsfrage	101
9	Zusammenfassung und Ausblick	106
	Literatur	111
A	Simulationsparameter	124
A.1	Validierung Simulationsmodell	124
A.2	Prüfstand	124
A.3	Simulationswiederholungen	126
A.4	Zeitschritte	127
A.5	Korngrößenverteilungen	130
A.6	Parameter Vertikalabstand	130
B	Ergebnisse der physikalischen Untersuchungen	135
B.1	Mischgut 1	135
B.2	Mischgut 2	136
B.3	Mischgut 3	138
B.4	Mischgut 4	139
B.5	Mischgut 5- Teil 1	142
B.6	Mischgut 5-Teil 2	145
B.7	Mischgut 5-Teil 3	148
B.8	Mischgut 5-Teil 1-20s	151
C	Versuchspläne	153
C.1	Mischgut 2	153
C.2	Mischgut 4	155
C.3	Mischgut 5	159
D	Mathematischer Zusammenhang bei einer Ringscherzelle	165
E	Tabellen und Berechnung für Shapiro -Wilk	167
E.1	Eigenwert und Faktoren für Shapiro-Wilk	167
E.2	Prüfstandsvalidierung-physikalisch	168
E.3	Prüfstandsvalidierung-simulativ	174
E.4	Mischgut 1	176
E.5	Mischgut 2	179
F	Mischgut -Datenblätter und Fotos	182
F.1	Datenblätter	182
F.2	Bilder Schüttgut	185

Abkürzungs-und Formelverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

AC	<i>Asphaltbeton (Asphalt Concrete)</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamic</i>
DEM	<i>Diskrete Elemente Methode</i>
EEPA	<i>Edinburgh Elasto-Plastic Adhesive</i>
FEM	<i>Finite Elemente Methode</i>
JKR	<i>Johnson-Kendall-Roberts</i>
NWA	<i>Nutzwertanalyse</i>
NI	<i>National Instruments</i>
SMA	Splittmastixasphalt

Fomelverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
a_K	Kontaktradius nach JKR-Modell	m
a_n	SHAPIRO und WILK Koeffizient	1
a	Kontaktradius nach EEPA-Modell	m
A_P	Probenfläche	m ²
A	Auftriebskraft des Einbaumaterials unter der Einbaubohle nach BLUMER	N
b	Zusätzliche Faktoren beim fraktionellen faktoriellen Versuchsplan	1
b_{SW}	SHAPIRO und WILK Koeffizient	1
d_n	Dämpfungskonstante in normaler Richtung	N·s/m
d_t	Dämpfungskonstante in tangentialer Richtung	N·s/m
$d_{t,eepe}$	Dämpfungskonstante in tangentialer Richtung nach EEPA-Modell	N·s/m
$e_{ij,n}$	Einheitsvektor in normaler Richtung	1
$e_{ij,t}$	Einheitsvektor in tangentialer Richtung	1
$e_{\omega,ij}$	Einheitsvektor der Winkelgeschwindigkeit im Kontaktpunkt	1
e_{ij}	Restitutionskoeffizient zweier Partikel i und j	1
E_{Mx}	Elastizitätsmodul von Mischgut x	N/m ²
E_{Al}	Elastizitätsmodul von Aluminium	N/m ²
E_{F_i}	Effekt eines Faktors	1
E_i	Elastizitätsmodul des Partikels i	N/m ²
E_{ij}	Ersatzelastizitätsmodul während des Kontakts von Partikel i und j	N/m ²
$f(x)$	Dichtefunktion	1
$F(x)$	Verteilungsfunktion	1
F_{Ab}	Abziehungskraft zwischen zwei interagierenden Partikeln für JKR-Modell	N
F_{hys}	Haftkraft mit Hysterese im Modell für EEPA-Modell	N

Fortsetzung des Verzeichnisses der Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$F_{\text{hys},0}$	Initialhaftkraft in Hysterese behafteten Kontaktmodellen für EEPA-Modell	N
F_K	Gesamtkontaktkraft	N
$F_{K,n}$	Gesamtkontaktkraft in normaler Richtung	N
$F_{K,n,el}$	Linear elastischer Kraftanteil in normaler Richtung	N
$F_{K,n,eepe}$	Linear elastischer Kraftanteil in normaler Richtung für EEPA-Modell	N
$F_{K,n,JKR}$	Linear elastischer Kraftanteil in normaler Richtung für JKR-Modell	N
$F_{K,n,diss}$	Dissipativer Kraftanteil in normaler Richtung	N
$F_{K,n,diss,eepe}$	Dissipativer Kraftanteil in normaler Richtung für EEPA-Modell	N
$F_{K,t}$	Gesamtkontaktkraft in tangentialer Richtung	N
$F_{K,t,eepe}$	Gesamtkontaktkraft in tangentialer Richtung für EEPA-Modell	N
$F_{t,el,eepe}$	Linear elastischer Kraftanteil in tangentialer Richtung für EEPA-Modell	N
$F_{t,diss,eepe}$	Dissipativer Kraftanteil in tangentialer Richtung für EEPA-Modell	N
F	Fläche der Einbaubohle nach BLUMER	m ²
$F_{V,n}$	Normal wirkende Kraft auf die Materialprobe	N
$F_{V,n,0}$	Normalkraft zur Vorscherung der Materialprobe	N
$F_{V,m}$	Gemessene Kraft im Rotationsscherzellenversuch nach SCHULZE	N
$F_{V,t}$	Tangential wirkende Kraft auf die Materialprobe	N
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
G	Gewichtskraft der Einbaubohle nach BLUMER	N
G_i	Schubmodul des Partikels i	N/m ²
$G_{i,max}$	Maximaler Schubmodul eines in der DEM-Simulation existenten Partikels	N/m ²
G_{ij}	Ersatzschubmodul während des Kontakts von Partikel i und j	N/m ²
H_0	Nullhypothese	1
H_1	Alternativhypothese	1
h	Exponent der Kohäsion im EEPA-Modell	1
I_i	Massenträgheitsmoment	kg/m ²
I_p	Flächenträgheitsmoment des Aluminiumprofils	m ⁴
k_{adh}	Kohäsionssteifigkeit in normaler Richtung nach EEPA-Modell	N/m
k_n	Kontaktsteifigkeit in normaler Richtung	N/m
$k_{n,1}$	Kontaktsteifigkeit für die Annäherung der Partikel nach EEPA-Modell	N/m
$k_{n,2}$	Kontaktsteifigkeit in normaler Richtung nach EEPA-Modell	N/m
k_t	Kontaktsteifigkeit in tangentialer Richtung	N/m
k_V	Anzahl der Faktoren/Parameter	1
L_V	Vertikalabstand zwischen Rotor und Stator	mm
m_i	Masse des Partikels i	kg

Fortsetzung des Verzeichnisses der Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
m_{ij}	Ersatzmasse der Partikel i und j	kg
m_V	Anzahl der Faktorstufenkombinationen beim vollständigen faktoriellen Versuchsplan	1
M_T	Rollreibungsmoment	Nm
M_K	Gesamtmoment im Partikelkontakt	Nm
$M_{V,s}$	Haltemoment am Stator des Scherzellenversuchs nach SCHULZE	Nm
n_{Val}	Anzahl der Simulationswiederholungen für die Validierung	1
n_{neu,α_s}	Anzahl der berechneten Simulationswiederholungen in Abhängigkeit von dem Signifikanzniveau α_s	1
n	Anzahl der Einzelversuche	1
p	p-Quantil	1
Q_p	Statistischer Lageparameter	1
\vec{r}_i	Ortsvektor des Mittelpunkts von Partikel i	m
R_i	Radius des Partikels i	m
\bar{R}_i	Mittlerer Partikelradius in der Materialprobe	m
$R_{i,min}$	Kleinster Partikelradius in der DEM-Simulation	m
R_{ij}	Ersatzpartikelradius während des Kontakts von Partikel i und j	m
R_1	Ansatz 1 zur Partikelverteilung	1
s	Standardabweichung	1
$s_{\bar{x}}$	Unsicherheit des arithmetischen Mittels	1
$s_{\bar{d}}$	Standardabweichung des Effektes	1
s_{SW}	Koeffizient für SHAPIRO und WILK Test	1
SW	Koeffizient für SHAPIRO und WILK Test	1
SW_{krit}	Kritischer Koeffizient für SHAPIRO und WILK Test	1
S_n	Hilfsgröße in normaler Richtung im HERTZ - MINDLIN Modell	N/m
S_t	Hilfsgröße in tangentialer Richtung im HERTZ - MINDLIN Modell	N/m
Δt_{krit}	Jeweiliger Zeitschritt innerhalb der Simulation	s
$t_{krit,R}$	Kritischer, nicht zu überschreitender Zeitschritt in DEM-Simulationen nach RAYLEIGH	s
$v_{ij,n}$	Relativgeschwindigkeit zwischen den Partikeln i und j in Normalenrichtung	m/s
$v_{ij,t}$	Relativgeschwindigkeit zwischen den Partikeln i und j in tangentialer Richtung	m/s
$V_{V,0}$	Gesamtvolumen der Materialprobe	m ³
$V_{V,p}$	Gesamtvolumen der Körnung in der Materialprobe	m ³
x_i	Stichprobenvariablen	1
x	Exponent der Kohäsion im EEPA-Modell	1
\bar{x}	Arithmetisches Mittel	1
y_i	Sortierte Stichprobenvariablen	1
$z_{N(0,1)}$	z-Wert	1

Fortsetzung des Verzeichnisses der Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
α	Bohlenanstellwinkel	rad
α_s	Signifikanzniveau	1
β_H	Dämpfungsparameter	1
$\beta_{t,eepea}$	Dämpfungsparameter im EEPA-Modell	1
γ_K	Oberflächenenergie bei Kontakt im JKR-Modell	1
γ_i	Oberflächenenergie des Partikels i	J/m ²
γ_{ij}	Nicht wirksame Oberflächenenergie im Überlappungsbereich der Partikel i und j	J/m ²
$\delta\gamma$	Am Kontakt wirkende Oberflächenenergie bei EEPA-Modell	J/m ²
$\delta_{ij,n}$	Überlappung zweier Partikel i und j in normaler Richtung	m
$\delta_{ij,t}$	Überlappung zweier Partikel i und j in tangentialer Richtung	m
$\delta_{ij,n,min}$	Minimal zulässige Überlappung zweier Partikel i und j in normaler Richtung	m
$\delta_{ij,n,max}$	Maximal zulässige Überlappung zweier Partikel i und j in normaler Richtung	m
$\delta_{ij,n,p}$	Plastische Überlappung in normaler Richtung im EEPA-Modell	m
$\delta_{ij,n,JKR}$	Überlappung in normaler Richtung im JKR-Modell	m
ϵ_x^{pl}	Plastische Dehnung nach KRASS	1
ϵ_x^{vi-el}	Viskos-elastische Dehnung nach KRASS	1
ϵ_x^{el}	Elastische Dehnung nach KRASS	1
ϵ_x^{vi-pl}	Viskos-plastische Dehnung nach KRASS	1
η	Dynamische Viskosität	Ns/m ²
$\kappa_{t,m}$	Tangentialer Steifigkeitsmultiplikator im EEPA-Modell	1
μ_w	Mittelwert/ Erwartungswert	1
$\mu_{t,h}$	Haftreibungsbeiwert	1
$\mu_{t,r}$	Rollreibungsbeiwerten	1
ν_i	Querkontraktionszahl des Partikels i	1
$\nu_{i,max}$	Maximal in der DEM-Simulation auftretende Querkontraktionszahl	1
ν_{ij}	Ersatzquerkontraktionszahl während des Kontakts von Partikel i und j	1
ρ	Dichte des Mischguts nach BLUMER i	kg/m ³
ρ_i	Dichte des Partikels i	kg/m ³
$\rho_{i,min}$	Geringste Dichte eines Partikels in der DEM-Simulation	kg/m ³
ρ_{Mx}	Dichte des Mischguts	kg/m ³
$\sigma_{\bar{x}}$	Unsicherheit des arithmetischen Mittels	1
σ_1	Hauptspannung	N/m ²
σ_2	Hauptspannung	N/m ²
σ_{an}	Spannung beim Anscheren	N/m ²
$\sigma_{V,t}$	Spannung in Materialprobe	N/m ²
τ	Scherspannung	N/m ²

Fortsetzung des Verzeichnisses der Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
τ_{an}	Tangentialspannung beim Anscheren	N/m ²
ϑ	Temperatur	°C
φ_V	Schüttungswinkel	rad
ϕ_R	Innerer Reibungswinkel	rad
ϕ_e	Effektive Reibungswinkel	rad
ω_i	Winkelgeschwindigkeit der Partikels i	rad/s
ω_V	Winkelgeschwindigkeit des Versuchsaufbaus	rad/s
ω_{ij}	Winkelgeschwindigkeit im Kontaktpunkt	rad/s

1 Einführung

Eine intakte und gut vernetzte Verkehrsinfrastruktur ist für die Wettbewerbsfähigkeit einer Volkswirtschaft von zentraler Bedeutung. Gute Wettbewerbsfähigkeit ist Basis für Arbeitsplätze, Wachstum und Wohlstand. Der Standort Deutschland verfügt über ein ca. 830 000 km langes Straßennetz, davon ca. 12 900 km Bundesautobahnen und ca. 39 900 km Bundesstraßen (Stand Juli 2016) (BMVI 2016, S. 6). Vom Aufbauprinzip der Straßen dominiert die Asphaltbauweise mit einem Anteil von rund 95 % (Kern und Mayländer 2005, S. 51). Der Gegenstand der Arbeit beschäftigt sich mit Asphaltstraßen.

Um diesen Standortvorteil zu erhalten und weiter auszubauen, muss ein geeigneter Mix aus Neubau-, Ausbau- und Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden, gerade vor dem Hintergrund des kontinuierlich steigenden Personen- und Warentransports (BMVI 2016, S. 30). Trotz der stetigen Weiterentwicklung bei den verwendeten Materialien im Straßenbau treten in immer kürzeren Abständen Probleme bei der Dauerhaftigkeit der Funktionseigenschaften der Straßenbeläge auf, die Baustellen und unproduktive Wartezeit zur Folge haben (Zander 2017). Baustellen auf Bundesautobahnen verursachen Staus und Engpässe, die sich im Jahr 2019 auf ca. 1,4 Mio. Kilometer bzw. 521 000 Stunden beziffern lassen, was im Zeitalter der Globalisierung und den hohen Anforderungen an Pünktlichkeit und Präzision in den Produktionsprozessen (Just-in-Time bzw. Just-in-Sequenz) zu erheblichen finanziellen Einbußen führt (ADAC e.V. 2020, S. 1).

Die auftretenden Probleme bei der Straße können auf eine Vielzahl von Ursachen zurückgeführt werden. Als ein Schwerpunkt bei den Schädigungsursachen kann sicherlich die hohe Beanspruchung, hervorgerufen durch den Gütertransport, genannt werden¹ (Friedrich 1998, S. 17). Zusätzlich dazu führen schon kleine Fehler beim Einbau dazu, dass die Lebensdauer der Straßenbeläge reduziert wird. Aus der Untersuchung von STEINAUER und UECKERMANN ist bekannt, dass Straßenbeanspruchung und Längsebenheiten korrelieren, je unebener die Straße ist, desto höher die auftretende Beanspruchung und desto geringer die Lebensdauer der Straße (Steinauer und Ueckermann 2001, S. 451).

Der Einbau von Asphaltstraßen wird mit einem Straßenfertiger durchgeführt. Der Straßenfertiger kann in zwei Funktionseinheiten unterteilt werden, in das Trägerfahrzeug und die Einbau-bohle. Das Trägerfahrzeug ist für die Fortbewegung der gesamten Maschine sowie für Materialtransport und -verteilung innerhalb der Maschine zuständig. Die Bohle wird hinter dem Trägerfahrzeug hergezogen. Dabei wird das Mischgut mittels der Verdichtungsaggregate vorverdichtet und es entsteht eine geschlossene Fahrbahndecke. Die endgültige Verdichtung erfolgt mit einer Walze. Im Asphaltstraßenbau werden alle Funktionseigenschaften der Straße mit der Einbau-

¹Die Beanspruchung der Straße wird wesentlich von der Achslast des Verkehrs hervorgerufen. Die Untersuchungen von FRIEDRICH bestätigen die Ergebnisse des *AASHO-Road-Tests*, demnach geht die Achslast mit ungefähr der vierten Potenz in die Beanspruchung der Straße ein (Friedrich 1998, S. 117).

bohle hergestellt. Hierzu zählen neben den Straßeneinbauparametern (Belagsdicke, Einbaubreite und Straßenprofil) auch die Ebenheit in Längsrichtung und die Oberflächenbeschaffenheit. Die Güte und Genauigkeit der erstellten Funktionseigenschaften der Straße sind im hohen Maße von den Erfahrungen des Maschinenpersonals abhängig (Ulrich 2015).

Der vorherrschende Wissensstand über die auftretenden Zusammenhänge beim Einbauprozess und deren mathematische Beschreibung sind wissenschaftlich nicht sehr gut dokumentiert, was auf mehrere Gründe zurückzuführen ist. Als maßgebliche Gründe lassen sich folgende Ursachen identifizieren: Erstens ist die Tatsache zu nennen, dass der Großteil der Entwicklung bei Straßenfertigern auf Basis von Erfahrungen im betrieblichen Einsatz entstammen. Eine grundsätzliche wissenschaftliche Betrachtung des Einbauprozesses wurde in der Vergangenheit als nicht notwendig erachtet bzw. war nicht notwendig (z. B. wegen genügend gut ausgebildetem Personal und/oder moderater Vorgaben der Einbauleistungen). Zum zweiten lässt sich das Einbaugut beim Einbau schwer mathematisch beschreiben. Die Gründe sind die starke Temperaturabhängigkeit und Inhomogenität des Einbaumaterials. Das Verhalten des Einbaugutes ist aber von fundamentaler Bedeutung, da sich beim Einbau ein komplexes Gleichgewicht zwischen der Einbaubohle und dem Material bildet. Darüber hinaus werden für erforderliche Experimente keine Versuchsstrecken, die unter normalem Verkehr stehen, genehmigt.

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Beitrag dazu geleistet werden, das Verhalten des Werkstoffes Asphalt bei Einbautemperatur besser zu verstehen, indem ein relevanter Asphalteinbauparameter identifiziert wird und experimentell (real und simulativ) quantifiziert wird.

Inhalt der vorliegenden Arbeit

Das Kapitel 2 beschäftigt sich mit dem gegenwärtigen Stand der Technik im Straßenbau und dem Werkstoff Asphalt. Das Kapitel 3 geht auf die vorhandenen Modellierungsmöglichkeiten bei Partikelsystemen ein und stellt den gegenwärtigen Stand bei der Modellierung von Asphalt dar. In Kapitel 4 wird der Forschungsbedarf aufgezeigt und die Forschungsfrage formuliert. Im Zuge dessen werden Hypothesen aufgestellt und die zu erreichenden Ziele definiert. Hierbei wird auch auf die Eingrenzung der experimentellen Untersuchung und des zu untersuchenden Parameters eingegangen. Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Diskreten Elemente Methode und zeigt welche Ideen und welche mathematischen Grundlagen der Methode zugrunde liegen. In Kapitel 6 werden die verwendeten statistischen Methoden kurz erläutert. Der für die Modellvalidierung und Modellkalibrierung notwendige experimentelle Versuchsaufbau und die verwendeten Simulationsmodelle werden in Kapitel 7 erklärt. Die Ergebnisse der Arbeit werden in Kapitel 8 vorgestellt und diskutiert. Die Arbeit schließt in Kapitel 9 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Straßenbau und Asphalt

Das vorliegende Kapitel ist thematisch in vier Blöcke aufgeteilt. Der erste Block gibt einen Einblick in den Straßenaufbau, d.h. wie ist die innere Struktur der Straße aufgebaut und welche Funktionen müssen die einzelnen Bestandteile erfüllen.

Der zweite Block beschäftigt sich mit dem Einbauprozess einer Asphaltstraße, hier wird der Ablauf erläutert und welche Maschinen beteiligt sind. Auf die straßenbauspezifischen Inhalte wird nur kurz eingegangen, um das Gesamtbild und die vorherrschenden Randbedingungen besser zu verstehen.

Im dritten Block werden der Aufbau und die Funktion eines Straßenfertigers erklärt. Mit dieser Maschine werden alle wichtigen Funktionseigenschaften der Straße hergestellt.

Der vierte Block beschäftigt sich mit dem Baustoff Asphalt, hierbei wird näher auf den Aufbau, die Bestandteile und die mechanischen Eigenschaften des Baustoffes eingegangen.

2.1 Straßenaufbau

Die Aufgabe einer Straße besteht darin, die „[...] Ortsveränderung von Menschen und Gütern [...]“ zu erleichtern. Die Fahrbahn soll so gebaut werden, „[...]daß sie die ihr zugemuteten Lasten ohne Verformung tragen kann, ihre Oberfläche eben und griffig ist, daß der gewünschte Kraftschluss bei jeder Witterung vorhanden und daß sie jeder weiteren Art der Beanspruchung gewachsen ist“ (Neumann 1959, S. 1).

Um diese Aufgaben zu erfüllen, setzt sich die heutige Straße aus dem Oberbau und dem Unterbau zusammen. Das Planum trennt den Erdbau (Unterbau) vom Straßenbau (Oberbau) ab. Der Unterbau ist ein künstlich hergestellter Erdkörper zwischen dem Untergrund (natürlicher Fels bzw. Boden) und dem Oberbau. In Abb. 2.1.1 sind alle wichtigen Begrifflichkeiten für den Straßenaufbau und deren Zusammenhang schematisch dargestellt. Der Oberbau besteht aus verschiedenen Schichten, die unterschiedliche Funktionen erfüllen. Der Oberbau wird auch als Asphalt- bzw. Straßenbefestigung bezeichnet (Bull-Wasser u. a. 2011, S. 48).

Die unterste Schicht im Oberbau ist die Tragschicht. Diese ist in der Regel zweigeteilt, in einen bitumengebundenen Anteil und einen nichtbitumenhaltigen Anteil.

Der nichtbitumenhaltige Anteil kann sowohl mit Bindemittel (HGT ~ hydraulisch gebundene Tragschicht) als auch ohne Bindemittel (Frostschuttschicht) ausgeführt werden. Die Tragschicht sorgt dafür, dass die Last gleichmäßig in den Untergrund verteilt wird. Die Asphaltbinderschicht hat die Aufgabe, die Verzahnung zwischen Asphaltdeckschicht und Tragschicht zu gewährleisten. Die Anforderungen an diese Schicht sind besonders hoch, da die auftretenden Schubspannungen gleichmäßig verteilt werden müssen, außerdem muss sie wasserundurchlässig sein. Darüber hinaus soll die Asphaltbinderschicht eine hohe Ermüdungsbeständigkeit und Standfestigkeit aufweisen (Richter und Heindel 2011, S. 400 – 407). Die Asphaltdeckschicht, oder auch „Partner zum

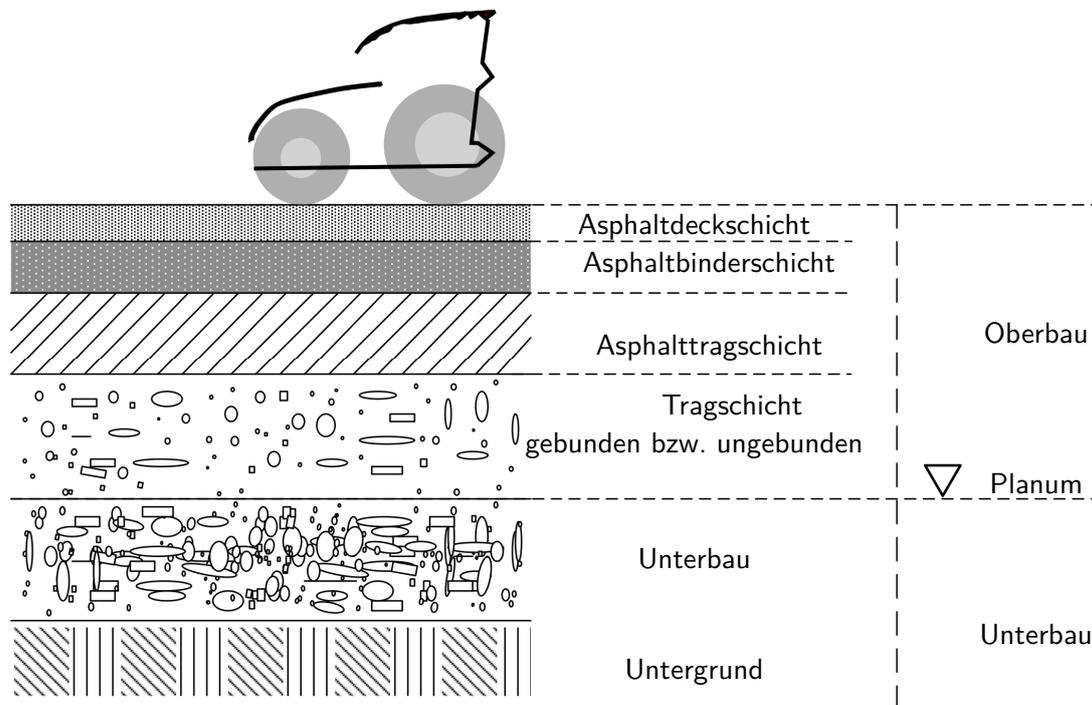


Abbildung 2.1.1: Typische Aufbau einer Straße (nach Velske u. a. 2013, S. 1)

Reifen“ (Hushek 1988, S. 50), steht in unmittelbarem Kontakt mit dem Verkehr. Sie nimmt die Verkehrslast auf und gibt diese an die unteren Schichten weiter. Die Anforderungen an die Deckschicht sind (Hutschenreuther und Wörner 2017, S. 312 f.):

- Abtransport von Wasser
- Ebenheit in Längs- und Querrichtung
- Geringer Rollwiderstand
- Griffbarkeit
- Lärminderung
- Verformungs- und Verschleißwiderstand

Je nach erwarteten Belastungen aus Verkehr und Klima variieren der Aufbau der Straße und die Dicken der einzelnen Schichten (Bull-Wasser u. a. 2011, S. 67). Für die einzelnen Schichten gibt es unterschiedliche Mischgutzusammensetzungen, siehe Kapitel 2.4. Um eine gute Tragfähigkeit der Straßenbefestigung zu erhalten, muss die Kräfteverteilung und -weitergabe zwischen den Schichten gewährleistet werden. Um dies zu erreichen, werden die Schichten miteinander verbunden. Hierbei wird von einem sogenannten Schichtenverbund¹ gesprochen, „[...] da eine dicke, zusammenwirkende Befestigung eine wesentlich höhere Tragfähigkeit bietet als die Summe einzelner aufeinanderliegender dünnerer Schichten mit derselben Gesamtdicke, aber ohne Verbund“ (ebd., S. 130). Diese Verbindung wird über eine Bitumenemulsion hergestellt, die kurz vor dem Einbau auf die zu überbauende Oberfläche gesprüht wird (näheres in Abschnitt 2.2).

¹Eine ausführliche Beschreibung zum Stand der Technik der Schichtenverbunde und zu den relevanten Einflussgrößen kann in der Dissertation von STÖCKERT nachgelesen werden (Stöckert 2002).

2.2 Einbauprozess

Der Einbauprozess von Asphaltstraßen sollte idealerweise ein kontinuierlicher Prozess sein, der sich in die Bereiche Vorarbeit, Materialtransport, Mischgutübergabe, Einbau mit dem Fertiger und Verdichtung mit der Walze aufteilen lässt. In Abb. 2.2.1 ist der Einbauprozess schematisch mit der Temperatur des Asphalts dargestellt. Die Spritzrampe stellt hierbei einen Teil der Vorarbeit dar. Die Vorarbeit ist je nach vorherrschenden Randbedingungen auf der Baustelle unterschiedlich, so brauchen Reparaturen andere Vorarbeiten als Neubaustrecken, z. B. die Erneuerung der Deckschicht. Für den Einsatz eines Straßenfertigers wird eine Bezugshöhe (Referenz- bzw. Führungssysteme) benötigt, anhand derer die Asphaltsschichten gefertigt werden. Es können verschiedene Referenz- bzw. Führungssysteme zum Einsatz kommen, siehe (H. J. Meyer 2002) und (H. J. Meyer 2003). Die Verbindung zwischen den Schichten wird durch eine Bitumenemulsion oder Haftkleber hervorgerufen, die vor dem Einbau mit einer Spritzrampe auf die Unterlage aufgesprüht werden.

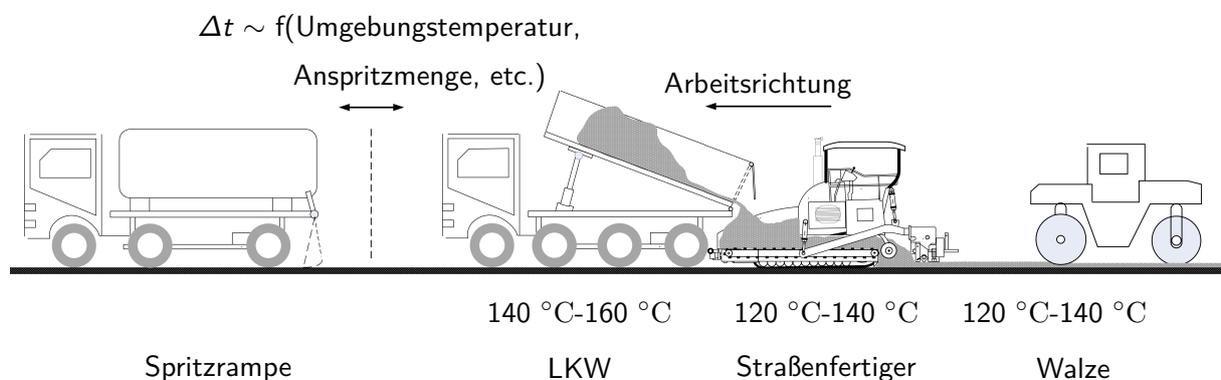


Abbildung 2.2.1: Schematische Darstellung des Einbauprozesses von Asphaltstraßen nach (Richter und Heindel 2011, S. 408)

Der Haftkleber bzw. die Bitumenemulsion muss einige Zeit vor dem eigentlichen Einbau auf die Unterlage gebracht werden, damit der Klebeeffekt eintreten kann. Dieser Effekt wird „brechen“ genannt: Bei diesem Vorgang müssen das Wasser und die darin enthaltenen Emulgatoren, welche die Bitumenemulsion „lagerstabil“ und transportfähig halten, verdunsten (Ausscheidvorgang). Der Ausscheidvorgang ist abhängig von vielen Faktoren, wie z.B. Aufbringmenge, Porosität der Unterlage, Umgebungstemperatur etc. (Bull-Wasser u. a. 2011, S. 133 ff.).

2.2.1 Mischgutübergabe

Das einzubauende Material wird mittels LKW vom Asphaltmischwerk zum Straßenfertiger transportiert und dort entweder direkt abgeladen oder mittels Beschicker zum Straßenfertiger befördert. Bei der Mischgutübergabe mit dem LKW fährt dieser rückwärts bis kurz vor den Straßenfertiger heran. Durch die Vorwärtsbewegung des Straßenfertigers berührt dessen Abdruckbalken (siehe Abb. 2.3.1 Punkt 9) schließlich die Reifen des LKWs und schiebt diesen vor sich her. Nun kann der LKW das Mischgut langsam in den Bunker des Fertigers hineinkippen, wobei in dieser Zeit die Arbeit des Straßenfertigers nicht unterbrochen wird. Bei der Mischgutübergabe mit

einem Beschicker übergibt der LKW das Mischgut an den Beschicker, welcher es mittels Förderband in den Bunker des Fertigers transportiert (Hutschenreuther und Wörner 2017, S. 154 f.).

2.2.2 Einbau und Verdichtung

Der Straßenfertiger stellt die jeweilige Schicht mit allen Straßeneinbauparametern (Belagdicke, Einbaubreite und Straßenquerprofil) her. Zusätzlich dazu hat der Straßenfertiger großen Anteil an der Straßenebenheit in Längsrichtung und der Oberflächenbeschaffenheit (Ulrich 2015).

Das Mischgut wird zur Einbaubohle transportiert und schließlich über die gesamte Einbaubreite der Bohle verteilt. An der Einbaubohle wird das Mischgut vorverdichtet und abgestreift. Es entsteht eine geschlossene Fahrbahnschicht. Anschließend wird das Mischgut mit Walzen verdichtet und es stellt sich der endgültige Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt ein. Entsprechend den straßenbaulichen Bedingungen (Schichtdicke, wetterspezifischen Gegebenheiten, Mischgut, Straßenprofil etc.) werden die Anzahl der Walzen und das Walzenschema ausgewählt. Von immanenter Bedeutung beim Einbauprozess ist die Temperatur des Mischgutes. Diese beeinflusst in höchstem Maße die Qualität der hergestellten Straße, sowohl bei dem Einbau als auch bei der anschließenden Verdichtung mit der Walze. Der Temperaturbereich, in dem die einzelnen Schritte des Einbauprozesses stattfinden sollen, ist in der Abb. 2.2.1 dargestellt. Die Abb. 2.2.2 zeigt verschiedene Abkühlkurven von verschiedenen Einbaudicken in Abhängigkeit von der Zeit nach dem Einbau der Schicht (Einbauzeit). Hierbei wird deutlich, dass die Zeit, in der die Walze im relevanten Temperaturbereich arbeiten kann, je nach Einbaudicke sehr stark variiert. Bei ungenügender Verdichtung in den Asphaltsschichten kann es zu einer Nachverdichtung durch den Verkehr kommen. Dies führt zu Unebenheiten, die wiederum die Verkehrssicherheit beeinträchtigen und die Lebensdauer der Straße herabsetzen können (Velske u. a. 2013, S. 233).

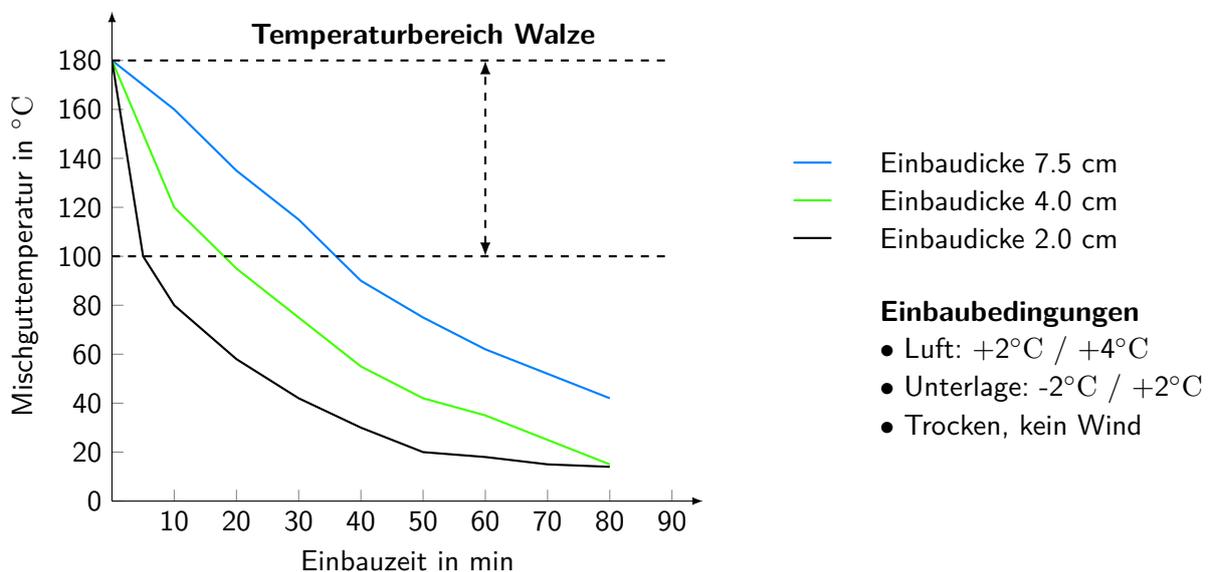


Abbildung 2.2.2: Schichtdicke und Abkühlverhalten der Mischguttemperatur nach (Hutschenreuther und Wörner 2017, S. 161)

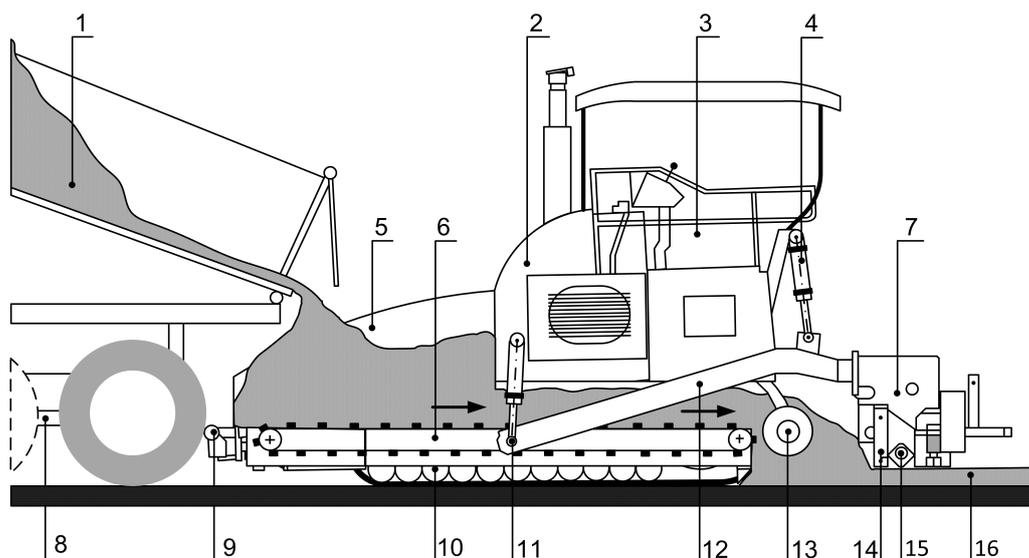
Der Hohlraumgehalt ist ein wichtiger Parameter bei der Straßenherstellung. Er soll niedrig genug sein, damit Sauerstoff, Wasser, Staub- und Schmutzpartikel nicht eindringen. Hierdurch kann

es zu Oxidation, Versprödung des Bindemittels und anderen Effekten führen, die die Lebensdauer der Straße reduzieren. Der Hohlraumgehalt muss aber auch ausreichend groß sein, um die Ausdehnung des Bindemittels bei sommerlichen Temperaturen abfangen zu können (Bull-Wasser u. a. 2011, S. 232). Darüber hinaus kann mit Hilfe eines größeren Hohlraumgehalts eine verbesserte Wasserabführung realisiert und der entstehende Straßenlärm reduziert werden. Diese Effekte werden mit offenporigem Asphalt umgesetzt (ebd., S. 198). Neuere Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass der Hohlraum als Defekt angesehen werden kann und das Auftreten von Makrorissen begünstigt (Hu u. a. 2015, S. 85).

Einen tieferen Einblick in die Verdichtung von Asphalt und die derzeitige Maschinenentwicklung geben das Buch von VIZI (Vizi und Büttner 1981) und die Dissertationen von ERDMANN (Erdmann 2018) und HALBRÜGGE (Halbrügge 2018).

2.3 Aufbau und Funktion eines Straßenfertigers

Der Straßenfertiger ist in Abb. 2.3.1 vereinfacht dargestellt. Das Einbaumaterial wird entweder mit Hilfe eines Beschickers oder mit dem LKW (Punkt 8) in den Bunker (Punkt 5) transportiert und über das Kratzkettenförderband (Punkt 6) zur Verteilerschnecke (Punkt 13) befördert.



- | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1 - Mischgut | 9 - Abdrückrolle für den LKW |
| 2 - Dieselmotor | 10 - Kettenfahrwerk |
| 3 - Betriebsstand | 11 - Zugpunkt für Nivellierzylinder |
| 4 - Hubzylinder der Einbaubohle | 12 - Bohlenzugarm |
| 5 - Materialbunker | 13 - Verteilerschnecke |
| 6 - Kratzboden | 14 - Stampfer |
| 7 - Einbaubohle | 15 - Vibrator |
| 8 - LKW | 16 - Eingebaute Schicht |

Abbildung 2.3.1: Schematische Darstellung des Einbaus von Asphalt mittels Straßenfertiger nach (Velske u. a. 2013, S. 179)

Die Verteilerschnecke befördert das Einbaumaterial gleichmäßig über die gesamte Einbaubreite vor der Einbaubohle. Das Mischgut verteilt sich im Schneckenkanal (zwischen Verteilerschnecke und Bohlenvorderwand) und gelangt aufgrund der Fortbewegungsrichtung und des Bohlenanstellwinkels (α) unter die Bohle. Der Bohlenanstellwinkel ist der gemessene Winkel zwischen dem Untergrund und dem Glättblech (Bodenplatte der Einbaubohle). Der Anstellwinkel wird gezielt vom Bediener eingestellt. In Abb. 2.3.1 ist der Anstellwinkel nicht dargestellt.

Durch das Eigengewicht der Einbaubohle (Punkt 7) und durch die Verdichtungsaggregate (Tamper, Vibration (Punkt 14, 15)) wird das Material vorverdichtet und abgestreift. Die Verdichtungsaggregate werden beheizt, um das Anhaften des bitumenhaltigen Materials zu verhindern. Je nach Anwendung ist die Einbaubohle mit unterschiedlichen Verdichtungsaggregaten ausgestattet. Abhängig von den verwendeten Verdichtungsaggregaten können unterschiedliche Vorverdichtungsgrade hergestellt werden. Laut Literatur und Herstellerangaben (Hutschenreuther und Wörner 2017, S. 163), (Horn u. a. 2011, S. 19) lassen sich durch den Einsatz von *Hochverdichtungsbohlen* (neben dem Tamper und der Vibration kommt noch eine Pressleiste zum Einsatz) ein Verdichtungsgrad von bis zu 96 %² erreichen.

Der Hubzylinder (Punkt 4) kann während des Einbaus drei Funktionen annehmen. Diese sind Bohlenschwimmstellung, Bohlenblockierung und Bohlenentlastung. Die verschiedenen Funktionen werden über eine Druckbeaufschlagung der Stangen- bzw. Kolbenseite des Hubzylinders realisiert (Joseph Vögele AG 2012, S. 72).

2.3.1 Kinematisches Verhalten der Einbaubohle

Die Einbaubohle wird hinter dem Trägerfahrzeug hergezogen, wobei keine Führung in der Höhe stattfindet. Der Bohlenzugarm (Punkt 12) ist starr mit der Einbaubohle verbunden. Die Verbindung zum Trägerfahrzeug erfolgt über zwei Hydraulikzylinder (Punkt 4+11). Aufgrund dieser konstruktiven Umsetzung kann sich die Einbaubohle in vertikaler Richtung um den Zugpunkt frei bewegen und es lassen sich verschiedene Anstellwinkel und Einbaustärken realisieren.

Die Höhe bzw. Einbaustärke wird von der Bohle selbständig eingestellt, indem sie versucht die Auftriebs- und Gewichtskräfte ins Gleichgewicht zu bringen. Die Auftriebskräfte ergeben sich aus der Kombination zwischen den Verdichtungsaggregaten und dem Material. Durch eine Änderung des Anstellwinkels sucht sich die Bohle ein neues Gleichgewicht, dazu steigt die Bohle auf oder sinkt herab. Aufgrund dieses „Schwimmens“ auf dem Material wird hierbei von einer schwimmenden Bohle gesprochen. Dies kann nach NIGGEMANN (Niggemann 2012, S. 32) mit Wasserskifahren verglichen werden:

„Dies lässt sich anschaulich mit einem Wasserskifahrer vergleichen, der über das Wasser gezogen wird. Wie die Skier wird auch die Bohle mit einem Anstellwinkel über das Material gezogen. Im Gegensatz zu dem Wasser ist die Viskosität von Walzasphalt jedoch so hoch, dass er nicht durch Fließen ausweichen kann. Asphalt reagiert mit Verdichtung auf die Einwirkung der Bohle.“

²Bezogen auf den dazugehörigen Marshall-Verdichtungskörper. Die Marshall-Dichte gibt die experimentell ermittelte Raumdichte an, die durch die schlagende Einbringung einer genormten Verdichtungsenergie auf eine genormte Asphaltprobe nach DIN EN 12697 erreicht werden kann. Der Verdichtungsgrad nach Marshall beschreibt das Verhältnis zwischen der erreichten und der theoretisch maximal erreichbaren Raumdichte.

Die Schwimmstellung wird über den Hub- und Nivellierzylinder (Punkt 4+11) realisiert, indem beide Hydraulikzylinder drucklos geschaltet werden. Der Nivellierzylinder ist nur für die Einstellung des Anstellwinkels zuständig und durch dessen Ansteuerung wird der Zugpunkt gezielt verschoben. beispielsweise bewirkt eine Verschiebung des Zugpunkt nach oben eine Vergrößerung des Anstellwinkels. Die Bohle reagiert solange mit einer Aufwärtsbewegung bis sich der Anstellwinkel soweit verringert hat, dass sich ein neues Gleichgewicht eingestellt hat.

Für die Gleichgewichtsbedingung hat BLUMER (Blumer 1965, S. 160) die Gleichung 2.3.1 aufgestellt. Die Variablen sind wie folgt definiert: F als Fläche, A als Auftriebskraft, ρ als Belagdicke, v als Fahrgeschwindigkeit, α als Anstellwinkel, W als Widerstandskraft, Z als Zugkraft und G als Gewichtskraft. In Abb. 2.3.2 sind die aufgeführten Kräfte zur Veranschaulichung am Straßenfertiger gezeigt.

$$A = \rho \cdot v^2 \cdot F \cdot \sin^2 \alpha = G \quad (2.3.1)$$

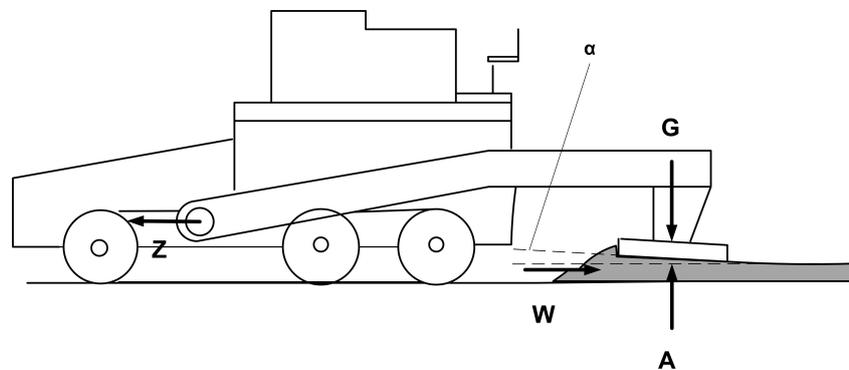


Abbildung 2.3.2: Schematische Darstellung des Straßenfertigers (nach Blumer 1965, S. 161)

Der Lehrstuhl Baumaschinentechnik, unter der Leitung von Professor POPPY an der Universität MAGDEBURG hat sich mit der Ermittlung und Optimierung der maschinen- und regelungstechnischen Parameter beim Einbau beschäftigt (Monecke u. a. 1997), (Monecke u. a. 1999). Hierzu wurde ein Versuchsstand für die experimentellen Untersuchungen gebaut und es wurde ein Ersatzbaustoff entwickelt, mit dem die Versuche durchgeführt worden sind. Der Ersatzbaustoff hatte als Bindemittel ein Paraffinöl. Durch das Paraffinöl war es möglich, dass das Ersatzmischgut ähnliche Eigenschaften bei Raumtemperatur hatte wie Asphalt bei Einbautemperatur (Monecke u. a. 1997, S. 10, 18). Das Ergebnis war eine quantitative Beschreibung der maschinentechnischen Parameter beim Einbau und die Erkenntnis, dass Änderungen bei den Einflussgrößen das Gesamtsystem Straßenfertiger-Asphalt beeinflussen und es Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen gibt, die im Rahmen des Forschungsprojektes nicht näher quantifiziert werden konnten (Monecke u. a. 1999, S. 58).

UTTERODT hat in seiner Dissertation untersucht, wie sich Änderungen der Mischguttemperatur und des Materialfüllstands an der Bohlenvorderwand auf die Zugkraft, die Schichtdicke, den Vorverdichtungsgrad und die Längsebenheit auswirken (Utterodt 2013, S. IX). Er hat herausgefunden, dass sowohl die Schnecke als auch der Füllstand an der Bohlenvorderwand einen Einfluss auf die Zugkraft haben. Darüber hinaus muss die Summe aller angreifenden Kräfte an

der Einbaubohle noch durch eine Schneidekraft im Bereich des Bohlenfußpunktes sowie durch Strömungskräfte und eine Widerstandskraft ergänzt werden (Utterodt 2013, S. 218, 236).

Tab. 2.3.1 gibt einen Überblick wie sich der Bohlenwinkel und die Einbaudicke bei Änderung verschiedener Maschinen- und Einbauparameter verhalten (z. B. bewirkt eine Erhöhung des Zugpunktes des Nivellierzylinders eine Erhöhung des Bohlenanstellwinkels und der Schichtdicke). Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Tabelle nur das Bewegungsverhalten der Einbaubohle bei Änderung eines Maschinen- und Einbauparameters darstellt, während alle anderen Parameter konstant bleiben.

Wie aus der Tabelle hervorgeht, gibt es bei der Materialtemperatur abweichende Meinungen inwieweit die Material- und Bohlenkräfte auf das Bohrgleichgewicht einwirken und dieses verändern.

Tabelle 2.3.1: Übersicht über das Bewegungsverhalten der Einbaubohle

Änderung		Bohlenwinkel	Schichtdicke	Quelle
Materialvorlage	↑	↑	↑	(Wirtgen Group 2011, S. 110)
Zugpunkt	↑	↑	↑	(Monecke u. a. 1997, S. 66)
Materialtemperatur	↓	↑	↑	(Dynapac 2005, S. 11)
Materialtemperatur	↑	↑	↑	(Utterodt 2013, S. 218)
Geschwindigkeit	↑	↓	↓	(Joseph Vögele AG 2012, S. 70)

2.4 Straßenbaustoff Asphalt

Asphalt ist sowohl ein natürlich vorkommendes als auch künstlich hergestelltes Gemisch (Richter und Heindel 2011, S. 389). Der künstlich hergestellte Baustoff Asphalt ist ein Gemisch aus verschiedenen Gesteinskörnungen und bitumenhaltigen Bindemitteln. Es lassen sich bei künstlich hergestelltem Asphalt drei Phasen identifizieren: Gesteinskörnung, Bitumen und Luftporen (Hohlraumgehalt). Zusätzlich können noch Zusätze verwendet werden, die verschiedene Eigenschaften verbessern, z. B. können für die Verbesserung der Dauerhaftigkeit Faserstoffe oder Cellulosefasern eingesetzt werden (Gerhard 2009, S. 28). Die Anforderungen an Asphaltmischgüter für den Straßenbau in Deutschland sind in der TL Asphalt StB 07/13³ (FGSV 2013) beschrieben. Sie stellt die nationale Umsetzung der relevanten Europäischen Normenteile der Reihe DIN EN 13108 „Asphaltmischgut -Mischgutanforderungen“ dar. Die verschiedenen Asphaltmischgüter unterscheiden sich in der Gesteinszusammensetzung (Konzeption), im Bitumenanteil, der Bitumensorte und beim Hohlraumgehalt. Entsprechend den Belastungsklassen der Straße wird das Asphaltmischgut ausgewählt.

2.4.1 Mechanische Eigenschaften

Die Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von Asphalt ist schwierig, da es sich um ein heterogenes und nicht isotropes Material handelt. Die beteiligten Komponenten weisen unterschiedliche Eigenschaften auf (z. B. Wärmeleitfähigkeit, Elastizitätsmoduli etc.) und es kann nur

³Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Ausgabe 2007/Fassung 2013.

bedingt von den Eigenschaften der Einzelkomponenten auf die Eigenschaften des Gemisches geschlossen werden. Die Eigenschaften des Asphalts lassen sich im eingebauten Zustand als viskoelastisch bezeichnen, d.h. es lassen sich sowohl zeitabhängige (viskos-elastisch und viskos-plastisch) als auch zeitunabhängige Anteile (elastisch-plastisch) identifizieren. Dieser Sachverhalt soll anhand der abgebildeten Kriechkurve aus Abb. 2.4.1 veranschaulicht werden. Die abgebildete Kurve stellt einen qualitativen Verlauf dar, der bei einer statischen und axialen Belastung an einem zylindrischen Asphaltprobekörper entsteht (Kraß 1971, S. 9 ff.)⁴.

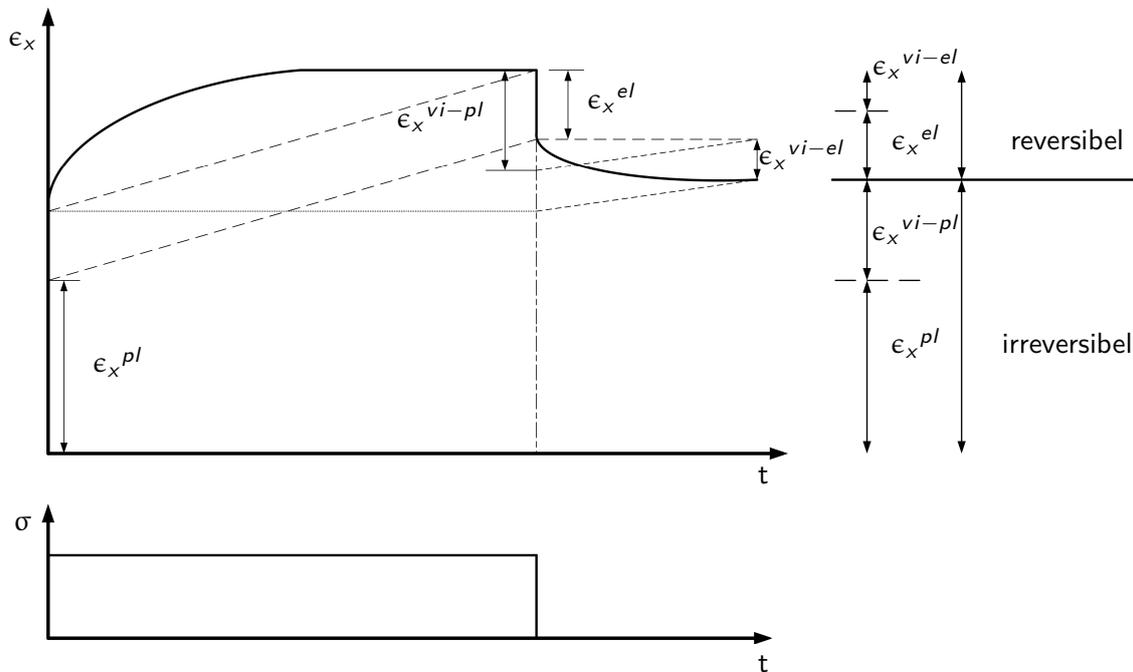


Abbildung 2.4.1: Qualitativer Verlauf der Kriechfunktion bei gegebener Belastung nach (Kraß 1971, S. 52)

Asphalt ist sehr stark temperaturabhängig was sich sowohl in seinem Verhalten als auch bei den Werkstoffkennwerten bemerkbar macht. Im heißen Zustand zeigt der Asphalt ein ausgeprägt viskoses Verhalten und je stärker der Asphalt abkühlt desto elastischer wird er. In der Literatur gibt es unterschiedliche Ergebnisse zum E-Modul bspw. gibt TURNER den E-Modul bei 70 °C mit 2000 [N/mm²] an, wohingegen VELSKE bei 40 °C einen E-Modul zwischen 400-800 [N/mm²] (siehe hierzu Tab. 2.4.1) angibt. Laut TURNER beträgt der E-Modul bei ~ 170 °C ca. 20 [N/mm²] (Thurner 2001, S. 10).

Tabelle 2.4.1: Elastizitätsmoduli von Asphalt bei kurzzeitiger Beanspruchung (Velske u. a. 2013, S. 96)

Temperatur ϑ [°C]	- 10	0	+ 10	+ 20	+ 40
E-Modul [N/mm ²]	< 15 000	6 000–10 000	2 000–6 000	1 000–3 000	400–800

⁴Eine Übersicht der verschiedenen experimentellen Laboruntersuchungen ist bei PARTL zu finden (Partl u. a. 2013).

2.4.2 Konzeption

In der Asphaltkonzeption wird die Zusammensetzung des Asphaltmischgutes hinsichtlich Qualität (Materialien und Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung) und Quantität (Anteile der einzelnen Komponenten in dem Asphaltgemisch) festgelegt (Rosauer 2010, S. 39). Der Sieblinienbereich (Abb. 2.4.2) gibt an, in welchem Bereich sich die Gesteinskörnungsmischung befinden darf. In der Abbildung ist beispielhaft die zulässige Korngrößenverteilung für AC 5 DL dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine Deckschicht (D) für leichte Beanspruchungen (L).

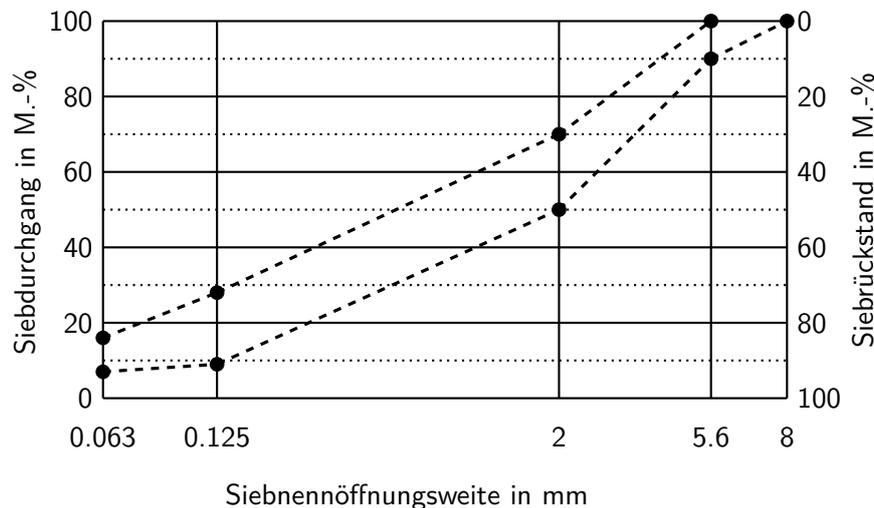


Abbildung 2.4.2: Bereich der zulässigen Korngrößenverteilung von AC 5 DL nach ZTV Asphalt StB (FGSV 2013, S. 55)

Durch eine Änderung der Qualität und Quantität werden die Eigenschaften des Asphalts gezielt beeinflusst. An die Gesteinskörnung werden hohe Qualitätsanforderungen gestellt und nur ausgesuchte Gesteinsarten kommen bei der Asphaltherstellung zum Einsatz. Die grobe Körnung bildet bei der Asphaltstraße das tragende Gerüst. Die feine Körnung füllt die Hohlräume und stützen grobe Körner ab und der Fülleranteil (Gesteinskörnung $\leq 0,063$ mm) bildet mit dem Bitumen den Mörtel, der die restlichen Hohlräume auffüllt und das Bindemittel versteift. Durch die Gesteinskörnungsmischung wird auch bei der späteren Verdichtung im Bauprozess maßgeblich der Hohlraumgehalt vorgegeben (Hutschenreuther und Wörner 2017, S. 234).

2.4.3 Bitumen

Das Bitumen wird durch Destillation aus Erdöl gewonnen und dient als Bindemittel im Asphaltmischgut. Die Hauptbestandteile sind Kohlenwasserstoff-Verbindungen, siehe Abb. 2.4.3. Der Aufbau kann als Kolloidsystem⁵ bezeichnet werden, dass sich aus Maltenen, Asphaltene und Erdöl-Harzen zusammensetzt. Die Asphaltene und Erdöl-Harze bilden sogenannte Mizellen⁶. Dabei bilden die Asphaltene den Kern, welcher von den Erdöl-Harzen umschlossen wird. Das Dispersionsmittel sind die Maltene, siehe Abb. 2.4.3. Bei einer Änderung der Temperatur

⁵Hierbei handelt es sich um ein System aus Materialteilchen, die in einem Medium, dem Dispersionsmittel, verteilt vorliegen (Latscha und Klein 2007, S. 188).

⁶Zusammenballung von Materialteilchen (Latscha u. a. 2016, S. 557).

ändert sich das Verhältnis der Asphaltene und Erdöl-Harze und es kommt zu der typischen temperaturabhängigen Viskosität des Bitumens (Nösler 2000, S. 27 ff.). Das Verhalten von Bitumen ist stark temperaturabhängig. Die Spanne der Viskosität liegt zwischen $1 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (bei $0 \text{ }^\circ\text{C}$, nach (Mezger 2016, S. 30)) und $1 \cdot 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (bei $200 \text{ }^\circ\text{C}$), siehe Abb. 2.4.4. Damit kann Bitumen je nach Temperatur entweder als Festkörper oder als Flüssigkeit charakterisiert werden (Hutschenreuther und Wörner 2017, S. 37).

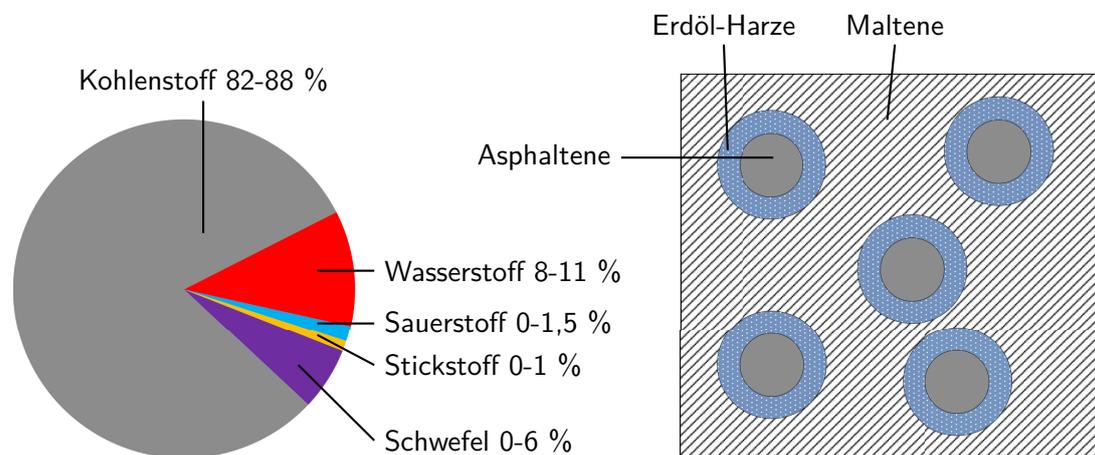


Abbildung 2.4.3: Zusammensetzung von Bitumen und Aufbau nach (Read und Whiteoak 2003, S. 29) und (Nösler 2000, S. 29)

Die Anforderungen an Straßenbaubitumen sind in der DIN EN 12591 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2015) spezifiziert, wobei die Bezeichnung von Straßenbaubitumen aus den Ergebnissen der Nadeleindringprüfung⁷ nach DIN EN 1426 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2009b) abgeleitet wird. So besitzt bspw. Straßenbaubitumen mit der Bezeichnung 20/30 eine Verformung von 2 bis 3 mm bei der Nadeleindringprüfung.

Die Forschung mit Bitumen beschäftigte sich in der Vergangenheit mit den Auswirkungen auf den Asphalt (im eingebauten Zustand) bei unterschiedlichen Bitumenzusammensetzungen, siehe (Arand u. a. 1989), (Arand und Lorenzl 1995) oder (Vonk u. a. 1994). In der Regel wurde das Stoffverhalten des Bitumens nur bei einem Temperaturpunkt bestimmt (z. B. durch Nadelpenetration).

In der Gegenwart hat die Forschung die Problematik bzgl. dieser eingeschränkten Sichtweise erkannt, weshalb derzeit eine Charakterisierung des Werkstoffverhaltens im kompletten Anwendungsbereich stattfindet (Radenberg und Gehrke 2012). Dies geschieht mit Hilfe der Rheologie⁸. Die etablierten Methoden und Experimenten der Rheologie werden auf die Eigenheiten und spezifischen Randbedingungen des Bitumens angepasst, so dass eine einheitliche Beschreibung des Werkstoffverhaltens erreicht wird. In der Rheologie wurde eine Kombination von statischen und dynamischen Prüfverfahren entwickelt um die mechanischen Eigenschaften solcher Materialien zu ermitteln (Grellmann und Seidler 2015, S. 97).

⁷Der Versuch wird bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$, einer Belastungsdauer von 5 s und mit einer aufgetragenen Last von 100 g durchgeführt.

⁸Die Rheologie beschäftigt sich mit dem Fließ- und Verformungsverhalten von Materialien (Mezger 2016, S. 19).

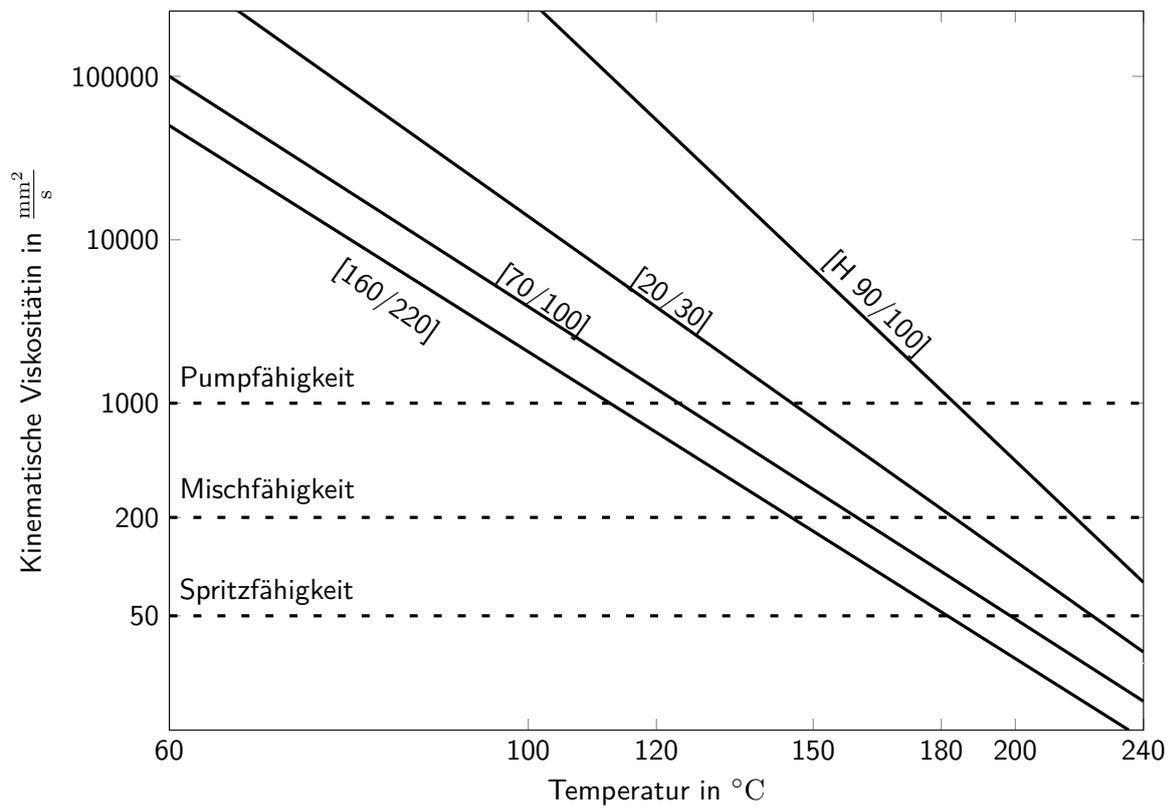


Abbildung 2.4.4: Viskositäten und Gebrauchstemperaturen von Bitumen nach (Hutschenreuther und Wörner 2017, S. 41)

Das Aif-Forschungsprojekt (Vorhaben 16639 N /1) hat mit Hilfe eines dynamischen Scherrheometers verschiedene Bitumensorten bei verschiedenen Temperaturen untersucht und herausgefunden, dass bei hohen Temperaturen der Bitumen ein idealviskoses Verhalten aufweist (M. Radenberg 2014, S. 66).

3 Modellierung von Partikelsystemen

Im ersten Teil des Kapitels werden verschiedene Simulations- und Modellierungsansätze diskutiert, mit denen eine Bearbeitung der Forschungsfrage möglich ist. Im zweiten Teil des Kapitels wird eine kurze Übersicht zum Stand der Technik zur Modellierung von Asphalt erbracht.

3.1 Vorhandene Modellierungsmethoden

Kontinuumsmechanischer Ansatz

Beim kontinuumsmechanischen Ansatz wird das Schüttgut als Partikelkollektiv angesehen, das heißt als Kontinuum. „Man betrachtet dazu nicht die Kräfte an den einzelnen Partikeln des Schüttgutes, sondern die Kräfte auf die Begrenzungsflächen einzelner Volumenelemente und die daraus folgenden Verformungen, ähnlich wie auch in der Strömungsmechanik oder der Festigkeitslehre. Kräfte zwischen einzelnen Partikeln werden dabei nur integral betrachtet. Die Volumenelemente werden hinreichend groß gegenüber den einzelnen Partikeln gewählt, so dass lokale Vorgänge an einzelnen Partikelkontakten nicht berücksichtigt werden müssen“ (Schulze 2014, S. 9). Das Schüttgut wird dadurch als ein unendlich oft teilbares Volumen betrachtet und die Schüttguteigenschaften werden dem gesamten Volumen zugeordnet (Gröger 1999, S. 11).

Die Umsetzung des kontinuumsmechanischen Ansatzes erfolgt über die *Finite Elemente Methode* (FEM) oder *Computational Fluid Dynamic* (CFD) Simulation. Die FEM wird für die Verformung von Festkörpern verwendet, wohin gegen die CFD Simulation im strömungsmechanischen Umfeld eingesetzt wird.

Der kontinuumsmechanische Ansatz zählt zu den gitterbasierenden Simulationsmethoden, das heißt der zu untersuchende Prozessraum wird durch ein zuvor festgelegtes Gitter räumlich diskretisiert (Krenzer u. a. 2013, S. 7).

Eine genauere Beschreibung der Finite Elemente Methode für Schüttgüter ist bei GRÖGER zu finden (Gröger 1999, S. 7–34).

Partikelmechanischer Ansatz

Im partikelmechanischen Ansatz liegt der Fokus auf der Kinetik der Partikel und deren Verformungsverhalten. Dadurch lässt sich die Interaktion bzw. Wechselwirkung der einzelnen Partikel zueinander bzw. mit der Umgebung beschreiben. Mit diesem Wissen ist es möglich, ein hinreichend genaues makroskopisches und mikroskopisches Partikelsystemverhalten zu erzeugen (ebd., S. 34). Hierbei handelt es sich um einen gitterfreien Ansatz, der keine Vernetzung des Prozessraumes voraussetzt (Krenzer u. a. 2013, S. 8).

Der partikelmechanische Ansatz lässt sich nach SCHNEIDER in verschiedene Lösungsansätze und Partikel- bzw. Kontaktverhalten unterteilen. Eine schematische Darstellung der Gliederung

der Partikelmethode ist in Abb. 3.1.1 dargestellt. Das Partikelverhalten lässt sich in starre und deformierbare Körper unterteilen. Diese wiederum unterscheiden harte und weiche Kontaktverhalten. Die Lösungsansätze hingegen lassen sich in drei verschiedene Methoden gliedern, nämlich in dynamische, statische und ereignisgesteuerte (ED¹) Lösungsansätze. Der ereignisgesteuerte Lösungsansatz kommt jedoch nur in der Konstellation mit dem starren Partikelverhalten und dem harten Kontaktverhalten vor (Schneider 2012, S. 19).

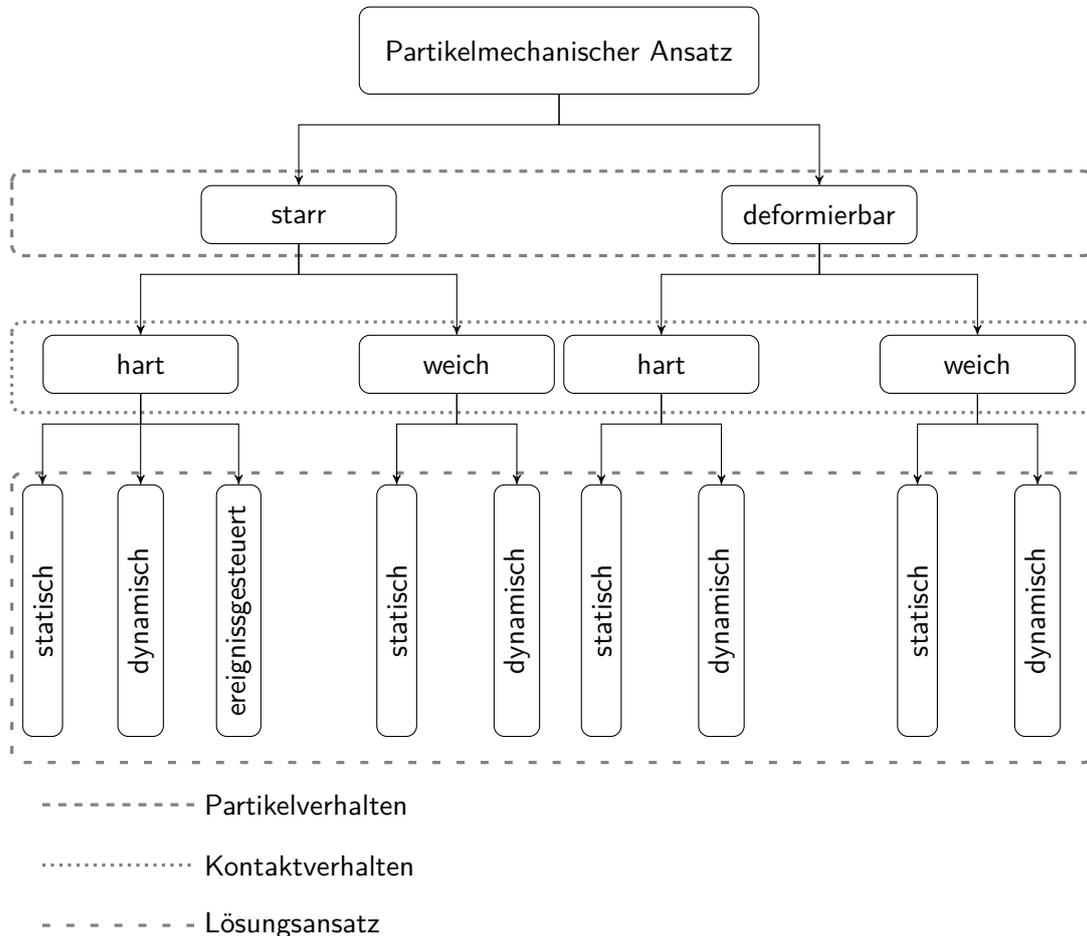


Abbildung 3.1.1: Baumdiagramm zu den verschiedenen Modellierungsmöglichkeiten bei den partikelmechanischen Methoden (nach Schneider 2012, S. 18 f.)

Die Grundlage aller Lösungsansätze bildet die NEWTONsche Bewegungsgleichung für die Partikel. Der statische Lösungsansatz vernachlässigt die Trägheitsterme sowie die geschwindigkeits- und zeitabhängigen Terme in der Bewegungsgleichung. Die dynamischen und statischen Lösungsansätze zählen zu den zeitschrittgesteuerten Methoden, das heißt, der Zeitschritt wird vom Nutzer vorgegeben. Der Zeitschritt bei dem ereignisgesteuerten Lösungsansatz wird über die Stoßereignisse definiert (Gröger 1999, S. 36–38), (Schneider 2012, S. 17).

Für den ereignisgesteuerten Lösungsansatz können die Grundlagen, Anwendungen und der Vergleich mit anderen Simulationsansätzen in LUDING gefunden werden (Luding 2004), (Luding 1998). Die Grundlagen für den zeitschrittgesteuerten Lösungsansatz werden in Kapitel 5 gezeigt.

¹Event Driven (Luding 2004, S. 306).

Zelluläre Automaten

Bei den Zellulären Automaten handelt es sich um eine Untersuchungsmethode für dynamische Prozesse. Der zu untersuchende Raum² wird durch eine endliche Anzahl an Zellen abgebildet. Die Zellen können verschiedene diskrete Zustände annehmen, die sich im zeitlichen Verlauf verändern können. Jede Zelle hat eine definierte Nachbarschaft zu anderen Zellen. Bei den Nachbarzellen handelt es sich um identische Zellen, das heißt die Zustandsberechnung erfolgt nach denselben Regeln (deterministische Regeln). Der Zustand der einzelnen Zelle zum Zeitpunkt t hängt von dem eigenen Zustand und den Zuständen der benachbarten Zellen zum Zeitpunkt $t - 1$ ab (Kaldenhoff 1998, S. 2.2–2.4).

Einen Überblick über die Methode gibt GERHARDT (Gerhardt und Schuster 1995). KALDENHOFF hat sich in seiner Dissertation mit der Modellierung von groben Schüttgütern bei der Entleerung von Silos beschäftigt (Kaldenhoff 1998). Ein Schwerpunkt in den Veröffentlichungen mit Zellulären Automaten liegt in der Simulation von Fließvorgängen bei physikalischen Systemen, siehe (ebd.), (Eisenberg und Renner 2006), (Bode und Ostermeyer 2008), (Treiber und Kesting 2010, S. 187–196).

Statistische Methoden

Als statistischen Methoden werden Algorithmen bezeichnet, mit deren Hilfe Simulationen und Berechnungen durchgeführt werden. Bei den statistischen Methoden wird der Prozess nicht analytisch abgebildet, sondern der Prozess wird durch Experimenten nachgebildet. Bei den Experimenten kann es sich sowohl um den realen Prozess handeln als auch um eine vereinfachte und abstrahierte Form. Das Experiment wird nun sehr häufig wiederholt, sodass eine Vielzahl von Ergebnissen erzeugt werden. Die Ergebnisse werden nun mittels Wahrscheinlichkeitstheorie analysiert und in Kombination mit der zu Grunde liegenden Physik wird eine Lösung ermittelt.

Die Monte-Carlo-Simulation stellt eine der bekannteren statistischen Methoden dar, mit deren Hilfe Simulationen und Berechnungen für physikalische Prozesse durchgeführt werden (Landau und Binder 2005).

3.2 Modellierung von Asphalt

Bei der Modellierung von Asphalt werden sowohl der kontinuumsmechanische als auch der partikelmechanische Ansatz verwendet. Der kontinuumsmechanische Ansatz wird ausnahmslos zur Modellierung von erkaltetem Asphalt verwendet. Wohingegen der partikelmechanische Ansatz seit kurzer Zeit³ für die Modellierung von heißem Asphalt genutzt wird.

Mit Hilfe des kontinuumsmechanischen Ansatzes wird versucht die durch den Straßenverkehr in der Straße auftretenden Mechanismen abzubilden, z. B. Verformungsverhalten (Schindler 2008), Rissausbreitung (Oeser u. a. 2018) oder Schädigungs- und Heilungsprozess (Oeser 2004), (Herz und Vormwald 2006, S. 1018).

²Hierbei kann es sich ein-, zwei oder dreidimensionale Räume handeln (Eisenberg und Renner 2006, S. 248).

³Die erste Veröffentlichung zu diesem Thema stammt aus dem Jahr 2017, siehe (Ghafoori Roozbahany 2017).

Einen Überblick und Einblick in den kontinuumsmechanischen Ansatz geben die Veröffentlichungen von OESER und LIU, siehe (Oeser 2004), (Y. Liu u. a. 2017), (P. Liu u. a. 2018), (Oeser u. a. 2017).

Die Veröffentlichungen, die mittels des partikelmechanischen Ansatzes den Asphalt modellieren, verwenden ein starres Partikelverhalten mit einem weichen Kontaktverhalten und dem dynamischen Lösungsansatz. In Tab. 3.2.1 ist eine Übersicht der veröffentlichten Arbeiten dargestellt, die sich mit der partikelmechanischen Modellierung von Asphalt beschäftigen.

Tabelle 3.2.1: Übersicht der Veröffentlichungen zum Thema partikelmechanische Modellierung von Asphalt

Inhalt	Quelle
Entwicklung eines Kontaktmodells zur Modellierung von Asphaltverdichtung	(Olsson u. a. 2019)
Experimentelle Untersuchungen und simulative Abbildung eines Schüttversuchs bei Einbautemperatur	(F. Chen u. a. 2019)
Modellierung des Bewegungsverhaltens von Asphalt bei Verdichtung	(Ghafoori Roozbahany u. a. 2019) ⁴
Ermittlung und Simulation der Risserzeugung und -ausbreitung mit Hilfe der Molekulardynamik	(Hou u. a. 2017)
Ermittlung und Simulation des Verformungsverhalten mittels dynamischer Kriechversuche	(Fakhri u. a. 2012)
Ermittlung und Simulation des Kriechverhalten mit Uniaxialen und Triaxialen Versuchen	(Lee 2006)
Ermittlung und Simulation des komplexen Schubmoduls mittels dynamischer Scher-Rheometer Versuchen	(Dondi u. a. 2014)
Ermittlung und Simulation des komplexen E-Moduls mittels dynamischer Druckbeanspruchung	(Yu und Shen 2013)
Analoges Vorgehen zu den Veröffentlichungen von DONDI und YU	(Feng u. a. 2015)
Ermittlung und Simulation der Verdichtung mittels Uniaxialer Versuche mit der Annahme, dass das Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip ⁵ bei Asphalt gilt	(J. Chen 2011)

Die Veröffentlichungen von F.CHEN, OLSSON und GHAFUORI ROOZBAHANY sind die einzigen Veröffentlichungen in Tab. 3.2.1, die sich mit der Modellierung und der experimentellen Untersuchung von „heißem“ Asphalt beschäftigen. Alle anderen Veröffentlichungen betrachten den „kalten“ Asphalt.

⁴Die von GHAFUORI ROOZBAHANY publizierten Ergebnisse wurden sowohl in seiner Dissertation als auch in einem wissenschaftlichen Journal veröffentlicht, siehe (Ghafoori Roozbahany 2017) und (Ghafoori Roozbahany u. a. 2019).

⁵Mit Hilfe dieser Zeit-/Temperatur-Verschiebungsmethode können Werte generiert werden, die außerhalb des gemessenen Wertebereichs liegen. Diese Methode kann jedoch nur für Substanzen angenommen werden, die im betrachteten Temperaturbereich nicht sprunghaft ihren Strukturcharakter ändern (Mezger 2016, S. 226 ff.).

F. CHEN hat das Bewegungsverhalten von unverdichtetem Asphalt (SMA 16 mit unterschiedlichen Bitumenanteilen) untersucht. Hierzu hat er als Versuch einen Setzversuch gewählt. Der Setzversuch wird eigentlich bei der Konsistenzprüfung von Frischbeton verwendet (siehe Deutsches Institut für Normung e.V. 2009a). Als Kontaktmodell hat er ein Modell gewählt, das sowohl Bindungskräfte in normaler als auch in tangentialer Richtung zulässt. Für die Modellierung der Partikel verwendet er einen zusammengesetzten Körper aus vier Kugeln und die Korngrößenverteilung hat als untere Grenze 4 mm.

Die Veröffentlichung von OLSSON beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Kontaktmodells, mit dem eine realistische Asphaltverdichtung möglich ist. Das Modell verwendet und verschmelzt viele Ansätze bereits bekannter Kontaktmodelle (z. B. JKR-Modell, HERZ-Modell).

GHAFOORI ROOZBAHANY hat das Bewegungsverhalten von Asphalt beim Verdichten untersucht. Die Untersuchungen wurden an einem eigens entwickelten Versuchsaufbau (*compaction flow simulator*) durchgeführt. Der Versuchsaufbau orientiert sich an der Walzenverdichtung und dem Ausweichen des Materials. Für die Simulation wurden zwei Kontaktmodelle benutzt, zum einen ein lineares Modell und zum anderen das BURGER-Modell.

3.3 Zusammenfassung

Von den vorhandenen Modellierungsmethoden finden nur der kontinuumsmechanische und der partikelmechanische Ansatz Anwendung bei der Modellierung von bitumenhaltigem Mischgut. Veröffentlichungen, die die statistische Methode oder die Zellulären Automaten zur Modellierung von Asphalt verwenden, wurden nicht gefunden.

Die Zellulären Automaten wurden bei der Simulation von kohäsionslosen Schüttgütern eingesetzt, zeigen jedoch erhebliche Abweichungen gegenüber dem realen Schüttgutverhalten (Kaldenhoff 1998, S. 8.1 f.). Weitere Veröffentlichungen bzw. Forschungsvorhaben, die experimentellen Untersuchungen von Schüttgütern mit der Simulation und Modellierung von Zellulären Automaten verknüpfen, wurden nicht publiziert.

Die statistische Methode wird nur vereinzelt eingesetzt, um technische Prozesse zu modellieren und zu simulieren (Wittmann 2011), (Fritz 2001). Eine Anwendung der Methode auf die Modellierung und Simulation eines Materialverhaltens konnte nicht in Erfahrung gebracht werden.

Der Stand der Technik bei der Modellierung von Asphalt zeigt, dass sich der kontinuumsmechanische und der partikelmechanische Ansatz für den Anwendungsfall „erkalteter“ Asphalt eignen. Anhand der Veröffentlichungen wird deutlich, dass sich die beiden Ansätze auf ein breites Feld anwenden lassen. Die Grundlage hierfür bilden die verschiedenen Kontaktmodelle, mit denen es möglich ist das Verhalten von kohäsionslosen und kohäsiven Stoffen zu simulieren z. B. (Morrissey 2013, S. 44–57), (Olsson u. a. 2019), (Oeser 2004). Für die Modellierung von „heißem“ Asphalt wird nur der partikelmechanische Ansatz verwendet. Diese Veröffentlichungen haben gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, das kohäsive Asphaltverhalten zu modellieren. Die Intentionen und die daraus resultierenden Fragestellungen bei den Veröffentlichungen machen deutlich, dass der Einbauprozess nicht im wissenschaftlichen Fokus steht.

4 Ziele und Eingrenzungen

Im vorliegenden Kapitel werden die Ziele und Hypothesen auf der Basis des vorangegangenen Stands der Technik erarbeitet und konkretisiert. Dabei werden die zu untersuchenden Asphaltparameter und Modellierungsansätze für die vorliegende Arbeit beurteilt und eine geeignete Auswahl getroffen.

4.1 Konkretisierung der Ziele

Der Stand der Technik für den Straßenbau hat gezeigt, dass der Einbauprozess von Asphaltstraßen ein komplexes Thema darstellt, bei dem das sich einstellende Gleichgewicht zwischen Maschine und Material für die herzustellende Straße essentiell ist und die Einbauqualität maßgeblich beeinflusst.

Die verschiedenen Einflussgrößen und die Wechselwirkungen im Einbauprozess wurden identifiziert. Bei der Quantifizierung der Ursachen und Wirkungen von einzelnen Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen herrschen unterschiedliche Meinungen vor, siehe Tab. 2.3.1.

Der Schwerpunkt der Forschung über den Straßenbau liegt in der Verbesserung der Gebrauchseigenschaften des Asphalts (z. B. Leiser Asphalt (Bundesanstalt für Straßenwesen 2012)) durch Optimierung der Asphaltzusammensetzungen oder Substitution einzelner Asphaltkomponenten (Bundesanstalt für Straßenwesen 2018), (Renken und Wistuba 2018). Der Einbauprozess steht hierbei nicht im Fokus.

Den veröffentlichten Forschungsergebnissen, die sich mit dem Einbauprozess beschäftigen, ist gemein, dass die erlangten Erkenntnisgewinne nur durch sehr aufwendige Versuche entstanden sind (Monecke u. a. 1997), (Monecke u. a. 1999), (Utterodt 2013). Eine simulative Betrachtung des Einbauprozesses mit dem Baustoff Asphalt ist bis zum jetzigen Zeitpunkt in keiner Veröffentlichung erfolgt.

Der Grund hierfür liegt in der schwierigen Modellierung und experimentellen Untersuchung von heißem Asphalt begründet. Dies resultiert aus der Zusammensetzung des Asphalts. Hierbei spielt sowohl die inhomogene Struktur (aufgrund der Korngrößenverteilung) eine Rolle als auch das Verhalten des Bindemittels (Bitumen), das im betrachteten Temperaturbereich nicht bekannt ist.

Der Stand der Forschung (siehe Kapitel 3.2) hat gezeigt, dass die Modellierung des heißen Asphalts mittels Simulationstechnik möglich ist. F.CHEN betrachtet das Bewegungsverhalten von heißem Asphalt im unverdichteten Zustand. Die Ergebnisse und Ansätze können nur einen geringen Beitrag zum besseren Verständnis des Einbauprozesses leisten, da das Bewegungsverhalten von unverdichtetem Asphalt beim Einbau eine untergeordnete Rolle spielt.

GHAFOORI ROOZBAHANY hat mit seinem Prüfstand die Bewegungen von heißem Asphalt beim Verdichten untersucht und modelliert. Da sich der Versuchsaufbau an der Walzverdich-

tung orientiert lassen sich einige gewonnenen Erkenntnisse auf den Einbauprozess übertragen. Der Fokus der Arbeit von GHAFORI ROOZBAHANY liegt zurzeit auf Verbesserung und Weiterentwicklung des Versuchsaufbaus. Die Simulation und die damit einhergehende systematische Parameteridentifikation der Asphaltkennwerte wird zurzeit nicht forciert. Eine Aussage über die Übertragbarkeit der gewonnenen Simulationsparameter auf den Einbauprozess kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht getroffen werden.

Beiden Veröffentlichungen ist gemein, dass sich die Kinematik des Materials durch die konzipierten Versuchsanordnungen gut beobachten lässt. Eine Charakterisierung der auftretenden Kräfte und die damit einhergehende Beschreibung der Kinetik kann aber nur schwer erfolgen, da die Möglichkeiten zur Messung der Kräfte stark eingeschränkt sind.

Das Kontaktmodell von OLSSON befindet sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium und es kann keine Aussage über die Relevanz beim Einbauprozess getroffen werden.

Anhand der Forschungsergebnisse wird deutlich, dass das Wissen um den Einbauprozess, hierbei vor allem das Verhalten des Asphalts beim Einbau als fragmentarisch bezeichnet werden kann. Aufgrund dessen stellt das Verhalten des Asphalts eine Forschungslücke dar, die detaillierte Untersuchungen im Rahmen der Arbeit erforderlich machen.

Da es unter wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Gesichtspunkten nicht vertretbar ist Untersuchungen während des Einbaus durchzuführen, wird das Verhalten des Werkstoff durch eine Kombination bestehend aus Prüfstands- und Simulationsergebnissen abgebildet¹.

In einem ersten Schritt muss ein Prüfstand entwickelt werden, mit dem sich relevante Asphaltparameter bestimmen lassen. Hierbei ist darauf zu achten, dass bei der Abstraktion, hervorgerufen durch die Überführung des Einbauprozesses hin zu einem Prüfstand, die relevanten Asphaltparameter unangetastet bleiben.

Der zweite Schritt besteht darin ein Simulationsmodell des Prüfstandes zu entwickeln. Auch hierbei ist wieder darauf zu achten, dass der Abstraktionsprozess den zu untersuchenden Asphaltparameter nicht beeinflusst. Die beschriebene Problematik der Abstraktion ist in Abb. 4.1.1 gezeigt.

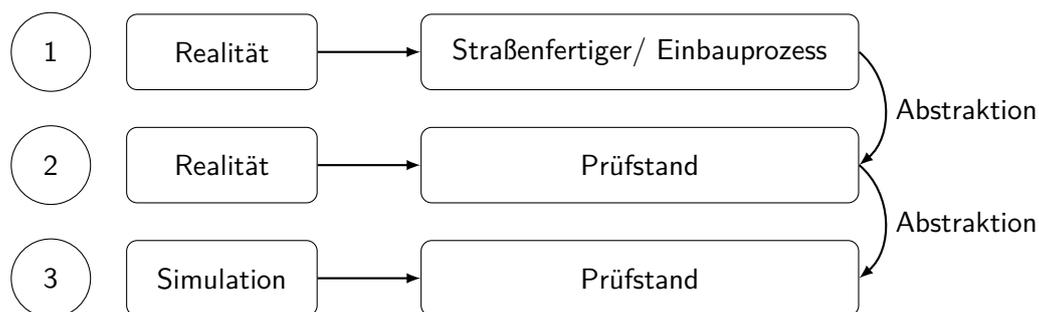


Abbildung 4.1.1: Vorgehensweise bei fragmentarischem Wissen

¹Die wirtschaftlichen Gesichtspunkte gliedern sich auf in Kosten für das zu verbauende Material, Maschinen- und Personalkosten sowie ggfs. Rückbaukosten. Die wissenschaftlichen Aspekte sind in Kapitel 2.3 aufgeführt. Hinzu kommt, dass über den Zusammenhang zwischen dem Anstellwinkel und der produzierten Schichtdicke keine publizierten Ergebnisse existieren. Hierzu läuft zurzeit ein BMVI-Forschungsprojekt (BMVI 2020).

Die experimentelle Untersuchung mittels Prüfstands Aufbau und Simulation stellt eine wissenschaftliche und wirtschaftliche Möglichkeit dar, um den vorhandenen Wissensstand zu erhöhen und die auftretenden Zusammenhänge besser zu verstehen.

Die Simulation kann im vorliegenden Fall nicht ohne die Ergebnisse des Prüfstandes existieren, da keine Referenz- bzw. Orientierungswerte für Werkstoffparameter bekannt sind. Die beiden Untersuchungsmethoden bilden eine Einheit, zum einen den simulativen Bereich, bestehend aus der Modellbildung und der Simulation. Zum anderen den Prüfstandsbereich, der für die Evaluierung der Simulationsergebnisse notwendig ist. Dies geschieht durch die Validierung und Verifikation² des simulativen Systems. Validierung und Verifikation nehmen einen wichtigen Stellenwert ein, um die Akzeptanz der Ergebnisse zu gewährleisten. Anhand der beiden Handlungsfelder lassen sich weitere Teilaspekte ableiten:

- Entwicklung des Versuchsaufbaus
- Auswahl der Modellierungsmethode
- Auswahl von geeigneten Mischgütern

Die Modellierungsmethode muss die relevanten Stoffparameter abbilden können. Hierzu zählt neben der Inhomogenität auch das kohäsive Verhalten. Für die Validierung und Verifikation ist ein geeigneter Versuchsaufbau zu konzipieren und zu entwickeln. Dabei ist zu beachten, dass zurzeit keine Versuchsaufbauten bekannt bzw. publiziert sind, mit denen sich Erkenntnisse für den Einbauprozess gewinnen lassen. Daraus ergibt sich auch, dass keine Referenz- bzw. Orientierungswerte für Werkstoffparameter bekannt sind, mit deren Hilfe die Eignung des Versuchsaufbaus nachgewiesen werden kann. Aufgrund dessen ist es notwendig die Versuchsergebnisse statistisch abzusichern um die Akzeptanz der Ergebnisse zu gewährleisten.

Für die experimentellen Untersuchungen muss ein passendes Asphaltmischgut ausgewählt werden, das modelliert werden soll und das mittels physikalischer Experimente untersucht werden kann. Bei der Auswahl ist darauf zu achten, dass Zusatzstoffe im Asphaltmischgut auf ein Minimum reduziert werden, um die Parameter- und Störgrößenanzahl in dem zu untersuchenden System zu reduzieren.

Darüber hinaus erscheint es sinnvoll weitere Mischgüter zu untersuchen, mit denen sich das unbekannte Verhalten des Bitumens und die Spreizung der Korngrößenverteilung abschätzen lassen. Hierbei muss es sich nicht um ein Mischgut handeln, welches im Straßenbau eingesetzt wird, sondern bei den Mischgütern muss die zu untersuchende Größe (Bitumeneigenschaft bzw. Spreizung der Korngrößenverteilung) möglichst wechselwirkungsfrei analysiert werden können.

Die Wahl eines synthetischen Mischguts/Asphaltesatzmischgut³ wird verworfen, da die Herstellung eines synthetischen Mischguts einen sehr aufwendigen und zeitintensiven Prozess darstellt. Hierfür müssten zunächst die zu untersuchenden Materialeigenschaften im Asphaltmischgut identifiziert und ermittelt werden. Im Anschluss daran müssten diese Eigenschaften auf

²Die Validierung beantwortet die Frage, ob die Modellgleichungen die richtigen für das zugrundeliegende Modell sind („Löse ich die RICHTIGEN Gleichungen?“). Das Ziel der Verifikation ist die Prüfung, ob die Modellgleichungen richtig gelöst werden („Löse ich die Gleichungen RICHTIG?“) (siehe Verein Deutscher Ingenieure 2004, S. 38 f., 54).

³Im Forschungsvorhaben *Einflußnahme maschinentechnischer Parameter auf den Einbau von Asphalt* wurde anstatt von Bitumen ein Ersatzbindemittel verwendet. Dieses Ersatzbindemittel weist bei Raumtemperatur ähnliche physikalische Eigenschaften auf, wie der Bitumen im Temperaturbereich von 130 bis 150 °C (Monecke u. a. 1997, S. 18).

das synthetische Mischgut übertragen werden. Dies alles vor dem Hintergrund, dass nur wenige Werkstoffparameter bekannt und publiziert sind. Eine Nutzung erscheint erst rentabel, wenn große Mengen benötigt werden. Der angestrebte experimentelle Versuchsaufbau soll im Labormaßstab stattfinden und der Nutzen von synthetischem Mischgut ist aus wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Gesichtspunkten nicht gegeben. Dadurch lässt sich folgende Forschungsfrage formulieren:

Wie ist es möglich einen Asphaltparameter, der beim Einbau eine Rolle spielt, zu identifizieren und mittels eines Prüfstandes im Labormaßstab zu quantifizieren, sowie das Asphaltverhalten modellierungstechnisch abzubilden?

Die Forschungsfrage lässt sich dabei in folgende Teilziele untergliedern:

- Identifikation und Auswahl eines geeigneten Asphaltparameters hinsichtlich der Relevanz beim Einbau, sowie der Mess- und Modellierbarkeit (Kapitel 4.2)
- Beurteilung und Auswahl eines geeigneten Modellierungsansatzes zur Darstellung des heißen Asphalts, sowie der softwaremäßigen Umsetzung des Modellierungsansatzes (Kapitel 4.3)
- Beurteilung und Auswahl eines physikalischen Versuchsaufbaus zur Messung des ausgewählten Asphaltparameters (Kapitel 4.3)
- Aufbau und Validierung des physikalischen Versuchsaufbaus (Kapitel 7.1)
- Auswahl des zu untersuchenden Mischguts (Kapitel 7.2)
- Aufbau und Validierung des simulativen Versuchsaufbaus (Kapitel 7.3)
- Parameterstudie für den gewählten Modellierungsansatz (Kapitel 8.2)
- Übertragbarkeit der Simulationsparameter (Kapitel 8.2.7)

4.2 Eingrenzung Asphaltparameter

Theorie zu den Einflussfaktoren im Asphalt

Wie aus Kapitel 2 und Kapitel 3 hervorgeht, gibt es wenige wissenschaftliche Erkenntnisse zum Verhalten des Asphalts beim Einbau.

Für theoretische Überlegungen zu den Einflussfaktoren auf das Asphaltverhalten wird auf die Betrachtungsweise der verschiedenen Strukturebenen zurückgegriffen. Hierbei wird zwischen der mikroskopischen, mesoskopischen und makroskopischen Betrachtung des Materials unterschieden. Auf der mikroskopischen Ebene werden die innere Struktur des Materials und interpartikuläre Kräfte bzw. Zusammenhänge berücksichtigt. Die makroskopische Ebene sieht das Material als Kontinuum an und der Einfluss der inneren Materialstruktur wird vernachlässigt. Die mesoskopische Ebene verbindet die mikroskopische Ebene mit der makroskopischen Ebene, indem mikroskopische Phänomene mit einer makroskopischen Betrachtungsweise verbunden werden (siehe Heese 2013, S. 30 f.). Die Sichtweise von mikroskopischen, mesoskopischen und makroskopischen Vorgängen ist bei der Betrachtung von Baustoffen weit verbreitet z. B. (L. Meyer 2007), (Ormel 2012), (Gröger u. a. 2003).

Das Verhalten wird von zwei Faktoren bestimmt: Dem Bitumen und dem Gestein. Der Bitumen bestimmt das Verhalten durch seine Adhäsionswirkung (zwischen Bitumen und Korn) und Kohäsionswirkung (innerhalb des Bitumens). Dieses Verhalten ist abhängig von der Temperatur,

Bitumenart und der eingesetzten Bitumenmenge. Das Gestein wiederum beeinflusst das Verhalten des Asphalts über die geometrischen Eigenschaften des Korns (Korngröße, Kornform), die Korngrößenverteilung und die Materialeigenschaft des Gesteins.

Diese beiden Faktoren sind für die mikro- und makromechanischen Eigenschaften verantwortlich⁴. Die mikromechanischen Eigenschaften sind auf der Kornebene angesiedelt. Die makromechanischen Eigenschaften beschreiben das Kornsystemverhalten als Ganzes, d. h. aufgrund der hohen Anzahl der Partikel und deren Interaktion kann ein makroskopisches Gutverhalten angenommen werden.

Das Verhalten auf der mikromechanischen Ebene wird durch das Zusammenspiel von mechanischen und chemischen Kräften bestimmt. Die mechanischen Kräfte (Reibungs- und Trägheitskräfte⁵) im Partikel-Partikel Kontakt ergeben sich aus den geometrischen Eigenschaften und Korneigenschaften. Die chemischen Kräfte werden von dem Bitumen (Adhäsion und Kohäsion) hervorgerufen. Hierbei beeinflussen Korngröße und Kornform sowohl die mechanischen als auch die chemischen Kräfte. Da die Körner mit Bitumen umhüllt sind, kann angenommen werden, dass die mechanischen Reibungskräfte gering sind.

Für die makromechanischen Eigenschaften ist neben der Bitumenmenge, der Bitumenart und der Korngrößenverteilung auch das sich einstellende Korngerüst verantwortlich. Dieser Sachverhalt ist mit den beteiligten Einflussfaktoren in Abb. 4.2.1 gezeigt.

⁴Die mesoskopische Betrachtung wird im vorliegenden Fall nicht weiter verfolgt.

⁵Hierbei sind Kräfte gemeint die notwendig sind, um ein Korn zu bewegen.

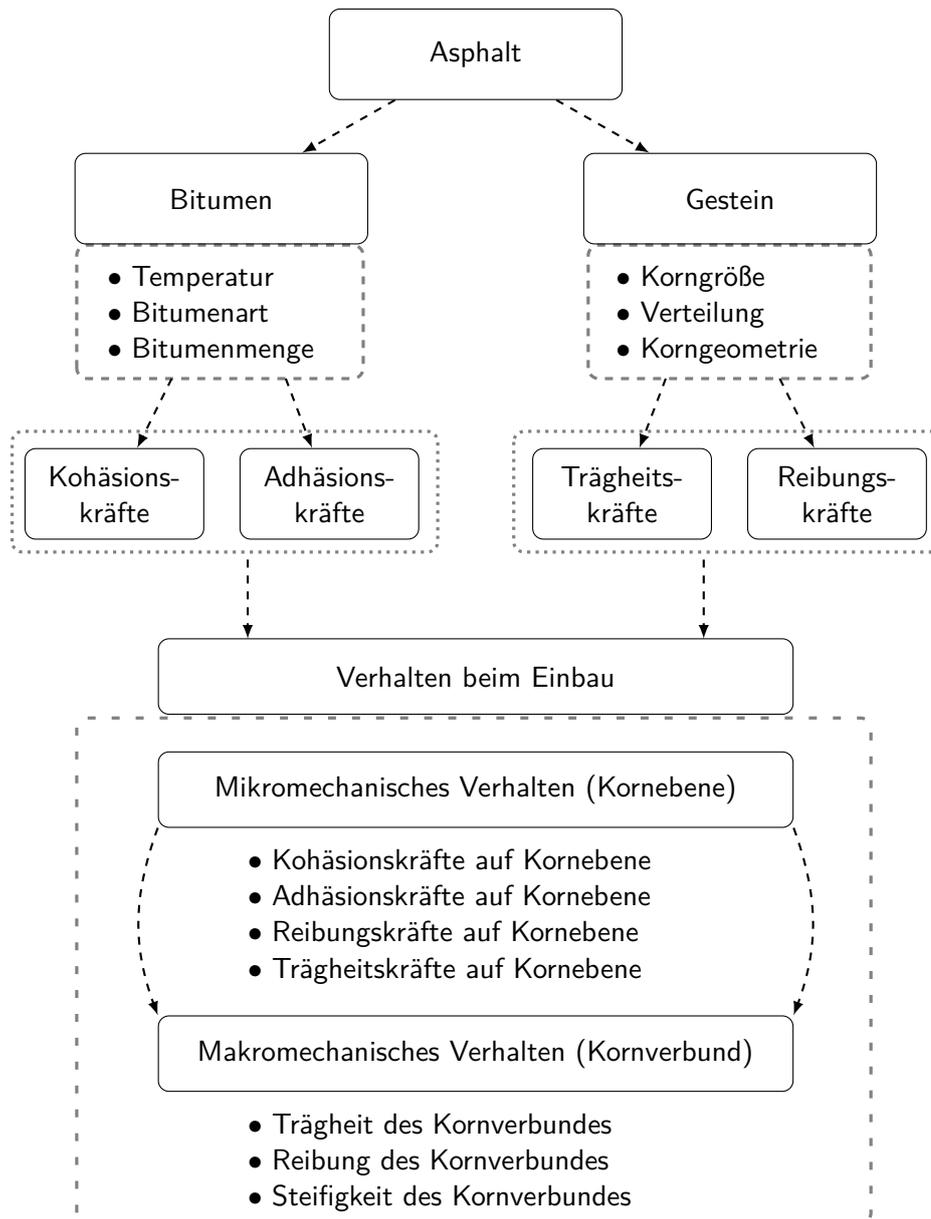


Abbildung 4.2.1: Beschreibung der Einflussfaktoren für das mikro- und makromechanische Verhalten des Asphalts

Auswahl Asphaltparameter

Für den Einbau ist das makromechanische Verhalten des Asphalts entscheidend, da hier der Asphalt transportiert (Kratzkettenförderband und Schnecke) und verdichtet (Einbaubohle) wird. Die Möglichkeit anhand von mikromechanischen Eigenschaften auf das makromechanische Verhalten des Asphalts zu schließen erscheint hierbei nicht zielführend, da nur einige mikromechanische Eigenschaften mit erheblichem messtechnischen Aufwand ermittelt werden können, z. B. die Geometrie des Gesteins oder die Adhäsionswirkung. Durch die Kenntnis einzelner mikromechanischer Eigenschaften kann nicht auf andere Eigenschaften geschlossen werden, da nichts über das Zusammenspiel und das gegenseitige Beeinflussen der verschiedenen mikromechanischen Eigenschaften bekannt ist. Somit erscheint es sinnvoll und zielführend einen makromechanischen

Werkstoffparameter zu identifizieren. In der Literatur wird dem Asphalt beim Einbau eine Trägheit bzw. Widerstandsfähigkeit zugesprochen (Kapitel 2.3). Diese Eigenschaft kann auch als “makroskopische Steifigkeit“⁶ umschrieben werden und diese Steifigkeit ist wiederum Abhängig von den Kräften innerhalb des Mischgutes. Der *Haftreibungsbeiwert* innerhalb des Materials stellt somit einen Werkstoffkennwert dar, mit dem das makroskopische Verhalten des Asphalts beschrieben werden kann. Daher erscheint es sinnvoll den Haftreibungsbeiwert als Parameter zu untersuchen.

4.3 Eingrenzung experimentelle Untersuchungen

Die Entscheidung für einen geeigneten Modellierungsansatz und für einen Versuchsaufbau werden anhand verschiedener Auswahllisten getroffen.

Bei der Generierung, Auswahl und Bewertung geeigneter Lösungen können bei technischen Systemen verschiedene Methoden zum Einsatz kommen, z. B. der morphologische Kasten oder eine *Nutzwertanalyse* (NWA) (siehe Verein Deutscher Ingenieure 1993, S. 33–38). Die Anwendung der verschiedenen Methoden erscheint aber nur sinnvoll, wenn die verwendeten Kriterien einen quantifizierbaren Wertebereich besitzen. Bei den vorliegenden Fällen (Modellierungsansatz, Versuchsaufbau) ist die Formulierung eines derartigen Wertebereichs nicht möglich. Daher erfolgt hier die Entscheidung mittels einer Auswahlliste.

Beurteilung der Modellierungsansätze

Für die Beurteilung eines geeigneten Ansatzes wird die Auswahlliste Tab. 4.3.2 verwendet. Hierzu werden folgende Kriterien definiert:

1. Kohäsive Stoff- bzw. Kontaktmodelle sind vorhanden:

Beim heißen Asphalt handelt es sich um ein viskoses Material, das ein kohäsives Stoffverhalten aufweist. Die Abbildung dieser Stoffeigenschaften ist für ein reales Verhalten relevant.

2. Abbildung von Inhomogenitäten ist möglich:

Die Abbildung von Inhomogenitäten ist wichtig, da der Asphalt aus verschiedenen Gesteinskörnungen besteht und eine homogene Mischung der einzelnen Gesteinskörnungen nicht möglich ist. Durch die Modellierung der Inhomogenität lässt sich das reale Verhalten des Asphalts besser abbilden.

3. Experimente wurden publiziert:

Experimente sind für eine Simulation in zweierlei Hinsicht relevant. Zum einen um wichtige Parameter zu ermitteln, die Teil der Simulation sind. Zum anderen werden durch Experimente Referenzdaten generiert, die für eine spätere Überprüfung der Simulationsergebnisse von immanenter Bedeutung sind. Hierdurch lässt sich eine Aussage über die Güte der Simulation treffen.

⁶Hier ist die Steifigkeit/Widerstandsfähigkeit des Kornverbundes gemeint.

4. Software vorhanden:

Für die Implementierung ist es außerdem wünschenswert, dass eine Software vorhanden ist. Mit Hilfe der Software ist es möglich ein Modell mit ingenieurwissenschaftlichen Kenntnissen aufzubauen. Dadurch wird die Formulierung der beschreibenden Differentialgleichungssysteme auf ein Minimum reduziert. Dies bringt Zeitersparnisse mit sich und reduziert die Fehler. Das bedeutet die Software erleichtert den Modellaufbau und die -analyse wesentlich (siehe Dronka 2004, S. 4).

5. Kopplungsfähigkeit vorhanden:

Um eine spätere Systemsimulation (Einbauprozess) durchführen zu können, muss die Software kopplungsfähig sein. Eine Software gilt als kopplungsfähig, wenn fachdisziplinspezifische Werkzeuge für eine Simulation fachdisziplinübergreifender Systeme genutzt werden können (siehe ebd., S. 4 f.).

6. Referenzdaten vorhanden :

Vorhandene Referenzdaten sind wünschenswert, da dadurch eine Aussage über die Plausibilität des im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Experiments getroffen werden kann.

Für die nachfolgende Auswahlliste Tab. 4.3.2 werden die verschiedenen partikelmechanischen Ansätze nummeriert, von eins bis neun (PA 1 bis PA 9)⁷.

Tabelle 4.3.2: Auswahlliste für Modellierung von Schüttgütern

✓ + X !	Auswahlkriterien: Vereinbar Bedingt vereinbar Nicht vereinbar Keine Veröffentlichung	Kohäsive Stoffe- / Kontaktmodelle vorhanden						Entscheidung
		Abbildung von Inhomogenitäten						
		Experimente wurden publiziert						
		Software vorhanden						
		Kopplungsfähigkeit						
		Referenzdaten vorhanden						
M	Modellierungsmöglichkeiten							
M 1	FEM Simulation	✓	X	+	✓	✓	!	X
M 2	Zelluläre Automaten	!	✓	+	!	!	!	X
M 3	Statistische Methoden	!	✓	+	!	!	!	X
M 4	Partikelmechanischen Ansätze (PA)							
M 4.1	PA 1	!	✓	+	!	!	!	X
M 4.2	PA 2	!	✓	+	✓	!	!	X
M 4.3	PA 3	!	✓	+	!	!	!	X
M 4.4	PA 4	!	✓	+	!	!	!	X
M 4.5	PA 5	✓	✓	+	✓	✓	!	✓
M 4.6	PA 6	!	✓	+	!	!	!	X
M 4.7	PA 7	!	✓	+	!	!	!	X
M 4.8	PA 8	!	✓	+	!	!	!	X
M 4.9	PA 9	!	✓	+	!	!	!	X

⁷Die Nummerierung erfolgt entsprechend der Abb. 3.1.1, beginnend von links (PA 1) nach rechts (PA 9). Die Nummerierung wird durchgeführt, da es nicht für jede partikelmechanische Methode eine Bezeichnung gibt bzw. diese nicht konsistent in der Literatur gebraucht wird.

Allen Simulationsmöglichkeiten sind zwei Kriterien gemein. Zum einen wurden für alle Modellierungsansätze spezifische Experimente publiziert, mit denen eine Parameterbestimmung bzw. ein Vergleich möglich ist. Jedoch wurde kein experimenteller Aufbau beschrieben, bei dem heißer Asphalt untersucht worden ist. Eine Adaption der vorhandenen Aufbauten auf die spezifischen Anforderung muss geprüft werden. Zum anderen wurden, bedingt durch das Fehlen eines experimentellen Aufbaus, keine Referenzdaten mit heißem Asphalt publiziert.

Die FEM- Simulation kann keine Inhomogenitäten abbilden und somit scheidet diese Möglichkeit zur Modellierung aus.

Bei den Zellulären Automaten wurde kein Stoff- bzw. Kontaktmodell für kohäsive Stoffe publiziert und bezüglich einer vorhandenen Software und deren Kopplungsfähigkeit gibt es keine Veröffentlichungen. Daher wird diese Möglichkeit nicht weiter betrachtet. Die Statistische Methode verhält sich analog zu den Zellulären Automaten.

Beim partikelmechanischen Ansatz lassen sich neun verschiedene Ansätze identifizieren, wobei PA 5 die meisten Kriterien erfüllt und somit für die weitere Beurteilung ausgewählt wird.

Für den partikelmechanischen Ansätze 5 sind verschiedene Stoff- bzw. Kontaktmodelle publiziert worden, unter anderem auch kohäsive Kontaktmodelle. Prinzipiell sollte es möglich sein für die anderen partikelmechanischen Ansätze diese Kontaktmodelle zu adaptieren, daher werden die betreffenden Spalte mit ! gekennzeichnet.

Beurteilung der Untersuchungsmöglichkeiten

Für die physikalischen experimentelle Untersuchung wird die Auswahlliste nach Tab. 4.3.4 verwendet. Hierzu werden folgende Kriterien definiert:

1. Dichtheit:

Das Probenmaterial besteht unter anderem aus Bitumen, dessen Viskosität temperaturabhängig ist. Bei der angestrebten Untersuchungstemperatur fällt die Viskosität ab und der Versuchsaufbau muss dicht sein, damit ein Austreten verhindert wird. Dadurch werden eine Veränderung der Probenzusammensetzung, sowie eine Kontamination der Umgebung und der Funktionsflächen zu verhindert. Eine Kontamination der Funktionsflächen hätte zur Folge, dass maßgebliche Relativbewegungen von Bestandteilen des Versuchsaufbaus während der Untersuchung behindert werden, ohne dass es zu einer messtechnischen Erfassung kommt. Eine derartige unkontrollierbare Verfälschung der Messergebnisse ist daher durch die Wahl einen geeigneten Versuchsaufbau zu verhindern bzw. möglichst klein zu halten.

2. Beheizbarkeit:

Die zu untersuchende Materialprobe muss vor, aber auch während und zwischen den Messungen auf die angestrebte Versuchstemperatur gebracht werden. Somit müssen ein geeigneter Versuchsaufbau und die verwendeten Komponenten für eine derartige Betriebstemperatur ausgelegt und tauglich sein.

3. Möglichkeit der mehrfachen Aufnahme von Messreihen mit derselben Probe:

Bei der Probenvorbereitung von Schüttgütern hat SCHULZE festgestellt, dass eine nicht zu vernachlässigende Fehlerquelle bei den Parameteridentifikationsversuchen in einer zwischen den einzelnen Messungen abweichenden Art der anwenderseitigen Probenvorbereitung besteht. Daraus resultierende Messfehler lassen sich nicht kompensieren (Schulze 2014, S. 206). Der anwenderseitige Einfluss lässt sich durch mehrfache Untersuchung derselben Materialprobe reduzieren. Darüber hinaus sind mehrfache Untersuchungen sehr wichtig, da das zu untersuchende Material inhomogen ist und nur durch eine ausreichende Anzahl an Wiederholungen ein valides Ergebnis entstehen kann. Die mehrfache Aufnahmemöglichkeit von Messreihen stellt daher ein wichtiges Kriterium für die Auswahl dar.

4. Ermittlung relevanter Asphaltparameter:

Siehe Kapitel 4.2 .

Tabelle 4.3.4: Auswahlliste für Versuchsaufbau

✓ + ✗ !	Auswahlkriterien: Vereinbar Schwer vereinbar Nicht vereinbar Informationsmangel	Dichtheit				Entscheidung	
		Beheizbarkeit					
		Mehrfache Messreihen					
		Relevanter Asphaltparameter					
		Quelle					
V	Versuchsaufbau zur Parameteridentifikation						
V1	COUETTE Versuch	✗	✓	✓	✓	(Fenistein u. a. 2004, S. 1)	✗
V2	Hohlzylinderversuch	✗	✓	✓	✓	(Buttlar u. a. 2002, S. 11)	✗
V3	Planare Scherzelle	✗	✓	✗	✓	(Richefeu u. a. 2008, S. 1372), (Dratt 2016, S. 55)	✗
V4	Ringscherzelle	✓	✓	✓	✓	(Schulze 2014, S. 13)	✓
V5	Schüttgutprobe	✓	✓	✓	✗	(Richefeu u. a. 2008, S. 55), (Dratt 2016, S. 49), (Günthner und Fottner 2017, S. 27)	✗
V6	Uniaxialer Versuch	✗	+	✗	+	(Schulze 2014, S. 5), (Morrissey 2013, S. 91)	✗
V7	Triaxialer Versuch	✓	+	!	✗	(Obermayr und Vrettos 2013, S. 55), (Schulze 2014, S. 55)	✗
V8	JKR-Versuch	✓	✓	+	✗	(Ahn und Shull 1996, S. 4383)	✗
V9	Setzfließversuch	✓	✓	✓	✗	(Remond und Pizette 2014, S. 175 f.) , (F. Chen u. a. 2019, S. 448)	✗
V10	Viskositätsprüfung	✓	✓	✓	✗	(Kerkhoven 1967, S. 12)	✗
V11	Flow Compaction	✓	✓	✓	✗	(Ghafoori Roozbahany u. a. 2019)	✗

Von den oben aufgeführten Versuchsaufbauten erfüllt der Ringscherzelle (V4) nach SCHULZE die Anforderungen. Bei dem Versuchsaufbau von COUETTE, dem Hohlzylinderversuch, den Versuchsaufbau mit der planaren Scherzelle und dem uniaxialen Versuch kann aufgrund des jeweiligen prinzipiellen Versuchsaufbaus keine Dichtheit hergestellt werden. Die Beheizbarkeit ist bei dem uniaxialen und triaxialen Versuch schwierig zu realisieren. Die Durchführung von mehrfachen Messreihe mit dem selben Material sind sehr wichtig, siehe Punkt 3 (Beurteilung der Untersuchungsmöglichkeiten). Mit den Versuchsaufbauten planare Scherzelle, uniaxialer Versuch, triaxialer Versuch und JKR-Versuch sind mehrfache Messungen nicht möglich. Die Identifikation des ausgewählten relevanten Asphaltparameters kann durch den COUETTE-Aufbau, den Hohlzylinderversuch, der planare Scherzelle und der Ringscherzelle erfolgen. Aber aufgrund der anderen Einschränkungen bleibt nur die Ringscherzelle (V4) nach SCHULZE übrig.

Software

Für die Bearbeitung der Forschungsfrage wird die Software EDEM[®] ausgewählt, da die Software in den Bereichen *Bedienbarkeit/ Auswertung*, *Kopplungsfähigkeit* und *Funktionalität* sehr gute Eigenschaften ausweist. So kann die Eingabe über eine graphische Oberfläche erfolgt und für die Auswertung ist kein zusätzliches Programm notwendig (*Bedienbarkeit/ Auswertung*). Die Software kann mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Programmen gekoppelt werden. Es existieren Kopplungsmöglichkeiten zwischen Matlab[®]/Simulink[®]/SimMechanics[®] (numerische Simulation, Datenerfassung, Datenanalyse und- auswertung), CFD (numerische Strömungssimulation) und adams (Mehrkörpersimulation) (*Kopplungsfähigkeit*). Mit dem Kriterium *Funktionalität* ist das vorhanden sein von Kontaktmodellen gemeint, mit denen es prinzipiell möglich ist ein kohäsives Stoffverhalten nachzuempfinden. Bei EDEM[®] existieren zwei Kontaktmodelle, die diese Eigenschaften aufweisen, zum einen das Kontaktmodell nach JOHNSON, KENDALL und ROBERTS und zum anderen das Kontaktmodell nach Edinburgh Elasto-Plastic Adhesive.

5 Diskrete Elemente Methode

Das Kapitel beschäftigt sich mit der Diskreten Elemente Methode. Hierbei wird geklärt, welche Ideen und welche mathematischen Grundlagen der Methode zugrunde liegen. Die in der Arbeit verwendeten Kontaktmodelle werden erklärt. Hierzu zählt das Modell von HERTZ-MINDLIN, sowie zwei Kontaktmodelle zur Beschreibung des kohäsiven Materialverhaltens. Im Anschluss daran wird der Kalibrierungsprozess bei den DEM-Simulationen erläutert. Das Kapitel schließt mit den durchzuführenden Experimenten, die der Charakterisierung von Schüttgütern dienen. Hierbei wird genauer auf den Ringscherzellenversuch eingegangen, da dieser Versuch im Rahmen der Arbeit weiterverwendet werden.

5.1 Grundlagen

Allgemein kann die *Diskrete Elemente Methode* (DEM) als eine Ansammlung von Algorithmen beschrieben werden, die dynamische Vorgänge in ablaufenden Prozessen abbilden können. Hierbei werden sowohl endliche Verschiebungen und Rotationen diskreter Körper als auch der Kontakt und die Trennung der diskreten Körper miteinbezogen. Der Kontakt und die Trennung der diskreten Körper wird über ein sogenanntes Kontaktmodell beschrieben, welches sich je nach Anwendung in Aufbau und Verhalten unterscheidet (näheres wird in Abschnitt 5.2 beschrieben) (Dratt 2016, S. 36 ff.) und (Tichý 2009, S. 25 f.). Den Kern der DEM bilden die Lösung der NEWTONschen Bewegungsgleichungen jedes diskreten Körpers und die Anwendung eines Kontaktmodells auf jeden Kontakt zwischen den diskreten Körpern innerhalb eines Systems. Im vorliegenden Fall ermöglicht die DEM¹ eine Modellierung und Simulation von Schüttgütern.

Die Ursprünge der DEM liegen in der Molekulardynamik² begründet, jedoch wird in der Literatur immer auf die Arbeiten von CUNDALL (Cundall 1971) und von CUNDALL und STRACK (Cundall und Strack 1979) verwiesen. Hiernach wurde die DEM erstmals auf Problemstellungen im Bereich der Felsmechanik angewendet (ebd.).

Im Rahmen dieser Arbeit wird die DEM verwendet, die auf den Arbeiten von CUNDALL und STRACK beruht, dabei werden die diskreten Körper bzw. Elemente als starr, nicht deformierbar und unzerbrechlich angenommen. Des Weiteren wird der Kontakt zwischen den diskreten Elementen als “weich “ angenommen, d. h. eine virtuelle Überlappung (leichtes gegenseitiges Überschneiden) ist möglich. Durch die Überschneidung der Elemente wird die Kontaktkraft ermittelt. Der formelmäßige Zusammenhang ist in der Gleichung 5.1.7 und Abb. 5.1.3 dargestellt (Schneider 2012, S. 17). Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die diskreten Körper bzw. Elemente als Partikel bezeichnet.

¹Eine Übersicht über die verschiedenen DEM und deren Anwendung ist in (Schneider 2012, S. 19) zu finden.

²Simulation und Modellierung der Wechselwirkung zwischen Atomen und Molekülen (Alder und Wainwright 1957).

Die geometrische Form der Partikel hat einen Einfluss auf den numerischen Aufwand einer Simulation: je komplexer die geometrische Form desto größer ist der Simulationsaufwand. Die Geometrie von realen Schüttgutpartikeln, wird über Kugelagglomerate angenähert, siehe (Weiler 2012, S. 67) oder (Simsek 2011, S. 62).

Die Kugel als Partikelform wird sehr häufig eingesetzt, da der Rechenaufwand geringer ist und sich viele Parameter unabhängig von der Form einstellen lassen. In den Veröffentlichungen von OBERMAYR, GÜNTNER und WENSRICH konnten bei der Verwendung von Kugeln als Partikelform gute Übereinstimmungen von Simulation und Experiment erzielt werden, siehe (Obermayr 2013, S. 241), (Günthner und Fottner 2017, S. 40, 46) und (Wensrich und Katterfeld 2012, S. 416).

Aufgrund der kugelförmigen Gestalt des Partikels kann die Befüllung bzw. der Füllungsgrad eines Probenvolumens berechnet werden, hierbei können unterschiedlich dichte Formationen auftreten. Theoretisch kann der Füllungsgrad zwischen 52 % und 74 % liegen (siehe Rao und Nott 2008, S. 21). Jedoch haben empirische Studien mit Stahlkugeln ergeben, dass der Füllungsgrad zwischen 60 % und 64 % liegt (ebd., S. 22). Die Literatur zeigt, dass die Befüllung eines Probenbetts nicht exakt reproduzierbar ist, sondern Schwankungen unterliegt, die von der Gestalt des Schüttguts und der Art der Befüllung abhängen. Bei der Generierung von Probebetten in der DEM-Simulation gilt ähnliches, die Reproduzierbarkeit ist nicht gegeben (siehe Thakur u. a. 2016, S. 133). Daher erscheint es sinnvoll DEM-Simulationen stets mehrfach durchzuführen, um die Ergebnisse richtig interpretieren zu können.

Im Rahmen der Arbeit werden die Partikel durch Kugeln modelliert. Daher werden auch die nachfolgenden Grundlagen der DEM mit Kugeln beschrieben.

5.1.1 Berechnungszyklus

Der grundsätzliche Ablauf einer DEM-Simulation ist in Abb. 5.1.1 dargestellt. Der darin vorkommende Zeitschritt Δt_{krit} wird im Abschnitt 5.1.3 hergeleitet und erklärt.

Die Anfangs- und Randbedingungen der Partikel, sowie der verwendeten Geometrien werden vorgegeben und eingelesen. Anschließend wird die Simulationszeit um den Simulationszeitschritt Δt_{krit} erhöht und im nächsten Schritt findet eine Kontaktdetektion bzw.-analyse statt. Hierbei wird ermittelt, ob ein Kontakt zwischen den Partikeln bzw. zwischen Partikeln und vorhandenen Geometrien stattgefunden hat. Die jeweils auftretende Überlappung wird ermittelt. Die Überlappung ergibt mit Hilfe der Kraft- und Verformungsgesetze der verwendeten Kontaktmodelle die resultierenden Kontaktkräfte und Momente.

Die so berechneten Kontaktkräfte und Momente gehen dann in die jeweiligen Bewegungsgleichungen ein und werden durch Integration gelöst. Dadurch erhalten die Partikel ihre neuen Geschwindigkeiten, Positionen und Kontakte. Danach werden diese Daten aktualisiert und der Simulationszyklus beginnt von neuem, bis eine zuvor festgelegte Simulationszeit erreicht ist (nach DEM Solutions Ltd. 2016, S. 5).

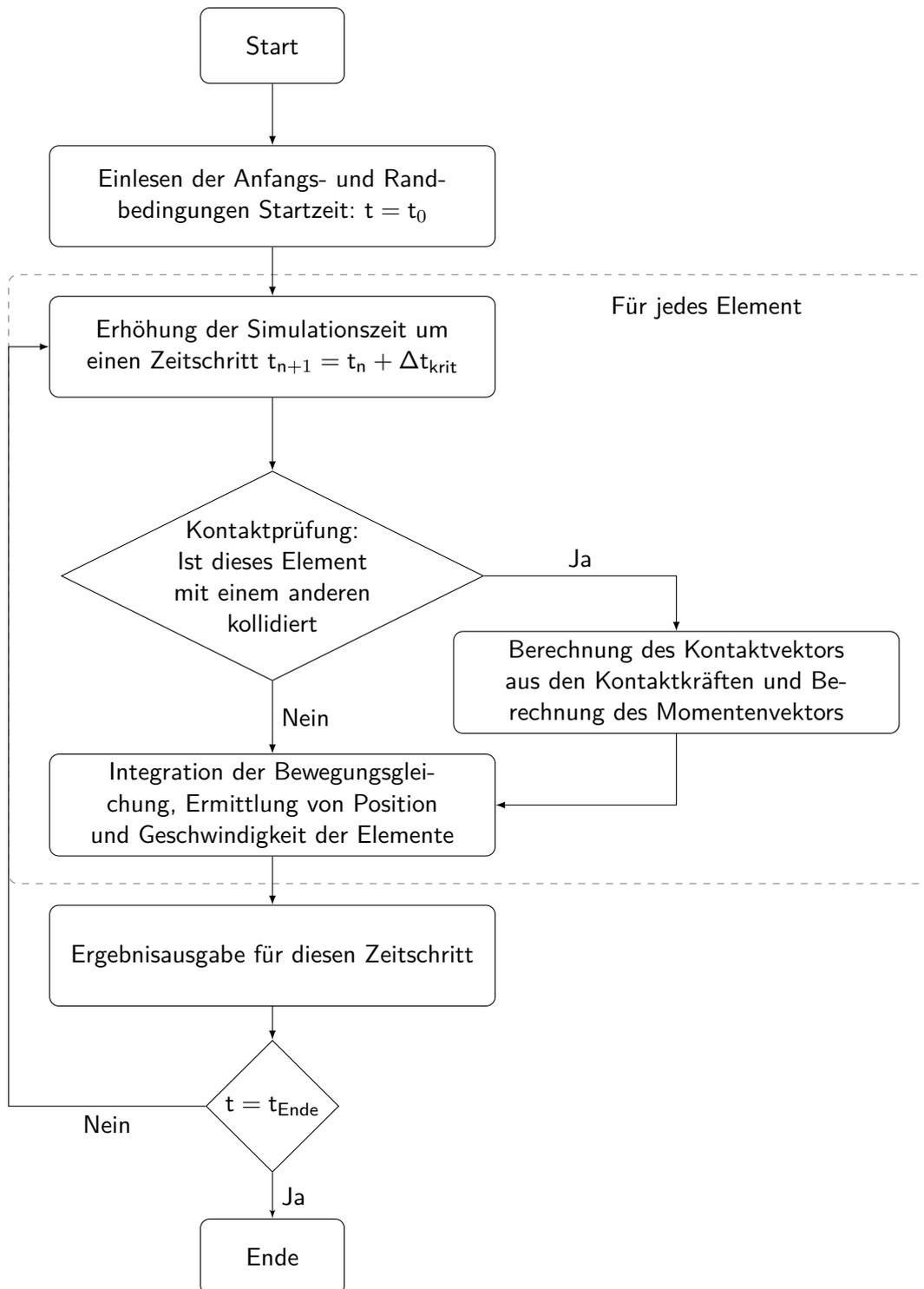


Abbildung 5.1.1: Vereinfachtes Ablaufschema einer DEM-Simulation für einen Zeitschritt (nach Piechatzek 2009, S. 23)

5.1.2 Mathematische Grundlagen

Für die Berechnung der Partikelkinematik wird neben der NEWTONSchen Bewegungsgleichung (Gleichung 5.1.1) auch die EULERSche Kreiselmgleichung (Gleichung 5.1.2) verwendet. Mit Hilfe

der NEWTONSchen Bewegungsgleichung wird die Änderung des Ortsvektors des Partikelmittelpunktes \vec{r}_i berechnet. Die EULERSche Kreisgleichung berechnet die rotatorische Bewegung.

$$m_i \cdot \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = \sum^n \vec{F}_K + m_i \cdot \vec{g} \quad (5.1.1)$$

Wobei die Masse m_i des Partikels i , die Gesamtkontaktkraft \vec{F}_K in der jeweiligen Interaktion mit n benachbarten Partikeln sowie die Erdbeschleunigung \vec{g} in die Gleichung 5.1.1 mit eingehen nach (Matuttis und J. Chen 2014, S. 5 ff.) und (Deng und Davé 2013, S. 403).

$$I_i \cdot \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \sum^n \vec{M}_K \quad (5.1.2)$$

Bei der EULERSche Kreisgleichung wird die Rotation aus der Massenträgheit I_i , der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_i$ und den wirkenden Kontaktmomenten \vec{M}_K mit n der angrenzenden Partikel gebildet (nach (ebd.) und (Morrissey 2013, S. 39)). Die Kontaktkraft \vec{F}_K wird aus der Summe der Normalkraft $\vec{F}_{K,n}$ und Tangentialkraft $\vec{F}_{K,t}$ gebildet.

$$\vec{F}_K = \vec{F}_{K,n} + \vec{F}_{K,t} \quad (5.1.3)$$

Zur Ermittlung des Kontaktmoments zwischen den Partikeln j und i wird das Kreuzprodukt aus dem tangentialen Anteil der Kontaktkraft und der Differenz der beiden Ortsvektoren gebildet nach (ebd., S. 40) und (Deng und Davé 2013, S. 403).

$$\vec{M}_K = (\vec{r}_i - \vec{r}_j) \times \vec{F}_{K,t} \quad (5.1.4)$$

Nach den Veröffentlichungen von LUDING und SIMSEK können noch weitere Einflüsse im Kontaktmoment implementiert werden, wie z. B. die Rollreibung siehe (Luding 2008) und (Simsek 2011).

5.1.3 Zeitschritt

Der Zeitschritt, in dem der gezeigte Berechnungszyklus (Abb. 5.1.1) abläuft, ist eine wichtige und kritische Größe bei der DEM-Simulation. Wird der Zeitschritt zu groß gewählt, kann es passieren, dass Ereignisse nicht erkannt werden. Dies hat zur Folge, dass sich die Partikel nicht mehr nach den modellierten physikalischen Gesetzmäßigkeiten verhalten und die Simulation instabil wird (Rackl 2018, S. 23). Die Abb. 5.1.2 soll den Zusammenhang verdeutlichen. In a.) bewegt sich zum Zeitschritt t_1 der Partikel i mit der Geschwindigkeit \vec{v}_i auf den ruhenden Partikel j zu. Im zweiten Zeitschritt t_2 jedoch hat sich der Partikel i quasi durch den ruhenden Partikel j hindurchbewegt; es kommt zu keiner Kollision und somit wird die Realität falsch abgebildet. Bei einem feiner gewählten Zeitschritt wird die Kollision korrekt erkannt und die beiden Partikel i und j haben die richtigen Geschwindigkeiten und Richtungen, siehe Abb. 5.1.2 b.).

Zur Abschätzung einer geeigneten Simulationszeitschrittweite wird die Bestimmung nach RAYLEIGH verwendet (Weiler 2012, S. 31 ff.).

Der Theorie von RAYLEIGH liegt die Annahme zu Grunde, dass sich der Impuls innerhalb der Partikel und zwischen den Partikeln einer Packung über deren Kontaktpunkte hinweg wel-

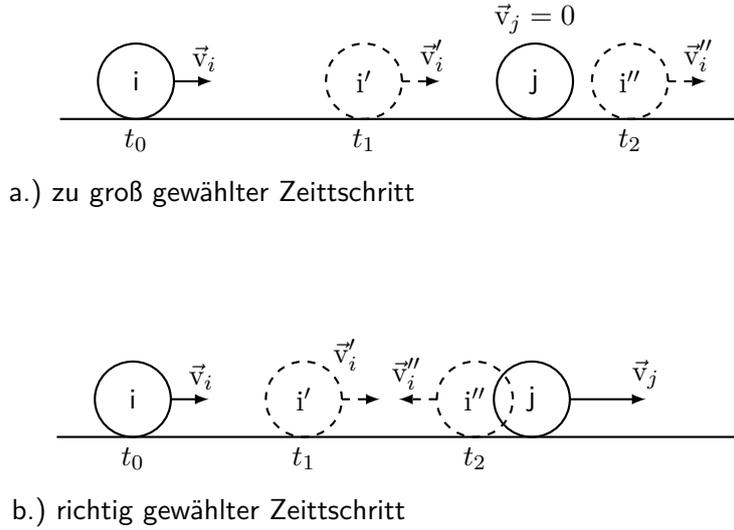


Abbildung 5.1.2: Kollisionssituation bei gewähltem Zeitschritt nach (Weiler 2012, S. 31)

lenförmig ausbreitet bzw. weitergegeben wird. Die Form der Impulsübertragung wird als RAYLEIGH-Welle bezeichnet. Mit Hilfe dieses Zusammenhangs kann der Zeitschritt berechnet werden, welchen die Welle braucht, um den kleinsten in der Simulation auftretenden Partikel mit Radius $R_{i,\min}$ zu überwinden. Dieser Zeitschritt wird als kritischer Zeitschritt $t_{\text{krit,R}}$ bezeichnet; der formelmäßige Zusammenhang ist in Gleichung 5.1.5 dargestellt.

$$t_{\text{krit,R}} = \frac{\pi \cdot R_{i,\min}}{0,1613 \cdot \nu_{i,\max} + 0,876605} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{i,\min}}{G_{i,\max}}} \quad (5.1.5)$$

In der Gleichung 5.1.5 repräsentiert $\nu_{i,\max}$ die maximal auftretende Querkontraktionszahl, $\rho_{i,\min}$ die geringste vorhandene Dichte sowie $G_{i,\max}$ den größten Schermodul eines Partikels.

Da die Partikel immer mit mehreren anderen Partikeln gleichzeitig in Kontakt stehen, wird der berechnete kritische Zeitschritt t_{krit} um einen empirisch ermittelten Faktor reduziert, welcher, je nach Quelle, zwischen 20 % und 40 % liegt (Weiler 2012, S. 35), (Morrissey 2013, S. 42) und (Thornton 2015, S. 16). Somit wird der für die Simulation relevante Zeitschritt Δt_{krit} wie folgt berechnet:

$$\Delta t_{\text{krit}} = 0,2 \cdot t_{\text{krit,R}} \quad (5.1.6)$$

5.1.4 Überlappungen

Der einzelne Partikel behält während der Simulation seine Gestalt bei, es kommt jedoch zu einer virtuellen Überlappung der Partikelvolumina. Diese virtuelle Überlappung stellt sicher eine Vereinfachung der mathematischen Abbildung der plastischen Verformungen dar. Dabei gehen die jeweiligen Werte für die Tiefe des Überlapps bzw. der Aufstandsfläche während der Simulation in die Berechnung der Kontaktkräfte mit ein, siehe Gleichung 5.2.2 bzw. Gleichung 5.2.3.

In Abb. 5.1.3 ist die normale Überlappung $\delta_{ij,n}$ zweier Partikel i und j dargestellt. Bei der Abbildung handelt es sich um eine schematische Darstellung, die Relationen zwischen den Radien und der Überlappung entsprechen nicht der Wirklichkeit (nach Götz 2006, S. 34).

$$\delta_{ij,n} = R_i + R_j - |\vec{r}_i - \vec{r}_j| \quad (5.1.7)$$

In die Gleichung 5.1.7 gehen die jeweiligen Partikelradien $\{R_i, R_j\}$, die Ortsvektoren der Partikelmittelpunkte $\{\vec{r}_i, \vec{r}_j\}$ und der Einheitsvektor der Kontaktflächennormalen $\vec{e}_{ij,n}$ mit ein. Der Einheitsvektor lässt sich durch folgende Gleichung bestimmen (nach Weiler 2012, S. 23):

$$\vec{e}_{ij,n} = \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \quad (5.1.8)$$

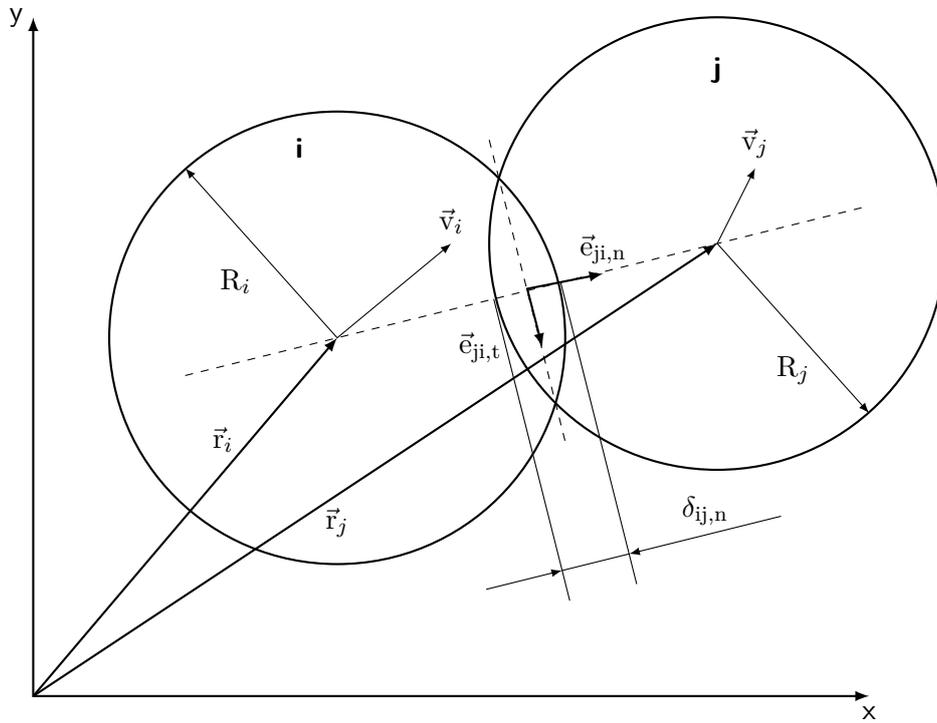


Abbildung 5.1.3: Überlappung zweier Partikel beim Stoß (nach Götz 2006, S. 34)

Zur vollständigen Beschreibung der Partikelinteraktion fehlt noch die Wechselwirkung der Partikel in tangentialer Richtung (parallel zur Kontaktfläche). Die tangentielle Überlappung ($\delta_{ij,t}$) wird durch Integration der relativen tangentialen Geschwindigkeit gebildet, siehe Gleichung 5.1.9 (nach Götz 2006, S. 34 f.).

$$\delta_{ij,t} = \int_{t=t_0}^{t=t_1} v_{ij,t} \, dt \quad (5.1.9)$$

Die tangentiale Geschwindigkeit im Kontaktpunkt ($\vec{v}_{ij,t}$) wird wiederum über die relative Geschwindigkeit im Kontaktpunkt ($\vec{v}_{ij,rel}$) ermittelt, Gleichung 5.1.10. Der Einheitsvektor in tangentialer Richtung $\vec{e}_{ij,t}$ wird in Gleichung 5.1.11 beschrieben (nach Götz 2006, S. 34 f.).

$$\vec{v}_{ij,t} = \vec{v}_{ij,rel} - \vec{v}_{ij,n} + (\vec{r}_i \cdot \vec{\omega}_i + \vec{r}_j \cdot \vec{\omega}_j) \times \vec{e}_{ij,n} = v_{ij,t} \cdot \vec{e}_{ij,t} \quad (5.1.10)$$

$$\vec{e}_{ij,t} = \frac{\vec{v}_{ij,t}}{|\vec{v}_{ij,t}|} \quad (5.1.11)$$

Die relative Geschwindigkeit im Kontaktpunkt setzt sich aus einem translatorischen und rotatorischen Anteil zusammen, siehe Gleichung 5.1.12 (nach ebd.).

$$\vec{v}_{ij,rel} = (\vec{v}_i + (\vec{\omega}_i \cdot R_i) \times \vec{e}_{ij,n}) - (\vec{v}_j + (\vec{\omega}_j \cdot R_j) \times \vec{e}_{ij,n}) \quad (5.1.12)$$

Die Gesamtgeschwindigkeit eines Partikels (\vec{v}_i) lässt sich durch die Gleichung 5.1.13 bestimmen (Munjiza 2004, S. 186). Die resultierende Normalgeschwindigkeit ($\vec{v}_{ij,n}$) wird durch Gleichung 5.1.14 beschrieben (Kruggel-Emden u. a. 2007, S. 159).

$$\vec{v}_i = \vec{v}_{i,n} + \vec{v}_{i,t} \quad (5.1.13)$$

$$\vec{v}_{ij,n} = \vec{v}_{i,n} - \vec{v}_{j,n} \quad (5.1.14)$$

5.2 Kontaktmodelle

Kontaktmodelle stellen die Verbindung zwischen den einzelnen Partikeln oder zwischen Geometrien und Partikeln dar. Mit den Kontaktmodellen wird versucht das Verhalten eines Materials nachzuempfinden. Allgemein ausgedrückt sind Kontaktmodelle eine Ansammlung verschiedener Elemente. Diese Elemente bilden unterschiedliche Materialeigenschaften nach und durch eine geeigneten Verknüpfung der verschiedenen Elemente kann das Verhalten des zu modellierenden Materials nachgebildet werden.

Die Elemente können drei verschiedene Ausprägungen annehmen: als ideale Elastizität (Feder bzw. HOOK-Element), als ideale Viskosität (Dämpfer bzw. NEWTON-Element) oder als ideale Plastizität (ST. VENANT-Element) (Reiner und E. Müller 1969, S. 117 f.). Die bildliche Darstellung der einzelnen Elemente ist in Abb. 5.2.1 zu sehen. Bei dem in Abb. 5.2.1 dargestellten Modell handelt sich um das BURGERS-Modell. Dieses Modell wurde entwickelt, um das viskoelastische und viskoplastische Verhalten von erkaltetem Straßenasphalt zu beschreiben, siehe Kriechkurve, wie in Abb. 2.4.1 (Mezger 2016, S. 116–119) (Reiner und E. Müller 1969, S. 159–162). Das ursprüngliche BURGERS-Modell wurde jedoch ohne ST. VENANT-Element konzipiert (Khong u. a. 1979, S. 384).

Darüber hinaus ist auch die Anordnung der einzelnen Elemente zueinander wichtig, denn je nach Anordnung ergeben sich andere Verhaltensweisen. Bei einer parallelen Anordnung des HOOK- und NEWTON-Elements wird dies als KELVIN-Element bezeichnet. Sind die beiden Elemente in Reihe geschaltet, dann handelt es sich um ein MAXWELL-Element (nach Reiner und E. Müller 1969, S. 147, 151). Der Sachverhalt zwischen der geänderten Anordnung und einem anderen Verhalten kann in Abb. 5.2.2 gezeigt werden, hierbei sind die Zeit-Dehnungskurven bei Belastung und Entlastung für das KELVIN- und das MAXWELL-Element dargestellt.

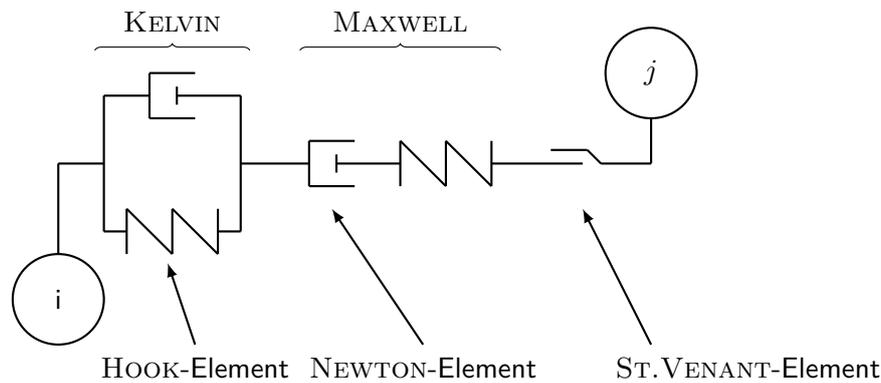


Abbildung 5.2.1: BURGERS-Modell (nach J. Chen 2011, S. 26)

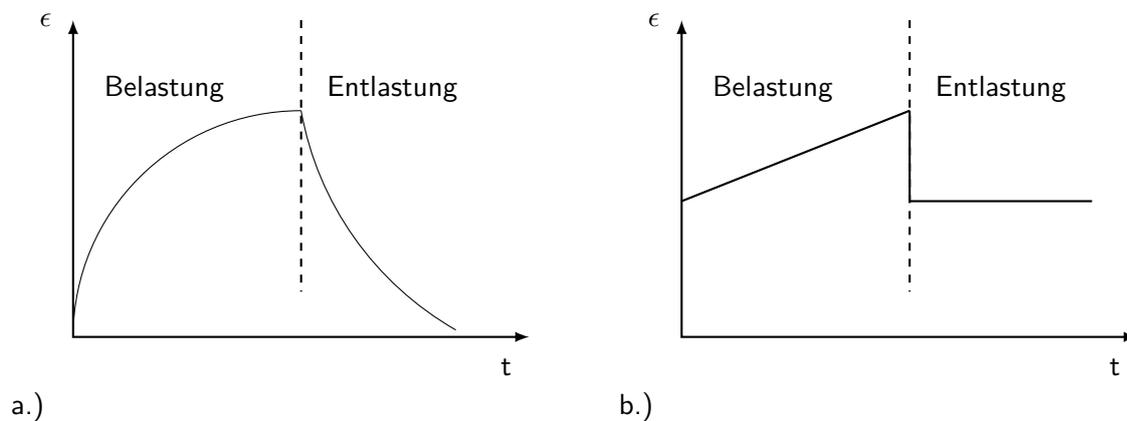


Abbildung 5.2.2: Zeit-Dehnungskurven für a) KELVIN-Element und b) MAXWELL-Element nach (Ludwig 2009, S. 116 f.)

Im nachfolgenden Kapitel wird bei den kohäsionslosen Kontaktmodellen nur auf das Modell nach HERTZ-MINDLIN eingegangen. Als Kontaktmodell für kohäsive Materialien wird das Modell nach *Johnson-Kendall-Roberts* (JKR) und *Edinburgh Elasto-Plastic Adhesive* (EEPA) beschrieben. Wobei das JKR Kontaktmodell eine Erweiterung des HERTZ-MINDLIN Modells darstellt. Eine Übersicht über einige in der Literatur publizierte Kontaktmodelle ist in MORRISSEY zu finden (Morrissey 2013, Kap.3). Die Rollreibung kann über verschiedene mathematische Modelle modelliert werden, siehe (Ai u. a. 2011), (Simsek 2011, S. 58), (Obermayr u. a. 2013, S. 27–32). Bei Verwendung des HERTZ-MINDLIN Kontaktmodells bzw. JKR Kontaktmodells wird das Reibungsmodell (Typ A) nach AI verwendet (Ai u. a. 2011, S. 273). Das Reibungsmodell, das im EEPA-Kontaktmodell verwendet wird, ist eine angepasste Version des Typ A Reibungsmodells nach AI.

5.2.1 Kontaktmodell nach Hertz und Mindlin

Das Modell geht auf die Arbeiten von HERTZ (Hertz 1882) in (Johnson 1985, S. 90–93) und MINDLIN (Mindlin und Deresiewicz 1953) zurück. HERTZ hat die Kraft senkrecht zur Kontaktfläche beschrieben und MINDLIN die Kraft parallel zur Kontaktfläche.

Das Modell von HERTZ-MINDLIN teilt die Kontaktkraft F_K (Gleichung 5.2.1) zwischen zwei Partikeln in einen normalen Anteil $F_{K,n}$ und einen tangentialen Anteil $F_{K,t}$ auf (Simsek 2011, S. 51).

$$F_K = F_{K,n} + F_{K,t} \quad (5.2.1)$$

Bei beiden Anteilen wird die auftretende plastische Verformung durch die Kombination eines elastischen Federelements mit einem dissipativen Dämpferelement angenähert. Die beiden Elemente sind in tangentialer und normaler Richtung parallelgeschaltet. In tangentialer Richtung kommt noch ein ST. VENANT-Element hinzu, welches sich in Reihe mit dem parallel geschalteten Element befindet, siehe Abb. 5.2.3 a) und b).

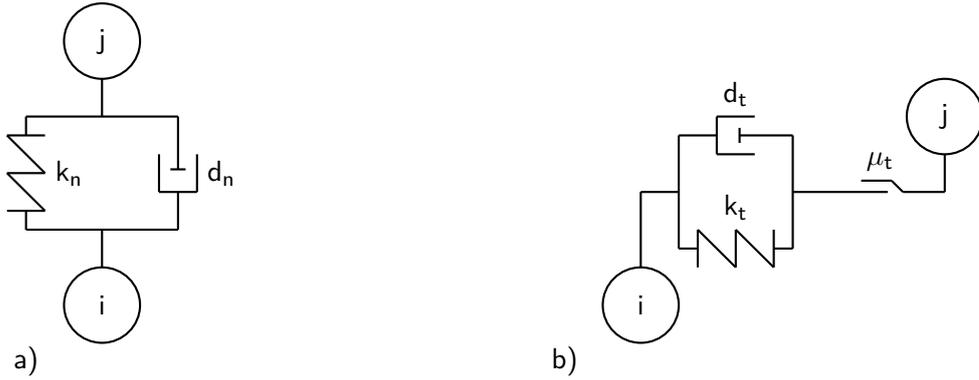


Abbildung 5.2.3: HERTZ-MINDLIN-Kontaktmodell in a) normaler und b) tangentialer Richtung nach (Morrissey 2013, S. 47)

Der elastische Kraftanteil in normaler und tangentialer Richtung $\{F_{K,n,el}, F_{K,t,el}\}$ wird über die verschiedenen Kontaktsteifigkeiten $\{k_n, k_t\}$ mit der dazugehörigen Überlappung $\{\delta_{ij,n}, \delta_{ij,t}\}$ gebildet. Die dissipativen Kraftanteile $\{F_{K,n,diss}, F_{K,t,diss}\}$ wiederum werden über die verschiedenen Kontaktdämpfungen $\{d_n, d_t\}$ mit den dazugehörigen relativen Geschwindigkeiten im Kontaktpunkt $\{v_{ij,n}, v_{ij,t}\}$ gebildet.

$$F_{K,n} = F_{K,n,el} + F_{K,n,diss} = k_n \cdot \delta_{ij,n} + d_n \cdot v_{ij,n} \quad (5.2.2)$$

$$F_{K,t} = F_{K,t,el} + F_{K,t,diss} = k_t \cdot \delta_{ij,t} + d_t \cdot v_{ij,t} \quad (5.2.3)$$

Darüber hinaus gilt für die tangentiale Kraft (Gleichung 5.2.4), dass der maximale Wert für $F_{K,t}$ durch das COULOMB'sche Reibungsgesetz $F_{K,t} = \mu_{t,h} \cdot F_{K,n}$ zwischen den Partikeln begrenzt wird (DEM Solutions Ltd. 2017, S. 53).

$$F_{K,t} = \begin{cases} k_t \cdot \delta_{ij,t} + d_t \cdot v_{ij,t} & \text{falls } F_{K,t} < \mu_{t,h} \cdot F_{K,n} \\ F_{K,t} = \mu_{t,h} \cdot F_{K,n} & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.2.4)$$

Die vektorielle Form der Gleichung zur Bestimmung der Normal- bzw. Tangentialkraft ist in den Gleichungen 5.2.5 und 5.2.6 mit den jeweiligen Einheitsvektoren zu sehen.

$$\vec{F}_{K,n} = \vec{F}_{K,n,el} + \vec{F}_{K,n,diss} = (k_n \cdot \delta_{ij,n} + d_n \cdot v_{ij,n}) \cdot \vec{e}_{ij,n} \quad (5.2.5)$$

$$\vec{F}_{K,t} = \vec{F}_{K,t,el} + \vec{F}_{K,t,diss} = (k_t \cdot \delta_{ij,t} + d_t \cdot v_{ij,t}) \cdot \vec{e}_{ij,t} \quad (5.2.6)$$

Die Gleichungen 5.2.7 bis 5.2.9 geben die Kontaktsteifigkeit und -dämpfung in normaler Richtung in Abhängigkeit der Überlappung $\delta_{ij,n}$ an (DEM Solutions Ltd. 2017, S. 52 f.).

$$k_n = \frac{4}{3} \cdot E_{ij} \cdot \sqrt{R_{ij} \cdot \delta_{ij,n}} \quad (5.2.7)$$

$$d_n = -2 \cdot \sqrt{\frac{5}{6}} \cdot \beta_H \cdot \sqrt{S_n \cdot m_{ij}} \quad (5.2.8)$$

$$S_n = 2 \cdot E_{ij} \cdot \sqrt{R_{ij} \cdot \delta_{ij,n}} \quad (5.2.9)$$

Die Kontaktsteifigkeit und -dämpfung in tangentialer Richtung in Abhängigkeit der Überlappung $\delta_{ij,t}$ wird über die Gleichungen 5.2.11 bis 5.2.12 berechnet (ebd.).

$$k_t = 8 \cdot G_{ij} \cdot \sqrt{R_{ij} \cdot \delta_{ij,n}} \quad (5.2.10)$$

$$d_t = -2 \cdot \sqrt{\frac{5}{6}} \cdot \beta_H \cdot \sqrt{S_t \cdot m_{ij}} \quad (5.2.11)$$

$$S_t = 8 \cdot G_{ij} \cdot \sqrt{R_{ij} \cdot \delta_{ij,n}} \quad (5.2.12)$$

Die Berechnung der Hilfsgröße β_H und der Ersatzgrößen $\{E_{ij}, R_{ij}, m_{ij}, G_{ij}, e\}$ erfolgt nach den Gleichungen 5.2.13 bis 5.2.19 (Rackl 2018, S. 17).

$$\beta_H = \frac{\ln e_{ij}}{\sqrt{\ln^2 e_{ij} + \pi^2}} \quad (5.2.13)$$

$$E_{ij} = \frac{E_i \cdot E_j}{E_i \cdot (1 - \nu_j^2) + E_j \cdot (1 - \nu_i^2)} \quad (5.2.14)$$

$$R_{ij} = \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \right)^{-1} \quad (5.2.15)$$

$$m_{ij} = \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)^{-1} \quad (5.2.16)$$

$$G_{ij} = \left(\frac{2 - \nu_i}{G_i} + \frac{2 - \nu_j}{G_j} \right)^{-1} \quad (5.2.17)$$

Dabei wird angenommen, dass bei den Partikeln ein isotropes Materialverhalten vorliegt und sich das Schermodul G , aus dem E-Modul E und der Querkontraktionszahl ν nach Gleichung 5.2.18 bilden lässt (Weiler 2012, S. 27).

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 - \nu)} \quad (5.2.18)$$

Die Stoßzahl e_{ij} , auch der Restitutionskoeffizient genannt, wird über das Verhältnis der Normalgeschwindigkeiten im Kontaktpunkt am Anfang und am Ende berechnet. Der Endwert $t = t_1$ kommt in den Zähler und der Anfangswert $t = t_0$ in den Nenner, siehe Gleichung 5.2.19 (nach Kruggel-Emden u. a. 2007, S. 159).

$$e_{ij} = -\frac{\dot{\delta}_n(t = t_1)}{\dot{\delta}_n(t = t_0)}, \quad e \in [0, 1] \quad (5.2.19)$$

Rollreibung

Die Rollreibung wird über das Drehmoment \vec{M}_r berücksichtigt und mittels der Gleichung 5.2.20 berechnet (Ai u. a. 2011, S. 273), (Weiler 2012, S. 29).

$$\vec{M}_{r,i} = -\mu_{t,r} \cdot l_{i,j} \cdot \vec{e}_{\omega,ij} \times \vec{F}_{K,n,i} \quad (5.2.20)$$

In die Gleichung 5.2.20 fließen der Rollreibungskoeffizient $\mu_{t,r}$, der Einheitsvektor der Winkelgeschwindigkeit im Kontaktpunkt $\vec{e}_{\omega,ij}$, die Normalkraft des Partikels i $\vec{F}_{K,n,i}$ und der Abstand $l_{i,j}$ zwischen den Partikeln i und j ein. Bei dem Abstand $l_{i,j}$ handelt es sich um die Länge zwischen dem Schwerpunkt des Partikels i und dem Kontaktpunkt mit Partikel j .

5.2.2 Kontaktmodell nach Johnson, Kendall und Roberts (JKR)

Bei dem JKR-Modell nach (Johnson u. a. 1971) handelt es sich um eine Erweiterung des Modells nach HERTZ-MINDLIN. Das Kontaktmodell verwendet für die Berechnung der dissipativen Kraftanteile $\{F_{K,n,diss}, F_{K,t,diss}\}$ und des elastischen Kraftanteils in tangentialer Richtung $\{F_{K,t,el}\}$ die Gleichungen nach HERTZ-MINDLIN (DEM Solutions Ltd. 2017, S. 59). Eine Herleitung des formelmäßigen Zusammenhangs ist in POPOV (Popov 2015, S. 86–92) zu finden.

Die Kontaktkraft $F_{K,n,el}$ und die Überlappung $\delta_{ij,n}$ in normaler Richtung werden um einen Kontaktradius a_K und die am Kontakt wirksamen Oberflächenenergien γ_K erweitert. Dadurch wird die resultierende Haftkraft in Abhängigkeit der aktuellen ausgeprägten Kontaktfläche definiert. Der Kontaktradius a_K bildet die Grenze des Kontaktgebiets zweier sich durchdringender Partikel (siehe Abb. 5.2.4).

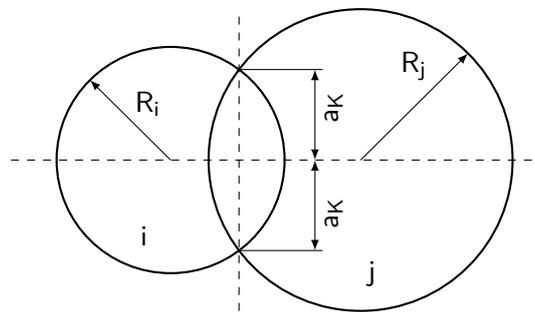


Abbildung 5.2.4: Kontaktradius im JKR-Modell nach (Hui u. a. 2001, S. 300)

Die Kontaktkraft nach JKR ($F_{K,n,\text{JKR}}$) hat nun folgende Gleichung:

$$F_{K,n,\text{JKR}} = \frac{4 \cdot E_{ij} \cdot a_K^3}{3 \cdot R_{ij}} - 4 \cdot \left(\pi \cdot \gamma_K \cdot E_{ij} \cdot a_K^3 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.2.21)$$

Der Ersatzradius und das Ersatzelastizitätsmodul $\{R_{ij}$ und $E_{ij}\}$ werden gemäß Gleichung 5.2.15 bzw. 5.2.14 gebildet (DEM Solutions Ltd. 2017, S. 59). Die Überlappung nach JKR $\delta_{ij,n,\text{JKR}}$ ist nun wie folgt definiert:

$$\delta_{ij,n,\text{JKR}} = \frac{a_K^2}{R_{ij}} - \left(\frac{2\pi \cdot \gamma_K \cdot a_K}{E_{ij}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.2.22)$$

Die Abb. 5.2.5 verdeutlicht den Unterschied und die Gemeinsamkeit mit der normalen Kontaktkraft nach HERTZ-MINDLIN. Die Oberflächenenergie γ_K

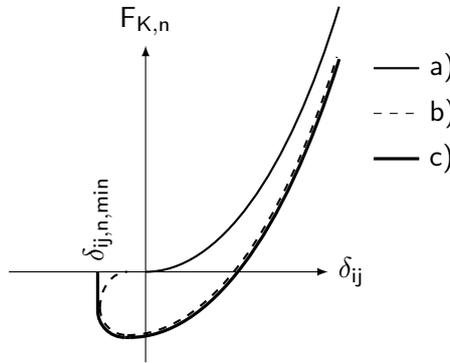


Abbildung 5.2.5: Vergleich der normalen Kontaktkraft im Modell a) nach HERTZ-MINDLIN sowie b) nach JKR und c) dessen Implementierung in *EDEM*[®] nach (DEM Solutions Ltd. 2017, S. 59)

$$\gamma_K = \gamma_i + \gamma_j - \gamma_{ij} \quad (5.2.23)$$

bildet sich aus der Summe der Oberflächenenergien γ_i und γ_j der Partikel $\{i, j\}$ abzüglich der im Überlappungsbereich nicht wirksamen Oberflächenenergien γ_{ij} (nach Morrissey 2013, S. 50). Wird die Oberflächenenergie aller Partikel in der DEM-Simulation als Null angenommen, erhält man das reine HERTZ-MINDLIN-Kontaktmodell (nach ebd., S. 51). Der Kontaktradius a_K (Gleichung 5.2.24) lässt sich mit Hilfe der Abziehungskraft F_{Ab} berechnen.

$$a_K = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot R_{ij}}{4 \cdot E_{ij}} \cdot \left(F_{Ab} + 3\pi \cdot \gamma_K \cdot R_{ij} + \sqrt{6\pi \cdot \gamma_K \cdot R_{ij} \cdot F_{Ab} + (3\pi \cdot \gamma_K \cdot R_{ij})^2} \right)} \quad (5.2.24)$$

Die Abziehungskraft ist die Kraft, die notwendig ist, um zwei Partikel voneinander zu trennen. Der maximale negative Wert der Abziehungskraft $F_{Ab,\text{max}}$ lässt sich über folgende Gleichung

$$F_{Ab,\text{max}} = -\frac{3}{2} \cdot \pi \cdot \gamma_K \cdot R_{ij} \quad (5.2.25)$$

berechnen, hierbei nimmt der Kontaktradius folgenden Wert an (Popov 2015, S. 90)

$$a_{K,krit} = \left(\frac{9}{8} \cdot \frac{\pi \cdot \gamma_K \cdot R_{ij}^2}{E_{ij}} \right) \quad (5.2.26)$$

5.2.3 Kontaktmodell nach Edinburgh Elasto-Plastic Adhesive (Eepa)

Das EEPA-Kontaktmodell wurde von einem Forscherteam der Universität Edinburgh für das Programm *EDEM*[®] entwickelt und in *EDEM 2018*[®] implementiert (Padros 2017, S. 1). Das Kontaktmodell ist in der Software in linearer Form als auch in nicht-linearer Form implementiert. Der Aufbau des EEPA Kontaktmodells orientiert sich an den von LUDING veröffentlichten Modellen (Luding 2005), (Luding 2008).

Die Entstehung, Implementierung und eine ausführliche Herleitung ist in der Dissertation von MORRISSEY (Morrissey 2013) und den Veröffentlichungen von THAKUR und MORRISSEY (Thakur u. a. 2014), (Thakur u. a. 2016), (Morrissey u. a. 2014) zu finden.

Die Modellierung des Kontaktes zwischen den Partikeln wird mit Hilfe von Adhäsionskräften, sowie elastischer und plastischer Verformung abgebildet (Morrissey 2013, S. 67).

In normaler Richtung setzt sich das Kontaktmodell aus zwei Termen zusammen: aus der sogenannten Haftkraft F_{hys} und einem dissipativen Anteil $F_{n,diss,eepa}$, siehe Gleichung 5.2.27. Der dissipative Anteil unterscheidet sich je nach Form, siehe Gleichung 5.2.28. In der nicht-linearen Form werden die Parameter entsprechend dem Modell von HERTZ-MINDLIN gebildet (siehe Gleichung 5.2.13, 5.2.8, 5.2.9). In der linearen Form wird der dissipative Anteil mit Hilfe des Dämpfungskoeffizienten β_L gebildet (Morrissey u. a. 2014, S. 8).

$$F_{K,n,eepa} = F_{hys} + F_{n,diss,eepa} \quad (5.2.27)$$

$$F_{n,diss,eepa} = \begin{cases} \beta_L \cdot v_{ij,n} & , \text{ falls lineares Modell} \\ d_n \cdot v_{ij,n} & , \text{ falls nicht-lineares Modell} \end{cases} \quad (5.2.28)$$

$$\beta_L = \sqrt{\frac{4 \cdot m_{i,j} \cdot k_{n,1}}{1 + \left(\frac{\pi}{\ln e_{ij}} \right)^2}} \quad (5.2.29)$$

Die Haftkraft hat einen hysteresearartigen Verlauf, wobei sich drei verschiedene “Äste“ identifizieren lassen, siehe Abb. 5.2.6 und Abb. 5.2.8. Der erste Ast beschreibt den Kraft-/Überlappungsverlauf bei erstmaliger Belastung bis zur maximalen Überlappung $\delta_{ij,max}$. Die Anfangssteifigkeit bzw. Belastungsteifigkeit $k_{n,1}$ ist der Faktor, der den Verlauf bestimmt. Bei einer Entlastung folgt der Kraft-/Überlappungsverlauf dem zweiten Ast bis zur maximalen Adhäsionskraft $F_{hys,min}$ mit $-k_{adh} \cdot \delta_{ij,n,min} + F_{hys,0}$. Hierbei ist der Faktor $k_{n,2}$ bestimmend (Entlastungsteifigkeit). Sinkt die Kraft weiter folgt der Kraft-/Überlappungsverlauf dem dritten Ast, bis zum Kraftminimum $F_{hys,0}$ bei $\delta_{ij,n} = 0$. Der dritte Ast beschreibt die Adhäsion. Die Kraft $F_{hys,0}$ stellt auch einen Teil der Adhäsion dar. Diese Kraft muss überwunden werden, um die Partikel voneinander zu lösen, wenn noch keine Überlappung stattgefunden hat. Sollte nun wieder eine Belastung erfolgen, so steigt der Kraft-/Überlappungsverlauf entlang des zweiten Astes

bis zum Schnittpunkt mit dem ersten Ast an. Steigt die Belastung weiter an, wird der erste Ast weiterverfolgt.

Der formelmäßige Zusammenhang ist in Gleichung 5.2.30 dargestellt, wobei die erste Zeile die Annäherung beschreibt und in Zeile zwei und drei der Kontakt bzw. das sich wieder Entfernen mathematisch dargestellt sind (Morrissey u. a. 2014, S. 8).

$$F_{\text{hys}} = \begin{cases} F_{\text{hys},0} + k_{n,1} \cdot \delta_{ij,n}^h & , k_{n,2} \cdot (\delta_{ij,n}^h - \delta_{ij,n,p}^h) \geq k_{n,1} \cdot \delta_{ij,n}^h \\ F_{\text{hys},0} + k_{n,2} \cdot (\delta_{ij,n}^h - \delta_{ij,n,p}^h) & , k_{n,1} \cdot \delta_{ij,n}^h > k_{n,2} \cdot (\delta_{ij,n}^h - \delta_{ij,n,p}^h) > -k_{\text{adh}} \cdot \delta_{ij,n}^x \\ F_{\text{hys},0} - k_{\text{adh}} \cdot \delta_{ij,n}^x & , -k_{\text{adh}} \cdot \delta_{ij,n}^x \geq k_{n,2} \cdot (\delta_{ij,n}^h - \delta_{ij,n,p}^h) \end{cases} \quad (5.2.30)$$

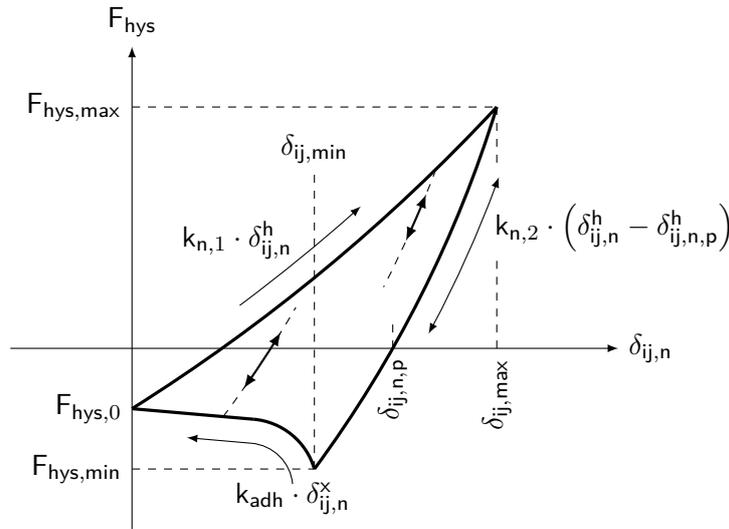


Abbildung 5.2.6: Nicht-linearer Verlauf der Haftkraft im EEPA-Modell (nach Morrissey 2013, S. 68)

Die Berechnung der notwendigen Parameter $\{F_{\text{hys},\text{min}}, \delta_{\text{min}}, k_{\text{adh}}, k_{n,1}, \delta_{ij,n,p}\}$ erfolgt nach den Gleichungen 5.2.31 bis 5.2.35. Der Parameter $\Delta\gamma$ stellt die Adhäsionskontaktenergie pro Fläche dar und der Parameter k_{adh} gibt den Wert für die Adhäsionssteifigkeit an (ebd., S. 7–9).

$$F_{\text{hys},\text{min}} = \frac{3}{2} \cdot \pi \cdot \Delta\gamma \cdot a \quad (5.2.31)$$

$$\delta_{\text{min}} = \left(\frac{-F_{\text{hys},\text{min}} + k_{n,2} \cdot \delta_p^h}{k_{n,2}} \right) \frac{1}{h} \quad (5.2.32)$$

$$k_{\text{adh}} = \left(\frac{F_{\text{hys},\text{min}}}{\delta_{\text{min}}^x} \right) \quad (5.2.33)$$

$$\delta_{ij,n,p} = \left(1 - \frac{k_{n,1}}{k_{n,2}}\right) \frac{1}{h} \cdot \delta_{ij,n} \quad (5.2.34)$$

$$k_{n,1} = \begin{cases} 2 \cdot R_{ij} \cdot E_{ij} & , \text{ falls lineares Modell} \\ \frac{4}{3} \cdot \sqrt{R_{ij}} \cdot E_{ij} & , \text{ falls nicht-lineares Modell} \end{cases} \quad (5.2.35)$$

Die Kontaktfläche wird, wie auch schon beim JKR Modell, über einen Kontaktradius a definiert. Der verwendete Kontaktradius aus Gleichung 5.2.31 wird über die Gleichungen 5.2.36 bis 5.2.39 hergeleitet, siehe auch Abb. 5.2.7 (Morrissey 2013, S. 74 f.).

$$a = \frac{1}{2 \cdot d} \sqrt{4 \cdot d^2 \cdot R_i^2 - (d^2 - R_j^2 + R_i^2)^2} \quad (5.2.36)$$

$$d = \begin{cases} d_1 & , \text{ für } d_1 < d_2 \\ d_2 & , \text{ für } d_1 \geq d_2 \end{cases} \quad (5.2.37)$$

$$d_1 = (R_i + R_j) - \delta_{i,j,n} \quad (5.2.38)$$

$$d_2 = (R_i + R_j) - \delta_{i,j,n,p} \quad (5.2.39)$$

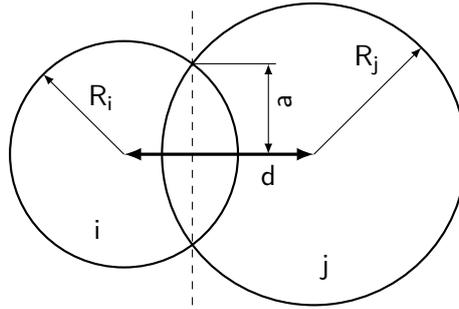


Abbildung 5.2.7: Kontaktradius im EEPa-Modell (nach Morrissey 2013, S. 75)

In linearer Form werden die Exponenten $\{h = x = 1\}$ gesetzt, woraus sich ein Kraftverlauf ergibt, wie er in Abb. 5.2.8 zu sehen ist.

In tangentialer Richtung wird die Kraft mittels der Gleichung 5.2.40 berechnet. Die Vorgehensweise erfolgt analog zum Modell von HERTZ-MINDLIN. Somit wird auch hier die tangentielle Kraft durch das COULOMB'sche Reibungsgesetz begrenzt (Gleichung 5.2.42). Die tangentielle Steifigkeit wird um einen Faktor κ_{tm} erweitert. Die Kontaktsteifigkeit und -dämpfung $\{k_{t,eepe}$ und $d_{t,eepe}\}$ mit den dazugehörigen Hilfsgrößen werden über die Gleichungen 5.2.42 bis 5.2.45 berechnet (ebd., S. 78–81) bzw. (DEM Solutions Ltd. 2017, S. 53).

$$F_{K,t,eepe} = \begin{cases} F_{t,el,eepe} + F_{t,diss,eepe} & , \text{ falls } F_{t,el,eepe} < \mu_{t,h} \cdot F_{hys} \\ F_{t,ct,eepe} & , \text{ falls } F_{t,el,eepe} > \mu_{t,h} \cdot F_{hys} \end{cases} \quad (5.2.40)$$

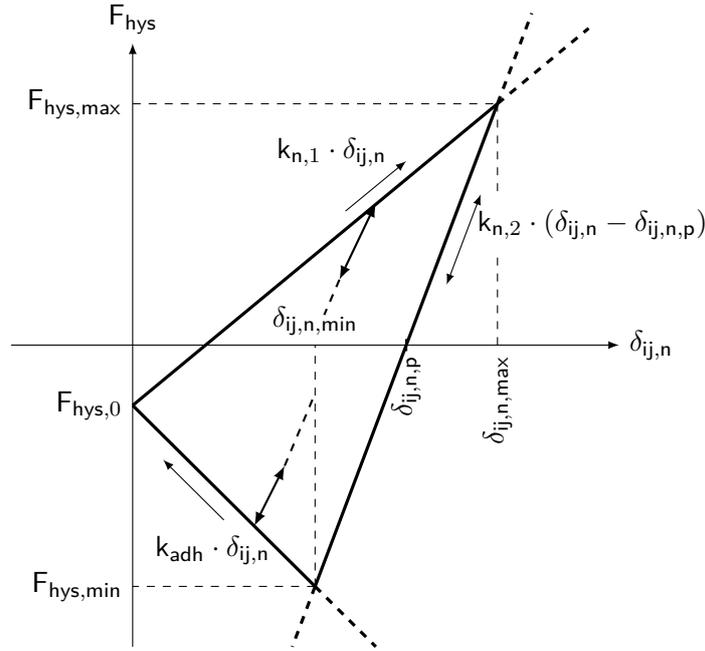


Abbildung 5.2.8: Linearer Verlauf der Haftkraft im EEPa-Modell (nach Morrissey 2013, S. 80)

$$F_{t,ct,eepe} = \mu \cdot |(F_{hys} + k_{adh} \cdot \delta_{ij,n} - F_{hys,0})| \quad (5.2.41)$$

$$F_{t,el,eepe} = k_{t,eepe} \cdot \delta_{ij,t} \quad (5.2.42)$$

$$k_{t,eepe} = \kappa_{tm} \cdot \begin{cases} k_{n,1} & , \text{ falls lineares Modell} \\ 8 \cdot G_{ij} \cdot \sqrt{R_{ij} \cdot \delta_{ij,n}} & , \text{ falls nicht-lineares Modell} \end{cases} \quad (5.2.43)$$

$$F_{t,diss,eepe} = d_{t,eepe} \cdot v_{ij,t} \quad (5.2.44)$$

$$d_{t,eepe} = \begin{cases} \beta_{t,eepe} & , \text{ falls lineares Modell} \\ -2 \cdot \sqrt{\frac{5}{6}} \cdot \beta_H \cdot \sqrt{k_{t,eepe} \cdot m_{ij}} & , \text{ falls nicht-lineares Modell} \end{cases} \quad (5.2.45)$$

$$\beta_{t,eepe} = \sqrt{\frac{4 \cdot m_{i,j} \cdot k_{t,eepe}}{1 + \left(\frac{\pi}{\ln e_{ij}}\right)^2}} \quad (5.2.46)$$

Rollreibung

Die Rollreibung wird wieder über das Drehmoment abgebildet, siehe Gleichung 5.2.47. Neben der Winkelgeschwindigkeit im Kontaktpunkt $\vec{\omega}_{ij}$ fließen noch der Abstand $l_{i,j}$ und die Haftkraft F_{hys} ein. Der Abstand $l_{i,j}$ ist die Strecke zwischen dem Kontaktpunkt und dem Massenschwerpunkt (DEM Solutions Ltd. 2017, S. 53).

$$\vec{M}_{r,i,ee\mu a} = -\mu_{t,r} \cdot l_{i,j} \cdot F_{hys} \cdot \vec{\omega}_{ij} \quad (5.2.47)$$

5.3 Kalibrierung

Das Ziel der Kalibrierung ist die Bestimmung der DEM Parameter, so dass zwischen den Simulationsergebnissen und Versuchsergebnissen nur eine minimale Abweichung besteht. Hierzu wird ein geeignetes Experiment numerisch abgebildet und die DEM Parameter werden in einem iterativen Prozess solange variiert bis die Abweichung minimal ist. In Abb. 5.3.1 ist der Kalibrierungsablauf schematisch dargestellt. Die Ergebnisse der Experimente dienen als Zielgrößen (Rackl 2018, S. 21 ff.).

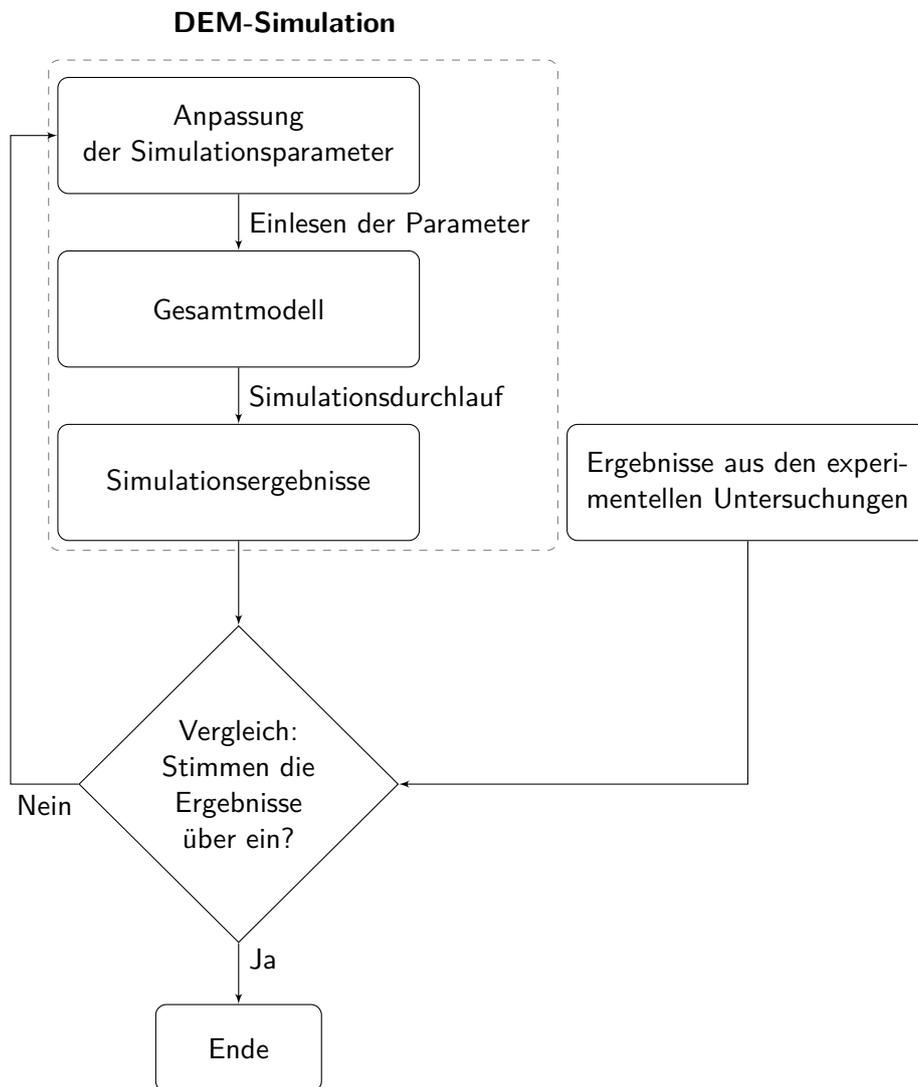


Abbildung 5.3.1: Schematische Darstellung des Kalibrierungsablaufs

Die verwendeten Experimente zur Kalibrierung beschäftigen sich sowohl mit makromechanischen Größen als auch mit mikromechanischen (Coetzee 2016, S. 50 f.). Die mikromechanischen

Größen sind auf der Partikelebene angesiedelt. Hierbei lassen sich einige ausgewählte Größen messtechnisch erfassen, jedoch nur mit erheblichem Aufwand (z. B. Rollwinkel der Partikel oder Partikel-Partikel Reibungskoeffizient) (Barrios u. a. 2013, S. 87 f.).

Die makromechanischen Größen beschreiben das Partikelsystemverhalten als Ganzes, d. h. aufgrund der hohen Anzahl der Partikel und deren Interaktion kann ein makroskopisches Schüttgutverhalten ermittelt werden z. B. Schüttdichte, Steifigkeit (Gröger und Katterfeld 2006, S. 481 f.), (Coetzee 2016, S. 51).

Eine Übersicht der in der Literatur publizierten gemessenen mikro- und makromechanischen Größen ist in COETZEE zu finden (ebd.), (Coetzee 2017). In der Literatur wird in vielen Fällen die Abweichung zwischen Simulation und Versuch nur graphisch dargestellt. Die Veröffentlichung von BARRIOS untersucht den statischen und dynamischen Schüttwinkel, hierzu vermisst er verschiedene mikromechanische Parameter und modelliert das Schüttgut mit unterschiedlichen Partikelformen. Die Abweichung zwischen Simulation und Versuch gibt BARRIOS mit 6 % bei der Modellierung mit einer komplexeren Partikelform (das Partikel besteht aus vier sich überlappenden Kugeln -zusammengesetztes Kugelglomerat) an. Handelt es sich bei dem Partikel um eine Kugel so beträgt die Abweichung 30 % (Barrios u. a. 2013, S. 91 f.). Anhand der verschiedenen graphischen Ergebnisse z. B. aus (Coetzee 2016, S. 65 f.) wird ersichtlich, dass mehrere Parametersätze die jeweiligen Zielgrößen hinreichend genau beschreiben. Die Experimente dienen nicht nur der Kalibrierung der DEM, sondern werden auch zur Bestimmung von makro- und mikromechanischen Größen benutzt.

Neben der genannten Anpassung der Simulationsparameter wird bei der Kalibrierung versucht, die Simulationszeit auf ein Minimum zu reduzieren. Dies geschieht indem Materialparameter, Partikeldurchmesser, -form und Elastizitätsmodul angepasst werden, da diese Parameter einen direkten Einfluss auf den Simulationszeitschritt haben, siehe Gleichung 5.1.5.

In den Veröffentlichungen von SAKAI und SALAZAR konnte gezeigt werden, dass durch das Zusammenfassen vieler kleiner Partikel zu weniger und größeren Partikeln, gute Kalibrierungsergebnisse erzielt werden können (Salazar u. a. 2015, S. 92), (Sakai u. a. 2014, S. 42). Diese Anwendung wird in der Literatur auch als *coarse graining* bezeichnet.

Eine vereinfachte Partikelform (kugelförmige Partikel) kann laut OBERMAYR, GÜNTHER und WENSRICH verwendet werden, wenn der Rollwiderstand angepasst wird (Obermayr und Vrettos 2013, S. 241), (Günthner und Fottner 2017, S. 40, 46) und (Wensrich und Katterfeld 2012, S. 416). Bei GÜNTHER und OBERMAYR konnte gezeigt werden, dass der *coarse graining* Ansatz auch mit kugelförmige Partikel umgesetzt werden kann und nicht zwangsläufig aus zusammengesetzten Kugelglomeraten bestehen muss (Günthner und Fottner 2017, S. 40, 46) und (Obermayr 2013, S. 90–106).

Die Reduzierung des Elastizitätsmoduls ist laut DALLINGER und LOMMEN ein geeignetes Mittel, um den Simulationszeitschritt zu erhöhen und damit die Rechenzeit zu reduzieren (Dallinger 2017, S. 116), (Lommen u. a. 2014, S. 111).

Kalibrierungsansätze

Laut RACKL lassen sich die Kalibrierungsansätze in drei Bereiche clustern: Einen unstrukturierten, einen strukturierten und einen methodischen Bereich (Rackl 2018, S. 23). Wobei die Grenzen zwischen dem strukturierten und dem methodischen Bereich fließend sind.

Der unstrukturierte Kalibrierungsansatz ist der in der Literatur³ am häufigsten vorkommende Ansatz. Hierbei wird vom Anwender ein Parametersatz ausgewählt und dann entsprechend den Erfahrungen des Anwenders und den Ergebnissen der Simulation die Änderung der Parameter vorgenommen. Bei diesem Vorgehen kann es passieren, dass der quantitative Einfluss und die gegenseitige Beeinflussung der Parameter falsch eingeschätzt werden (ebd., S. 24).

Beim strukturierten Kalibrierungsansatz handelt es sich um eine systematisierte Parameterstudie mit anschließender Sensitivitätsanalyse. Der Anwender variiert die verschiedenen Simulationsparameter stufenweise und kann dadurch die verschiedenen Wechselwirkungen und Abhängigkeitsverhältnisse identifizieren (Fakhimi und Villegas 2007). Im Bereich der methodischen Kalibrierungsansätze werden Methoden der statistischen Versuchsplanung (Hanley u. a. 2011), Optimierungsalgorithmen (Rackl 2018) und neuronale Netze (Benvenuti u. a. 2016) eingesetzt.

5.4 Experimentelle Untersuchungen an Schüttgütern

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen an Schüttgütern, die je nach Aufbau verschiedene Modellparameter auf Makroebene identifizieren. Tab. 5.4.1 listet einige Untersuchungen für DEM-Simulationen auf. Die Untersuchungen dienen neben der Identifizierung der Parameter zusätzlich der Referenz- und Validierungsmessung. Mit Hilfe der Referenzmessung lassen sich nicht zu identifizierende Parameter in einer nachgelagerten DEM-Simulation kalibrieren.

Tabelle 5.4.1: Übersicht der verschiedenen Versuche zu den experimentellen Untersuchungen an Schüttgütern

Versuchsaufbau	Quelle
Uniaxialer Versuch	(Schulze 2014, S. 5), (Morrissey 2013, S. 91)
Triaxialer Versuch	(Obermayr und Vrettos 2013, S. 55), (Schulze 2014, S. 55)
COUETTE-Versuch	(Fenistein u. a. 2004, S. 1)
Hohlzylinder Versuch	(Buttlar u. a. 2002, S. 11)
Planarer Scherzellenversuch	(Richefeu u. a. 2008, S. 1372), (Dratt 2016, S. 55)
Ringscherzellenversuch	(Schulze 2014, S. 13)
JKR-Versuch	(Ahn und Shull 1996, S. 4383)
Schüttwinkel	(Richefeu u. a. 2008, S. 55), (Dratt 2016, S. 49), (Günthner und Fottner 2017, S. 27)
Setzfließversuch	(Remond und Pizette 2014, S. 175 f.) , (F. Chen u. a. 2019, S. 448)
Viskositätsprüfung	(Kerkhoven 1967, S. 12)
Verdichtungsbewegung	(Ghafoori Roozbahany u. a. 2019)

³Eine Aufzählung hierzu relevanten Veröffentlichungen ist in (Rackl 2018, S. 24) zu finden.

Planare Scherzelle

Mit Hilfe einer Scherzelle wird eine Scherverformung in einer Schüttgutprobe indiziert. Mit der Scherzelle lässt sich die Fließgrenze bzw. der innerer Reibungswinkel (ϕ_R) und der effektive Reibungswinkel (ϕ_e)⁴ bestimmen. Der Aufbau einer Scherzelle ist in Abb. 5.4.1 a) dargestellt, die Schüttgutprobe hat die Querschnittsfläche A_p . Die Probe wird mit einer Normalkraft ($F_{V,n}$) belastet, diese erzeugt eine Normalspannung in der Probe (σ_1 und σ_2). Zusätzlich dazu wird eine Tangentialkraft ($F_{V,t}$) in den oberen Teil eingeleitet, dies erzeugt eine Schubspannung und sorgt für das Abscheren der Probe (Schulze 2014, S. 95–99).

Der mathematische Zusammenhang ist in den Gleichungen 5.4.1 bis Gleichungen 5.4.3 dargestellt. In Abb. 5.4.1 b) ist der MOHRsche Kreis für den betreffenden Fall dargestellt (ebd., S. 70 f., 99).

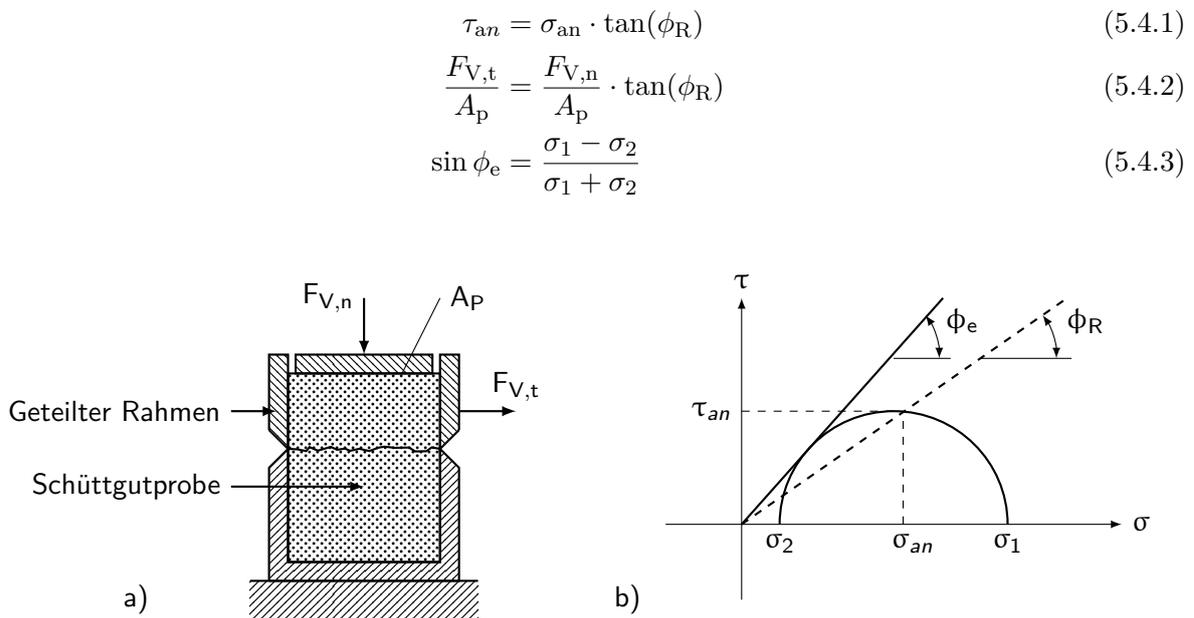


Abbildung 5.4.1: a) Abstrahierter Aufbau einer planaren Scherzelle nach JENIKE, b) MOHRscher Kreis bei Belastung der Scherzelle (Schulze 2014, S. 97, 70)

⁴Der effektive Reibungswinkel ist ein Maß zur Beurteilung der inneren Reibung beim stationären Fließen (Schulze 2014, S. 71)

Rotationsscherzelle

Bei einer Rotationsscherzelle handelt es sich um eine weiterentwickelte planare Scherzelle. Hierbei wird die Scherbewegung rotatorisch durchgeführt. In der rotationsförmigen Bauform besteht die Möglichkeit mehrere Messungen mit derselben Probe bei unterschiedlichen Belastungen durchzuführen. Darüber hinaus kann durch den großen Verschiebungsweg der Übergang zwischen den verschiedenen Reibbeiwerten (Haft- und Gleitreibung) aussagekräftiger erfasst werden. In Abb. 5.4.2 ist ein Ringscherzellenversuch nach SCHULZE dargestellt.

Der Rotor, in dem sich die Schüttgutprobe befindet, ist schalenförmig ausgeführt und wird mit einer Kreisgeschwindigkeit (ω_V) angetrieben. Die Oberseite des Prüfstands (Stator) kann entweder mit einer Normalkraft ($F_{V,n}$) belastet oder mit einer Auftriebskraft ($F_{V,A}$) entlastet werden. Der Stator ist über einen Querträger mit zwei Zugstangen verbunden, die eine Rotation unterbinden, jedoch eine axiale Verschiebung zur Be- und Entlastung zulassen. Sowohl der Stator als auch der Rotor sind mit Mitnehmern ausgestattet, um eine gute Übertragung der Kraft zwischen den Bauteilen und der Probe zu gewährleisten.

Durch die indizierte Bewegung am Rotor wird die Schüttgutprobe tordiert, bis es zum Versagen durch Abscherung kommt. Hierbei lässt sich das auftretende Haltedrehmoment am Stator messen. Durch Kenntnis der geometrischen Zusammenhänge kann aus dem Haltedrehmoment ($M_{V,s}$) der Reibbeiwert (μ) ermittelt werden. Eine mathematische Herleitung ist in Anhang D zu finden.

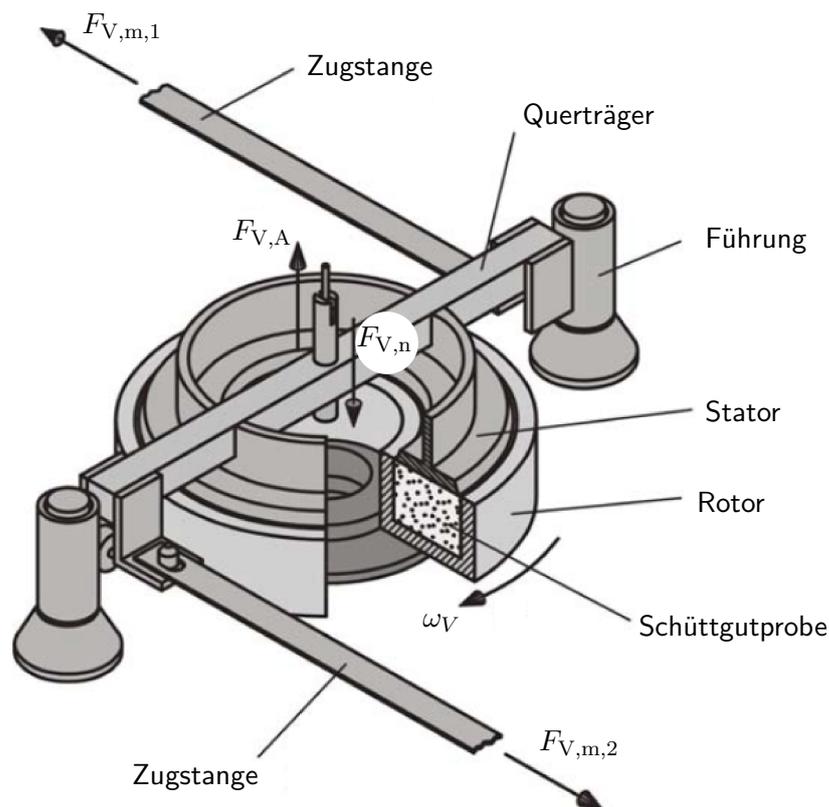


Abbildung 5.4.2: Aufbau des SCHULZE-Ringscherzellenversuch (nach Schulze 2014, S. 103)

6 Statistische Absicherung der Untersuchungen

In diesem Kapitel wird darauf eingegangen, welche statistischen Methoden in der vorliegenden Arbeit verwendet werden. Das Kapitel gliedert sich in fünf Teile. Im ersten Teil wird aufgezeigt, was die Statistik in der Wissenschaft leistet und welcher Stellenwert ihr beigemessen wird. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der deskriptiven Statistik. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung wird in Teil drei angerissen. Hierbei beschränkt sich der Inhalt auf die Normalverteilung, da die gemessenen Daten normalverteilt sind¹. Die verwendete induktive Statistik wird im vierten Teil dargestellt. Das Kapitel schließt mit der Versuchsplanung, die für die Kalibrierung der Simulationsparameter benutzt wird.

6.1 Grundsätzliches

Die Wissenschaft versucht durch Beobachtungen von Vorgängen die dabei zutage tretenden Gesetzmäßigkeiten zu beschreiben, wobei es unerheblich ist, ob es sich dabei um technische Vorgänge oder Phänomene der Natur handelt. Um die relevanten Gesetzmäßigkeiten genau zu beobachten, werden Experimente aufgebaut, die den Vorgängen nachempfunden sind. Hierbei ist wichtig aus den Vorgängen alle wesentlichen Einflüsse klar zu definieren und herauszufiltern und die uninteressanten Einflüsse zu minimieren (Kamke 2014, S. 7).

Das Experiment kann mit einem Messsystem als geschlossenes System angesehen werden, siehe Abb. 6.1.1. Das Experiment hat neben den Eingangsgrößen, welche sowohl gezielt als auch

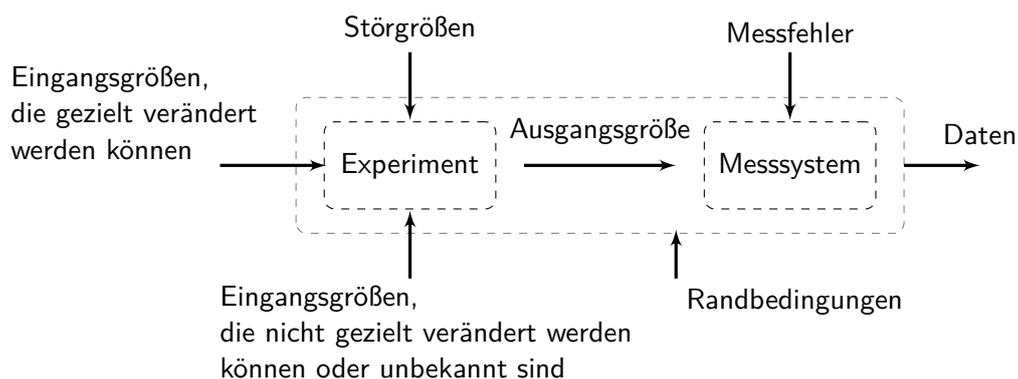


Abbildung 6.1.1: Vereinfachtes Blockschaltbild eines Experiments nach (Siebertz u. a. 2010, S. 3)

nicht gezielt verändert werden können bzw. unbekannt sind, noch Störgrößen. Zusammen ergeben diese Größen eine Ausgangsgröße, die mit Hilfe eines Messsystems quantitativ bestimmt wird und die Daten bzw. Ergebnisse des Experimentes darstellt. Die Wissenschaft muss ver-

¹Die Normalverteilung der gemessenen Daten wird mittels Anpassungstest nachgewiesen, siehe Abschnitt 7.3.2.

suchen, dass zum einen den Ergebnissen vertraut werden kann. Zum anderen ist die Aufgabe aus den erzeugten Daten möglichst viele Informationen zu extrahieren bzw. die erzeugten Daten besser zu interpretieren. Bei der quantitativen Bestimmung der Ausgangsgrößen können, trotz größtmöglicher Sorgfalt des Experimentators, Fehler nicht vermieden werden, welche durch veränderliche Randbedingungen oder durch Messfehler² verursacht werden können. Mit Hilfe von statistischen Methoden können diese Fehler quantifiziert werden. In Kombination mit den Ergebnissen kann dies zum Vertrauen in die Ergebnisse bzw. Daten beitragen (Kamke 2014, S. 12 – 17). Die deskriptive Statistik stellt Werkzeuge bereit, um die Zusammenhänge, Wechselwirkungen und Einflüsse zwischen den Eingangsgrößen und Ergebnissen besser interpretieren zu können.

6.2 Deskriptive Statistik

Die deskriptive (beschreibende) Statistik stellt Methoden [...] bereit, mit deren Hilfe Beobachtungsdaten möglichst effektiv charakterisiert und zusammenfassend beschrieben werden können.

(Ruge u. a. 2014, S. 167)

Die nachfolgenden Lage- und Streuungsparameter sind aus KAMKE entommen (Kamke 2014, S. 33–38, 47 f.). Das arithmetische Mittel ist gegeben durch folgende Formel:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.2.1)$$

Die Stichprobenvarianz berechnet sich durch die mittleren quadratischen Abweichung vom arithmetischen Mittel, siehe Gleichung 6.2.2.

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6.2.2)$$

Die Standardabweichung ergibt sich danach wie folgt:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.2.3)$$

Da sich das arithmetische Mittel aus Einzelmessungen berechnen lässt, kann mit Hilfe des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes die Genauigkeit bzw. Unsicherheit des arithmetischen Mittels über Gleichung 6.2.4 bestimmt

$$s_{\bar{x}} = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (6.2.4)$$

Der Median ist eine weitere Möglichkeit, die Lage der Daten einzuordnen. Die Daten werden hierbei in eine obere und untere Hälfte geteilt, unabhängig vom Wert der einzelnen Daten. Daher gilt dieser Lageparameter als robust gegenüber Ausreißern. Im Zusammenhang mit dem Median

²Laut *DIN 1319-1* sind Messfehler als Messabweichung zu bezeichnen, da jedoch das Wort 'Fehler' üblich die Bedeutung der 'Falschheit' hat. In diesem Kontext ist mit dem Wort 'Fehler' jedoch gemeint, dass Messungen immer mit Unsicherheiten behaftet sind (Taylor 1988, S. 3).

(Q_2) werden auch noch die jeweiligen Quartile (Q_1, Q_3) berechnet, siehe Formel 6.2.5. Diese Kennzahl nimmt eine weitere Einteilung der Daten vor und gibt die Werte an, die von 25 % der Daten unter- bzw. überschritten wird (Roosch 2014, S. 74). Die Berechnung³ des Medians und der Quartile erfolgt nach folgender Formel⁴ (Feuersänger 2018, S. 497):

$$Q_p = \begin{cases} x_{n \cdot p} & , \text{ falls } n \text{ ungerade} \\ \frac{1}{2} \cdot (x_{\lfloor n \cdot p \rfloor} + x_{\lceil n \cdot p \rceil}) & , \text{ falls } n \text{ gerade} \end{cases} \quad (6.2.5)$$

Die Stichprobe hat die Form (x_1, x_2, \dots, x_n) und p stellt den Quantilen-Faktor dar. Der Wertebereich von p ist definiert als $0 \leq p \leq 1$. Der Quantilen-Faktor teilt die nach der Größe sortierten Daten in zwei Teile ein. Der erste Teil ($100 \cdot p$ %) liegt links davon und der zweite Teil ($100 \cdot (1 - p)$ %) liegt rechts davon (Roosch 2014, S. 75). Der Median und die Quartile werden bei der Boxplotdarstellung verwendet, siehe Abb. 6.3.3.

Mit Hilfe des Chauvenetschen Kriteriums lässt sich überprüfen, ob ein Messwert ein Ausreißer ist oder ob es sich um eine legitime Abweichung handelt. Der formelmäßige Zusammenhang ist in der Gleichung 6.2.6 dargestellt. Wenn die erwartete Anzahl von Messwerten n_{verd} , die mindestens so schlecht sind wie der verdächtige Messwert x_{verd} , kleiner als $1/2$ ist, dann handelt es sich um einen Ausreißer (Taylor 1988, S. 125–128).

$$t_{verd} = \frac{x_{verd} - \bar{x}}{s}$$

$$P_{verd} \text{ (schlechter als } x_{verd}) = 1 - P(t_{verd} \cdot s) \quad (6.2.6)$$

$$n_{verd} \text{ (schlechter als } x_{verd}) = n \cdot P_{verd} \text{ (schlechter als } x_{verd})$$

6.3 Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Messgröße lässt sich über die Verteilungsfunktion $F(x)$, die Dichtefunktion $f(x)$ oder über Parameter (sogenannte Lage- und Streuungsparameter) beschreiben. Zu diesen Parametern zählen z. B. der Mittelwert ($\bar{x} \approx \mu_w$) und die Varianz ($s \approx \sigma_w$) bzw. die Standardabweichung (Papula 2011, S. 335, 498 f.).

Die Normalverteilung nimmt im physikalisch-technischen Umfeld eine Sonderrolle unter den Wahrscheinlichkeitsverteilungen ein, da ein Großteil dieser Messgrößen der Normalverteilung unterliegt. Dieser Umstand ist auf den *Zentralen Grenzwertsatz* zurückzuführen, der besagt, dass sich Messungen, die aus dem Zusammenwirken vieler Einzeleinflüsse (Messfehler, Störgrößen etc.) resultieren, als normalverteilt annehmen lassen (Bamberg u. a. 2012, S. 122 f.).

Die Dichtefunktion $f(x)$ und die Verteilungsfunktion $F(x)$ der Normalverteilung lassen sich (nach Papula 2011, S. 372) mit den Gleichungen 6.3.1 und 6.3.2 bestimmen.

³Für die Berechnung des Medians und der Quartile gibt es verschiedene Berechnungsgrundlagen (siehe Hyndman und Fan 1996).

⁴Bei den Funktionen $\lfloor \dots \rfloor$ und $\lceil \dots \rceil$ handelt es sich um die Abrundungs- bzw. Aufrundungsfunktion (Roosch 2014, S. 75).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_w}} \cdot e^{-\frac{(x - \mu_w)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}} \quad x \in \mathbb{R} \quad (6.3.1)$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_w}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x' - \mu_w)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}} dx' \quad x \in \mathbb{R} \quad (6.3.2)$$

In der Literatur ist für die Normalverteilung auch die Schreibweise $N(\mu_w; \sigma_w)$ gebräuchlich. In Abb. 6.3.1 sind beispielhaft zwei Normalverteilungen mit unterschiedlichen Parametern dargestellt und Abb. 6.3.2 zeigt den Zusammenhang zwischen den Lage- und Streuungsparametern.

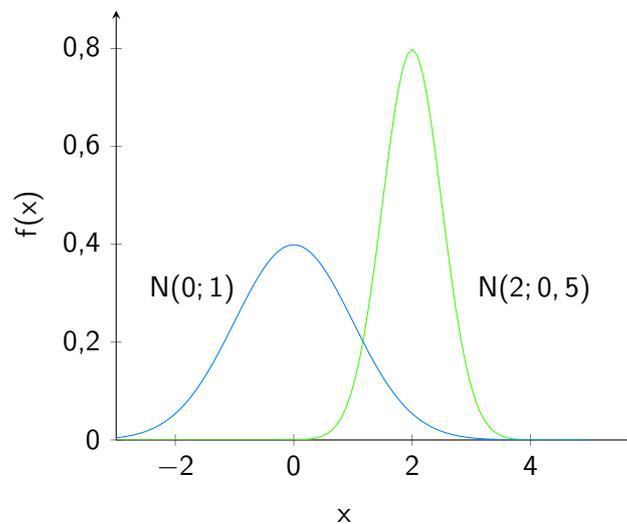


Abbildung 6.3.1: $N(\mu_w; \sigma_w)$ -Verteilung für verschiedene Parameterkonstellationen (vgl. Bamberg u. a. 2012, S. 102)

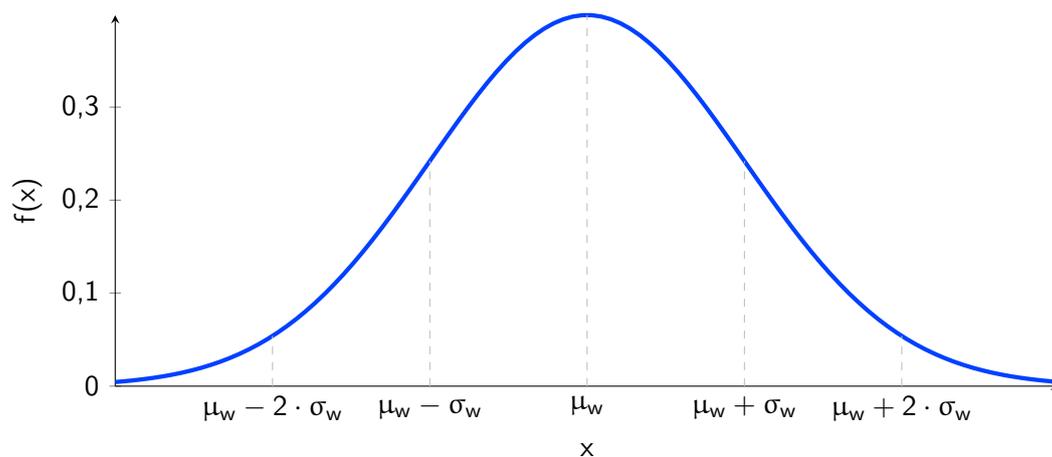


Abbildung 6.3.2: Zusammenhang zwischen Gaußverteilung, Mittelwert und Standardabweichung (nach Papula 2011, S. 373)

Der Boxplot ist eine Darstellungsmöglichkeit für statistische Werte, wobei der Median (Q_2 , der minimale Wert (Min), der maximale Wert (Max), das erste und dritte Quartil (Q_1 , Q_3) sowie Ausreißer dargestellt werden, siehe Abb. 6.3.3. Die Box entspricht in ihrer Länge dem Interquartilsabstand (IQR). Die maximalen und minimalen Werte liegen innerhalb eines Bereichs mit einem Abstand von $1,5 \cdot IQR$ jeweils zur oberen und unteren Kante. Alle Werte, die außerhalb des Bereichs ($4 \cdot IQR$) liegen, sind Ausreißer (Rooch 2014, S. 77 f.).

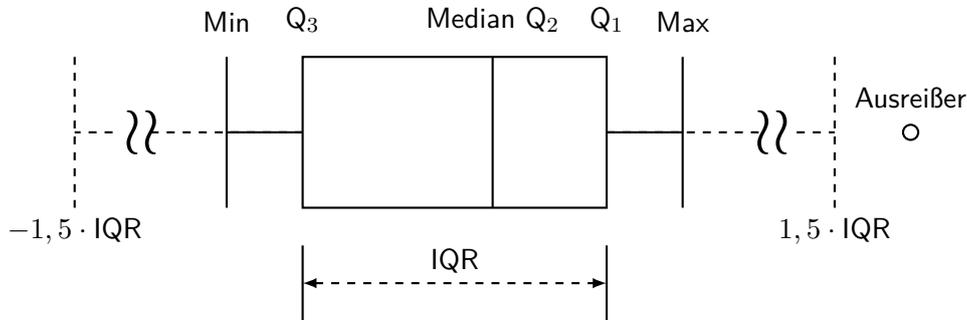


Abbildung 6.3.3: Relevante Parameter eines Boxplots

6.4 Induktive Statistik

Das Ziel bei Messungen ist, die gesuchte Größe mit den zu erwartenden Unsicherheiten möglichst genau zu bestimmen, in der Literatur wird hierbei vom 'wahren' Wert gesprochen. Eine Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der Gesamtheit. Die Ermittlung der Gesamtheit ist aber in vielen Fällen nicht möglich. Daher wird versucht, anhand von wenigen Messungen auf die Eigenschaften der Gesamtheit zu schließen. Mit Hilfe der induktiven Statistik können aus wenigen Messungen verlässliche Rückschlüsse auf die Gesamtheit gezogen werden (Kamke 2014, S. 91 ff.). Hierzu werden Hypothesen (sogenannte Null- oder Prüfhypothesen) darüber aufgestellt, wie sich die Eigenschaften der Gesamtheit verhalten. Für die Hypothesen werden die Verteilungsfunktion, die Lageparameter sowie die Streuungsparameter geschätzt. Im Anschluss daran werden die Hypothesen mittels geeigneter Tests auf ihre Konsistenz hin überprüft (Holling und Schmitz 2010, S. 326–357). Im Rahmen dieser Arbeit werden die Hypothesen nur hinsichtlich der Verteilungsfunktion überprüft, d. h. handelt es sich bei den Messungen um eine Normalverteilung. Im vorliegenden Fall wird die Nullhypothese (H_0) aufgestellt, die besagt, dass eine Normalverteilung der Grundgesamtheit vorliegt. Im Umkehrschluss besagt die Alternativhypothese (H_1), dass keine Normalverteilung vorliegt. Der beschriebene Sachverhalt wird über die Gleichung 6.4.1 ausgedrückt.

$$H_0 : F(x) = F_0(x) \quad \text{gegen} \quad H_1 : F(x) \neq F_0(x) \quad (6.4.1)$$

Zur Überprüfung der Hypothese wird der Test von SHAPIRO und WILK herangezogen, siehe Gleichungen 6.4.2 und 6.4.3 (Shapiro und Wilk 1965, S. 602–603). Die Stichproben (x_1, x_2, \dots, x_n) werden nach aufsteigender Größe sortiert, die sortierte Stichprobe wird nun mit (y_1, y_2, \dots, y_n) bezeichnet und es gilt folgender Zusammenhang ($y_1 < y_2 < \dots < y_n$). Die Koeffizienten a_{n-i+1}

hängen von der Stichprobengröße ab und sind in der Tabelle 5 in (Shapiro und Wilk 1965, S. 603) zu finden. Wenn eine Normalverteilung vorliegt, so ist der berechnete Wert SW größer als der kritische Wert SW_{krit} . Der kritische Wert ist von SHAPIRO und WILK vorgegeben.

$$\begin{aligned}
 SW &= \frac{b_{\text{SW}}^2}{s_{\text{SW}}^2} \\
 \text{mit} \\
 s_{\text{SW}}^2 &= \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \\
 b_{\text{SW}} &= \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} \cdot (y_{n-i+1} - y_i) \\
 &= a_n \cdot (y_n - y_1) + \dots + a_{k+2} \cdot (y_{k+2} - y_k) \\
 \text{bei } n \text{ geraden } k &= \frac{n}{2} \\
 \text{bei } n \text{ ungeraden } k &= \frac{n+1}{2} \\
 \begin{cases} SW < SW_{\text{krit}} & \text{Nicht normalverteilt} \\ SW > SW_{\text{krit}} & \text{normalverteilt} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{6.4.2}$$

$$\begin{cases} SW < SW_{\text{krit}} & \text{Nicht normalverteilt} \\ SW > SW_{\text{krit}} & \text{normalverteilt} \end{cases} \tag{6.4.3}$$

Dieser Test hat eine große statistische Teststärke⁵ und bietet den Vorteil, dass er schon bei einer kleinen Anzahl von Stichproben gute Ergebnisse liefert. Jedoch reagiert der Test stark auf Ausreißer, so dass es zu einer Verzerrung kommen kann und die Annahme auf Normalverteilung abgelehnt wird, obwohl eine Normalverteilung vorliegt, siehe (B. W. Yap und Sim 2011) und (Razali und B. Yap 2011).

Im Fall von Ausreißern kann der QQ-Plot (Quantil-Quantil-Plot) zur Überprüfung einer Verteilungsannahme verwendet werden. Beim QQ-Plot handelt es sich um ein graphisches Verfahren, bei dem eine empirische Verteilung mit einer vorgegebenen theoretischen Verteilung im zweidimensionalen Diagramm verglichen wird. Im Fall der Überprüfung auf Normalverteilung wird die empirische Verteilung mit den Quantilen der Normalverteilung verglichen. Liegen die Punkte im QQ-Plot annähernd auf einer Geraden mit Winkel 45 Grad, kann davon ausgegangen werden, dass die Stichprobe normalverteilt ist (Holling und Gediga 2016, S. 100 ff.), (Roosch 2014, S. 83).

Konfidenzintervall

Da aus dem Stand der Technik für die DEM hervorgeht, dass die Simulationsergebnisse streuen (siehe Kapitel 5.1), müssen die Simulationen mehrfach durchgeführt werden. Die verwendeten statistischen Methoden im DEM-Simulationsprozess werden in den Veröffentlichungen sehr ungenau spezifiziert bzw. nicht benannt, z. B. in (Dallinger 2017, S. 108), (Yan u. a. 2015), (Syed u. a. 2017), (Günthner und Fottner 2017, S. 27). Darüber hinaus wird in der Statistikkliteratur das Thema Simulation nicht benannt bzw. werden keine spezielle Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt, z. B. (Bamberg u. a. 2012), (Ruge u. a. 2014).

⁵Ist die Wahrscheinlichkeit für die korrekte Entscheidung zugunsten der Alternativhypothese H_1 , (siehe Holling und Schmitz 2010, S. 358 f.).

Für die Bestimmung der Simulationswiederholungen wird das Verfahren der Intervall-Schätzung (Konfidenzintervall) herangezogen. Das Ziel einer Intervall-Schätzung ist es, einen Bereich anzugeben, der mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit den wahren Wert enthält. Der Bereich wird als Konfidenzintervall bezeichnet (Roosch 2014, S. 95 f.) Wie die Untersuchungen (Kapitel 7.3.2) zeigen, lässt sich der *Zentrale Grenzwertsatz* auch auf die Simulationsparameter anwenden, weshalb diese als normalverteilt angenommen werden können. Für normalverteilte Parameter hat das Konfidenzintervall folgenden formelmäßigen Zusammenhang (nach ebd., S. 98):

$$\bar{x} - z_{N(0,1)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu_w \leq \bar{x} + z_{N(0,1)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6.4.4)$$

In der Formel 6.4.4 stellt der Wert μ_w den unbekanntem wahren Wert dar und $z_{N(0,1)}$ ist ein Faktor (z-Wert), der aus einer Quantil-Tabelle (ebd., S. 218) entnommen werden kann. Der z-Wert $z_{N(0,1)}$ ist abhängig vom gewählten α_s -Wert (das sogenannte Signifikanzniveau⁶). Die Breite des Konfidenzintervalls (KIB) lässt sich aus der Differenz der oberen Grenze und der unteren Grenze berechnen:

$$KIB = \left(\bar{x} + z_{N(0,1)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \right) - \left(\bar{x} - z_{N(0,1)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (6.4.5)$$

$$KIB = 2 \cdot z_{N(0,1)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6.4.6)$$

6.5 Versuchsplanung

Die Versuchsplanung ist eine natürliche Erweiterung des naturwissenschaftlichen Vorgehens zum Erkenntnisgewinn über Prozesse. Das Ziel der Versuchsplanung ist es, mit möglichst wenig Einzelversuchen den Prozess umfassend zu verstehen (Kleppmann 2016, S. 4 f.).

Im Folgenden werden sowohl der vollständige als auch der fraktionelle faktorielle Versuchsplan näher beschrieben, da diese in der Arbeit angewendet werden. Die Gründe für die Wahl dieser Versuchspläne finden sich in Kapitel 7.3.6. Beim vollständigen faktoriellen Versuchsplan werden alle Kombinationen getestet, damit der Einfluss der Prozessparameter und der Wechselwirkungen zwischen den Parametern aufgezeigt wird. Das bedeutet, dass der Effekt des einen Parameters davon abhängt, welchen Wert der andere Faktor hat (ebd., S. 106). Die im Versuchsplan untersuchten Parameter werden Faktoren genannt (Siebertz u. a. 2010, S. 5–7). Der mathematische Zusammenhang bei einem vollständig faktoriellen Versuchsplan mit 2 Stufen und k_V -Faktoren, wird durch die Gleichung

$$m_V = 2^{k_V} \quad (6.5.1)$$

beschrieben (nach Kleppmann 2016, S. 113).

Hierbei stellt das Formelzeichen m_V die Anzahl der Faktorstufenkombinationen dar. Die Stufen sind die Einstellungen der Faktoren. In Tab. 6.5.1 ist ein vollständig faktorieller Versuchsplan mit 2 Stufen (+, –) und 3 (A, B, C) Faktoren und den resultierenden Faktorwechselwirkungen (AB, AC, BC, ABC) dargestellt. Die Wirkung der einzelnen Faktoren auf den Prozess wird

⁶Dieser Wert wird festgelegt und stellt eine Wahrscheinlichkeit dar, mit der eine getroffene Nullhypothese abgelehnt wird bzw. ihre Gültigkeit behält (Kronthaler 2014, S. 128 f.).

durch einen sogenannten Effekt ermittelt. Der Effekt quantifiziert die Veränderung des Ergebnisses beim Wechsel der Faktoreinstellung. Die Gleichung

$$E_{F_i} = \frac{2}{m_V} \cdot \sum_{i=1}^m (\text{Vorzeichen} \cdot \bar{x}_i) \quad (6.5.2)$$

stellt die Berechnungsvorschrift für den Effekt von Faktor F_i dar. Der Faktor F_i umfasst sowohl die Effekte als auch deren Wechselwirkungen (Kleppmann 2016, S. 115).

Tabelle 6.5.1: Vollfaktorieller Versuchsplan mit 2 Stufen und 3 Faktoren und den Wechselwirkungen (nach Siebertz u. a. 2010, S. 19)

Nr.	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Ergebnisse	
								Mittelwert $[\bar{x}_i]$	Varianz $[s_i]$
1	-	-	-	+	+	+	-	\bar{x}_1	s_1
2	+	-	-	-	-	+	+	\bar{x}_2	s_2
3	-	+	-	-	+	-	+	\bar{x}_3	s_3
4	+	+	-	+	-	-	-	\bar{x}_4	s_4
5	-	-	+	+	-	-	+	\bar{x}_5	s_5
6	+	-	+	-	+	-	-	\bar{x}_6	s_6
7	-	+	+	-	-	+	-	\bar{x}_7	s_7
8	+	+	+	+	+	+	+	\bar{x}_8	s_8
Summe	Su_A	Su_B	Su_C	Su_{AB}	Su_{AC}	Su_{BC}	Su_{ABC}		
Effekt	E_A	E_B	E_C	E_{AB}	E_{AC}	E_{BC}	E_{ABC}		

Der Mittelwert der Varianz (Gleichung 6.5.3) und die Standardabweichung des Effektes (Gleichung 6.5.4) sind wichtige statistische Lage- und Streuungsparameter, um die Signifikanz des Effektes beurteilen zu können.

$$s^2 = \frac{1}{m_V} \cdot \sum_{i=1}^m (s_i)^2 \quad (6.5.3)$$

$$s_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{4}{N} \cdot s^2} \quad (6.5.4)$$

Mit Hilfe des statistischen Freiheitsgrads⁷ (Gleichung 6.5.5) kann die Breite eines Konfidenzintervalls ($\pm t \cdot s_{\bar{d}}$) über die t-Verteilung bestimmt werden. Durch das Konfidenzintervall und den Wert des Effektes kann die jeweilige Signifikanz beurteilt werden (siehe Gleichung 6.5.6). In der Regel werden die Effekte mit den Konfidenzintervallen 95 %, 99 % und 99,9 % verglichen. Neben der Berechnung können die Ergebnisse auch graphisch dargestellt werden. Diese Darstellung ist

⁷Dieser Wert gibt an, wie groß die Zufallsstreuung ist. Je größer der Freiheitsgrad ist, desto weniger Zufallsstreuung liegt vor (Kleppmann 2016, S. 79).

Abb. 6.5.1 zu sehen. Die Gesamtzahl der Einzelversuche wird mit N bezeichnet (Kleppmann 2016, S. 115 ff.).

$$f = N - m_V \quad (6.5.5)$$

$$\begin{cases} E_{F_i} < t \cdot s_{\bar{d}} & \text{Nicht Signifikant} \\ E_{F_i} > -t \cdot s_{\bar{d}} & \text{Nicht Signifikant} \\ E_{F_i} < -t \cdot s_{\bar{d}} & \text{Signifikant} \\ E_{F_i} \geq t \cdot s_{\bar{d}} & \text{Signifikant} \end{cases} \quad (6.5.6)$$

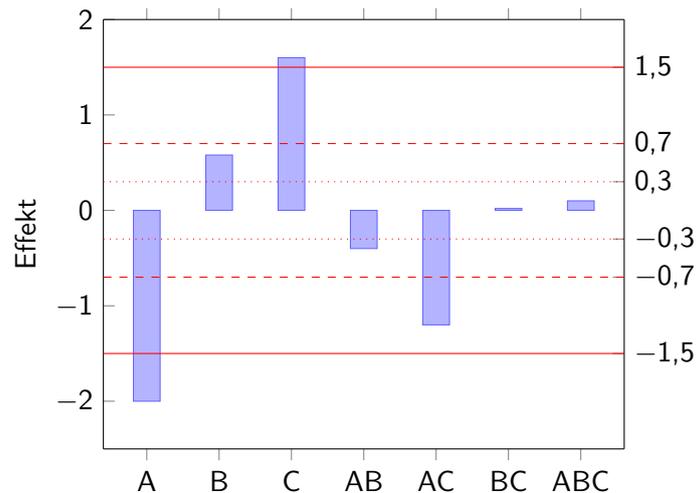


Abbildung 6.5.1: Graphische Darstellung der Effekte mit den Konfidenzintervall (95 % [gepunktet], 99 % [gestrichelt], 99,9 % [durchgezogen]) (nach Kleppmann 2016, S. 106 ff.)

Der fraktionelle faktorielle Versuchsplan baut auf dem System des vollständigen faktoriellen Versuchsplans auf. Hierbei werden die höheren Faktorwechselwirkungen (FWW) durch zusätzliche Faktoren substituiert. Die Anzahl der Faktorstufenkombinationen bleibt gleich, es werden jedoch mehrere unterschiedliche Faktoren untersucht. Der mathematische Zusammenhang ist in Gleichung 6.5.7 dargestellt, hierbei stellt b die Anzahl an Faktoren dar, die zusätzlich beobachtet werden können.

$$m_V = 2^{k_V - b} \quad (6.5.7)$$

Der fraktionelle faktorielle Versuchsplan hat k_V Faktoren und $2^{k_V - b}$ Faktorstufenkombinationen. Somit wird nur der Anteil von $\frac{1}{2^b}$ vom vollständigen faktoriellen Versuchsplan untersucht. Da nur ein Teil des vollständigen faktoriellen Versuchsplan durchlaufen wird, kommt es zu einer Vermengung zwischen den Effekten. Diese Vermengung kann zu Fehlinterpretationen führen. Hierbei ist entscheidend welche Effekte miteinander vermengt sind, siehe Tab. 6.5.2. Die Auflösung gibt an, welche Effekte miteinander vermengt sind und wie kritisch die Bewertung ist (ebd., S. 129–163). Die Bildung der Effekte und die Auswertung der Signifikanz erfolgt nach

denselben Gleichungen, die für die vollständige faktorielle Versuchsplanung genommen werden (Gleichung 6.5.2 bis 6.5.6).

Tabelle 6.5.2: Verschiedene Auflösung für den fraktionelle faktorielle Versuchsplan (Kleppmann 2016, S. 144)

Auflösung	Vermengung	Bewertung
III	Faktor mit 2 FWW	kritisch
IV	Faktor mit 3 FWW	wenig kritisch
	2 FWW mit 2 FWW	
V	Faktor mit 4 FWW	unkritisch
	2 FWW mit 3 FWW	
VI	Faktor mit 5 FWW	unkritisch
	2 FWW mit 4 FWW	
	3 FWW mit 3 FWW	

7 Experimenteller Versuchsaufbau

Dieses Kapitel ist in drei Teilbereiche untergliedert. Den physikalischen Versuchsaufbau, das verwendete Versuchsmaterial und den simulativen Versuchsaufbau. Der erste Teil beschäftigt sich mit der Beschreibung des physikalischen Versuchsaufbaus. Hierbei wird der verwendete Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und die Validierung des Aufbaus beschrieben. Im zweiten Teil werden die verschiedenen Mischgüter vorgestellt, die im Rahmen der Arbeit untersucht werden. Der simulative Versuchsaufbau stellt den dritten Teil des Kapitels dar. Inhaltliche Schwerpunkte sind der Aufbau des Modells, die Kinematik, die Validierung, die verwendete Partikelverteilung, die Parameter der Kontaktmodelle und die Kalibrierungsmethode.

7.1 Physikalischer Versuchsaufbau-Ringscherzellenversuch

Die Kinematik des Prüfstandes entspricht der Ringscherzelle nach SCHULZE. Der Rotor besitzt einen rotatorischen Freiheitsgrad um die Längsachse, der Antrieb erfolgt über einen Hebel per Hand. Der Stator besitzen zwei Freiheitsgrade, einen rotatorischen und einen translatorischen. Der rotatorische Freiheitsgrad um die Längsachse wird für die Kraftmessung verwendet. Die Kraftmessung erfolgt nach demselben Messprinzip, welches bei SCHULZE verwendet wird, mittels Hebelarm und Kraftaufnehmer. Der translatorische Freiheitsgrad sorgt dafür, dass der Stator exakt auf dem Rotor positioniert werden kann. Unterhalb des Rotors ist eine Heizung verbaut, um die gewünschten Versuchstemperaturen zu erreichen. Das Heizelement, der Rotor und der Stator sind aus Aluminium gefertigt, um eine gute Wärmeleitfähigkeit zu gewährleisten.

Der Probenraum hat einen Außendurchmesser von 160 mm, einen Innendurchmesser von 80 mm und die Höhe beträgt 40 mm. Die Mitnehmer sind aus L-Profilen (10 x 10 x 2 mm) gefertigt und alle 30° im Stator und Rotor angeordnet. In Abb. 7.1.1 ist der Prüfstand als Ganzes dargestellt.

7.1.1 Versuchsdurchführung

Der Ablauf der Versuchsdurchführung ist in Abb. 7.1.2 skizziert und wurde entsprechend den Vorgaben aus SCHULZE nachempfunden (Schulze 2014, S. 102–106). Hierbei wird der Handhebel vor jeder Messwertaufnahme zuerst in eine Stellung von -15° verfahren. Anschließend wird er in die Ausgangsstellung bei 0° gedreht. Während der Messung wird der Hebel manuell in die Endstellung von 110° verfahren. Untersuchungen mit zwei verschiedenen Verfahrdauern¹ (Drehung von der Startposition in die Endstellung) hat keine signifikante Änderung der Ergebnisse ergeben (nach Hornstein 2018, S. 63–65). Die Drehung erfolgt innerhalb von ca. 2 s.

¹Die Verfahrdauern waren ca. 5 s und ca. 1 s, dies entspricht einer einer Drehrate von ca. $22^\circ/\text{s}$ respektive $110^\circ/\text{s}$.

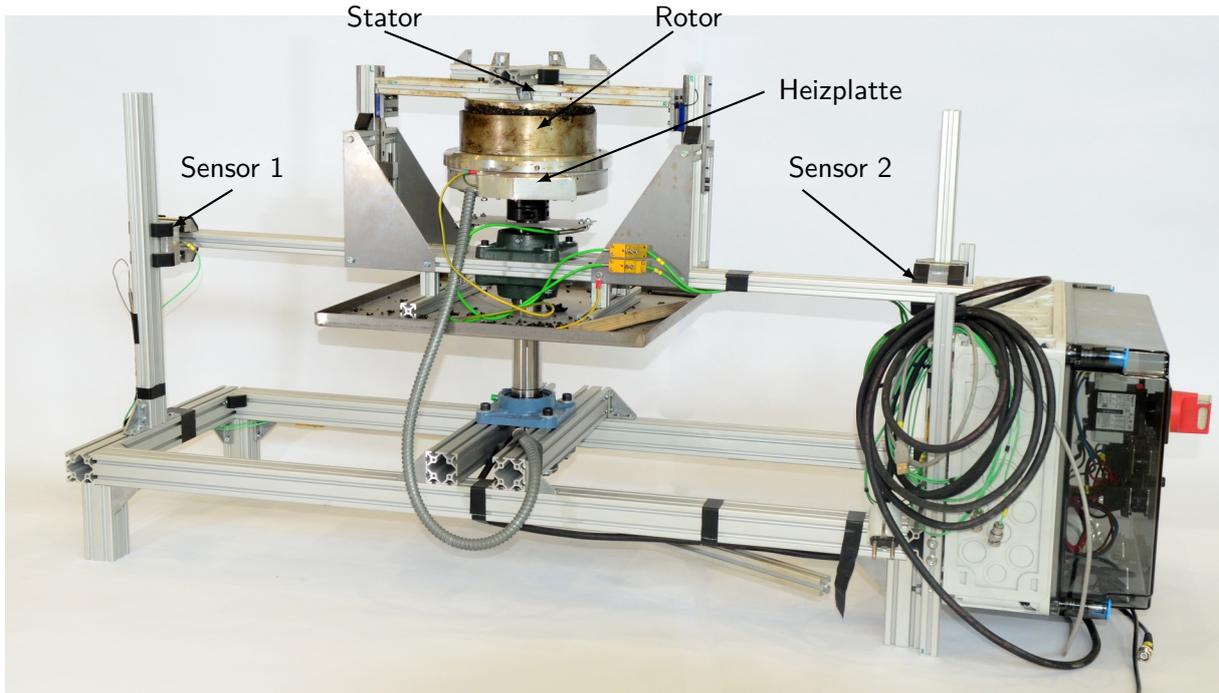


Abbildung 7.1.1: Darstellung des Prüfstandes (© Daniel Wiest, 2020)

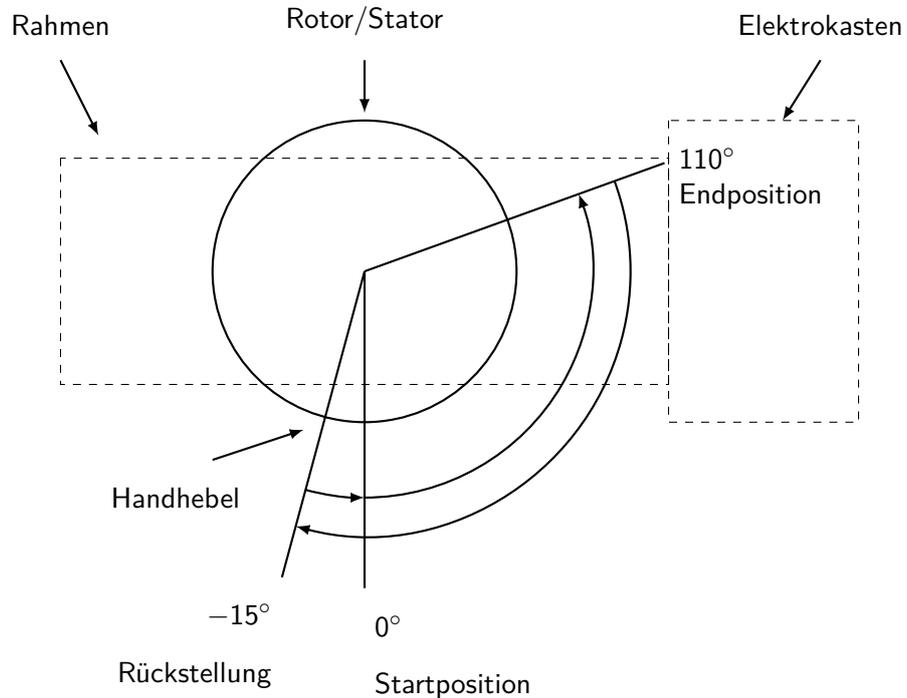


Abbildung 7.1.2: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung im Handbetrieb (nach Hornstein 2018, S. 63)

7.1.2 Messtechnik

Die Steuerung und Messdatenaufnahme erfolgt über einen *cDAQ*-Controller von *National Instruments* (NI) mittels LABVIEW. Für die Messung der auftretenden Kräfte kommen piezoelektrische Kraftaufnehmer von KISTLER zum Einsatz, die mit den entsprechenden Ladungsverstärkern betrieben werden².

Der Ablauf bei der Messwertaufnahme ist in Tab. 7.1.1 beschrieben. Bei der anschließenden Auswertung kommt ein BUTTERWORTH-Tiefpassfilter zum Einsatz, da dieser bei hohen Grenzfrequenzen den gemessenen Signalverlauf gut wiedergibt und das Rauschen und die Außereißer stark reduziert (Runkler 2015, S. 31 f.). Der linke Graph in Abb. 7.1.3 stellt die Messwertaufnahme im „rohen“ Zustand dar (Nr. 1 aus Tab. 7.1.1). Im rechten Graph ist der resultierende Momentenverlauf (gefilterte und umgerechnete Messwertaufnahme, siehe Nr. 5 aus Tab. 7.1.1) dargestellt.

Tabelle 7.1.1: Ablauf bei einer Messwertaufnahme

Nr.	Bezeichnung	Inhalt
1	Aufnahme der Messwerte	Ausgabe der Messwerte in Volt, Abtastrate 500 Hz
2	Umrechnung der Messwerte	Umrechnung der Spannungswerte in eine Kraft, gemäß der ermittelten Geradengleichung bei der Sensorkalibrierung
3	Filterung	Anwendung des BUTTERWORTH-Tiefpassfilters
4	Umrechnung der Kraftwerte	Umrechnung der Kraft in ein Moment, mittels der geometrischen Größen des Prüfstands und abzüglich der vorhandenen Lagerverluste
5	Detektion des Haltemoments	Detektion des maximalen Moments mit anschließendem starken Abfallen des Momentenverlaufs
6	Berechnung von $\mu_{t,h}$	Berechnung des vorliegenden Haftreibungsbeiwerts anhand des detektierten Haltemoments, siehe Anhang D

7.1.3 Prüfstandsvalidierung

Für die Validierung des Prüfstandes werden Stahlkugeln als Referenzmaterial verwendet. Es werden fünf Messreihen mit jeweils 30 Einzelmessungen durchgeführt, dabei werden die Versuchstemperatur und die Normalkräfte variiert. Die Normalkraft wird in drei Schritten verändert: 104 N, 150 N und 200 N. Die Temperatur hatte zwei Niveaus, einmal 21 °C und einmal 120 °C. Alle Messungen werden mit der gleichen Probenfüllung durchgeführt.

Die Ergebnisse der Messreihen sind in Tab. 7.1.2 zu sehen. Für die Ergebnisse der sechs Messreihen kann die Nullhypothese (Gleichung 6.4.1), durch Gleichung 6.4.2 bestätigt werden, das heißt die jeweiligen Ergebnisse gelten als normalverteilt. Alle errechneten SHAPIRO-WILK Werte liegen über dem kritischen Wert $SW_{krit} = 0,927$. Die ausführlichen Ergebnisse sind im Anhang E.2 in den Tab. E.2.1 bis Tab. E.2.6 zu finden. Die errechneten Mittelwerte und der

²Eine genauere Beschreibung der verwendeten Bauteile und des Aufbaus ist in HORNSTEIN zu finden (Hornstein 2018, Kap.3.2), (Hornstein 2019)

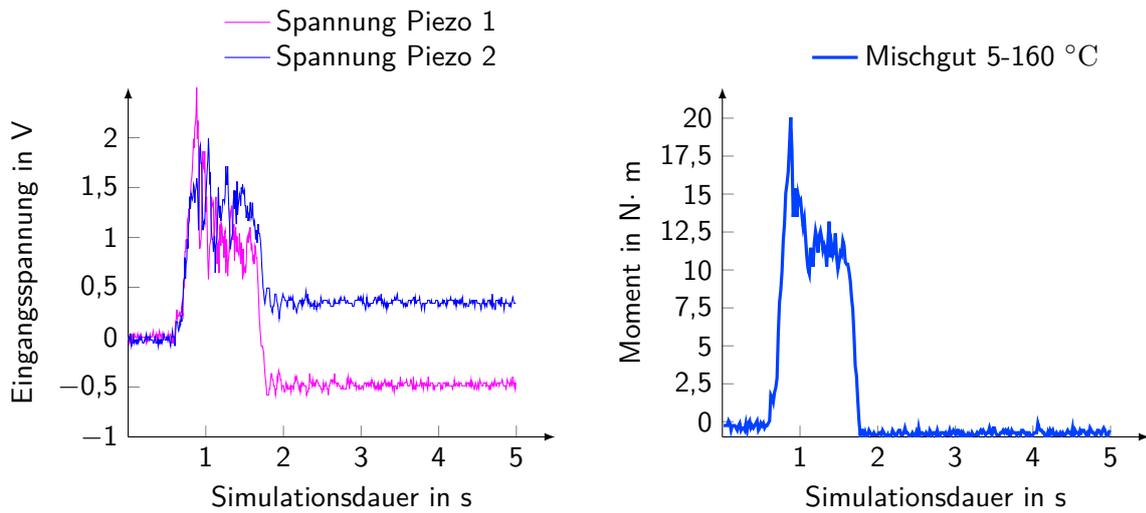


Abbildung 7.1.3: Exemplarische Messwertaufnahmen der beiden Sensoren ohne Glättung und Haltemomentenverlauf nach Glättung und Umrechnung (Mischgut 5, Normalkraft 165,4 N und 160 °C)

relative Fehler, bezogen auf den Referenz-Haftreibungsbeiwert von 0,2, zeigen, dass die Testresultate die gewünschten Werte erzielen und somit der Prüfstand für weitere Untersuchungen geeignet ist. Als zugrunde liegender Referenz-Wert für die Materialpaarung Stahl-Stahl wird der Haftbeiwert für entfettete Stahl-Stahl-Querpressverbände in Längsrichtung³ herangezogen (siehe (Deutsches Institut für Normung e.V. 2001, S. 13) bzw. (R. Müller 2015, S. 115)). In Abb. 7.1.4 sind die Ergebnisse als Boxplot dargestellt. Die Kugeln bestehen aus Stahl mit der Werkstoffnummer 1.4034 und haben ein Durchmesser von 6,0 mm. Die Härte der Kugeln bewegt sich im Bereich zwischen 54-60 HRC und die maximale Rauigkeit (R_a) beträgt 0,032 μm (Deutsches Institut für Normung e.V. 2002, S. 9) bzw. (Klarmann 2020).

Tabelle 7.1.2: Ergebnisse der Messungen für den Haftbeiwert für die Validierungen

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit des Mittelwerts	relative Fehler [%]
1	104	21	0,2267	0,038	0,0069	13
2	150	21	0,2194	0,0144	0,0026	9
3	200	21	0,2273	0,0204	0,0037	13
4	104	120	0,1919	0,0147	0,0027	4
5	150	120	0,2224	0,0175	0,0032	11
6	200	120	0,2096	0,00826	0,0015	4

³Hierbei handelt es sich um einen Linienkontakt, der dem idealisierten Punktkontakt, wenn sich die Stahlkugel berühren, näherungsweise entspricht.

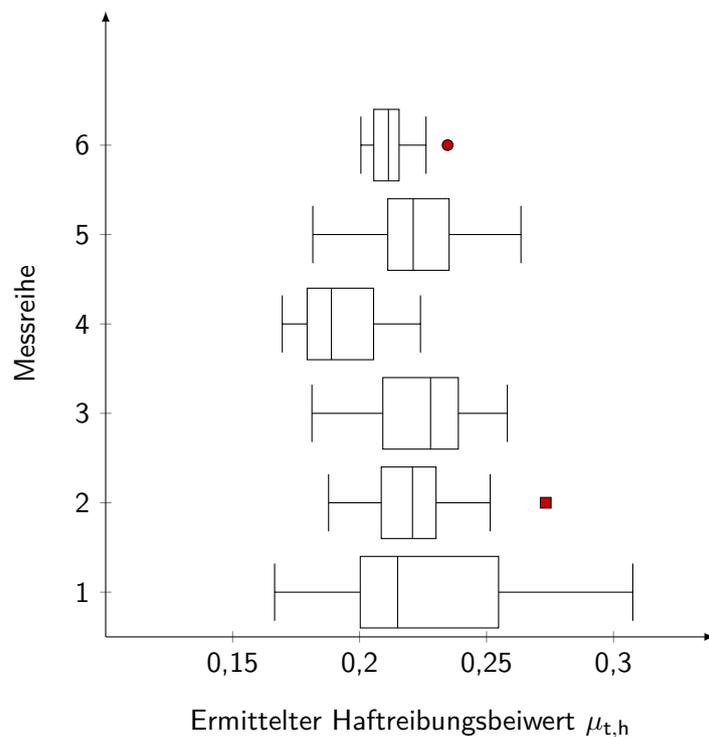


Abbildung 7.1.4: Darstellung der Messungen für die Validierung im Boxplot

7.2 Versuchsmaterial

Als Versuchsmaterial wird *AC 5DL* ausgewählt. Bei dem Material handelt es sich um *Asphaltbeton* (*Asphalt Concrete*) (*AC*) dieser wird als Deckschichtmaterial (*D*) eingesetzt, bei leichten Belastungen (*L*). Die obere Siebgröße beträgt 5 mm und das darin enthaltene Bitumen ist 70/100. Die Korngrößenverteilung ist in Tab. 7.2.1 dargestellt. Das Datenblatt mit der Kornzusammensetzung und der Sieblinie ist in Anhang F zu finden.

Tabelle 7.2.1: Korngrößenverteilung von AC 5DL (Deutag Ost 2017)

Massen-Aufteilung [%]	Korngröße [mm]		
10	0,0	bis	0,063
2,8	0,063	bis	0,125
5,8	0,125	bis	0,25
27,8	0,25	bis	1
12,1	1	bis	2
39,9	2	bis	5,6
1,6	5,6	bis	8

Die Wahl erfolgte anhand von zwei Kriterien. Das erste Kriterium ist die Mischgutzusammensetzung. Hierbei stellt das AC-Mischgut das einzige Asphaltmischgut dar, das keine Zusätze verwendet (FGSV 2013, S. 21). Das zweite Kriterium betrifft die Einflussnahme der Korngröße auf das Probenraumvolumen und die Simulationsrechenzeit. Die Korngröße beeinflusst sowohl die Simulationsrechenzeit über den Zeitschritt (Gleichung 5.1.5), als auch das Probenraumvolumen, da bei Ringscherzellen der Durchmesser mindestens dem 20-fachen des größten Partikeldurch-

messers entsprechen soll (siehe Morrissey 2013, S. 29). Das Probenraumvolumen wiederum hat auch Einfluss auf die Rechenzeit. Da bei den AC Mischgütern der kleine Korngrößenanteil ähnlich verteilt ist, wird das Mischgut mit der geringsten oberen Siebgröße gewählt. Der Sachverhalt dieses Spannungsfeldes ist in Abb. 7.2.1 dargestellt.

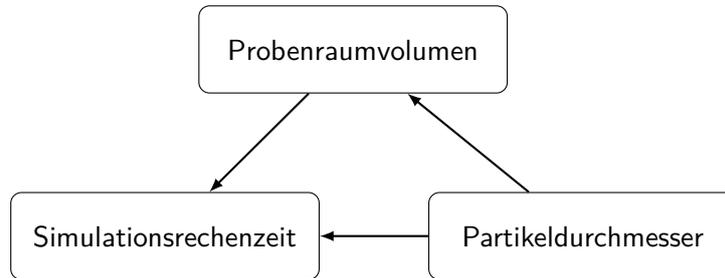


Abbildung 7.2.1: Schematische Darstellung des Spannungsfeldes zwischen Probenraumvolumen - Simulationsrechenzeit - Material

Neben dem originalen Mischgut (AC 5DL) werden noch weitere Mischgüter untersucht, eine Auflistung ist in Tab. 7.2.2 dargestellt. Mit Hilfe der zusätzlichen Mischgüter wird zum einen versucht, das Bitumenverhalten zu quantifizieren, indem das Verhalten des Bitumens mit verschiedenen Korngrößen und Kornformen gemessen und modelliert wird. Zum anderen wird untersucht inwieweit eine Skalierung und Verschiebung der Korngrößenverteilung durch verschiedene Modellierungsansätze möglich ist.

Tabelle 7.2.2: Zu untersuchende Mischgüter

Mischgut	Zusammensetzung
1	AC 5 DL ohne Bitumen
2	Filterkies 3-5 mm
3	Filterkies 3-5 mm mit Bitumen (70/100)
4	Stahlkugeln 6 mm mit Bitumen (70/100)
5	AC 5DL

Die Abb. 7.2.2 gibt eine Übersicht zu der Verwendung der Mischgüter. Die Überprüfung der verschiedenen Ansätze zur Korngrößenverteilung findet an Mischgut 1 und Mischgut 2 statt. Zur Modellierung der Korngrößenverteilung werden verschiedenen Ansätze (siehe Kapitel 7.3.4) überprüft. Beim Mischgut 1 handelt es sich um die gleiche Materialzusammensetzung (Korngrößen- und Massenzusammensetzung) wie beim Mischgut 5 (AC 5DL), jedoch ohne Bitumen.

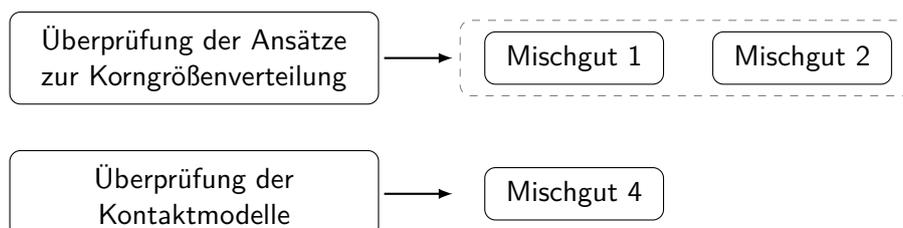


Abbildung 7.2.2: Verwendung der einzelnen Mischgüter für die Simulation

Mischgut 2 ist ein Filterkies mit einer geringen Korngrößenstreuung, die Korngrößenverteilung liegt zwischen 3 und 5 mm, die genaue Zusammensetzung ist in Anhang F zu finden. Die Massen-Aufteilung und die Korngrößenbereiche sind in der Tab. 7.2.3 aufgelistet.

Das Mischgut 3 und Mischgut 4 wird herangezogen, um eine Charakterisierung des Bitumenverhaltens vorzunehmen, das heißt den Einfluss des Bitumens zu quantifizieren und die Abbildungsmöglichkeit mit Hilfe der DEM zu überprüfen. Der Bitumenanteil bei den Mischgütern 3 und 4 wird auf dem Niveau des Originalmischguts gehalten und das Originalbitumen 70/100 verwendet. Die Überprüfung der verschiedenen Kontaktmodelle erfolgt am Mischgut 4, da die Stahlkugeln zur Validierung des Prüfstands verwendet werden und somit ein Großteil der Parameter schon vorhanden ist.

Tabelle 7.2.3: Korngrößenverteilung des Mischguts 2 nach (Sand-Schulz GmbH 2018)

Massen-Aufteilung [%]	Korngröße [mm]
1,0	0,0 bis 2,0
2,9	2,0 bis 3,15
36,1	3,15 bis 4,0
56,2	4,0 bis 5,6
3,8	5,6 bis 8,0

7.3 Simulativer Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 7.3.1 dargestellt, die Abb. 7.3.1 a) stellt das Simulationsmodell zu Beginn da und Abb. 7.3.1 b) am Ende der Simulation. Die Farbcodierung ist wie folgt gewählt: Rotor (violett), Stator (blau), Geometrie zur Partikelerzeugung (cyan) und Partikel (rot). Die Geometrie zur Partikelerzeugung kann frei gewählt werden. Innerhalb eines definierten Zeitraums werden die vorher definierten Partikel innerhalb der Geometrie erzeugt. Bei der dynamische Variante werden die Partikel stochastisch normalverteilt erzeugt. Der Prüfstand wurde 1:1 in der Simulationsumgebung abgebildet.

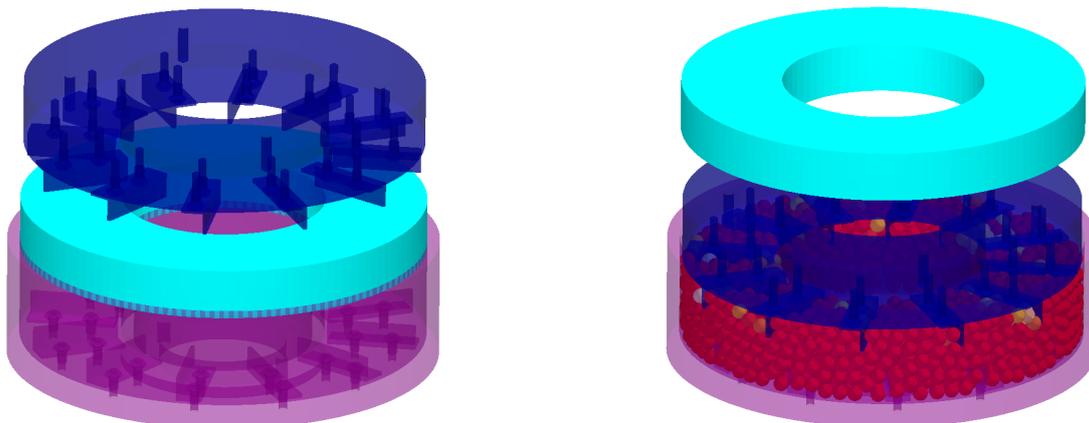


Abbildung 7.3.1: Ansicht des Simulationsmodell zu Beginn (linkes Bild) und am Ende der Simulation (rechtes Bild)

7.3.1 Kinematik

Bei der DEM-Simulation, mit EDEM[®], wird der Geometrie eine Kinematik zugewiesen, wenn dies nicht geschieht wird die Geometrie während der Simulationslaufzeit als fixiert angenommen. Etwaige Formänderungen finden hierbei nicht statt, d.h. die Geometrie wird als ideal starrer Körper angenommen. In der DEM-Simulation wird die vorgesehene Arbeitsweise (Definition von Bewegungen) entsprechend des festgelegten zeitlichen Ablaufs ausgeführt. Die hierbei aufzuwendenden bzw. resultierenden Kräfte und Momente sind als Simulationsergebnis auswertbar.

Der Simulationsablauf ist entsprechend dem physischen Versuchsablauf nachgebildet und gliedert sich in die Abschnitte I bis VI. Die dahinter liegende Kinematik, in den jeweiligen Phasen, ist in Tab. 7.3.1 genauer spezifiziert und in Abb. 7.3.2 ist der Verlauf der Statornormalenkraft und des Haltemoments gezeigt. Die Abb. 7.3.3 zeigt den zeitlichen Verlauf im relevanten Zeitabschnitt.

Tabelle 7.3.1: Simulationsverlauf

Phasen	Kinematik
I	Befüllung des Rotors
II	Anfahren und Eintauchen des Stators
III	Beruhigung
IV	Rotatorische Vorscherung der simulierten Materialprobe
V	Beruhigung
VI	Rotatorische Abscherung

Der Stator wird an die Materialprobe translatorisch herangefahren bis dessen Mitnehmer in die Probe eintauchen. Danach wird der Rotor mit einer rotatorischen Bewegung beaufschlagt. Das Bewegungsprofil sieht eine kontinuierliche Erhöhung der Drehrate aus dem Stillstand vor. Dabei ist ähnlich den physikalischen Versuchsergebnissen ein Ansteigen des Haltemoments zu Beginn der Rotation zu beobachten.

Im Anschluss daran erfolgt nach der ersten Abscherung eine Beruhigungsphase, bei dem der Rotor stillsteht. Im letzten Abschnitt wird die rotatorische Bewegung wieder in den Stator indiziert, um die Untersuchung fortzusetzen.

Der im physikalischen Experiment vorhandene freigegebene translatorische Freiheitsgrad des Stators entlang dessen Längsachse kann mit der Software EDEM[®] nicht nachgebildet werden. Daher wird der Vertikalabstand (L_V) zwischen Rotor und Stator als zusätzlicher Parameter aufgenommen, siehe Abb. A.1.1 im Anhang A.1.

Der Parameter wird dabei solange variiert bis sich das empirisch ermittelte Haltemoment und die vertikale Statornormalkraft in der Simulation einstellen.

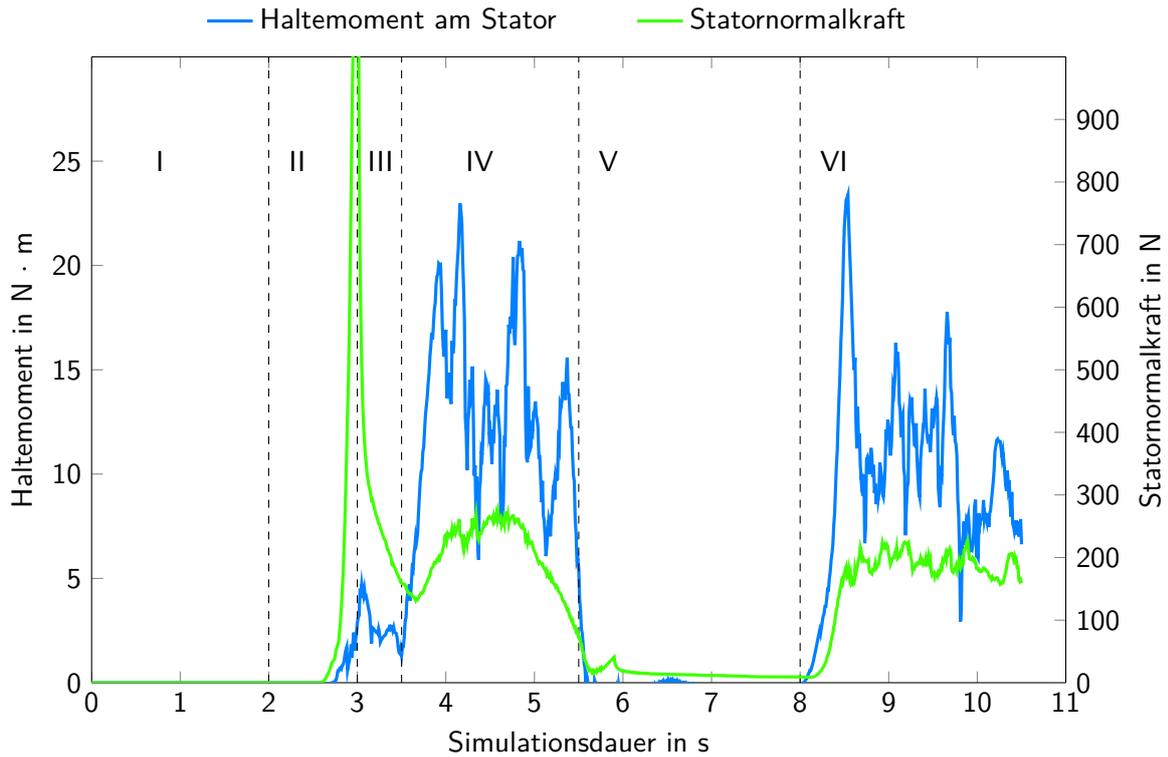


Abbildung 7.3.2: Arithmetisch gemittelter zeitlicher Verlauf der Simulationswerte Haltemoment und Statornormalkraft mit den verschiedenen Phasen, gezeigt am Mischgut 5, lineare EEPA-Kontaktmodell mit Korngrößenverteilung R_5

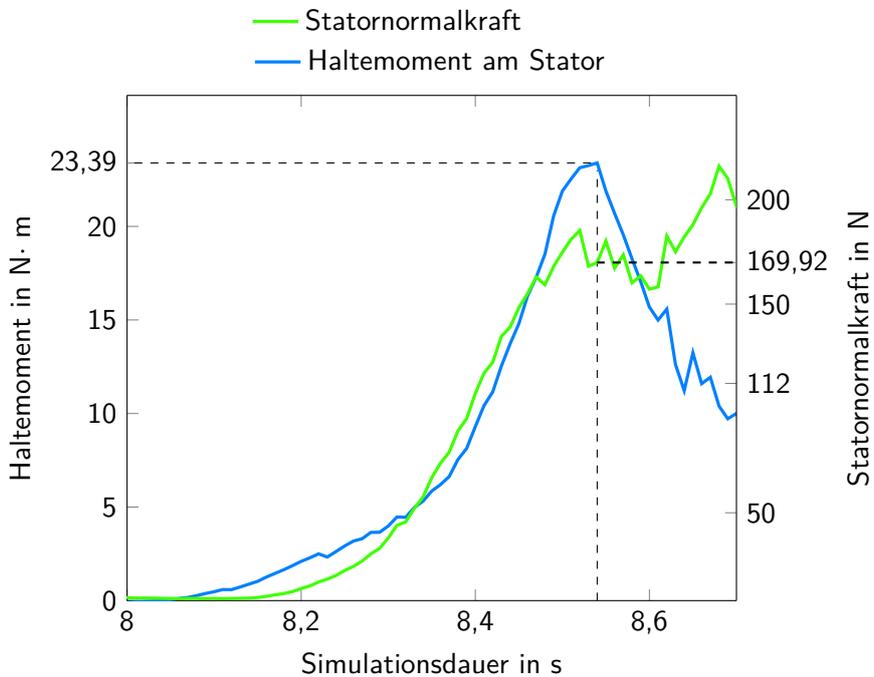


Abbildung 7.3.3: Zeitlicher Verlauf der Simulationswerte Haltemoment und Statornormalkraft im relevanten Zeitabschnitt, gezeigt am Mischgut 5, lineare EEPA-Kontaktmodell mit Korngrößenverteilung R_5

7.3.2 Validierung

Die Validierungsuntersuchung für das Simulationsmodell hat einen Umfang von 30 Simulationswiederholungen (n_{Val}). Als Kontaktmodell wird das HERTZ-MINDLIN Modell mit Stahlkugeln gewählt, da dieses Modell bei kohäsionslosen Schüttgütern am häufigsten eingesetzt wird, siehe (Simsek 2011) (Barrios u. a. 2013)(Günthner und Fottner 2017). Der empirische Faktor für den relevante Zeitschritt Δt_{krit} wird auf 8 % gesetzt, da bei diesem Wert angenommen werden kann, dass der Zeitschritt klein genug ist. Die Ergebnisse der Simulationswiederholungen werden mit den Messungen der Prüfstandsvalidierung verglichen (Kapitel 7.1.3). Die Validierung des Simulationsmodells wurde mit den Parametern in Tab. 7.3.2 durchgeführt. Der Werkstoff Aluminium wird aufgeführt, da Rotor und Stator aus diesem Material gefertigt worden sind. Die ermittelten Werte sind in der Tab. A.1.1 im Anhang A.1 aufgeführt.

Tabelle 7.3.2: Gewählte Modellparameter der Simulation mit Stahlkugeln

Parameter	Einheit	Bez.	Wert
Partikelradius	mm	R	3,00
Querkontraktionszahl des Stahls		ν_{St}	0,25
Querkontraktionszahl des Aluminiums		ν_{Al}	0,35
Elastizitätsmodul des Stahls	N/m^2	E_{St}	$2,1 \cdot 10^9$
Elastizitätsmodul des Aluminiums	N/m^2	E_{Al}	$7,0 \cdot 10^8$
Dichte des Stahls	g/cm^3	ρ_{St}	7,860
Dichte des Aluminiums	g/cm^3	ρ_{Al}	2,699
Restitutionszahl		e_{ij}	0,8
Haftreibungszahl		$\mu_{\text{t,h}}$	0,2
Rollreibungszahl		$\mu_{\text{t,r}}$	0,1
Vertikalabstand	mm	L_V	32,1

Die Ergebnisse zeigen eine breite Verteilung mit Ausreißern siehe Abb. 7.3.4. Aufgrund der großen Streuung fällt der Test auf Normalverteilung mit SHAPIRO-WILK negativ aus, da die berechneten Werte ($SW_{\text{Moment}} = 0,87$, $SW_{\text{Kraft}} = 0,855$) den kritischen Wert ($SW_{\text{krit}} = 0,927$) knapp verpassen, siehe Tab. E.3.1 und Tab. E.3.2 im Anhang E.3.

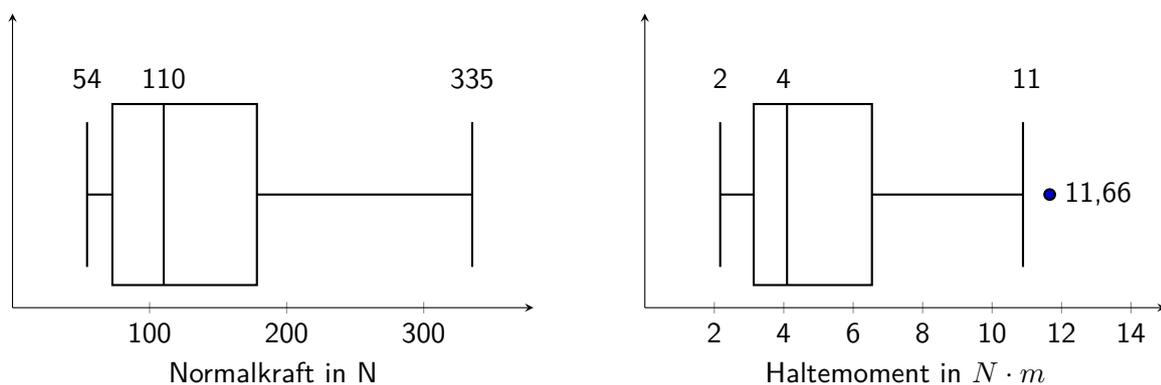


Abbildung 7.3.4: Boxplot der Simulationsergebnisse für die Normalkraft und das Haltemoment

Jedoch ist aus der Literatur bekannt, dass bei Ausreißern bzw. starker Streuung der Test auf Normalverteilung nach SHAPIRO-WILK fehlerhafte Ergebnisse liefern kann (siehe Kapitel 6.4).

Daher wird im vorliegenden Fall der QQ-Plot als zusätzliche Identifikationsmöglichkeit angewendet. Wie im QQ-Plot (Abb. 7.3.5) zu sehen ist liegen die Simulationsergebnisse sehr nahe bei einer Geraden. Somit können die Simulationsergebnisse als normalverteilt angenommen werden.

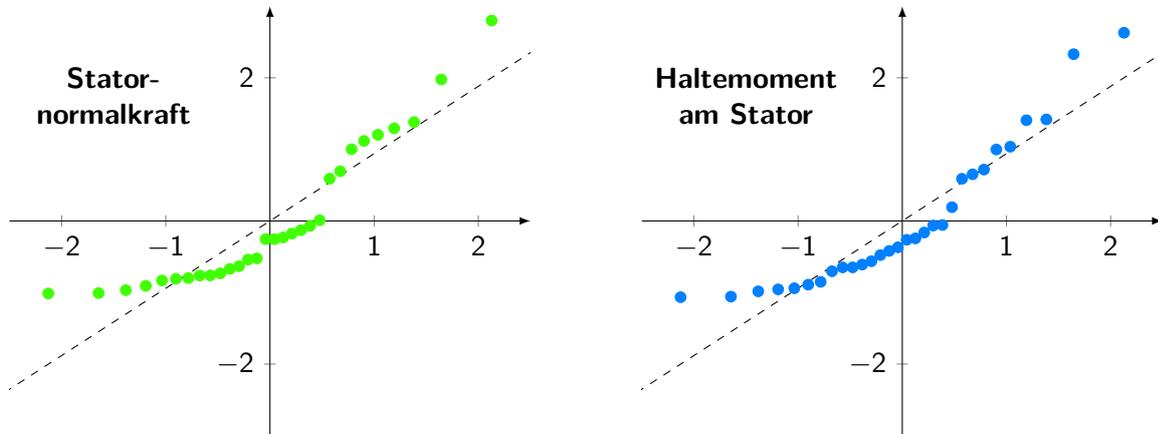


Abbildung 7.3.5: QQ-Plot der Simulationsergebnisse

Mit Hilfe des Chauvenetschen Kriteriums, siehe Gleichung 6.2.6, lassen sich die Werte der Zeilen *SIM3* und *SIM22* in Tab. A.1.1 als Ausreißer identifizieren. Die Ergebnisse des Haltemoments und die Statornormalkraft nach Bereinigung um die Ausreißer sind in der Tab. 7.3.3 und Tab. A.3.2 dargestellt. Aufgrund des geringen relativen Fehlers wird das Simulationsmodell als validiert angenommen.

Tabelle 7.3.3: Vergleich der Ergebnisse

	Simulation	Prüfstand	relative Fehler [%]
Normalkraft [N]	$116,4 \pm 10,49$	104 ± 1	1,8-22
Moment [N·m]	$4,45 \pm 0,35$	$4,25 \pm 0,13$	0,48-1,4

7.3.3 Simulationswiederholungen

Zur Reduzierung der Simulationswiederholungen wird das Konfidenzintervall reduziert, so dass sich die Wahrscheinlichkeit verringert, dass der Wert in dem Intervall liegt. Die notwendigen Simulationswiederholungen werden anhand der Simulationsergebnisse der Validierungsdurchläufe abgeschätzt. Der Ablauf zur Bestimmung der notwendigen Simulationswiederholungen ist schematisch in Abb. 7.3.6 dargestellt. Hierbei werden die Breite des Konfidenzintervalls (Gleichung 6.4.6) und die Standardabweichung (Gleichung 6.2.3) mit entsprechendem Quantil-Faktor berechnet. Diese Werte werden als Abschätzung genommen und gehen in die Berechnung für die notwendigen Simulationswiederholungen mit einem geringeren z-Wert $z_{N(0,1)}$ ein.

Die Überprüfung auf Normalverteilung ist im vorherigen Abschnitt (Kapitel 7.3.2) zu finden. Die Lage- und Streuungsparameter der 30 Simulationsdurchläufe sind in der Tab. A.3.1 und Tab. A.3.2 aufgelistet. In Tab. 7.3.4 sind die berechneten Simulationswiederholungen mit den

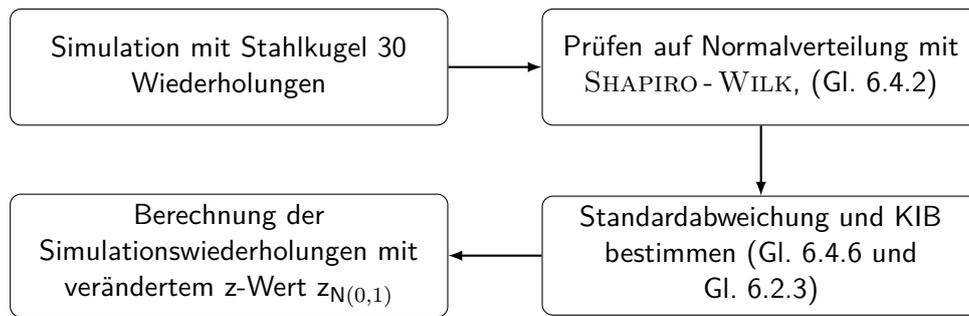


Abbildung 7.3.6: Vorgehen zur Ermittlung der Simulationswiederholungen

jeweiligen Signifikanzniveaus gelistet. Je nach Anwendung, Relevanz und Simulationsdauer wird entschieden wie viele Simulationswiederholungen durchgeführt werden.

Tabelle 7.3.4: Berechnete Simulationswiederholungen mit den jeweiligen Signifikanzniveaus

Bez.	Wiederholungen	α_s	$z_{N(0,1)}$
n_{Val}	30	0,025	1,96
$n_{\text{neu},90}$	19,6	0,05	1,64
$n_{\text{neu},80}$	11,94	0,1	1,28
$n_{\text{neu},60}$	5,1	0,2	0,84

7.3.4 Partikel

Die Partikelgenerierung erfolgt bei EDEM[®] über eine sogenannte *Factory*. Bei der Partikelerzeugung wird die dynamische Variante gewählt, welche über einen definierten Zeitraum die Partikel stochastisch normalverteilt erzeugt.

Für die Modellierung des Asphalts (Mischgut 5) muss neben einer Modellierung der Korngrößenverteilung und -bereiche auch eine Skalierung der Partikel erfolgen, da eine realitätsnahe Modellierung der kleinen Korngrößen zu sehr hohen Rechenzeiten führt.

Die vorhandene Korngrößenverteilung mit den einzelnen Korngrößenbereichen lässt sich nicht exakt modellieren, da keine Daten zur jeweiligen Verteilung innerhalb der Korngrößenbereiche existieren. Daher wird die jeweilige Korngrößenverteilung innerhalb der Bereiche vereinfacht modelliert. Hierzu werden verschiedene Modellierungsansätze miteinander verglichen. Diese Ansätze werden an den Mischgüter 1 und 2 angewendet. Zum einen kann der jeweilige Korngrößenbereich durch den Mittelwert aus dem Anfangs- und Endwert des Korngrößenbereichs gebildet werden (Tab. 7.3.5 Ansatz R_1). Zum anderen wird der jeweilige Korngrößenbereich in drei gleiche Teile unterteilt (Tab. 7.3.5 Ansatz R_3). Zusätzlich dazu wird die Korngrößenverteilung nach dem *coarse graining*-Prinzip (Kapitel 5.3) noch sehr grob modelliert, siehe Tab. A.5.1 und Tab. A.5.2 im Anhang A.5. Als untere Partikelgrenze wird 2,0 mm genommen, da bei diesem Wert noch eine akzeptable Simulationszeit gewährleistet werden kann⁴. Die verschiedenen Ansätze werden mit R_1 bis R_6 bezeichnet. Die weiteren Ansätze zur Modellierung sind im Anhang A.5 zu finden.

⁴Während der Erstellung der Arbeit am Fachgebiet dauert 1 Sekunde Simulation ca. 40 Minuten mit der verfügbaren Hardware, bei einer minimalen Korngröße von 2 mm. Bei einer minimalen Korngröße von 1 mm dauert 1 Sekunde Simulation ca. 8 Stunden.

Tabelle 7.3.5: Korngrößenverteilung (R_1 , R_3) des Mischguts 2 für die Simulation

Massen-Aufteilung [%]	Ansatz R_1	Ansatz R_3		
	Korngröße [mm]	Korngröße [mm]		
1,0	2,0	2,0	2,0	2,0
2,9	2,6	2,0	2,5	3,0
36,1	3,6	3,1	3,5	4,0
56,2	4,6	4,0	5,0	5,6
3,8	6,8	5,7	6	8,0

7.3.5 Parameter der Kontaktmodelle

Im ersten Schritt wird die Modellierung der Korngrößenverteilung untersucht (Ergebnis E_1). Die verschiedenen Ansätze zur Modellierung der Korngrößenverteilung werden an den Mischgütern 1 und 2 getestet. Hierbei kommt das Kontaktmodell von HERTZ-MINDLIN zum Einsatz (siehe Kapitel 5.2.1), da das Kontaktmodell einfacher aufgebaut ist und weniger Simulationszeit benötigt. Die Modellierung wird mit einem sehr kleinen Zeitschritt durchgeführt, um etwaige Verzerrungen, durch einen zu groß gewählten Zeitschritt zu verhindern, siehe Kapitel 5.1.3.

Im zweiten Schritt wird die Zeitschrittgröße untersucht, da der Zeitschritt von der minimalen Korngröße abhängt, siehe Gleichung 5.1.5. Ziel ist es, die maximale Zeitschrittgröße für die gewählte Korngrößenverteilung zu ermitteln (Ergebnis E_2).

Im dritten Schritt wird die kohäsiven Eigenschaft der Kontaktmodelle von JKR und EEPA (in linearer Ausführung) miteinander verglichen (Ergebnis E_3). Das EEPA-Kontaktmodell wird nur zwischen den Partikeln verwendet. Für die Modellierung des Kontaktes zwischen den Partikeln und der Geometrie wird das HERTZ-MINDLIN-Kontaktmodell verwendet⁵. Der Vergleich findet am Mischgut 4 statt, da Ungenauigkeiten durch die Modellierung der Partikel (Geometrie und Material) und Korngrößenverteilung minimal sind. Die Ergebnisse aus der Korngrößenmodellierung, der Modellierung des Zeitschritts und aus dem Vergleich der Kontaktmodelle werden zur Modellierung des Mischguts 5 umgesetzt. Das Vorgehen für Mischgut 3 ist analog zu Mischgut 5. In Abb. 7.3.7 ist der Entscheidungsablauf für die Parameter gezeigt⁶.

Der Wertebereich und die Abstufungen für das EEPA-Kontaktmodell werden aus THAKUR übernommen (Thakur u. a. 2014). Für das JKR Kontaktmodell dient als Orientierung die Veröffentlichungen von DENG (Deng und Davé 2013)

Entsprechend der Empfehlung in (DEM Solutions Ltd. 2017) wird das Elastizitätsmodul um den Faktor 100 verringert. Eine Reduktion des Elastizitätsmodul beeinflusst das Ergebnis nur geringfügig, aber da der Elastizitäts- bzw. Schermodul ein Bestandteil der RAYLEIGH-Zeitschrittberechnung ist, kann die Simulationsdauer stark verringert werden (siehe Gleichung 5.1.5).

Die ermittelten Haftreibungszahlen (siehe Kapitel 8.1) aus den physikalischen Untersuchungen werden für die jeweiligen Simulationen verwendet. Bei mehreren erfassten Haftreibungszahlen wird der arithmetische Mittelwert genommen.

⁵Die Implementierung des EEPA-Kontaktmodell ist zwischen den Partikeln und der Geometrie noch nicht vorhanden.

⁶Dem Autor ist bewusst, dass durch dieses Vorgehen der Lösungsraum, aufgrund der Voruntersuchungen eingeschränkt wird. Jedoch birgt dieses Vorgehen die Möglichkeit die Simulationszeit und -durchläufe stark zu reduzieren. Vor allem vor dem Hintergrund, dass es bei der DEM-Simulation mehrere mögliche Parameterkombinationen gibt, die zum Ziel führen, erscheint dieses Vorgehen sinnvoll.

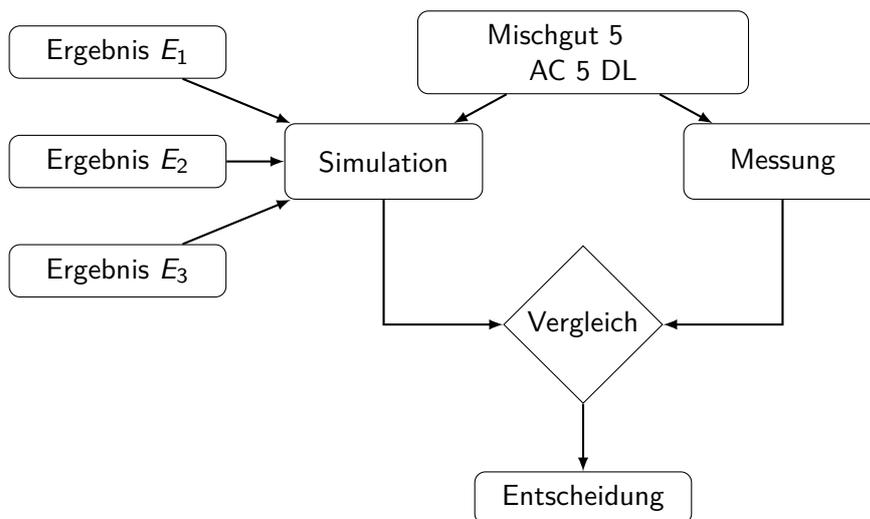
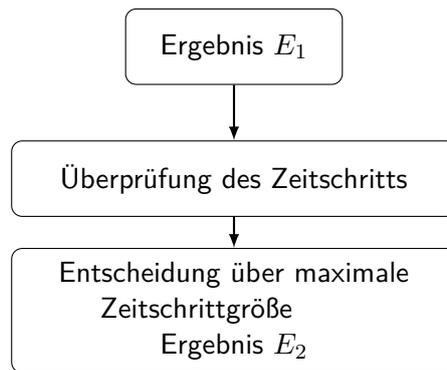
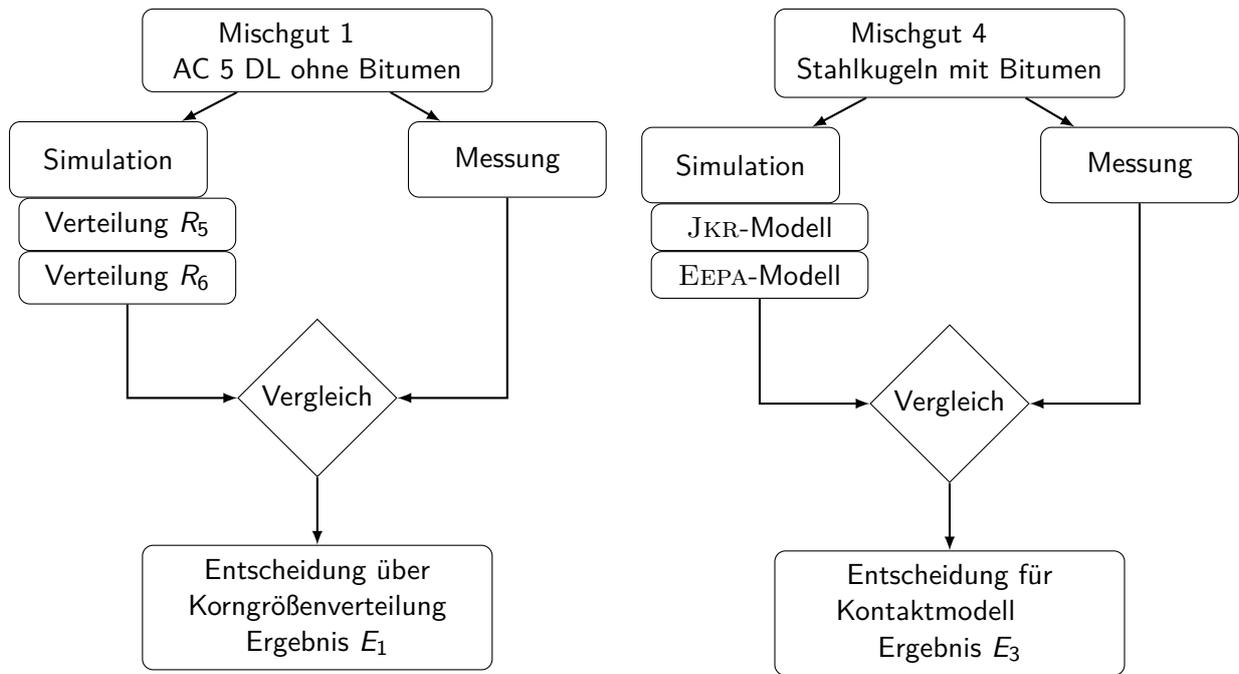


Abbildung 7.3.7: Ablauf des Entscheidungsprozesses für Simulationsparameter Korngrößenverteilung, Kontaktmodell und Zeitschritt

In den Tabellen 7.3.6 bis 7.3.9 sind die verwendeten Parameter für das jeweilige Mischgut gelistet. Die Werte für das Material des Prüfstandes werden nicht verändert und sind in Tab. A.2.1 im Anhang A.2 aufgeführt. Für die verschiedenen Mischgüter muss der geeignete Zeitschritt Δt_{krit} ermittelt werden, hierbei wird der Zeitschritt solange reduziert bis sich das Ergebnis nicht mehr signifikant ändert. Die Ergebnisse sind in Kapitel 8.2.4 dargestellt. Der passende Vertikalabstand L_V muss für jedes Mischgut neu parametrisiert werden.

Mischgut 1

Die Dichte und der E-Modul für das Mischgut 1 $\{\rho_{M1}, E_{M1}\}$ werden über den Mittelwert aus den vier verschiedenen Gesteinsarten gebildet, siehe Tab. A.2.2 im Anhang A.

Tabelle 7.3.6: Modellparameter der Simulation für Mischgut 1

Parameter	Einheit	Bez.	Werte
Partikelverteilung		R	$R_5; R_6$
Querkontraktionszahl Material		ν_{M1}	0,2 ; 0,5
Elastizitätsmodul Material	N/m ²	E_{M1}	$4,5125 \cdot 10^8$
Dichte Material	g/cm ³	ρ_{M1}	2,43
Restitutionszahl		e_{ij}	0,2 ; 0,8
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	0,5 ; 1
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	3,06
Vertikalabstand	mm	L_V	29 - 32

Mischgut 2 und 3

Aufgrund des hohen Siliziumdioxid-Anteils (siehe Anhang F) wird der E-Modul von Quarzit für die Simulation bei den Mischgütern 2 und 3 genommen, da für Quarzsand keine Werte existieren (Peschel 1977, S. 59 f., 94). In Tab. 7.3.7 sind die Parameter für die Mischgüter 2 und 3 aufgelistet.

Tabelle 7.3.7: Modellparameter der Simulation für die Mischgüter 2 und 3

Parameter	Einheit	Bez.	Mischgut 2	Mischgut 3
Partikelverteilung		R	$R_1 - R_4$	$R_1 - R_4$
Querkontraktionszahl Material		ν_{M2}	0,2 ; 0,5	0,2 ; 0,5
Elastizitätsmodul Material	N/m ²	E_{M2}	$6,25 \cdot 10^8$	$6,25 \cdot 10^8$
Dichte Material	g/cm ³	ρ_{M2}	2,65	2,65
Restitutionszahl		e_{ij}	0,2 ; 0,8	0,2 ; 0,8
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	3,492	0,796
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	0,5 ; 1	0,5 ; 1
Belastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,1}$	-	1
Entlastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,2}$	-	1,25 ; 100
Kohäsionssteifigkeit	N/m	k_{adh}	-	0,1 ; 100
Kohäsionskraft	N	$F_{hys,0}$	-	-0,002 ; -0,05
Vertikalabstand	mm	L_V	29 - 32	29 - 39

Mischgut 4

Die Parametereinstellungen für das JKR-Modell und EEPA-Modell sind in Tab. 7.3.8 aufgeführt.

Tabelle 7.3.8: Modellparameter der Simulation für Mischgut 4

Parameter	Einheit	Bez.	JKR-Modell	EEPA-Modell
Partikelradius	mm	R	3,00	3,00
Querkontraktionszahl Stahl		ν_{St}	0,25	0,25
Elastizitätsmodul Stahl	N/m^2	E_{St}	$2,1 \cdot 10^9$	$2,1 \cdot 10^9$
Dichte Material	g/cm^3	ρ_{St}	7,86	7,86
Restitutionszahl		e_{ij}	0,8	0,8
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	0,1	0,1
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	0,191	0,191
Kohäsionsparameter (JKR)	J/m^2	γ_K	1; 0,5; 0,25; 0,01; 0,001; 0,0001	-
Vertikalabstand	mm	L_V	32,1	32,1
Belastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,1}$	-	1
Entlastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,2}$	-	1,25 ; 100
Kohäsionssteifigkeit	kN/m	k_{adh}	-	0,1 ; 100
Kohäsionskraft	N	$F_{hys,0}$	-	-0,002 ; -0,05

Mischgut 5

Für das Mischgut 5 wird als Dichte der ermittelte Wert aus Kapitel F.1 verwendet. Für das betreffende Material ist der E-Modul bei der betrachteten Temperatur unbekannt. Nur in den Veröffentlichungen von F. CHEN und J. CHEN werden Werte für den E-Modul genannt. F.CHEN hat den E-Modul mit $1,8 \cdot 10^8 N/m^2$ angenommen. Bei dem Material handelte es sich um Splittmastixasphalt (SMA) 16 mit 70/100 Bitumen (F. Chen u. a. 2019, S448 ff.). In der Veröffentlichung von J.CHEN wurde ein E-Modul von $0,1 \cdot 10^8 N/m^2$ bzw. $0,15 \cdot 10^8 N/m^2$ berechnet (J. Chen 2011, S. 52). Die Berechnung erfolgte anhand des Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips und als Material wurde ein nicht näher spezifiziertes SMA- Material verwendet.

Für die nachfolgende Simulation wird der Wert von F.CHEN übernommen, da es sich hier um das gleiche Bitumen handelt, das in dieser Arbeit verwendet wird.

Tabelle 7.3.9: Modellparameter der Simulation für Mischgut 5 EEPa-Modell

Parameter	Einheit	Bez.	Werte
Partikelverteilung		R	R_5, R_6
Querkontraktionszahl Material		ν_{M5}	0, 2 ; 0, 5
Elastizitätsmodul Material	N/m^2	E_{M5}	$1 \cdot 10^8$
Dichte Material	g/cm^3	ρ_{M5}	2,4
Restitutionszahl		e_{ij}	0, 5 ; 1
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	0,831
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	0, 2 ; 0, 8
Belastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,1}$	1
Entlastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,2}$	1,25 ; 100
Kohäsionssteifigkeit	N/m	k_{adh}	0,1 ; 100
Kohäsionskraft	N	$F_{hys,0}$	-0,002 ; -0,05
Vertikalabstand	mm	L_V	29 - 39

7.3.6 Verwendete Kalibrierungsmethode

Als Ansatz wird ein strukturierter Kalibrierungsansatz gewählt. Bei der statistischen Versuchsplanung existieren eine Vielzahl von verschiedenen Methoden, um Parameter zu quantifizieren und Wechselwirkungen aufzudecken. Ein Großteil der Methoden benötigt aber Vorwissen. Bei der PLACKETT und BURMANN Methode z. B. wird zwischen Haupt- und Nebeneffekten unterschieden oder bei der G. TAGUCHI Methode wird nach Steuer- und Rauschfaktoren unterschieden (Kleppmann 2016, S. 156–170). Im vorliegenden Fall ist in der Literatur wenig über die Einordnung der Parameter bekannt, da in der Vergangenheit vielfach ein unstrukturierter Ansatz bei der Parameterermittlung angewendet worden ist, siehe Kapitel 5.4. Hierbei wird für die Parameterstudie je nach Anzahl an Parametern ein vollständig faktorieller oder ein fraktioneller faktorieller Versuchsplan verwendet, da mit Hilfe dieses Ansatzes die meisten Erkenntnisse über den Prozess gewonnen werden können. Zum einen können die Wirkungen der Parameter und deren Wechselwirkungen ermittelt werden. Zum anderen lassen sich die Randbedingungen aufgrund der simulativen Umgebung einfach beherrschen, so dass eine große Anzahl an Versuchen einfach durchgeführt werden kann, ohne dass es zu einer unbeabsichtigten Beeinflussung kommt. Der vollfaktorielle Versuchsplan wurde in einigen Veröffentlichungen erfolgreich angewendet siehe (Yan u. a. 2015), (Syed u. a. 2017), (Coetzee 2017). Vor allem der erste Punkt ist entscheidend, da für die Modellierung des heißen Asphalts keinerlei Referenzwerte vorhanden sind und mit den faktorieller Versuchsplänen eine gute Möglichkeit besteht, den Parameterraum und deren wechselseitige Beziehungen der Parameter genau zu betrachten.

8 Analyse der Ergebnisse

Diese Kapitel gliedert sich in drei Teile. Teil eins beschäftigt sich mit den Ergebnissen der Ringscherzelle nach SCHULZE (physikalischen Untersuchung). Hierbei findet eine weitere Aufteilung statt, einmal Mischgüter ohne Bitumen und einmal Mischgüter mit Bitumen. Der zweite Teil zeigt die Ergebnisse der Simulation. Die Simulationsergebnisse beschäftigen sich mit den notwendigen Simulationswiederholungen, der Modellierung der Korngrößenverteilung, dem Einfluss des Vertikalabstandes (L_V), der Bestimmung des notwendigen Zeitschritts, dem Vergleich zwischen den Kontaktmodellen EEPA und JKR und der Modellierung der Mischgüter 3 und 5. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion der Ergebnisse, dabei werden die Ergebnisse aus den physikalischen Untersuchung mit den simulativen Ergebnissen in Bezug gesetzt.

8.1 Ergebnisse der physikalischen Untersuchung

Der Anpassungstest nach SHAPIRO-WILK hat gezeigt, dass die Messwerte für die Mischgüter 1 bis 5 normalverteilt sind (siehe Anhang E.1). Die dargestellten Werte in den nachfolgenden Abbildungen sind die arithmetischen Mittelwerte mit den dazugehörigen Standardabweichungen. Die genauen Zahlenwerte und die dazugehörigen statistischen Lageparameter sind in Anhang B zu finden. Die Messreihen für das Mischgut 1 und Mischgut 2 (Mischgut ohne Bitumen) setzen sich jeweils aus 30 Einzelmessungen¹ zusammen. Bei den Mischgütern mit Bitumen (Mischgut 3 bis 5) besteht eine Messreihe aus 50 Einzelmessungen² und die Toleranz bei den gemessenen Temperaturen beträgt $\pm 3,5$ °C. Die Untersuchungen mit dem Bitumen haben gezeigt, dass bei der Versuchsdurchführung die Wartezeiten zwischen den einzelnen Messungen das Ergebnis beeinflusst, siehe Abb. 8.1.7.

8.1.1 Mischgut ohne Bitumen

Mischgut 1

Für die Versuche am ersten Mischgut wurden ca. drei kg Mischgut entsprechend den Vorgaben (siehe Anhang F) hergestellt. Hieraus wurden drei Proben mit identischem Gewicht (731 ± 5 g) entnommen und untersucht. Die Versuche wurde bei 26 °C und einer Normalkraft von 104 N durchgeführt.

Die Messwerte für Mischgut 1 sind in Abb. 8.1.1 und Tab. 8.1.1 aufgezeigt. Anhand der verschiedenen arithmetischen Mittelwerte und der breiten Standardabweichung wird deutlich, dass das Mischgut starke Inhomogenität aufweist. So weichen die Messwerte in M1-1 und in

¹Die Anzahl an Messung wurde auf 30 festgelegt, da ab diesem Stichprobenumfang eine valide Aussage über die Verteilung gemacht werden kann (Holling und Schmitz 2010, S. 381)(Bamberg u. a. 2012, S. 136).

²50 Messungen stellen die Obergrenze für den SHAPIRO-WILK Anpassungstest dar.

M1-2 um ca. 40 % bzw. 20 % von den Messwerten in M1-3 ab, wenn die Messwerte in M1-3 als Sollwert herangezogen werden. Das Verhältnis zwischen den Standardabweichungen und den arithmetischen Mittelwerten entspricht ca. 1:3.

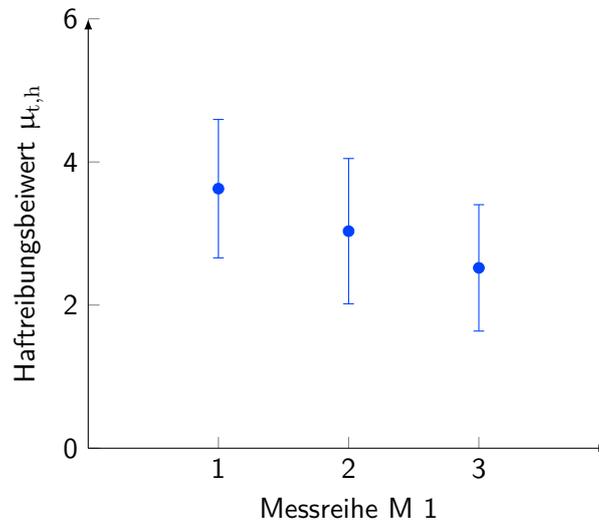


Abbildung 8.1.1: Messergebnisse der Haftreibungsbeiwerte für Mischgut 1 mit den Standardabweichungen

Tabelle 8.1.1: Ergebnisse der Messungen für den Haftreibungsbeiwerte

Messreihe	Ergebnis
M1-1	3,627 ± 0,176
M1-2	3,033 ± 0,185
M1-3	2,520 ± 0,161

Mischgut 2

Auch für die Untersuchungen am Mischgut 2 wurden drei Proben mit einem identischen Gewicht (632 ± 5 g) entnommen und untersucht. Die Normalkraft und die Temperatur entsprechen Mischgut 1. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 8.1.2 und Tab. 8.1.2 dargestellt. Aufgrund der engeren Korngrößenverteilung sind die arithmetischen Mittelwerte näher beieinander und die Breite der Standardabweichung ist auch geringer, bezogen auf die Ergebnisse von Mischgut 1. Das Verhältnis den Standardabweichungen und den arithmetischen Mittelwerten entspricht ca. 1:4,5.

Tabelle 8.1.2: Ergebnisse der Messungen für den Haftreibungsbeiwerte

Messreihe	Ergebnis
M2-1	3,592 ± 0,153
M2-2	3,468 ± 0,149
M2-3	3,416 ± 0,141

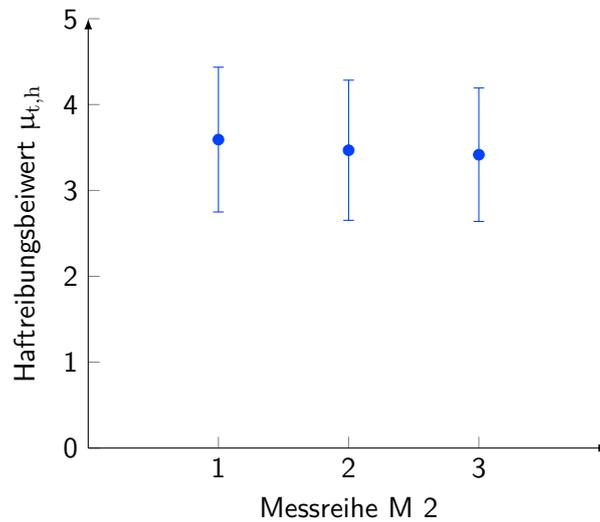


Abbildung 8.1.2: Messergebnisse der Haftreibungsbeiwerte für Mischgut 2 mit den Standardabweichungen

8.1.2 Mischgut mit Bitumen

Mischgut 3

Das untersuchte Mischgut 3 wurde aus der Probe M2-2 durch Zugabe von 7,1 Ma.-% Bitumen (70/100) hergestellt. Der Haftreibungsbeiwert wurde durch die Zugabe des Bitumens auf ca. $\frac{1}{3}$ reduziert, in Bezug auf die Ergebnisse von Probe M2-2. Im betrachteten Temperaturbereich kann geschlussfolgert werden, dass bei steigenden Temperaturen der Haftreibungsbeiwert sinkt, siehe Abb. 8.1.3 und Tab. 8.1.3.

Das Verhältnis zwischen den Standardabweichungen und den arithmetischen Mittelwerten hat sich verändert auf ca. 1:3. Die Wartezeit zwischen den einzelnen Messungen war 5 Sekunden.

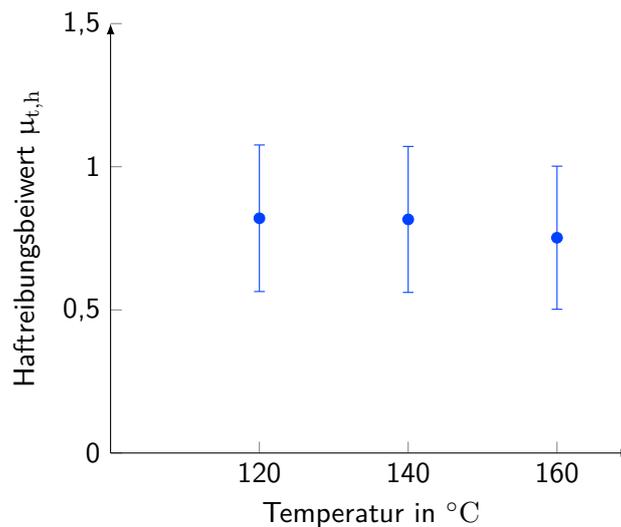


Abbildung 8.1.3: Messergebnisse der Haftreibungsbeiwerte für Mischgut 3 mit den Standardabweichungen

Tabelle 8.1.3: Ergebnisse der Messungen für den Haftreibungsbeiwerte

Messreihe	Temp. [°C]	Ergebnis
M3-1	120	0,820 ± 0,036
M3-2	140	0,816 ± 0,036
M3-3	160	0,752 ± 0,035

Mischgut 4

Das Mischgut 4 besteht aus Kugeln (C45 Stahl mit einem Durchmesser von 6,0 mm) und 7,1 Ma.-% Bitumen. Die Kugeln wurden für die Prüfstandsvalidierung benutzt, siehe Kapitel 7.1.3. Der betrachtete Temperaturbereich liegt zwischen 60 °C und 160 °C. Die Abb. 8.1.4 und Tab. 8.1.4 machen die Temperaturabhängigkeit des Bitumens deutlich. Die Standardabweichung wird durch die Zugabe des Bitumens vergrößert, in Bezug auf die Messungen für die Prüfstandsvalidierung, siehe Tab. 7.1.2. Die Wartezeit zwischen den einzelnen Messungen war 5 Sekunden. Das Verhältnis der Standardabweichungen zu den arithmetischen Mittelwerten liegt zwischen ca. 1:8 und 1:17.

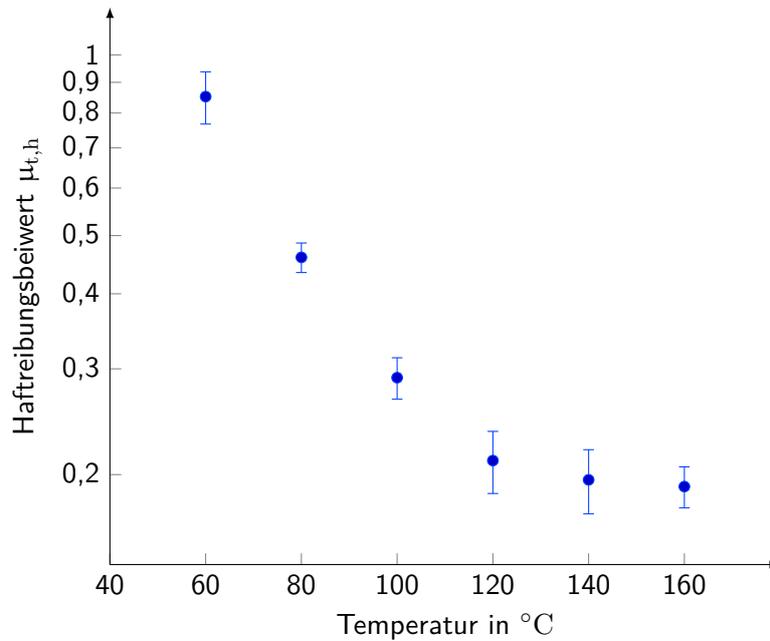


Abbildung 8.1.4: Messergebnisse der Haftreibungsbeiwerte für Mischgut 4 mit den Standardabweichungen

Tabelle 8.1.4: Ergebnisse der Messungen für den Haftreibungsbeiwerte

Messreihe	Temp. [°C]	Ergebnis
M4-1	60	0,852 ± 0,012
M4-2	80	0,460 ± 0,003
M4-3	100	0,290 ± 0,003
M4-4	120	0,211 ± 0,004
M4-5	140	0,196 ± 0,004
M4-6	160	0,191 ± 0,002

Mischgut 5

Für die Untersuchungen am Mischgut 5 wurden drei Proben aus einer hergestellten Charge (siehe Anhang F.1) entnommen. Mit den drei Proben wurden verschiedene Messreihen zwischen 80 °C und 160 °C durchgeführt. Der Abstand zwischen den einzelnen Messreihen beträgt 20 °C. Die Wartezeit zwischen den einzelnen Messungen betrug 5 Sekunden. In dieser Zeit war der Hebel in der Startposition (siehe Abb. 7.1.2). Die Abb. 8.1.5 und Tab. 8.1.5 zeigen die Ergebnisse der 5 Messreihen. Für die Mittelwerte wird die Skala der linken Achse verwendet. Das Balkendiagramm darunter stellt die jeweilige Standardabweichung zur jeweiligen Temperatur dar. Die Standardabweichung wird anhand der rechten Achse skaliert. Die Werte zeigen, dass der Bitumen die Haftreibungsbeiwerte deutlich senkt, im Vergleich zum Mischgut 1 (AC 5 DL ohne Bitumen). Die Standardabweichungen lassen keine Rückschlüsse auf die Temperatur zu, da die Standardabweichungen innerhalb der jeweiligen Temperaturen sehr unterschiedliche Werte annehmen.

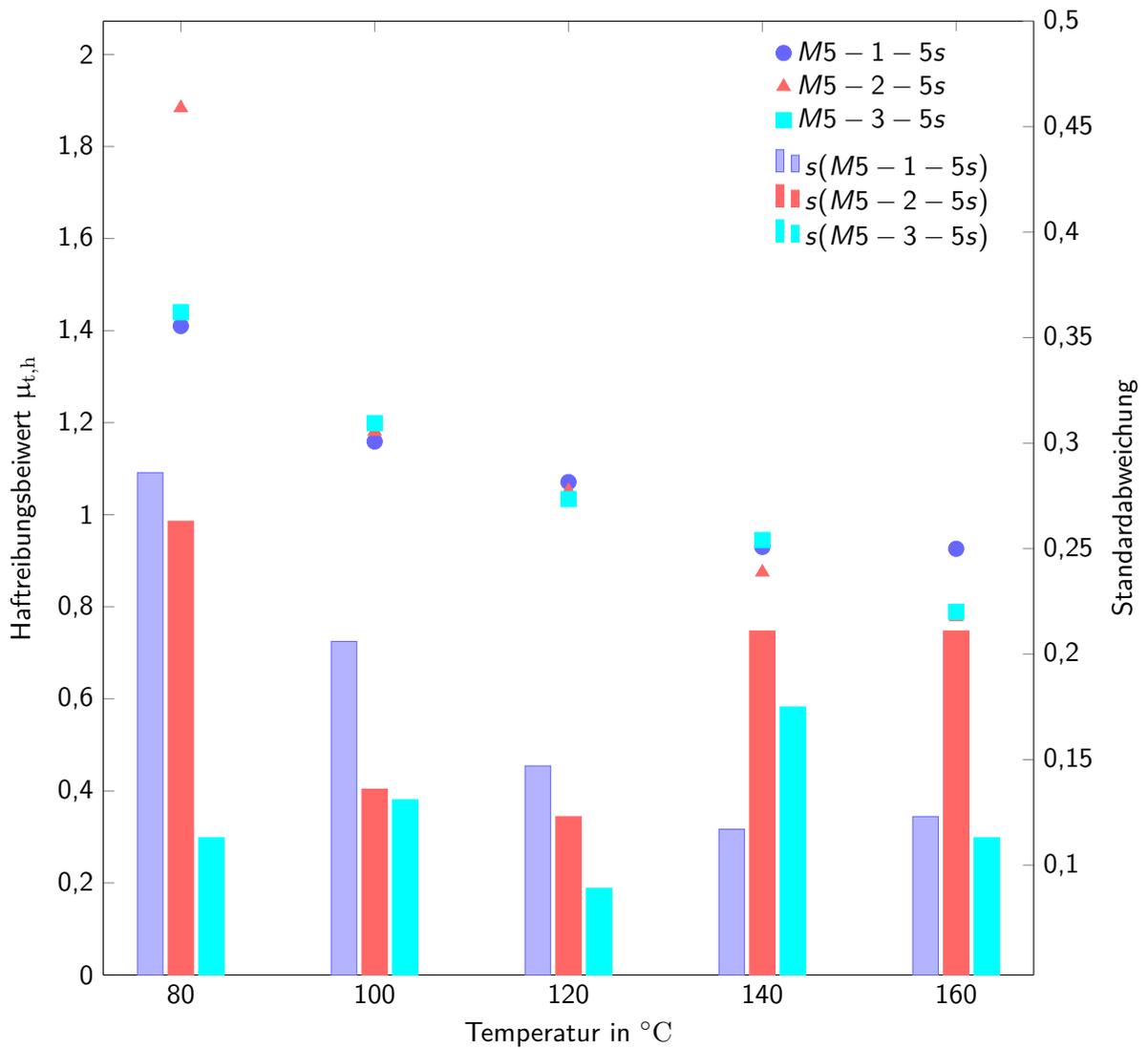


Abbildung 8.1.5: Messergebnisse der Haftreibungsbeiwerte für Mischgut 5, die Standardabweichungen sind als Balken dargestellt mit eigener Achse

Abb. 8.1.6 zeigt die drei Messreihen (M5-1-5s bis M5-3-5s) in Bezug auf *M5-Gesamt*³. Bis auf die Messreihen mit 80 °C liegen die die drei Messreihen innerhalb der jeweiligen Gesamtstandardabweichung.

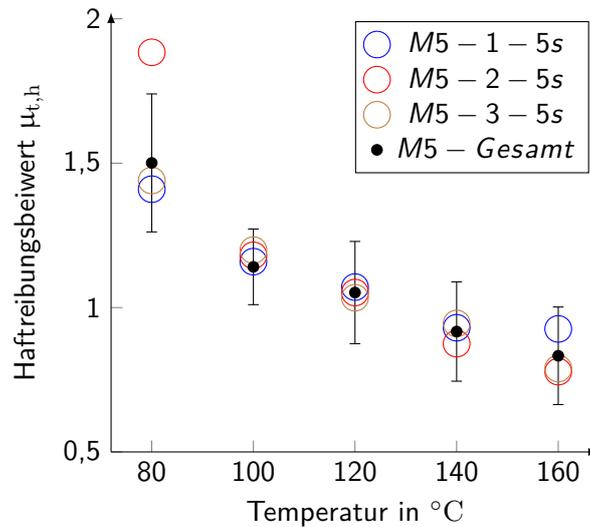


Abbildung 8.1.6: Messergebnisse der Haftreibungsbeiwerte für Mischgut 5 mit den Standardabweichungen der Gesamtmessreihe

Darüber hinaus wurden 3 Messreihen aufgenommen mit einer Wartezeit von 20 s an der Startposition. Die Ergebnisse sind in Abb. 8.1.7 und Tab. 8.1.5 dargestellt. Hierbei sind die Standardabweichungen wieder als Balken dargestellt, mit der Skalierung an der rechten Achse. Die Messreihen M5-1 und M5-1-20s wurden mit derselben Probe durchgeführt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei einer Wartezeit von 20 Sekunden sich der Bitumen bei den hohen Temperaturen wieder verbindet⁴ und der Haftreibungsbeiwert stark einsteigt.

Dieser Effekt nimmt bei geringeren Temperaturen ab und der Verlauf ist gegensätzlich zum Verlauf mit 5 Sekunden Wartezeit. Die Breite der Standardabweichung unterscheidet sich deutlich zwischen den Messreihen mit 20 s und 5 s Wartezeit.

³Dieser Wert ist der arithmetische Mittelwert aus den drei Messreihen.

⁴Der Effekt des sich wieder verbindenden Bitumens ist als Heilungs-Effekt bekannt (siehe Oeser 2004, S. 53 f.).

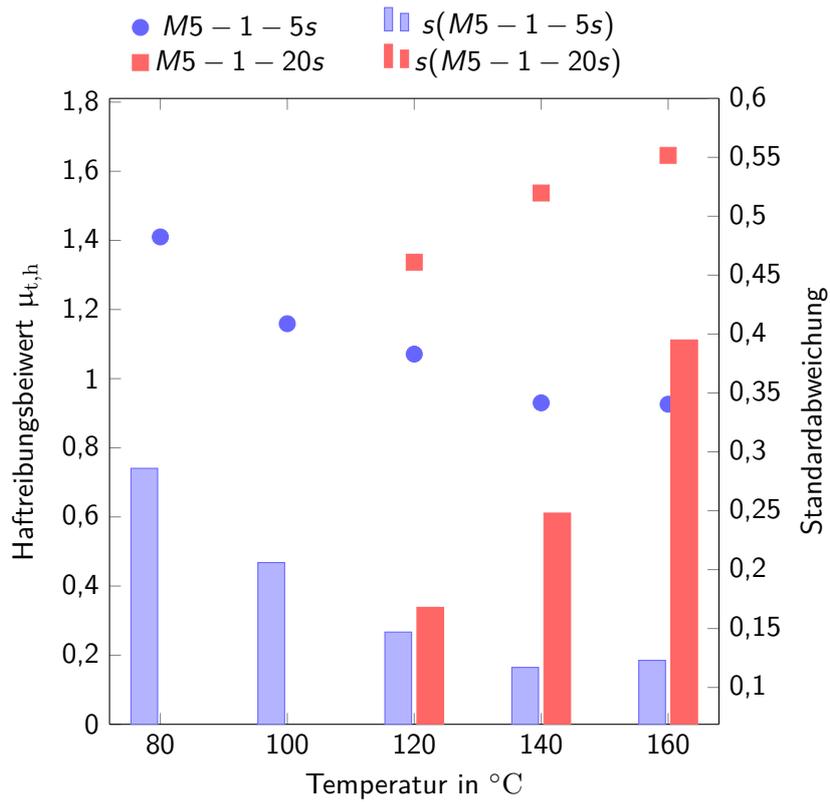


Abbildung 8.1.7: Messergebnisse der Haftreibungsbeiwerte für Mischgut 5, die Standardabweichungen sind als Balken dargestellt mit eigener Achse

Tabelle 8.1.5: Ergebnisse der Haftreibungsbeiwertbestimmung für Mischgut 5

Messreihe	Temp. [°C]	Ergebnis
M5-1-1	80	1,410 ± 0,040
M5-2-1	80	1,884 ± 0,037
M5-3-1	80	1,440 ± 0,022
M5-1-2	100	1,159 ± 0,027
M5-2-2	100	1,181 ± 0,019
M5-3-2	100	1,199 ± 0,018
M5-1-3	120	1,071 ± 0,020
M5-2-3	120	1,052 ± 0,017
M5-3-3	120	1,034 ± 0,012
M5-1-20s-1	120	1,337 ± 0,030
M5-1-4	140	0,930 ± 0,019
M5-2-4	140	0,875 ± 0,029
M5-3-4	140	0,945 ± 0,024
M5-1-20s-2	140	1,537 ± 0,045
M5-1-5	160	0,926 ± 0,017
M5-2-5	160	0,778 ± 0,029
M5-3-5	160	0,789 ± 0,015
M5-1-20s-3	160	1,646 ± 0,072

8.2 Ergebnisse der Simulation

Zur Detektion des Haltemoments bzw. der Normalkraft wird das erste Gefälle in Phase IV (siehe Tab. 7.3.1) gesucht, bei dem sich der Wert innerhalb von ca. 1 Sekunde um ca. 40-50 % reduziert. Die Werte orientieren sich an den Auswertungen der physikalischen Messungen. In der Abb. 8.2.1 ist das Vorgehen beispielhaft gezeigt.

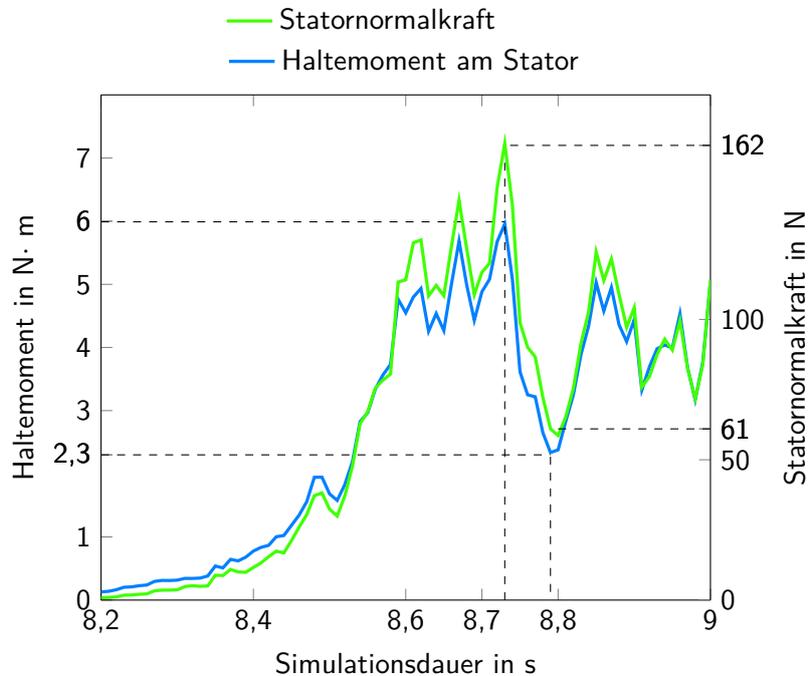


Abbildung 8.2.1: Beispiel für Detektion beim Verlauf des Haltemoments am Stator bzw. der Statornormalkraft

Die Notation für die Versuchspläne besteht aus vier Positionen (z.B. M1-1-R₁-1), die verschiedenen Positionen und deren Bedeutung sind in Tab. 8.2.2 aufgeführt. Die jeweiligen Versuchspläne sind im Anhang C zu finden. Die Ergebnisse der jeweiligen Versuchsreihe sind jeweils der arithmetische Mittelwert aus 12 Simulationen (siehe Kapitel 7.3.3).

Tabelle 8.2.1: Notation bei den Versuchsplänen

Bezeichnungen	Spezifikationen
Mischgut	M1, M2, M3, M4, M5
Kontaktmodelle	1 (HERZ-MINDLIN), 2 (EPPA), 3 (JKR)
Partikelverteilung	R ₀ (keine Anpassung) , R ₁ bis R ₆
Fortlaufende Nummer	entsprechend der Anzahl an Versuchen

8.2.1 Simulationswiederholungen

In Abb. 8.2.2 sind die Ergebnisse für verschiedene Simulationswiederholungen⁵ für Mischgut 4 und Mischgut 5 gezeigt. Die Simulationsergebnisse sind der arithmetische Mittelwert aus den jeweiligen Simulationswiederholungen mit den jeweiligen Konfidenzintervall. Die zahlenmäßigen Ergebnisse sind in Tab. A.3.3 im Anhang A.3 zu finden.

Für 5 Wiederholungen liegt die Wahrscheinlichkeit bei 60 %, dass der wahre unbekannte Wert innerhalb des Konfidenzintervalls liegt. Werden 12 Wiederholungen für die Simulation durchgeführt, so liegt diese Wahrscheinlichkeit bei 80 %. Bei 20 Wiederholungen erhöht sich diese Wahrscheinlichkeit auf 90 %.

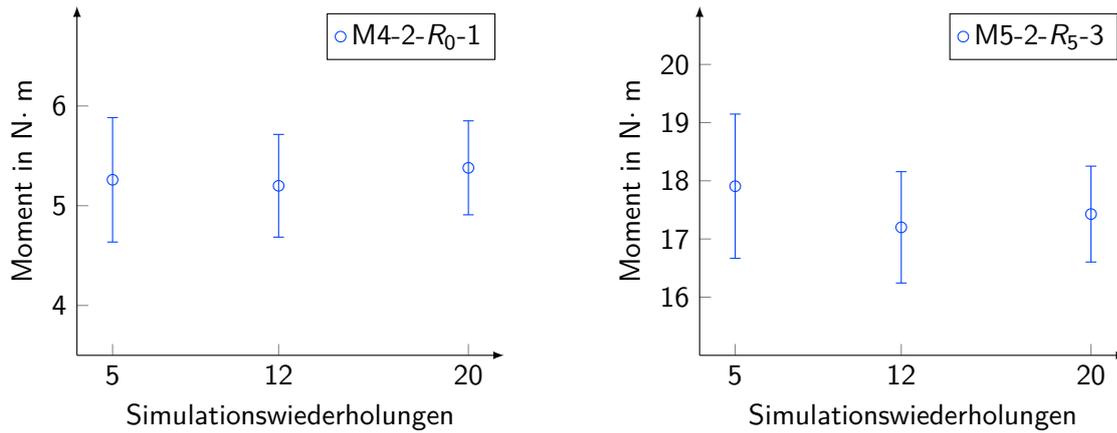


Abbildung 8.2.2: Änderung der Ergebnisse in Abhängigkeit von den Simulationswiederholungen mit den jeweiligen Konfidenzintervallen

Für den weiteren Verlauf wird angenommen, dass die anderen Mischgüter und Parameterkombinationen sich ähnlich verhalten wie die in Abb. 8.2.2 dargestellten Mischgüter. Die Abbildung verdeutlicht, dass zur Bestimmung der relativen Lage des jeweiligen Simulationsergebnisses mit 5 Wiederholungen ausreichend sind. Somit werden für die Überprüfung der Korngrößenverteilung und der Bestimmung des Vertikalabstandes 5 Simulationswiederholungen verwendet. In einem ersten Schritt werden bei den vollständigen und fraktionellen faktoriellen Versuchsplänen 5 Simulationen durchgeführt. Im Anschluss daran werden für die relevanten Faktorstufenkombinationen 12 Simulationswiederholungen durchgeführt. Darüber hinaus werden bei stark schwankenden Simulationsergebnissen 12 Wiederholungen durchgeführt.

8.2.2 Modellierung der Korngrößenverteilung

Für die Überprüfung und Auswahl einer geeigneten Korngrößenverteilung sind für die Mischgütern 1 und 2 mit den verschiedenen Korngrößenverteilungen ($R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$) Simulationen durchgeführt worden. Die Simulationsergebnisse zu den verschiedenen Korngrößenverteilungen sind in Abb. 8.2.3 dargestellt. Die verwendeten Parameterkombinationen sind in Tab. A.5.3 und Tab. A.5.4 im Anhang A zu finden. Für den relevanten Zeitschritt Δt_{krit} wurde der empirische Faktor auf 8 % definiert. Dieser Wert wurde gewählt, da angenommen werden kann, dass

⁵Die Simulationswiederholungen ergeben sich aus den Berechnungen von Kapitel 7.3.3, siehe Tab. 7.3.4.

der relevante Zeitschritt hinreichend klein ist und es dadurch zu keinerlei Unstetigkeiten/Verzerrungen kommt. Die Abb. 8.2.3 zeigt, dass trotz unterschiedlicher Korngrößenverteilung sich die Ergebnisse innerhalb der verschiedenen Korngrößenverteilungen nicht wesentlich voneinander unterscheiden, weder vom jeweiligen Absolutwert noch von der relativen Lage zueinander. Neben den Ergebnissen sind auch die Referenzwerte aus den physikalischen Messungen aufgeführt. Das Haltemoment bei Mischgut 1 beträgt $39 \text{ N} \cdot \text{m}$ und bei Mischgut 2 nimmt es $45 \text{ N} \cdot \text{m}$ an. Die Normalkraft ist bei beiden Mischgütern 104 N .

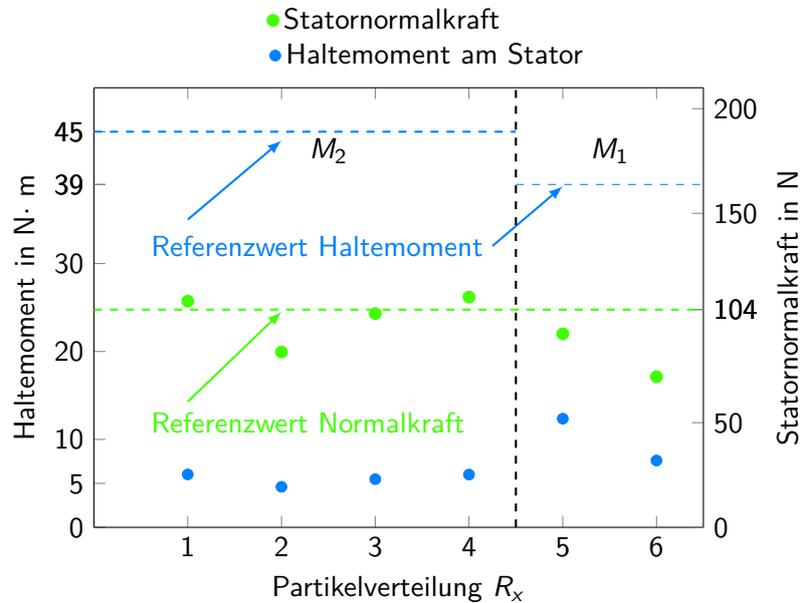


Abbildung 8.2.3: Ergebnisse des Parametersatzes bei unterschiedlichen Partikelverteilungen ($R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$)

Die Ergebnisse in Abb. 8.2.3 zeigen keine sehr große Übereinstimmung zwischen den Referenzwerten und den Simulationsergebnissen. Um zu überprüfen, ob mit anderen Parametern ein besseres Ergebnis erzielt werden kann, wird ein vollständig faktorieller Versuchsplan für das Mischgut 2 mit der Korngrößenverteilung R_1 durchgeführt. Die Werte sind in Tab. 7.3.7 dargestellt und die Zuordnung der Faktoren ist in Tab. C.1.1 aufgelistet.

Die Ergebnisse des vollständigen faktoriellen Versuchsplans sind graphisch in Abb. 8.2.4 gezeigt. In Abb. 8.2.5 ist die Auswertung der Effekte zu sehen. Es wird deutlich, dass der Faktor A (Querkontraktionszahl) keinen großen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Daher wird in den nachfolgenden Simulationen mit einer konstanten Querkontraktionszahl von 0,2 gerechnet.

Die Abb. 8.2.3 und Abb. 8.2.4 zeigen, dass mit dem vorhandenen Simulationsmodell (Kontaktmodell nach HERTZ und MINDLIN) die Referenzwerte nicht erreicht werden können. Entweder wird der Referenzwert der Statornormalkraft erreicht oder der Wert für das Haltemoment. Die Ergebnisse legen nahe, dass in der Simulation wichtige Aspekte nicht hinreichend genau abgebildet worden sind. Hierbei kann es sich nur um die Kornform, die Topologie der Oberfläche oder die Korngrößenverteilung handeln. Da feinere Korngrößen keinen entscheidenden Beitrag zum Versetzungswiderstand leisten und die gewählte Korngrößenverteilung nur die feineren Korngrö-

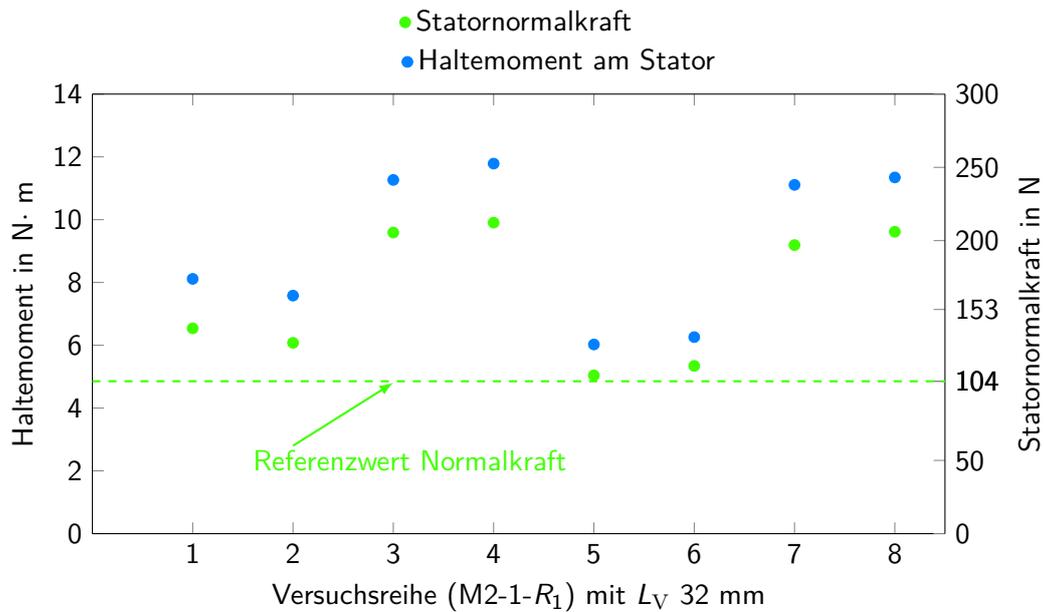


Abbildung 8.2.4: Ergebnisse des vollständigen faktoriellen Versuchsplans für M2-1- R_1

ßen nicht abbildet, kann davon ausgegangen werden, dass die Kornform und die Topologie der Oberfläche die entscheidenden Faktoren sind.

Trotz der wahrscheinlich fehlenden Simulationsaspekte zeigen die Simulationsergebnisse, dass die verschiedenen Korngrößenverteilungen sich, beim gewählten Kontaktmodell, ähnlich verhalten. Somit wird im weiteren Verlauf der Arbeit angenommen, dass die verschiedenen Korngrößenverteilungen sich auch bei anderen Kontaktmodellen ähnlich verhalten. Daher wird für die weiteren Simulationen mit den Korngrößenverteilungen R_2 und R_5 gearbeitet, da aufgrund der größeren minimalen Korngröße die Simulationszeit reduziert wird.

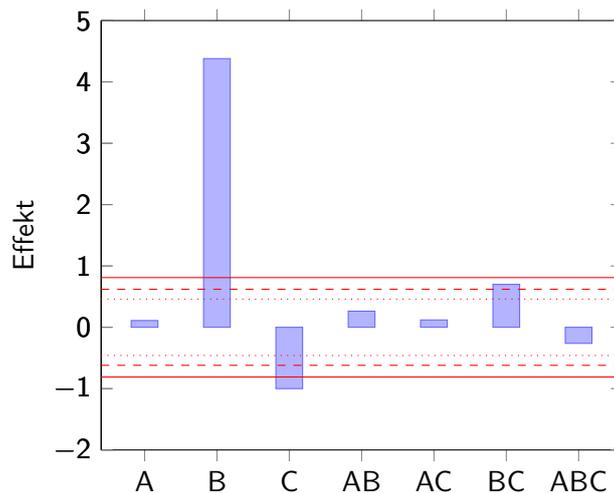


Abbildung 8.2.5: Auswertung der einzelnen Effekte für das Mischgut 2 (M2-1- R_1) mit den Konfidenzintervallen (95 % [gepunktet], 99 % [gestrichelt], 99,9 % [durchgezogen])

8.2.3 Vertikalabstand

Um den Einfluss des Vertikalabstandes auf das Simulationsergebnis zu untersuchen, sind verschiedene Simulationen mit verschiedenen Korngrößenverteilungen und Kontaktmodellen durchgeführt worden. Abb. 8.2.6 zeigt die Ergebnisse für die Parametersätze M2-1- R_1 und M5-2- R_6 . Die zahlenmäßigen Ergebnisse mit den veränderlichen Parametern sind Tab. A.6.5 im Anhang A.6 aufgelistet. Neben den Ergebnissen sind auch die Referenzwerte aus den physikalischen Messungen aufgeführt (104 N und 45 N·m für Mischgut 2 und 104 N und 17,1 N·m für Mischgut 5). Die Werte für Parameter sind in Tab. A.6.1 und Tab. A.6.4 im Anhang A.6 zu finden.

Zum einen zeigt sich, dass mit steigendem Vertikalabstand (L_V) sowohl das Haltemoment als auch die Statornormalkraft absinkt, unabhängig vom Kontaktmodell. Zum anderen ist deutlich zu sehen, dass das Kontaktmodell einen großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat, bei M2-1- R_1 wird das Kontaktmodell nach HERTZ - MINDLIN eingesetzt, wohingegen bei M5-2- R_6 das EEPA-Kontaktmodell verwendet wird.

Dieses Verhalten ist auch bei den anderen Korngrößenverteilungen ($R_2 - R_5$) zu beobachten, siehe Abb. A.6.1 und Abb. A.6.2 im Anhang A.6. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Parameter für das Kontaktmodell auch einen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben. Dies wird aus Abb. A.6.2 ersichtlich.

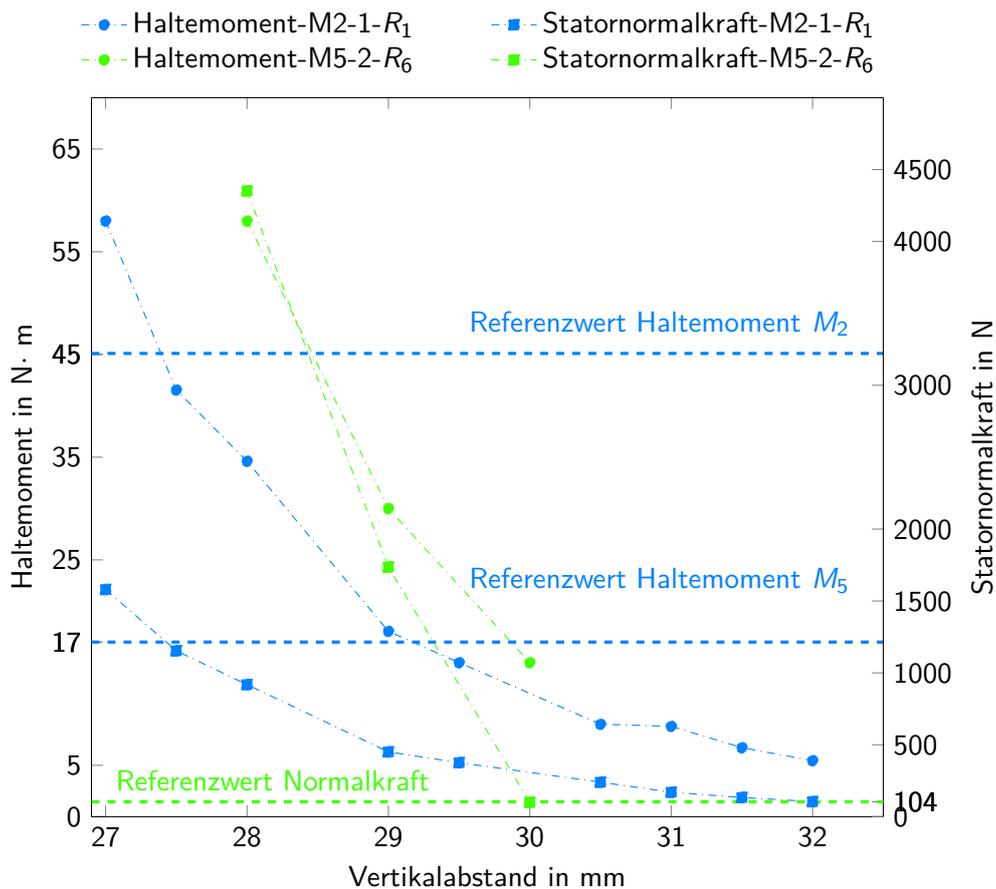


Abbildung 8.2.6: Ergebnisse der Parametersätze M2-1- R_1 und M5-2- R_6 für verschiedene Vertikalabstände

8.2.4 Zeitschritt

In Tab. 8.2.2 sind die Simulationsergebnisse von Mischgut 5 bei unterschiedlichen Zeitschritten und mit den dazugehörigen empirischen Faktoren für Δt_{krit} dargestellt. Es zeigt sich, dass zwischen 6 % und 8 % die Ergebnisse relativ ähnlich sind. Für die darauffolgenden Zeitschritte ändern sich die Simulationsergebnisse je Zeitschritt.

Tabelle 8.2.2: Abhängigkeit der Simulationsergebnisse von verschiedenen empirischen Faktoren bei Mischgut 5 - R_5

Empirischer Faktor [%]	Zeitschritt [10^{-6} s]	Ergebnis [N·m]
6	2,9891	$15,137 \pm 0,57$
7	3,4877	$14,91 \pm 0,41$
8	3,9859	$14,96 \pm 0,71$
10	4,9824	$11,53 \pm 0,49$
12	5,9789	$5,00 \pm 0,14$
14	6,9754	$3,26 \pm 0,06$
16	7,9719	$2,359 \pm 0,05$
18	8,9684	$1,83 \pm 0,04$
20	9,9649	$1,388 \pm 0,02$

Die Änderung des Zeitschritts zeigt sich auch im charakteristischen Verlauf des Haltemoments beim Abscherprozess. Bei den empirischen Faktoren zwischen 6 % bis 8 % zeigt das Haltemoment beim Abscheren ein klares Abfallen an, siehe Abb. 8.2.1. Bei den größer gewählten empirischen Faktoren zeigt sich hingegen dieses Abfallen nicht. Der beschriebene Sachverhalt ist in Abb. 8.2.7 deutlich zu erkennen.

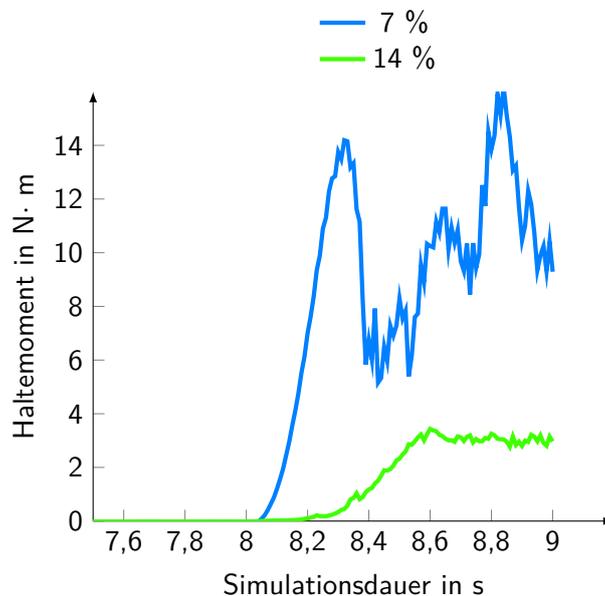


Abbildung 8.2.7: Vergleich zweier Momentenverläufe für das Mischgut 5 mit dem EEPA-Modell und der Partikelverteilung R_5 mit den empirischen Faktoren 7 % und 14 %

Für die Mischgüter 3 und 4 zeigen sich ähnliche Verläufe wie bei Mischgut 5. Die Ergebnisse hierzu sind im Anhang A.4 in Abb. A.4.1 und Tab. A.4.1 zu finden. Die verwendeten Modellierungsparameter für die Mischgüter 3, 4 und 5 sind den Tabellen A.4.2 bis A.4.4 im Anhang A.4 zu entnehmen.

8.2.5 Modellierung Kontaktmodell

Für die Auswahl eines geeigneten Kontaktmodells wird zum einen das EEPA-Kontaktmodell mit dem JKR-Kontaktmodell verglichen. Aber zum anderen wird auch das lineare EEPA-Kontaktmodell mit dem nicht linearen EEPA-Kontaktmodell verglichen.

Für das lineare EEPA-Kontaktmodell wird ein vollständiger faktorieller Versuchsplan durchgeführt, mit den Parametern aus Tab. 7.3.9. Die Ergebnisse der Simulation für das EEPA-Kontaktmodell sind in Tab. 8.2.3 dargestellt. Die Ausprägung der Faktoren {A:Entlastungssteifigkeit, B:Kohäsionssteifigkeit, C:Kohäsionskraft} ist in Tab. C.2.1 im Anhang C dargestellt. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass mit den vorgegebenen Parametern die Werte aus den physikalischen Messungen (4,7 N·m und 153 N) nicht erreicht werden können. Anhand der Ergebnisse aus M4-2- R_0 -3 und M4-2- R_0 -7, sowie der Tatsache, dass für M4-2- R_0 -4 und M4-2- R_0 -8 keine Werte ermittelt werden konnten, da das System zu stark geschwungen hat, wird deutlich, dass der obere Wert der Kohäsionssteifigkeit (k_{adh}) viel zu groß gewählt ist.

Tabelle 8.2.3: Ergebnis des vollständigen faktoriellen Versuchsplans für Mischgut 4 mit EEPA-Kontaktmodell

M4-2- R_0 -	Ergebnisse		Abweichung zu Referenzwerten	
	Haltemoment	Normalkraft	Haltemoment	Normalkraft
	[N· m]	[N]	[%]	[%]
1	6,31	166,13	34,7	8,58
2	1,233	29,5	70,76	80,71
3	158,88	4639,583	320,8	290
4	–	–	–	–
5	9,17	247	95,17	61,58
6	1,79	247,2	62,15	72,96
7	157,28	4643,5	320	290
8	–	–	–	–

Die schrittweise Reduktion der Kohäsionssteifigkeit (k_{adh}) für den Parametersatz M4-2- R_0 -1 zeigt, dass ein k_{adh} -Wert mit 0,1 N/m eine gute Übereinstimmung mit den Referenzwerten liefert, siehe Tab. 8.2.4.

Tabelle 8.2.4: Ergebnis der Reduktion des Kohäsionssteifigkeit (k_{adh}) für Mischgut 4 mit dem Parametersatz M4-2- R_0 -1

k_{adh}	Ergebnisse		Abweichung zu Referenzwerten	
	Haltemoment	Normalkraft	Haltemoment	Normalkraft
	[N·m]	[N]	[%]	[%]
10	8,39	215,26	78	40
1	7,35	193,72	56	27
0,1	5,21	131,10	10	14

Mit der neu ermittelten Untergrenze für die Kohäsionssteifigkeit wird ein vollständiger faktorieller Versuchsplan durchgeführt. Die Auswertung des vollfaktoriellen Versuchsplans für das lineare EEPA-Kontaktmodell ist graphisch in Abb. 8.2.8 und Abb. 8.2.9 dargestellt. Abb. 8.2.8 zeigt die zahlenmäßigen Ergebnisse, mit den Referenzwerte aus den physikalischen Messungen (153 N und 4,7 N·m). Wohingegen Abb. 8.2.9 die verschiedenen Einflüsse der Faktoren {A: Entlastungssteifigkeit, B: Kohäsionssteifigkeit, C: Kohäsionskraft} und deren Wechselwirkung aufschlüsselt. Die Wechselwirkung zwischen den Faktoren A und C ist stark ausgeprägt, wohingegen die Wechselwirkungen zwischen AB, BC und ABC nicht sehr ausgeprägt sind. Die Linien in der Abb. 8.2.9 stellen die verschiedenen Wahrscheinlichkeiten bzw. die Konfidenzintervalle (95 % [gepunktete Linie], 99 % [gestrichelte Linie], 99,9 % [durchgezogene Linie]) dar. Die ausführlichen Ergebnisse sind in Tab. C.2.3 im Anhang C zu finden.

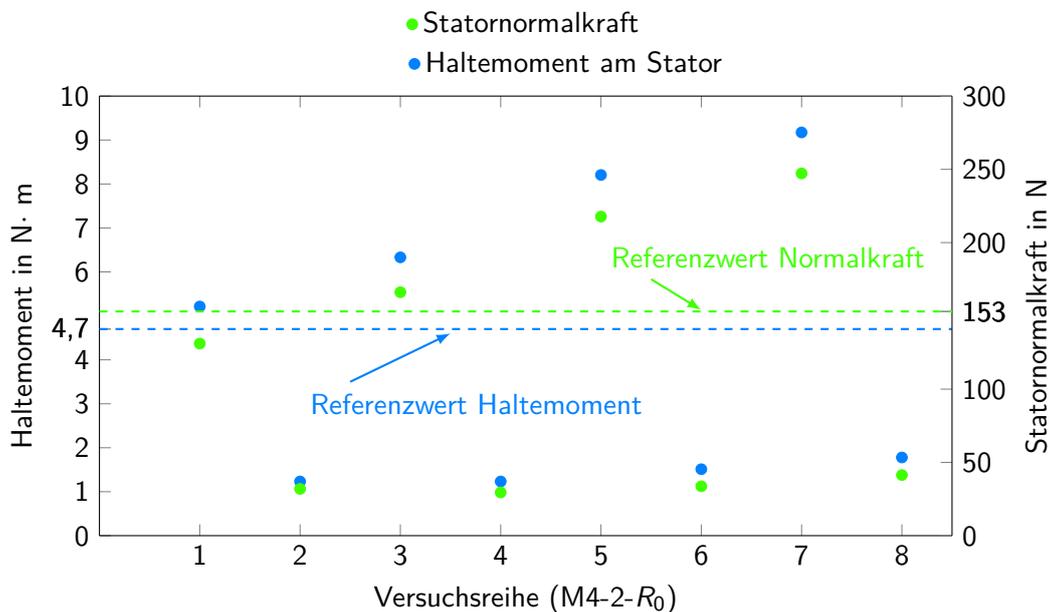


Abbildung 8.2.8: Ergebnisse des vollständigen faktoriellen Versuchsplan für das lineare EEPA-Kontaktmodell mit geänderter Kohäsionssteifigkeit

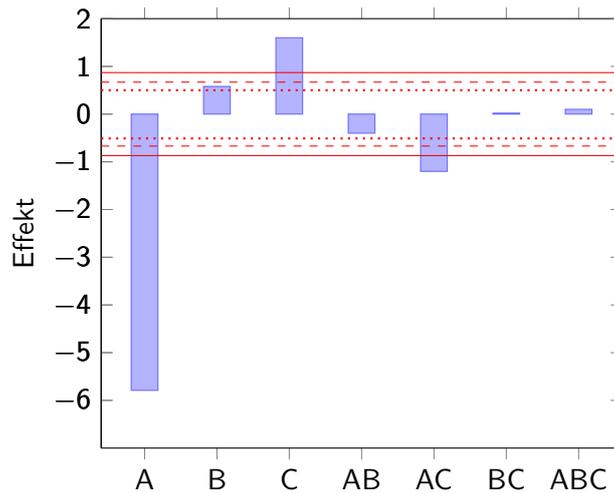


Abbildung 8.2.9: Auswertung der einzelnen Effekte für das EEPA-Kontaktmodell mit den Konfidenzintervallen (95 % [gepunktet], 99 % [gestrichelt], 99,9 % [durchgezogen])

Der Vergleich zwischen dem nicht linearen und dem linearen EEPA-Kontaktmodell wird mit der Parameterkombination M4-2- R_0 -1 durchgeführt. Die Werte für die Exponenten werden aus MORRISSEY übernommen, dabei hat der Exponent h den Wert 1,5 und der Exponent x den Wert 2 (Morrissey u. a. 2014, S. 4). Das Ergebnis ist in Tab. 8.2.5 gezeigt. Zum einen zeigt sich, dass das lineare und nicht lineare EEPA-Kontaktmodell unterschiedlich auf Eingangsparameter reagieren. Dies ist jedoch nicht überraschend, da die Exponenten nicht nur den Verlauf der einzelnen “Äste“ der Haftkraft beeinflussen, sondern auch einige Parameter, die maßgeblich die Form bestimmen wie z. B. $F_{\text{hys,min}}$, δ_{min} oder $\delta_{ij,n,p}$, siehe Gleichungen 5.2.31 bis 5.2.35. Zum anderen verlängert sich die Simulationszeit um ca. 20 %. Im weiteren Verlauf wird mit dem linearen EEPA-Kontaktmodell gerechnet, da es im Vergleich zum nicht linearen EEPA-Kontaktmodell weniger Simulationszeit benötigt und ähnlich genaue Ergebnisse liefert.

Tabelle 8.2.5: Vergleich zwischen dem linearen und dem nicht linearen EEPA-Kontaktmodell

Bezeichnung	Linear	Nicht linear	Haltemoment [N· m]	Normalkraft [N]
M4-2- R_0 -1	X		$5,21 \pm 0,36$	$131,19 \pm 10,2$
M4-2- R_0 -1		X	$11,23 \pm 0,61$	$289,07 \pm 19,0$

Für das JKR-Kontaktmodell wird im ersten Schritt die Einflussnahme des Kohäsionsparameter (γ_K) überprüft, hierzu wird der Wert Schrittweise reduziert, von 1 J/m^2 auf $0,0001 \text{ J/m}^2$. Hierzu sind die Parameter aus Tab. 7.3.8 verwendet worden. Die grafische Darstellung der Ergebnisse ist in Abb. 8.2.10 im linken Teil zu sehen. Die ausführlichen Ergebnisse mit Abweichung sind Tab. C.2.4 im Anhang C zu finden.

Im zweiten Schritt wird ein vollfaktorieller Versuchsplan verwendet, um die Einflussnahme der Startparameter zu untersuchen. Die Faktoren sind die Restitutionszahl (A), die Rollreibungszahl (B) und der Kohäsionsparameter (C). Die Auswertung ist in Abb. 8.2.10 im rechten Teil dargestellt. Der verwendete Parametersatz, die Bezeichnung der Faktoren und die ausführliche

Auswertung sind im Anhang C in den Tab. C.2.6 bis Tab. C.2.7 zu finden. In den beiden Diagrammen sind neben den Simulationsergebnissen auch die Referenzwerte aus den physikalischen Messungen aufgeführt (153 N und 4,7 N·m).

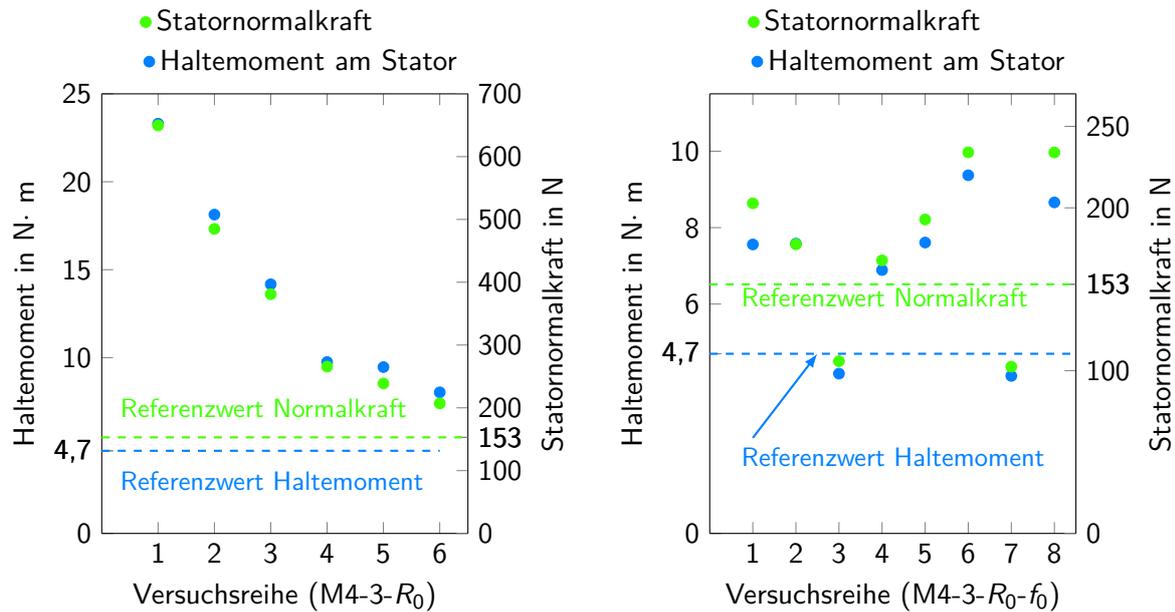


Abbildung 8.2.10: Ergebnisse der Einflussnahme des Kohäsionsparameter (γ_K) [M4-3- R_0] und Auswertung des vollfaktorieller Versuchsplan [M4-3- R_0 - f_0]

Die Abb. 8.2.10 zeigt, dass mit veränderten Startparametern, die Ergebnisse sich verbessern, siehe Tab. 8.2.6.

Tabelle 8.2.6: Ausgewählte Ergebnisse aus dem vollfaktoriellen Versuchsplan bzw. Bestimmung des Kohäsionsparameter für das JKR-Kontaktmodell

Versuchsreihe	Ergebnisse		Abweichung zu Referenzwerten	
	Haltemoment [N·m]	Normalkraft [N]	Haltemoment [%]	Normalkraft [%]
M4-3- R_0 -6	8,0	207,09	70	35
M4-3- R_0 - f_0 -3	4,17	105,78	12,2	31,12
M4-3- R_0 - f_0 -7	4,12	102,41	13,35	33,32

Der Vergleich zwischen dem JKR-Kontaktmodell und dem linearen EEPA-Kontaktmodell zeigt, dass die Abweichungen zu den Referenzwerten aus den physikalischen Messungen beim linearen EEPA-Kontaktmodell kleiner sind, siehe Tab. 8.2.7.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird das lineare EEPA-Kontaktmodell verwendet, da zum einen mit den gewählten Parametern die Abweichungen zu den Referenzwerten kleiner sind, siehe Tab. 8.2.7. Zum anderen ist die Detektion des Haltemoments bzw. der Normalkraftweisen bei den Simulationen mit JKR schwierig, da sich hier kein charakteristischer Verlauf (wie in Abb. 8.2.1) ausgebildet hat. Die Detektion erfolgte nach dem selben Prinzip, das erste Gefälle in Phase IV wird detektiert, jedoch mit einem Grenzwert von ca. 20-30 %.

Tabelle 8.2.7: Abweichungen des Haltemoments und der Normalkraft innerhalb der Versuchsreihe und zum Referenzwert

Bezeichnung	M4-3- R_0 - f_0 -3 (JKR)	M4-2- R_0 -1 (EEPA)
Gemittelter Wert [N · m]	$4,17 \pm 0,38$	$5,21 \pm 0,27$
Abweichungen zum Referenzhaltemoment [%]	12	10
Gemittelter Wert [N]	$105,78 \pm 15,87$	$131,10 \pm 10,24$
Abweichungen zur Referenznormalkraft [%]	31	14

Die Ursache für das schlechtere Abschneiden des JKR-Kontaktmodells kann nicht auf die Startparameter zurückgeführt werden, sondern die Ursache ist vielmehr in den Modellgleichungen der Normal- und Tangentialkräften und deren Verläufe zu suchen. In Abb. 8.2.11 sind der Normalkraftverlauf (JKR) und der Verlauf der Haftkraft F_{hys} (EEPA) dargestellt.

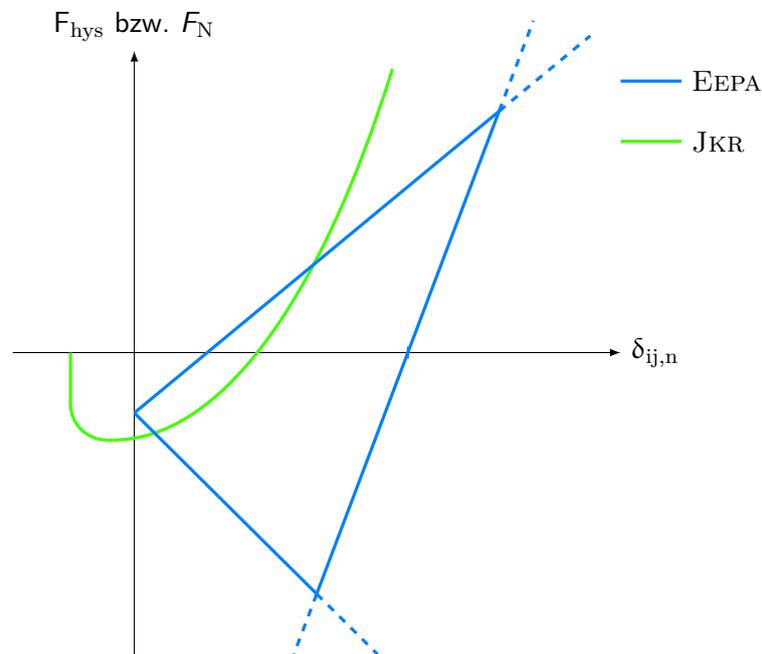


Abbildung 8.2.11: Vergleich des Haftkraftverlaufs (EEPA) mit dem Normalkraftverlauf von JKR

Hierbei zeigt sich, dass die beiden Verläufe sich zum einen bei einem negativen $\delta_{ij,n}$ unterscheiden. Zum anderen unterscheiden sich die beiden Kontaktmodelle bei der Be- und Entlastung. Das EEPA Kontaktmodell bildet eine Be- und Entlastung ab, wohingegen das Kontaktmodell nach JKR keine Unterschied zwischen Be- und Entlastung hat. Und in tangentialer Richtung wird die Gleichung um den Faktor κ_{tm} erweitert, siehe Gleichung 5.2.40. Sowohl der $F_{n,diss,eeпа}$, als auch κ_{tm} sind wiederum von der Belastungssteifigkeit $k_{n,1}$ abhängig. Daher ist zu vermuten, dass Abbildung der Be- und Entlastung in Kombination mit den beiden Faktoren für das bessere Abschneiden verantwortlich ist.

8.2.6 Modellierung Mischgut 5

Für die Auswertung wird ein fraktioneller faktorieller Versuchsplan verwendet. Hierbei kommt ein Versuchsplan 2^{5-1} zum Einsatz. Dieser Versuchsplan besitzt nach KLEPPMANN die Auflösung V. Dadurch kommt es nur zu einer geringen Vermengung zwischen den Effekten bei gleichzeitiger Reduzierung des Versuchsaufwands (Kleppmann 2016, S. 144). Die für die Modellierung verwendeten Parameter sind in Tab. C.3.1 zu finden. Die Ergebnisse des fraktionellen faktoriellen Versuchsplans sind in der Abb. 8.2.12 graphisch dargestellt. Dort sind neben den Ergebnissen noch die Werte aus den physikalischen Untersuchungen gezeigt (Haltemoment mit $17,1 \text{ N} \cdot \text{m}$ und Statornormalkraft mit 165 N , siehe Anhang B.5).

Tabelle 8.2.8: Ausgewählte Ergebnisse des fraktionellen faktoriellen Versuchsplans für Mischgut 5

M5-2- R_5 -	Ergebnisse		Abweichung zu Referenzwerten	
	Haltemoment	Normalkraft	Haltemoment	Normalkraft
	[$\text{N} \cdot \text{m}$]	[N]	[[%]]	[[%]]
3	$17,42 \pm 0,50$	$180,20 \pm 6,35$	2	9
5	$14,57 \pm 1,04$	$147,02 \pm 9,18$	14	10
15	$14,08 \pm 0,50$	$154,36 \pm 9,16$	13	6

Die Parameterkombinationen M5-2- R_5 -3, M5-2- R_5 -5 und M5-2- R_5 -15 zeigen die geringsten Abweichungen zu den physikalischen Messwerten. Die Werte und die Abweichungen zu den physikalischen Messwerten sind in der Tab. 8.2.8 gelistet. Eine Auflistung aller Werte ist in der Tab. C.3.6 im Anhang C.3 zu finden.

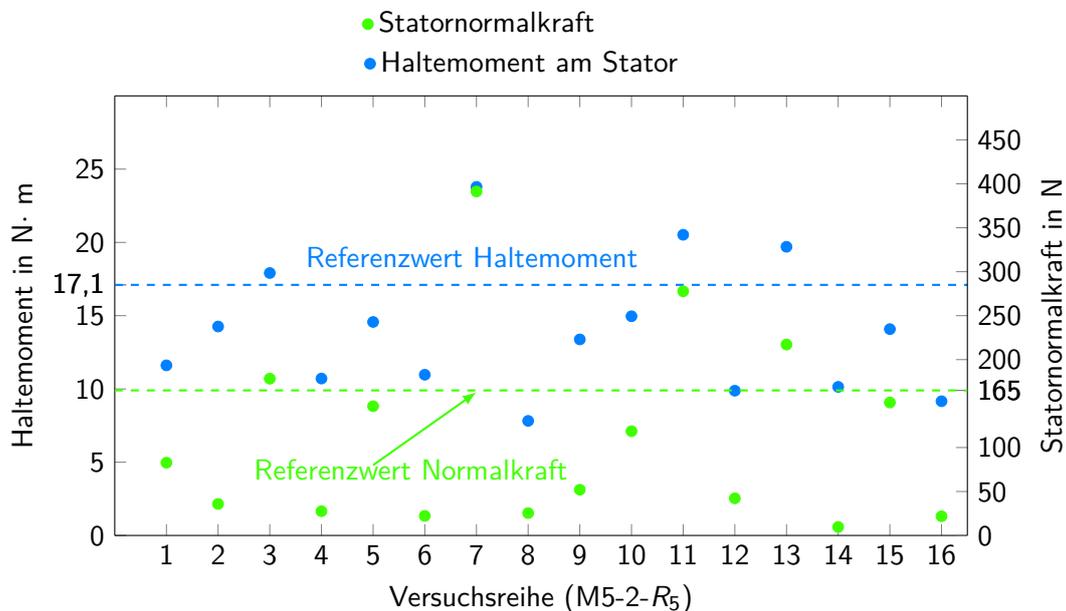


Abbildung 8.2.12: Graphische Darstellung der Ergebnisse des fraktionellen faktoriellen Versuchsplans für Mischgut 5

Die jeweiligen Werte der einzelnen Parameter sind in Tab. 8.2.9 aufgelistet. Wie die Tab. 8.2.9 schon vermuten lässt, sind die Faktoren A (Entlastungssteifigkeit) und E (Restitutionszahl) für das „richtige“ Ergebnis ausschlaggebend.

Tabelle 8.2.9: Parameterwerte für M5-2-R₅-3, M5-2-R₅-5 und M5-2-R₅-15

Faktor	Name		Einheit	M5-2-R ₅ -3	M5-2-R ₅ -5	M5-2-R ₅ -15
A	Entlastungssteifigkeit	$k_{n,2}$	kN/m	1,25	1,25	1,25
B	Kohäsionssteifigkeit	k_{adh}	N/m	100	0,1	100
C	Kohäsionskraft	$F_{hys,0}$	N	-0,002	-0,05	-0,05
D	Rollreibungszahl	$\mu_{t,r}$		0,2	0,8	0,2
E	Restitutionszahl	e_{ij}		0,5	0,5	0,5

Diese Annahme wird durch die Abb. 8.2.13 bestätigt. Sie zeigt den Einfluss/Effekte der verschiedenen Parameter. Hierbei sind nur die Einflüsse/Effekte dargestellt, die über den jeweiligen Konfidenzintervallen liegen. Die gesamten Ergebnisse der einzelnen Effekte sind in Tab. C.3.5 im Anhang C.3 zu finden. Darüber hinaus wird deutlich, dass es zu Wechselwirkungen mit den Faktoren B, C und D kommt (AB, AC, CE, DE).

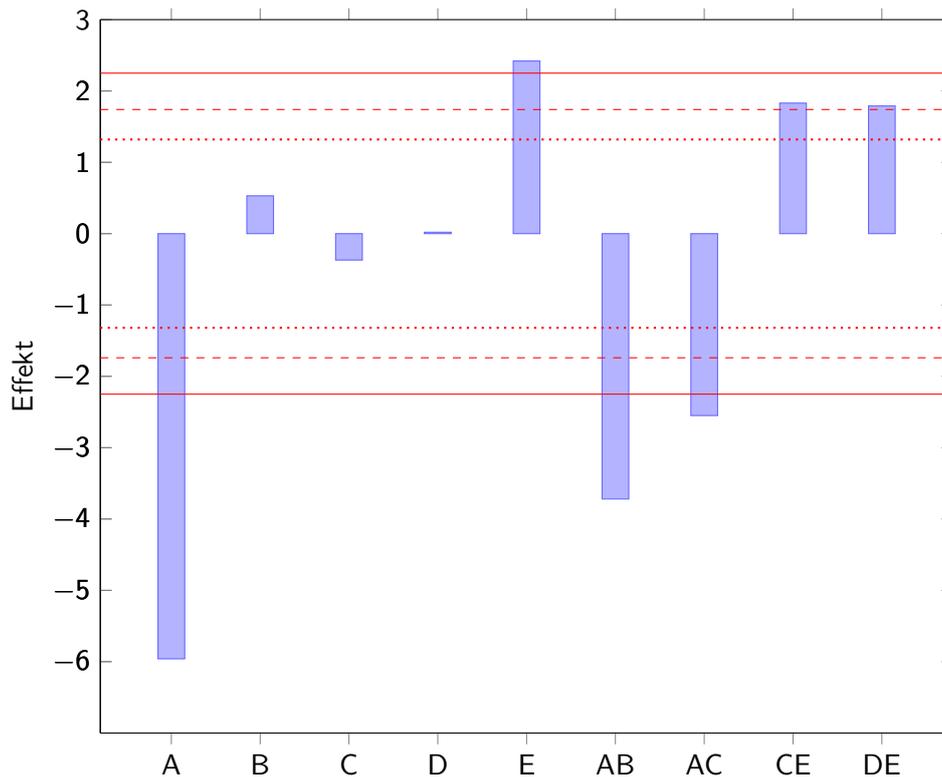


Abbildung 8.2.13: Auswertung einiger ausgewählter Effekte für Mischgut 5 mit den Konfidenzintervallen (95 % [gepunktet], 99 % [gestrichelt], 99,9 % [durchgezogen])

8.2.7 Modellierung Mischgut 3

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit von Modellierungsparametern werden die Modellierungsparameter von Mischgut 5 in das Parametermodell von Mischgut 3 eingesetzt. Zum Einsatz kommen hierbei die Modellierungsparameter von Mischgut 5, die die besten Ergebnisse erzielt haben, siehe Tab. 8.2.9. Die Parameterwerte für die verschiedenen Simulationen sind in Tab. 8.2.10 aufgeschlüsselt.

Tabelle 8.2.10: Parameterwerte für M3-2- R_4 -1 bis M3-2- R_4 -6

Bez.	Modellierungsparameter			L_V [mm]
	M5-2- R_5 -3	M5-2- R_5 -5	M5-2- R_5 -15	
M3-2- R_4 -1	x			31,25
M3-2- R_4 -2	x			30,75
M3-2- R_4 -3			x	30,75
M3-2- R_4 -4			x	31,75
M3-2- R_4 -5		x		27,00
M3-2- R_4 -6		x		30,00

Das Ergebnis der Übertragbarkeit der Modellierungsparameter ist in Tab. 8.2.11 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Übertragung von Modellierungsparametern auf ähnliche Modelle nur mäßig gut funktioniert.

Tabelle 8.2.11: Ergebnisse zur Überprüfung der Übertragbarkeit von Modellierungsparametern bei Mischgut 3

M3-2- R_4 -	Ergebnisse		Abweichung zu Referenzwerten	
	Haltemoment	Normalkraft	Haltemoment	Normalkraft
	[N · m]	[N]	[%]	[%]
1	10,78 ± 0,07	212,75 ± 2,89	34	28
2	11,83 ± 0,37	226,34 ± 6,13	27	36
3	15,00 ± 0,66	286,68 ± 11,42	8	73
4	10,83 ± 0,13	205,78 ± 2,84	33	24
5	10,29 ± 0,49	200,76 ± 47,95	37	21
6	2,34 ± 0,09	31,16 ± 1,47	85	81

8.3 Diskussion der Ergebnisse im Kontext zur Forschungsfrage

Anhand der in Kapitel 4 aufgestellten Forschungsfrage lassen sich sechs Teilziele ableiten.

Für das Erreichen des **ersten Teilziel** (Identifikation und Auswahl eines geeigneten Asphaltparameters hinsichtlich der Relevanz beim Einbau sowie der Mess- und Modellierbarkeit) wurden Überlegungen über das Verhalten des Asphalts beim Einbau angestellt.

Für die Beschreibung der Theorie zu den Einflussfaktoren im Asphalt wurde auf die Betrachtungsweise der verschiedenen Strukturebenen (mikroskopische, mesoskopische und makroskopische Betrachtung) zurückgegriffen. Beim Einbau ist das makromechanische Verhalten des Asphalts entscheidend, da hier der Asphalt transportiert (Kratzkettenförderband und Schnecke) und verdichtet (Einbaubohle) wird. Der Haftreibungsbeiwert innerhalb des Materials wurde als zu untersuchender Asphaltparameter ausgewählt, da dieser einen Einfluss auf den Einbau hat und bereits vorhandene physikalische Versuchsaufbauten existieren, um den Parameter zu ermitteln.

Im **zweiten Teilziel** (Beurteilung und Auswahl eines geeigneten Modellierungsansatzes zur Darstellung des heißen Asphalts sowie der softwaremäßigen Umsetzung des Modellierungsansatzes) wurde für die Modellierung des heißen Asphalts ein partikelmechanischer Ansatz (Diskrete Elemente Methode) gewählt. Da mit diesem Ansatz Inhomogenitäten abgebildet werden können, kohäsive Stoff- bzw. Kontaktmodelle vorhanden sind und der Modellierungsansatz als Software vorhanden ist. Für die Umsetzung der Diskrete Elemente Methode wurde die Software EDEM[®] ausgewählt.

Mit Hilfe einer Auswahlliste und den Kriterien Dichtheit, Beheizbarkeit und einfache Durchführung von mehrfachen Messungen wurde das **dritte Teilziel** (Beurteilung und Auswahl eines physikalischen Versuchsaufbaus zur Messung des ausgewählten Asphaltparameters) untersucht. Die Ringscherzelle nach SCHULZE erfüllt alle Kriterien. Der Prüfstand wurde mit Stahlkugeln validiert. Die Abweichung zum Referenzwert betrug maximal 13 %. Als zugrunde liegender Referenzwert für die Materialpaarung Stahl-Stahl wurde der Haftbeiwert für entfettete Stahl-Stahl-Querpressverbände in Längsrichtung genommen. Hierbei handelt es sich um einen Linienkontakt, der dem idealisierten Punktkontakt, wenn sich die Stahlkugel berühren, näherungsweise entspricht.

Für das **vierte Teilziel** (Auswahl des zu untersuchenden Mischguts) wurden fünf Mischgüter experimentell untersucht, wobei drei der untersuchten Mischgüter Bitumen als Bindemittel hatten. Bei einem der drei Mischgüter handelt es sich um einen realen Straßenbauasphalt. Dieses wird als Mischgut 5 bezeichnet. Hierbei handelt es sich um Asphaltbeton (Asphalt Concrete) AC, der als Deckschichtmaterial (D) bei leichten Belastungen (L) eingesetzt wird. Die obere Siebgröße beträgt 5 mm und das darin enthaltene Bitumen ist 70/100. Dieses Material wurde gewählt, weil die AC-Mischgüter keine Zusätze enthalten. Die betreffende Korngröße wurde aufgrund der Abhängigkeiten/Restriktionen zwischen der Simulationszeit, dem Proberaumvolumen und dem Partikeldurchmesser ausgewählt.

Die anderen Mischgüter dienen zum einen dazu, eine Abschätzung über das unbekanntes Verhalten des Bindemittels Bitumen zu erhalten. Zum anderen soll mit den Mischgütern eine Aussage über die Modellierbarkeit der Spreizung der Korngrößenverteilung getroffen werden. Die Experimente wurden sowohl in realer Umgebung als auch in simulativer Umgebung durchgeführt. Die realen Experimente dienen der Identifikation von Parametern und werden auch als Referenzmessung für die Simulationsergebnisse verwendet. Da keine Referenzwerte für die realen Untersuchungen vorhanden sind, wurde die Untersuchungsanzahl an den Mischgütern erhöht, um eine signifikante Aussage der Messergebnisse zu erhalten. Bei den Untersuchungen zu den Mischgütern ohne Bindemittel wurden Messungen mit 30 Wiederholungen durchgeführt, für die Untersuchungen an den Mischgütern mit Bitumen Messungen mit jeweils 50 Wiederholungen. Mischgut 1 hat die gleiche Korngrößenverteilung wie der Straßenbauasphalt, jedoch ohne Bindemittel. Mischgut 2 ist auch ohne Bindemittel. Hier handelt es sich um einen Filterkies mit der Korngrößenverteilung von 3,15-5,6 mm. Das dritte Mischgut ist der Filterkies aus Mischgut 2 mit Bitumen als Bindemittel. Für das vierte Mischgut wurden Stahlkugeln mit Bindemittel versetzt. Dieses Mischgut wurde für die Untersuchungen zum Bindemittelverhalten generiert. Bei den beiden Mischgütern (Mischgut 3 und Mischgut 4) wurden die gleiche Bitumenart und -menge wie beim realen Straßenbauasphalt verwendet.

Im **fünften Teilziel** (Experimentelle Untersuchungen und Parameterstudie für den gewählten Modellierungsansatz) wurden die verschiedenen Mischgüter bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht und mittels DEM modelliert.

Die Mischgüter ohne Bitumen wurden bei Raumtemperatur (26 °C) untersucht, wohingegen die Experimente bei den Mischgütern mit Bitumen im Temperaturbereich von 80 °C bis 160 °C durchgeführt wurden. Die Schrittweite zwischen den Messreihen beträgt 20 °C. Bei den realen Untersuchungen weisen die Mischgüter ohne Bitumen eine große Streuung auf, dies lässt sich durch die große Spreizung der Korngrößen erklären. Darüber hinaus liegen sich die Messwerte der beiden Mischgüter in einem ähnlichen Wertebereich, obwohl die Korngrößenverteilung und die Kornform sehr unterschiedlich sind. Mischgut 1 hat einen großen Feinanteil, d. h. ca. 48 Ma-% der Mischung sind kleiner gleich 1 mm. Die vorhandenen größeren Körner, die zum großen Teil aus Grauwacke besteht, sind sehr spitz, scharfkantig und haben eine sehr raue Oberfläche. Bei Mischgut 2 handelt es sich um Filterkies (3,15-5,6 mm). Über die Hälfte der Korngrößen liegt zwischen 4,0 mm und 5,6 mm, die Kornform ist relativ quadratisch ohne scharfe Kanten und die Oberfläche ist glatter im Vergleich zur Grauwacke.

Bei den Mischgütern mit Bitumen ist die Streuung wesentlich kleiner und die Messwerte reduzieren sich durch das Bindemittel deutlich. Die Messwerte weisen eine deutliche Temperaturabhängigkeit auf. Bei hohen Temperaturen sind die Messwerte kleiner als bei niedrigeren Temperaturen.

Bei einer Erhöhung der Zeit zwischen den Messungen konnte das aus der Literatur bekannte „Selbsteilungsverhalten“ beobachtet werden. Die sogenannte „Selbsteilung“ bei bitumenhaltigen Materialien bedeutet, dass sich Risse oder ähnliche Schädigungen wieder verschließen können. Dieser Vorgang wird erst ab einer bestimmten Temperatur beobachtet und ist darauf zurückzuführen, dass der Bitumen ab dieser Temperatur die Fähigkeit besitzt sich wieder verbinden zu können. Ab 120 °C und einer längeren Wartezeit sind die Messwerte im Vergleich zu

den Messwerten mit kürzerer Wartezeit erhöht. Bei 160 °C liegen die Messwerte ca. 60 % über den Messwerten mit kurzer Wartezeit. Daher liegt der Schluss nahe, dass es sich hierbei um das bekannte „Selbsteilungsverhalten“ handelt.

Für die simulative Untersuchung wurden die Simulationswiederholung, die Korngrößenverteilung, der Vertikalabstand, der Zeitschritt, die Modellierung des Kontaktmodells und der Einfluss der verschiedenen Parameter untersucht. Für die jeweiligen Untersuchungen kamen unterschiedliche Mischgüter zum Einsatz, abhängig vom jeweiligen Untersuchungsfokus.

Für die Untersuchung über die notwendige Anzahl an Wiederholungen wurden die Mischgüter mit Bitumen eingesetzt. Hierbei zeigte sich, dass durch fünf Simulationswiederholungen eine grundlegende Einordnung des Wertebereichs für die Simulation möglich ist. Bei stark schwankenden Simulationsergebnissen wurden zwölf Wiederholungen durchgeführt.

Die Modellierung der Korngrößenverteilung bei Mischgütern ohne Bitumen hat gezeigt, dass sich die Simulationsergebnisse für die verschiedenen Partikelverteilungen sehr ähnlich sind und in einem engen Wertebereich liegen. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass die verschiedenen Partikelverteilungen als gleichwertig anzusehen sind. Für den weiteren Verlauf der Arbeit wird angenommen, dass die verschiedenen Korngrößenverteilungen sich auch bei anderen Kontaktmodellen ähnlich verhalten. Deshalb wurde für weitere Simulationen die Partikelverteilung gewählt, die mit dem geringsten simulativen Aufwand verbunden wurde.

Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass die Modellierung hier wichtige Aspekte nicht abbildet, da die Simulationsergebnisse und die Referenzwerte sehr weit voneinander entfernt sind. Die Modellierung bildet die Kornform, die Topologie der Oberfläche und die Korngrößenverteilung nur vereinfacht ab. Da feinere Korngrößen keinen entscheidenden Beitrag zum Versetzungswiderstand leisten und die gewählte Korngrößenverteilung nur die feineren Korngrößen nicht abbildet, kann davon ausgegangen werden, dass die Kornform und die Topologie der Oberfläche die entscheidenden Faktoren sind.

Zur Beobachtung der Einflussnahme des Vertikalabstandes auf das Simulationsergebnis sind verschiedene Simulationen mit verschiedenen Korngrößenverteilungen und Kontaktmodellen durchgeführt worden. Hierbei hat sich zum einen gezeigt, dass mit steigendem Vertikalabstand (L_V), unabhängig vom Kontaktmodell, sowohl das Haltemoment als auch die Statornormalkraft absinkt. Zum anderen ist deutlich zu sehen, dass der Vertikalabstand mit dem Kontaktmodell und den gewählten Parametern einen großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat.

Bei den Untersuchungen zu den Zeitschritten hat sich herausgestellt, dass der Zeitschritt geringer ausfallen muss als in der Literatur vorgeschlagen. In den verschiedenen Veröffentlichungen wird der Zeitschritt über die Theorie von RAYLEIGH berechnet. Der berechnete Wert wird noch um einen empirisch ermittelten Faktor reduziert, da die Theorie nach RAYLEIGH nur den Fall beschreibt, dass ein Körper mit einem anderen Körper in Kontakt ist, jedoch nicht, dass ein Körper in Kontakt mit mehreren Körpern stehen kann. Die verschiedenen Veröffentlichungen schlagen einen empirisch ermittelten Faktor vor, der im Bereich zwischen 20 % und 40 % liegt. Für die Mischgüter 3 und 5 wurde der empirische Faktor mit 8 % angenommen. Zum einen verändert sich ab diesem Wert das Simulationsergebnis nicht mehr signifikant. Zum anderen zeigt sich, dass wenn der empirische Faktor und damit auch der Zeitschritt klein genug gewählt sind, um

alle Partikelinteraktionen zu detektieren, dass sich dann der charakteristische Momentenverlauf beim Abscheren reproduzieren lässt. Für das Mischgut 4 lag der empirische Faktor bei 16 %.

Zur Ermittlung eines geeigneten Kontaktmodells, welches das Verhalten des Bitumens abbilden soll, sind zwei Modelle miteinander verglichen worden. Dies war das Kontaktmodell von JKR und das EEPA-Kontaktmodell. Das EEPA-Kontaktmodell wiederum existiert sowohl in linearer Form als auch in nicht linearer Form. Diese beiden Ausprägungen wurden auch verglichen. Die Untersuchungen wurden am Mischgut 4 vorgenommen, da bei diesem Mischgut die Werkstoffkennwerte der verwendeten Partikel (Stahlkugeln) und die Korngrößenverteilung bekannt sind. In Voruntersuchungen wurden die unbekannt Parameter (*Restitutionszahl*, *Rollreibungszahl* und *Vertikalabstand*) ermittelt und auf die verschiedenen Modelle übertragen.

Der Vergleich hat gezeigt, dass das lineare EEPA-Kontaktmodell sehr gut für die Modellierung von Asphalt geeignet ist, da zum einen das lineare EEPA-Kontaktmodell ca. 20 % kürzerer Simulationszeiten aufweist, im Vergleich zu dem nicht linearen EEPA-Kontaktmodell. Zum anderen war die Abweichung bezogen auf die ermittelten Referenzwerte aus den physikalischen Messungen geringer als beim JKR-Kontaktmodell. Die Abweichung beim Statorhaltemoment betrug ca. 10 %, wohingegen die Abweichung beim JKR-Kontaktmodell bei 12 % lag. Für die Normalkraft lagen die Abweichungen beim lineare EEPA-Kontaktmodell bei ca. 14 %, das JKR-Kontaktmodell erreichte ca. 31 % . Die Ursache für den Unterschied zwischen dem EEPA-Kontaktmodell (lineare und nicht lineare) und dem JKR-Kontaktmodell liegt sehr wahrscheinlich in der Tatsache begründet, dass das EEPA-Kontaktmodell zum einen die Be- und Entlastung abbildet und zum anderen in den normalen und tangentialen Modellgleichungen dissipative Anteile hat. Da jedoch keine Untersuchungen auf mikroskopischer Ebene durchgeführt werden können, handelt es sich bei der Lokalisierung der Be- und Entlastung lediglich um eine Vermutung. Die Ursache ungeeigneter Startparameter beim JKR-Kontaktmodell konnte durch einen vollständig faktoriellen Versuchsplan ausgeschlossen werden. Es zeigte sich eine Verbesserung durch die geänderten Startparameter, aber trotzdem hatte das lineare EEPA-Kontaktmodell die geringere Abweichung.

Für die Analyse der Parametereinflüsse beim EEPA-Kontaktmodell wurde ein vollständig faktorieller Versuchsplan eingesetzt. Der Versuchsplan hat gezeigt, dass der Parameter *Entlastungssteifigkeit* eine sehr dominante Rolle einnimmt und dass der von der Literatur vorgeschlagene Wertebereich der *Kohäsionssteifigkeit*, bezogen auf die gewählten Parameter aus den Voruntersuchungen zu groß ist. In den verschiedenen Veröffentlichungen wird ein Bereich zwischen 0,1-100 kN/m vorgeschlagen. Für die Simulation hat sich gezeigt, dass die *Kohäsionssteifigkeit* mit 0,1 N/m angenommen werden kann. Die Ursache für die Diskrepanz zwischen dem gewählten Wert und dem in den Veröffentlichungen vorgeschlagenen Wertebereich ist sehr wahrscheinlich darauf zurück zu führen, dass die *Restitutionszahl*, die *Rollreibungszahl* und der *Vertikalabstand* aus den Voruntersuchungen übernommen worden sind.

Durch das Einbringen von Ergebnissen aus Voruntersuchungen wird der Lösungsraum eingeschränkt. Dieses Vorgehen eröffnet jedoch die Möglichkeit, sowohl die Simulationszeit als auch die Simulationsdurchläufe stark zu reduzieren. Vor allem vor dem Hintergrund, dass es bei der DEM-Simulation mehrere mögliche Parameterkombinationen gibt, die zum Ziel führen, erscheint dieses Vorgehen sinnvoll. Im Fall der Modellierung des Verhaltens von Bitumen hat sich das Vorgehen als geeignet erwiesen.

In die Modellierung von Mischgut 5 sind die Ergebnisse aus den Themenfeldern *Zeitschritt*, *Korngrößenverteilung* und *Kontaktmodell* eingeflossen. Für die Einflussnahme der verschiedenen Parameter wurden ein fraktioneller faktorieller Versuchsplans durchgeführt. Hierbei kam der 2^{5-1} Versuchsplan zum Einsatz. Bei drei Parameterkombinationen konnte eine gute Übereinstimmung zwischen der Realität und der Simulation erzielt werden. Die Abweichungen lagen beim Haltemoment zwischen 2 % und 14 % und bei der Normalkraft zwischen zwischen 6 % und 10 %. Die Auswertung der Effekte ergab, dass die *Entlastungssteifigkeit* und die *Restitutionszahl* wichtige Parameter sind, die einen relevanten Einfluss auf das Ergebnis haben. Sowohl bei der Analyse des Kontaktmodells als auch von Mischgut 5 wurde die *Entlastungssteifigkeit* als ausschlaggebender Parameter identifiziert.

Im **sechsten Teilziel** (Übertragbarkeit der Simulationsparameter) wurde die Überprüfung der Übertragbarkeit von Modellierungsparametern zwischen Mischgut 5 und Mischgut 3 untersucht. Hierbei wurden die Parameter von Mischgut 5 verwendet, die eine gute Übereinstimmung erzielten. Diese Parameter wurden auf das Modell von Mischgut 3 übertragen. Die Ergebnisse zeigen, dass die verwendeten Parameter als Ausgangs- bzw. Startpunkt für eine Parameterbestimmung geeignet sind. Die Abweichungen bewegen sich im Bereich zwischen 8 % und 85 % für das Haltemoment und zwischen 21 % und 81 % bei der Normalkraft. Es zeigt sich aber auch, dass bereits geringe Änderungen zwischen den Modellen zu großen Abweichungen in den Ergebnissen führen. Somit kann geschlussfolgert werden, dass wenn sich die Modelle, die Skalierung oder die Anwendung von der ursprünglichen Parametrierungsmethode nur geringfügig unterscheiden, dass dann die zuvor ermittelte Parameterkombination und -werte nur eingeschränkt verwendet werden können. Daher muss bei jeder Anwendung die Parameterermittlung von neuem beginnen. Aufgrund dieser Tatsache ist es schwierig Erkenntnisgewinne auf neue Fragestellungen zu übertragen. Daher erscheint es sinnvoll für zukünftige Simulationsprozesse den Parameterermittlungsprozess zu optimieren, wie RACKL vorschlägt.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Recherche zu den Publikationen im Bereich des Straßenbaus, hierbei im speziellen zum Einbauprozess, bestätigt den Eindruck, dass die mathematische Beschreibung der auftretenden Zusammenhänge im Einbauprozess und die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema als fragmentarisch bezeichnet werden kann. Hierbei ist vor allem das Verhalten des Asphalts ursächlich zu nennen. Aufgrund dessen war das Ziel dieser Arbeit, einen relevanten Asphaltbauparameter zu identifizieren und diesen Parameter mittels eines geeigneten experimentellen Aufbaus zu untersuchen und mit einer Simulationsumgebung zu modellieren. Dementsprechend wurde die Forschungsfrage wie folgt formuliert:

Wie ist es möglich einen Asphaltparameter, der beim Einbau eine Rolle spielt, zu identifizieren und mittels eines Prüfstandes im Labormaßstab zu quantifizieren sowie das Asphaltverhalten modellierungstechnisch abzubilden?

Als Asphaltparameter wurde der Haftreibungsbeiwert innerhalb des Materials ausgewählt, da dieser einen Einfluss auf den Einbau hat. Zur Bestimmung dieses Parameters wurde der Ringscherzellenversuch nach SCHULZE auf die gegebenen Anforderungen adaptiert.

Die Modellierung des heißen Asphalts wurde der Diskrete Elemente Methode durchgeführt, da mit diesem Ansatz Inhomogenitäten abgebildet werden können, kohäsive Stoff- bzw. Kontaktmodelle vorhanden sind und der Modellierungsansatz als Software vorhanden ist. Die Umsetzung erfolgte mit der Software EDEM[®].

Für die Untersuchungen wurde das Deckschichtmaterial *AC 5DL* ausgewählt. Die obere Siebgröße beträgt 5 mm und das darin enthaltene Bitumen ist 70/100. Neben dem originalen Mischgut wurden noch weitere Mischgüter untersucht, es waren insgesamt fünf Mischgüter. Bei den zusätzlichen verwendeten Mischgütern handelt es sich nicht um Mischgüter, die im Straßenbau eingesetzt werden, sondern diese Mischgüter wurden erzeugt, um die zu untersuchende Größe (Bitumeneigenschaft, Spreizung der Korngrößenverteilung, Kornform) möglichst wechselwirkungsfrei beobachten zu können. Mischgut 1 hat die gleiche Korngrößenverteilung wie AC 5 DL, jedoch ohne Bitumen. Für Mischgut 2 und Mischgut 3 wurde ein Filterkies mit einer engeren Korngrößenspreizung (3,15 - 5,6 mm) verwendet, wobei Mischgut 3 mit Bitumen versetzt worden ist. Das vierte Mischgut besteht aus Stahlkugeln und ist mit Bitumen versetzt. Bei Mischgut 3 und Mischgut 4 wurde Bitumen 70/100 verwendet und die verwendete Menge entspricht den Ma.-% wie bei AC 5 DL. Das fünfte Mischgut ist AC 5 DL.

Die Mischgüter 1 und 2 wurden ausgewählt, um zu untersuchen, inwieweit sich verschiedenen Korngrößen, Kornformen und Korngrößenverteilungen auf die Ergebnisse auswirken. Die Mischgüter wurden auch verwendet um bei der Simulation eine Skalierung und Verschiebung der Korngrößenverteilung durch verschiedene Modellierungsansätze zu untersuchen. Mischgut 3 wurde hergestellt, um bei der Simulation die Übertragbarkeit von Modellierungsparametern zu

untersuchen. Das vierte Mischgut wurde verwendet, um die Eignung der verschiedenen Kontaktmodelle bei der Simulation zu überprüfen, da ein großer Teil der Parameter zu den Stahlkugeln bekannt ist bzw. aus Voruntersuchungen ermittelt werden kann.

Die Versuche mit *AC 5DL* wurden im Temperaturbereich zwischen 80 °C und 160 °C durchgeführt mit einer Schrittweite zwischen den Messreihen von 20 °C. Um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, dass in den Versuchsproben das gesamte Korngrößenspektrum vorhanden ist, wurden drei Proben aus einer hergestellten Charge untersucht. Dem Umstand von fehlenden Referenzwerten in der Literatur wurde dadurch Rechnung getragen, dass bei jeder Probe über den gesamten Temperaturbereich vermessen worden ist. Hierzu wurde zu jeder Temperatur eine Messreihe bestehend aus 50 Einzelmessungen durchgeführt.

Die Ergebnisse bei den verschiedenen Temperaturen bestätigen die Temperaturabhängigkeit des Materials. Das arithmetische Mittel für den Haftreibungsbeiwert liegt bei 80 °C bei $1,5 \pm 0,23$. Er sinkt mit steigender Temperatur und erreicht bei 160 °C einen Wert von $0,8 \pm 0,17$.

Durch eine Änderung im Versuchsablauf konnte ein Effekt beobachtet werden, der aus der Literatur als „Selbstheilungsverhalten“ bekannt ist. Hierzu wurde die Zeit zwischen den Einzelmessungen von 5 auf 20 Sekunden erhöht. Durch diese Erhöhung hat der Bitumen Zeit sich wieder zu verbinden. Bei 160 °C und 20 Sekunden Wartezeit sind die Messwerte ca. 60 % größer als bei der Wartezeit von 5 Sekunden. Dieser Vorgang tritt ab 120 °C auf.

Aufgrund der Anzahl an Simulationsparametern und da für die Modellierung des heißen Asphalts keinerlei Referenzwerte vorhanden sind, wurden für Parameterstudien und die Quantifizierung des Einflusses der verschiedenen Parameter sowohl der vollständige faktorielle als auch der fraktionelle faktorielle Versuchsplan eingesetzt.

Zur Ermittlung eines geeigneten Kontaktmodells, welches das kohäsive Verhalten des Bitumens abbilden soll, wurden das Kontaktmodell von JKR und das EEPA-Kontaktmodell miteinander verglichen. Das EEPA-Kontaktmodell wiederum existiert sowohl in linearer Form als auch in nicht linearer Form. Diese beiden Ausprägungen wurden auch verglichen. Der Vergleich hat gezeigt, dass das lineare EEPA-Kontaktmodell sich sehr gut für die Modellierung von Asphalt eignet. Zum einen hat die lineare Form des EEPA-Kontaktmodell ca. 20 % weniger Simulationszeit gebraucht, als die nicht lineare Form. Zum anderen waren die Abweichung beim Statorhaltmoment und bei der der Normalkraft geringer als beim JKR-Kontaktmodell, bezogen auf die ermittelten Referenzwerte aus den physikalischen Messungen.

Die Modellierung der Korngrößenverteilung hat gezeigt, dass die Simulationen bei verschiedenen Partikelverteilungen sehr ähnlich sind und in einem engen Wertebereich liegen. Hieraus wurde geschlossen, dass die verschiedenen Partikelverteilungen als gleichwertig anzusehen sind. Die weiteren Simulationen wurden daher mit der Partikelverteilung vorgenommen, die mit dem geringsten simulativen Aufwand verbunden waren.

Für die Modellierung des Mischgutes AC 5 DL wurden die Ergebnisse aus Voruntersuchungen eingebracht, was zur Folge hat, dass sich der Lösungsraum verkleinert, aber die Simulationszeit und -durchläufe reduziert werden. Vor dem Hintergrund, dass es bei der DEM-Simulation mehrere mögliche Parameterkombinationen gibt, die zum Ziel führen, wurde dieses Vorgehen als sinnvoll erachtet. Mit Hilfe der Versuchspläne wurden drei Parameterkombinationen gefunden, die eine gute Übereinstimmung zwischen den physikalischen Messergebnissen und der Simulati-

on aufweisen. Die Abweichungen lagen beim Haltemoment zwischen 2 % und 14 % und bei der Normalkraft zwischen 6 % und 10 %. Die Parameterstudie zeigte, dass die Parameter *Entlastungssteifigkeit* und *Restitutionszahl* einen großen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben. Zur Überprüfung der Übertragbarkeit von Simulationsparametern wurden die Modellierungsparameter von Mischgut 5 auf Mischgut 3 übertragen. Hierzu wurden die drei Parameterkombinationen verwendet, die eine gute Übereinstimmung erzielten. Die Ergebnisse weichen beim Haltemoment zwischen 8 % und 85 % ab. Für die Normalkraft liegt die Abweichung zwischen 21 % und 81 %. Durch diese Ergebnisse liegt die Schlussfolgerung nahe, dass eine direkte Übertragung von Modellierungsparametern nur sehr eingeschränkt möglich ist, aber als Ausgangs- bzw. Startpunkt für eine Parameterbestimmung verwendet werden kann.

Einordnung der Forschungsergebnisse in den simulativen Kontext und für den realen Bezug

Simulativer Kontext

Die Modellierung von heißem Asphalt ist mit dem Kontaktmodell nach EDINBURGH ELASTO-PLASTIC ADHESIVE möglich.

Bei den Mischgütern ohne Bitumen zeigt sich, dass die Vereinfachung der Form der Gesteinskörner als runde Partikel an ihre Grenzen stößt, da die Simulationsergebnisse und die realen Ergebnisse sehr weit voneinander entfernt sind. Daher lässt sich vermuten, dass bei der Modellierung wichtige Aspekte nicht abgebildet wurden. Da weder die Partikelform noch die Oberflächenbeschaffenheit modelliert wurden, scheinen diese beiden Werkstoffparameter beim Abscherprozess ohne Bitumen eine wichtige Rolle zu spielen. Wird jedoch Bitumen zugesetzt zeigt sich, dass die Vereinfachung der Gesteinskörner bei den Mischgütern mit Bitumen sehr gut funktioniert. Daher kann angenommen werden, dass der Bitumen die Gesteinskörner umhüllt und der Einfluss der Form und der Topologie der Oberfläche stark reduziert wird.

Aufgrund des großen Lösungsraums bei den Parametern ist es möglich, Ergebnisse aus Voruntersuchungen zu verwenden (Teilziel 5). Dadurch können Versuche und Simulationszeit reduziert werden. Die Verwendung der Ergebnisse aus Voruntersuchungen schränken jedoch im weiteren Verlauf des Prozesses die Parameterwerte ein, was zur Folge haben kann, dass die notwendigen Parameterwerte von den Parameterwerten aus der Literatur stark abweichen können. Die Ergebnisse aus Teilziele 6 zeigen jedoch auch, dass eine direkte Übertragung von Modellierungsparametern nur bedingt funktioniert und es nur bedingt möglich ist Erkenntnisgewinne auf neue Fragestellungen zu übertragen.

Realer Bezug

Der Versuchsaufbau nach SCHULZE kann zur Bestimmung von Asphaltparametern verwendet werden. Die Messungen zeigen in welchem Wertebereich die Werkstoffparameter liegen, wie der Einfluss der Temperatur ist und wie der Bitumen auf die Messwerte wirkt. Anhand dessen können jetzt auch weitere Abschätzungen zu anderen Werkstoffparametern erfolgen, wie z. B. dem Halftreibungsbeiwert zwischen Stahl und Asphalt. Das Wissen über die verschiedenen Reibungsbeiwerte kann dazu beitragen dem Prozess der Entmischung entgegenzuwirken. Mit diesem Wert können jetzt vorhandene analytische Berechnungen verfeinert werden, wie z. B. benötigter Zugkraftbedarf oder Kräfte an der Schnecke bzw. dem Kratzkettenförderband. Die Kräfte wiederum können zu einer besseren Dimensionierung der jeweiligen Motoren verwendet werden.

Ausblick

Zukünftige experimentelle Untersuchungen sollten weitere Mischgüter untersuchen, um eine Aussage darüber zu erhalten, inwieweit der ermittelte Haftreibungskoeffizient auch auf andere Asphaltmischungen insbesondere Mischgüter mit größeren Korngrößen und anderen Bitumenarten übertragen werden kann. Von Interesse ist hierbei, ob einen Zusammenhang zwischen dem Haftreibungskoeffizient und der Bitumenart besteht oder ob es eine Korrelation mit der Korngröße gibt.

Um ein besseres wissenschaftliches Verständnis über den Einbauprozess zu erhalten, müssen in einem ersten Schritt Hypothesen über die Zuordnung der unterschiedlichen Einflussfaktoren aufgestellt werden, z. B. dass die benötigte Zugkraft maßgeblich von der Höhe des Haufwerks vor der Bohle abhängig ist¹. Diese Hypothesen müssen dann mit geeigneten physikalischen Versuchen überprüft werden. Das Ziel dieser Untersuchungen muss sein herauszufinden, welche Einflussfaktoren an welchen Stellen dominant sind bzw. vernachlässigt werden können. Die physikalischen Versuche bieten gleichzeitig die Chance, als Referenz- und Kalibrierungsmessung für Simulationen verwendet werden zu können. Vor allem vor dem Hintergrund, dass es schwierig ist, an Messungen beim Einbau zu gelangen, die als Orientierungs- und Referenzmessungen dienen.

Aber die Modellierung des Werkstoffverhaltens ist ein sehr wichtiger Schritt, um in Zukunft den Einbauprozess als Prozesssimulation abzubilden. Dadurch besteht die Möglichkeit, den Prozess gezielt untersuchen zu können, wodurch der vorhandene Wissensstand verbessert und die auftretenden Zusammenhänge klar aufgezeigt werden. Das bessere Verständnis des Einbauprozesses ermöglicht eine höhere Qualität des Einbaus. Die bessere Qualität kann die Nutzungsdauer der Straßen erhöhen und dadurch Kosten einsparen. Nach HALBRÜGGE, der mit Hilfe einer einfachen Überschlagsrechnung den wirtschaftlichen Nutzen quantifiziert², lassen sich durch die Nutzungsdauerverlängerung bis zu 440 Mio. Euro pro Jahr einsparen (Halbrügge 2018, S. 2). Darüber hinaus kann die Prozesssimulation dazu beitragen den Einbauprozess besser zu verstehen, damit der Einbauprozess in Zukunft (teil-) automatisiert ablaufen kann, denn der Asphalteinbauprozess bietet laut ULRICH, HEIKKILÄ und MIKA sehr großes Potential zur Automatisierung (Ulrich 1996, S. 722), (Heikkilä und Mika 2003, S. 108).

Sicher steht hier die Entwicklung noch am Anfang und zurzeit erscheint die Automatisierung noch in weiter Ferne, da der Einbauprozess noch nicht gut wissenschaftlich durchdrungen ist und viele Zusammenhänge unerforscht sind. Hierfür müssen unter anderem die relevanten Maschinenparameter messtechnisch erfasst werden und in einen Zusammenhang gebracht werden. Durch das messtechnische Erfassen der relevanten Maschinenparameter besteht auch die Möglichkeit den Einbauprozess mittels maschinellen Lernen zu verbessern, z. B. durch künstliche neuronale Netze. Im landwirtschaftlichen Kontext und bei Baumaschinen gibt es erste Ansätze und Forschungslösungen zum Einsatz von maschinellen Lernen, siehe (Stein und H. J. Meyer 2018) (Wydra u. a. 2020). Jedoch lohnt es sich Anstrengungen in die wissenschaftliche Durch-

¹Dieses Beispiel dient nur zur Veranschaulichung. Dem Autor ist bewusst, dass die Zugkraft während des Einbaus dynamisch ist und von vielfältigen Faktoren abhängt (Höhe des Haufwerks, Temperatur des Mischguts, Stellung des Schnecke, etc.)

²Hierbei hat HALBRÜGGE angenommen, dass 550 km Straße pro Jahr weniger saniert werden müssen, aufgrund der besseren Qualität. Die Kosten pro Kilometer Straße (zwei Fahrstreifen) wurden mit 800 000 Euro angenommen.

dringung von Bau-Prozessen (Erdbau und Straßenbau) zu unternehmen. Denn wie aus dem Finanzbericht 2020 hervorgeht, sollen in den nächsten Jahren (2020 bis 2023) durchschnittlich 10,641 Mrd. Euro in die Bundesfernstraßen investiert werden (BMF 2019, S. 21). Anhand dieser Zahlen wird ersichtlich, welchen Stellenwert und welches Volumen der Straßenbau einnimmt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Ziel der Wirtschaft und Wissenschaft sein muss, den Einbauprozess besser wissenschaftlich zu durchdringen. In den Bau-Prozessen (Erdbau und Straßenbau) liegen noch große Potentiale verborgen, da sich diese Prozesse in den letzten Jahrzehnten nicht grundlegend geändert haben und eine wissenschaftliche Betrachtung nicht stattgefunden hat, weder von einzelnen Prozessen noch vom gesamten Bauprozess. Durch ein besseres Verständnis und einen gesamtheitlichen Blick können Innovationen entstehen, die z. B. die Prozesse beschleunigen oder auch Material einsparen. Die Schonung von Ressourcen trägt zur Reduktion von CO_2 -Emissionen bei.

Literatur

- ADAC e.V. (2020). *Staubilanz 2019 – So lange standen die Deutschen im Stau*. URL: <https://www.adac.de/verkehr/verkehrsinformationen/staubilanz/> (besucht am 01.04.2020).
- Ahn, D. und K. R. Shull (1996). “JKR studies of acrylic elastomer adhesion to glassy polymer substrates”. In: *Macromolecules* 29.12, S. 4381–4390.
- Ai, J., J.-F. Chen, J. M. Rotter und J. Y. Ooi (2011). “Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations”. In: *Powder Technology* 206.3, S. 269–282. ISSN: 00325910. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.09.030.
- Alder, B. J. und T. E. Wainwright (1957). “Phase Transition for a Hard Sphere System”. In: *The Journal of Chemical Physics* 27.5, S. 1208–1209. ISSN: 0021-9606. DOI: 10.1063/1.1743957.
- Arand, W. und H. Lorenzl, Hrsg. (1995). *Einfluß der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung und der Temperatur, Teil 2*. Schriftreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 696.
- Arand, W., H. Milbradt und G. Steinhoff (1989). *Untersuchung der Wirksamkeit von Hochverdichtungsbohlen durch Feldmessungen auf laufenden Baustellen: Schlußbericht*. Hrsg. von Institut für Straßenwesen Technische Universität Braunschweig. Braunschweig.
- Bamberg, G., F. Baur und M. Krapp (2012). *Statistik*. 17th ed. Oldenbourg Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- U. Sozialwissenschaften Ser. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH. ISBN: 978-3-486-71747-1. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5117541>.
- Barrios, G. K.P., R. M. de Carvalho, A. Kwade und L. M. Tavares (2013). “Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling”. In: *Powder Technology* 248, S. 84–93. ISSN: 00325910. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.01.063.
- Benvenuti, L., C. Kloss und S. Pirker (2016). “Identification of DEM simulation parameters by Artificial Neural Networks and bulk experiments”. In: *Powder Technology* 291, S. 456–465. ISSN: 00325910. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.01.003.
- Blumer, M. (1965). “Der maschinelle Einbau bituminöser Beläge”. In: *Bitumen* 6, S. 160–168.
- BMF, Hrsg. (2019). *Finanzbericht 2020: Stand und voraussichtliche Entwicklung der Finanzwirtschaft im gesamtwirtschaftlichen Zusammenhang: Stand August 2019*. URL: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Broschueren_Bestellservice/finanzbericht-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (besucht am 16.06.2020).
- BMVI, Hrsg. (2016). *Verkehr und Mobilität in Deutschland*.
- Hrsg. (2020). *Autonom arbeitende Maschinen im Straßenbau 4.0 - ROBOT-Straßenbau 4.0*. URL: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/KI-Projekte/robot4-0.html> (besucht am 16.06.2020).

- Bode, K. H. und G.-P. Ostermeyer (2008). “Wechselwirkung bewegter Temperaturfelder mit Zellulären Automaten”. In: *PAMM* 8.1, S. 10365–10366. ISSN: 16177061. DOI: 10.1002/pamm.200810365.
- Bull-Wasser, R., H. Schmidt und H.-H. Weßelborg (2011). *ZTV/TL Asphalt-StB: Fassung 2007 ; unter Berücksichtigung der Änderungen und Ergänzungen des ARS 29/2010 ; Handbuch und Kommentar*. 3. Aufl., Stand: März 2011. Bonn: Kirschbaum. ISBN: 9783781216808.
- Bundesanstalt für Straßenwesen, Hrsg. (2012). *Verbundprojekt "Leiser Straßenverkehr 2": Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche*. Bd. 74. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen S, Strassenbau. Bremerhaven und Hannover: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für neue Wiss und Techn. Informationsbibl. und Univ.-Bibl. ISBN: 978-3-86918-183-7.
- Hrsg. (2018). *Epoxy III-Elvaloy: Laufendes Forschungsprojekt*.
- Buttlar, W., J. Bauer und D. Sherman (2002). “Dynamic modulus of asphalt concrete with a hollow cylinder tensile tester”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1789, S. 183–190.
- Chen, F., D. Jelagin und M. N. Partl (2019). “Experimental and numerical analysis of asphalt flow in a slump test”. In: *Road Materials and Pavement Design* 20.S1, S446–S461. ISSN: 1468-0629. DOI: 10.1080/14680629.2019.1587495.
- Chen, J. (2011). “Discrete Elemente Method (DEM) Analyses for Hot-Mis Asphalt (HMA) Mixture Compaction”. Dissertation. Knoxville: University of Tennessee. URL: http://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/957/ (besucht am 06.08.2019).
- Coetzee, C. J. (2016). “Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape”. In: *Powder Technology* 297, S. 50–70. ISSN: 00325910. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.04.003.
- (2017). “Review: Calibration of the discrete element method”. In: *Powder Technology* 310, S. 104–142. ISSN: 00325910. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.01.015.
- Cundall, P. A. (1971). “A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems”. In: *Proc. Int. Symp. on Rock Fracture*, S. 11–18.
- Cundall, P. A. und O. D. L. Strack (1979). “A discrete numerical model for granular assemblies”. In: *Géotechnique* 29.1, S. 47–65. ISSN: 0016-8505. DOI: 10.1680/geot.1979.29.1.47.
- Dallinger, N. (2017). “Die Diskrete Elemente Methode als Simulationsmethode in der Vibrationsfördertechnik”. Dissertation. Technischen Universität Chemnitz. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-229364>.
- DEM Solutions Ltd. (2016). *EDEM 2017: Programming Guide*.
- (2017). *EDEM 2017: Documentation Creator*. Edinburgh.
- Deng, X. L. und R. N. Davé (2013). “Dynamic simulation of particle packing influenced by size, aspect ratio and surface energy”. In: *Granular Matter* 15.4, S. 401–415. ISSN: 1434-5021.
- Deutag Ost, Hrsg. (2017). *Rezeptur für Asphaltmischgut: AC 5DL*.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2001). *Pressverbände Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln*.
- (2002). *Wälzlager - Kugeln für Wälzlager und allgemeinen Industriebedarf*.
- (2009a). *DIN EN 12591 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Anforderungen an Straßenbaubitumen, Deutsche Fassung*. Berlin.
- (2009b). *Prüfung von Frischbeton - Teil 2: Setzmaß*. Berlin.

- Deutsches Institut für Normung e.V. (2015). *DIN EN 1426 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration, Deutsche Fassung*. Berlin.
- Dondi, G., V. Vignali, M. Pettinari, F. Mazzotta, A. Simone und C. Sangiorgi (2014). “Modeling the DSR complex shear modulus of asphalt binder using 3D discrete element approach”. In: *Construction and Building Materials* 54, S. 236–246. ISSN: 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.005.
- Dratt, M. (2016). *Kopplung von FEM- und DEM-Simulationen zur Analyse der Gut-Bauteil-Interaktionen in der Fördertechnik*. Logisch.
- Dronka, S. (2004). *Die Simulation gekoppelter Mehrkörper- und Hydraulik-Modelle mit Erweiterung für Echtzeitsimulation*. Berichte aus der Fahrzeugtechnik. Aachen: Shaker. ISBN: 9783832229801.
- Dynapac (2005). *Einbaugrundlagen für Straßenfertiger*.
- Eisenberg, W. und U. Renner (2006). “Zur Beschreibung grobgranularer Schüttgüter mit zellulären Automaten”. In: *ARCS 2004 - Organic and Pervasive Computing, Workshops Proceedings*.
- Erdmann, P. (2018). “Numerische Simulation des Verdichtungsvorganges in Böden mit dynamisch angeregten Walzen”. Dissertation. Berlin: TU Berlin.
- Fakhimi, A. und T. Villegas (2007). “Application of Dimensional Analysis in Calibration of a Discrete Element Model for Rock Deformation and Fracture”. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 40.2, S. 193–211. ISSN: 0723-2632. DOI: 10.1007/s00603-006-0095-6.
- Fakhri, M., P. T. Kheiry und A. A. Mirghasemi (2012). “Modeling of the permanent deformation characteristics of SMA mixtures using discrete element method”. In: *Road Materials and Pavement Design* 13.1, S. 67–84. ISSN: 1468-0629. DOI: 10.1080/14680629.2011.644080.
- Feng, H., M. Pettinari, B. Hofko und H. Stang (2015). “Study of the internal mechanical response of an asphalt mixture by 3-D discrete element modeling”. In: *Construction and Building Materials* 77, S. 187–196. ISSN: 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.022.
- Fenistein, D., J. W. van de Meent und M. van Hecke (2004). “Universal and wide shear zones in granular bulk flow”. In: *Physical review letters* 92.9, S. 094301. ISSN: 0031-9007. DOI: 10.1103/PhysRevLett.92.094301.
- Feuersänger, Ch. (2018). *Manual for Package pgfplots: Version 1.16*. URL: <https://ctan.org/pkg/pgfplots?lang=de> (besucht am 18.02.2019).
- FGSV, Hrsg. (2013). *Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen: TL Asphalt-StB 07/13*. Aug. 2007, Fassung 2013. Bd. 797. FGSV R1 - Regelwerke. Köln: FGSV-Verl. ISBN: 9783939715696.
- Friedrich, M. (1998). *Analyse des Schwerverkehrs und Quantifizierung seiner Auswirkungen auf die Strassenbeanspruchung mit Hilfe der Potenzregel*. Bd. H. 73. Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München. München: Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Techn. Univ.
- Fritz, A. (2001). “Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme”. Dissertation. Stuttgart: Universität.
- Gerhard, H. (2009). *Zusätze zu Asphalt: Möglichkeiten und Grenzen: Regenstauer Asphalt- und Straßenbau-Seminar 2009*. URL: https://www.ifbgauer.de/global/gfx/file/RAS_2009_Gerhard.pdf (besucht am 06.08.2019).

- Gerhardt, M. und H. Schuster (1995). *Das digitale Universum: Zelluläre Automaten als Modelle der Natur*. Facetten. Braunschweig: Vieweg. ISBN: 9783528066772.
- Ghafoori Roozbahany, E. (2017). *Flow behavior of asphalt mixtures under compaction*. Bd. 2017:07. TRITA-BYMA. KTH Royal Institute of Technology. ISBN: 9177296354. URL: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1165645/FULLTEXT02.pdf>.
- Ghafoori Roozbahany, E., M. N. Partl und D. Jelagin (2019). “Modelling the flow of asphalt under simulated compaction using discrete element”. In: *Construction and Building Materials* 227, S. 116432. ISSN: 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.158.
- Götz, S. (2006). *Gekoppelte CFD/DEM-Simulation blasenbildender Wirbelschichten: Dissertation*. Shaker. ISBN: 3-8322-5006-9.
- Grellmann, W. und S. Seidler, Hrsg. (2015). *Kunststoffprüfung*. 3., aktualisierte Aufl. München: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-44390-7. URL: <http://dx.doi.org/10.3139/9783446443907>.
- Gröger, T. (1999). *Partikelmechanische Untersuchungen zur senkrechten Schlauchgurtförderung*. Bd. Nr. 99,1. Berichte aus dem Institut / IFSL, Institut für Förder- und Baumaschinentechnik, Stahlbau, Logistik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg Forschungsberichte, Dissertationen. Magdeburg: Logisch. ISBN: 9783930385218.
- Gröger, T. und A. Katterfeld (2006). “Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttguttechnik: Grundlagen und Kalibrierung”. In: 12.7, S. 480–486.
- Gröger, T., U. Tüzün und D. M. Heyes (2003). “Modelling and measuring of cohesion in wet granular materials”. In: *Powder Technology* 133.1-3, S. 203–215. ISSN: 00325910. DOI: 10.1016/S0032-5910(03)00093-7.
- Günthner, W. und J. Fottner (2017). *DEM-Schüttgutdatenbank - Generierung einer Datenbank zur Kalibrierung von Schüttgütern für die DEM-Simulation von Förderanlagen: Forschungsbericht zu dem IGF-Vorhaben der Forschungsstelle(n) Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München : Abschlussbericht*. München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik Technische Universität München. ISBN: 978-3-941702-75-2.
- Halbrügge, Ch. (2018). “Strategien und technische Konzepte zur automatisierten Verdichtung von Walzasphalt”. Dissertation. Berlin: TU Berlin.
- Hanley, K. J., C. O’Sullivan, J. C. Oliveira, K. Cronin und E. P. Byrne (2011). “Application of Taguchi methods to DEM calibration of bonded agglomerates”. In: *Powder Technology* 210.3, S. 230–240. ISSN: 00325910. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.03.023.
- Heese, Ch. (2013). “Simulation des rheologischen Verhaltens von zementgebundenen einkornsystemen”. Dissertation. Kaiserslautern.
- Heikkilä, R. und J. Mika (2003). *Automatic Control of road Construction Machinery – Feasibility and Requirements*. Eindhoven, Holland. URL: http://www.iaarc.org/publications/proceedings_of_the_20th_iaarc/automatic_control_of_road_construction_machinery_feasibility_and_requirements.html.
- Hertz, H. (1882). “Ueber die Berührung fester elastischer Körper”. In: *Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelle’s Journal)* 1882.92, S. 156–171. ISSN: 0075-4102. DOI: 10.1515/crll.1882.92.156.

- Herz, E. und M. Vormwald (2006). "Simulation von Schädigungs- und Kriechvorgängen im Asphalt". In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 37.12, S. 1018–1025. ISSN: 09335137. DOI: 10.1002/mawe.200600094.
- Holling, H. und G. Gediga (2016). *Statistik - Testverfahren*. 1. Auflage. Bachelorstudium Psychologie. Göttingen: Hogrefe. ISBN: 9783840923029. URL: <http://elibrary.hogrefe.de/9783840923029>.
- Holling, H. und B. Schmitz, Hrsg. (2010). *Handbuch Statistik, Methoden und Evaluation*. Bd. / hrsg. von J. Bengel ... ; Bd. 13. Handbuch der Psychologie. Göttingen: Hogrefe. ISBN: 9783801718480. URL: <http://elibrary.hogrefe.de/9783840918483/U1>.
- Horn, A., H. Hameister, D. Pitzler und M. Cremer (2011). "Qualitätsverbesserungen beim Asphalteinbau-Einbau und Verdichtung von Asphalt (Teil 2)". In: *Bauportal* 8, S. 18–21. URL: www.baumaschine.de/fachzeitschriften/baumaschinen/bauportal_dateien/2011/heft8/a018_021.pdf/at_download/file (besucht am 01.04.2014).
- Hornstein, F. (2018). "Entwicklung und Inbetriebnahme eines geeigneten Experimentes zur Parameterbestimmung von heißem Asphalt und simulativer Abbildung in EDEM". Masterarbeit. TU Berlin.
- (2019). *Betriebsanweisung: Ringscherzellenversuchsaufbau nach Schulze*.
- Hou, Y., L. Wang, D. Wang, X. Qu und J. Wu (2017). "Using a Molecular Dynamics Simulation to Investigate Asphalt Nano-Cracking under External Loading Conditions". In: *Applied Sciences* 7.8, S. 770. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app7080770.
- Hu, J., D. Wang, P. Liu und M. Oeser (2015). "Mikroskalige Untersuchungen an den Asphaltbohrkernen aus der isac- Einbaustrecke: Konferenzbeitrag". In: *4.Dresdner Asphalttage*, S. 85–93.
- Hui, C. Y., J. M. Baney und Y. Y. Lin (2001). "Mechanics of the JKR (Johnson–Kendall–Roberts) adhesion test". In: *In: Adhesion Measurement of Films and Coatings* 2, S. 299–328.
- Huschek, S. (1988). "Der "funktionale Schichtaufbau", Gedanken zu einem neuen Konzept für Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt". In: *Bitumen* 2, S. 50–52.
- Hutschenreuther, J. und T. Wörner (2017). *Asphalt im Straßenbau*. 3. Auflage. Bonn: Kirschbaum Verlag. ISBN: 9783781219502.
- Hyndman, R. J. und Y. Fan (1996). "Sample Quantiles in Statistical Packages". In: *The American Statistician* 50.4, S. 361. ISSN: 00031305. DOI: 10.2307/2684934.
- Johnson, K. L. (1985). *Contact mechanics*. Cambridge Cambridgeshire u. a.: Cambridge University Press. ISBN: 9781615832187. URL: <http://dx.doi.org/10.1017/CB09781139171731>.
- Johnson, K. L., K. Kendall und A. D. Roberts (1971). "Surface Energy and the Contact of Elastic Solids". In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 324.1558, S. 301–313. ISSN: 1364-5021. DOI: 10.1098/rspa.1971.0141.
- Joseph Vögele AG (2012). "Vögele Einbaufibel".
- Kaldenhoff, M. (1998). "Simulation von grobgranularen Schüttgütern mit Hilfe zellulärer Automaten". Dissertation.
- Kamke, W. (2014). *Der Umgang mit experimentellen Daten, insbesondere Fehleranalyse, im Physikalischen Anfänger-Praktikum: Eine elementare Einführung*. 10., erw. Aufl. Aachen: Shaker. ISBN: 9783844029215.

- Kerkhoven, Ir. R. E. (1967). “Die Weiterentwicklung des Baustoffes Asphalt im holländischen Wasserbau”. In: *Bitumen* 1.
- Kern, F. und M. Mayländer (2005). *Faszination Strassenbau: [von widerstandsfähigen Verkehrswegen, spektakulären Baustellen und kraftvoller Maschinenteknik]*. 1. Aufl. Stuttgart: Motorbuch-Verl. ISBN: 3613024993.
- Khong, T. D., S. L. Malhotra und L.-P. Blanchard (1979). “Rheological behaviour of asphalts”. In: *Rheologica Acta* 18.3, S. 382–391. ISSN: 0035-4511. DOI: 10.1007/BF01515832.
- Klarmann, W. (2020). *Stahlkugeln – Material 1.4034*. URL: <https://www.kugel-winnie.de/Kugeln-Edelstahl-6000-mm-N0-Qualitaet-G400-Material-14034>.
- Kleppmann, W. (2016). *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. 9., überarbeitete Auflage. Praxisreihe Qualitätswissen. München und Wien: Hanser. ISBN: 978-3-446-44717-2.
- Kraß, K. (1971). “Kriechuntersuchungen an zylindrischen Asphaltprobekörpern”. Dissertation. Karlsruhe: Universität.
- Krenzer, K., J. Lipowsky, R. Lohse, H. Schäler und U. Palzer (2013). *Modellbildung bei der Simulation des Herstellungs- und Verarbeitungsverhaltens von Betongemengen: Studie*. Bd. 45. Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen.
- Kronthaler, F. (2014). *Statistik angewandt: Datenanalyse ist (k)eine Kunst*. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer Spektrum. ISBN: 978-3-642-53740-0. DOI: 10.1007/978-3-642-53740-0. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-53740-0>.
- Kruggel-Emden, H., E. Simsek, S. Rickelt, S. Wirtz und V. Scherer (2007). “Review and extension of normal force models for the Discrete Element Method”. In: *Powder Technology* 171.3, S. 157–173. ISSN: 00325910. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.10.004.
- Landau, D. P. und K. Binder (2005). *A guide to Monte Carlo simulations in statistical physics*. 2nd ed. Cambridge, UK und New York: Cambridge University Press. ISBN: 0511614462.
- Latscha, H. P., U. Kazmaier und H. A. Klein (2016). *Organische Chemie: Chemie-Basiswissen II*. 7. Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer Spektrum. ISBN: 978-3-662-46179-2.
- Latscha, H. P. und H. A. Klein (2007). *Anorganische Chemie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-69863-0. DOI: 10.1007/978-3-540-69865-4.
- Lee, Y. W. (2006). “Discrete element modelling of idealised asphalt mixture”. Diss. University of Nottingham.
- Liu, P., D. Wang, F. Otto und M. Oeser (2018). “Application of semi-analytical finite element method to analyze the bearing capacity of asphalt pavements under moving loads”. In: *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 12.2, S. 215–221. ISSN: 2095-2449. DOI: 10.1007/s11709-017-0401-2.
- Liu, Y., X. Zhou, Z. You, S. Yao, F. Gong und H. Wang (2017). “Discrete element modeling of realistic particle shapes in stone-based mixtures through MATLAB-based imaging process”. In: *Construction and Building Materials* 143, S. 169–178. ISSN: 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.037.
- Lommen, S., D. Schott und G. Lodewijks (2014). “DEM speedup: Stiffness effects on behavior of bulk material”. In: *Particuology* 12, S. 107–112. ISSN: 16742001. DOI: 10.1016/j.partic.2013.03.006.

- Luding, S. (1998). *Die Physik kohäsionsloser granularer Medien: Zugl.: Stuttgart, Univ., Habil.-Schr., 1998*. Berlin: Logos-Verl. ISBN: 3-89722-064-4.
- (2004). “Molecular Dynamics Simulations of Granular Materials”. In: *The physics of granular media*. Hrsg. von D. E. Wolf und H. Hinrichsen. Weinheim: Wiley-VCH, S. 299–324. ISBN: 3-527-40373-6.
- (2005). “Shear flow modeling of cohesive and frictional fine powder”. In: *Powder Technology* 158.1-3, S. 45–50. ISSN: 00325910. DOI: 10.1016/j.powtec.2005.04.018.
- (2008). *Introduction to discrete element methods: Basic of contact force models and how to perform the micro-macro transition to continuum theory*. Hermes - Lavoisier.
- Ludwig, S. (2009). *Entwicklung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt unter Verwendung von Epoxydharz*. Bd. H. 1. Schriftenreihe / Universität Duisburg, Essen, Institut für Straßenbau und Verkehrswesen. Essen: Inst. für Straßenbau und Verkehrswesen. ISBN: 3922602339.
- Matuttis, H.-G. und J. Chen (2014). *Understanding the Discrete Element Method: Simulation of Non-Spherical Particles for Granular and Multi-body Systems*. Hoboken: Wiley. ISBN: 1118567226. DOI: 10.1002/9781118567210. URL: <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1745057>.
- Meyer, Henning Jürgen (2002). *Systeme zur leitdrahtlosen Nivellierung und Navigation von Straßenfertigern*.
- (2003). “Anwendung von geodätischen Positionsmesssystemen in Straßenbaumaschinen”. In: *Schriftreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen* 23.
- Meyer, L. (2007). *Zum Einfluss der Kontaktzone bei der Modellierung des Elastizitätsmoduls von Beton*. 1. Aufl. Bd. Bd. 14. Aachener Beiträge zur Bauforschung. Aachen: Mainz. ISBN: 9783861306320.
- Mezger, T. (2016). *Das Rheologie Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*. 5., vollständig überarbeitete Auflage. Farbe und Lack Bibliothek. Hannover: Vincentz. ISBN: 9783866306332.
- Mindlin, R. D. und H. Deresiewicz (1953). “Elastic spheres in contact under varying oblique forces”. In: *Journal of Applied Mechanics* 20, S. 327–344.
- Monecke, J., J. Ortlepp und W. Poppy (1999). *Ermittlung und Optimierung der maschinen- und regelungstechnischen Parameter beim Einbau von Asphalt: Abschlussbericht der zum Forschungsvorhaben AiF/FKM/FVB-NR 10034 B*. Frankfurt/M.
- Monecke, J., P. Petrov und W. Poppy (1997). *Einfluss maschinentechnischer Parameter auf den Einbau von Asphalt: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF/FKM/ FVB-Nr.368D*. Frankfurt/M.
- Morrissey, J. P. (2013). “Discrete element modelling of iron ore pellets to include the effects of moisture and fines”. Diss. University of Edinburgh.
- Morrissey, J. P., S. C. Thakur und J. Y. Ooi (2014). *EDEM Contact Model: Adhesive Elasto-Plastic Model*. URL: https://www.edemsimulation.com/content/uploads/2014/07/ECM_Details.pdf (besucht am 06.08.2019).
- Müller, R. (2015). *Klassische Mechanik: Vom Weitsprung zum Marsflug*. 3., überarb. Aufl. De Gruyter Studium. Berlin u.a.: de Gruyter. ISBN: 3-11-044529-8.
- Munjiza, A. A. (2004). *The combined finite-discrete element method*. John Wiley & Sons.

- Neumann, E. (1959). *Der neuzeitliche Straßenbau: Aufgaben und Technik*. Vierte neubearbeitete Auflage. Bd. 10. Handbibliothek für Bauingenieure, Ein Hand- und Nachschlagebuch für Studium und Praxis. Berlin, Heidelberg und s.l.: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 9783662276594. DOI: 10.1007/978-3-662-29149-8. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-29149-8>.
- Niggemann, M. (2012). *Angewandter Straßenbau: Straßenfertiger im Einsatz*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN: 978-3-8348-2476-9.
- Nösler, I., Hrsg. (2000). *Beitrag zur prüftechnischen Ansprache des Haftverhaltens zwischen Mineralstoff und Bitumen*. Bd. Bd. 5. Schriftenreihe des Fachzentrums Verkehr. Aachen: Shaker. ISBN: 978-3-8265-7453-5.
- Obermayr, M. (2013). *Prediction of load data for construction equipment using the discrete element method*. Bd. Bd. 31. Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische Mechanik der Universität Stuttgart. Aachen: Shaker. ISBN: 978-3-8440-2381-7.
- Obermayr, M., K. Dressler, Ch. Vrettos und P. Eberhard (2013). "A bonded-particle model for cemented sand". In: *Computers and Geotechnics* 49, S. 299–313. ISSN: 0266352X. DOI: 10.1016/j.compgeo.2012.09.001.
- Obermayr, M. und Ch. Vrettos (2013). "Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode zur Vorhersage von Kräften bei der Bodenbearbeitung". In: *geotechnik* 36.4, S. 231–242. ISSN: 01726145. DOI: 10.1002/gete.201300009.
- Oeser, M. (2004). *Numerische Simulation des nichtlinearen Verhaltens flexibler mehrschitiger Verkehrsbefestigungen*.
- Oeser, M., W. Dawei, P. Liu, M. Wistuba, S. Büchler, F. Wellner und D. Ascher (2018). *Numerische Simulation der Rissausbreitung in flexiblen Asphaltbefestigungen durch Verkehrslasten*. Bd. Heft 1130. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bremen: Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG. ISBN: 9783956063633.
- Oeser, M., D. Wang und P. Liu (2017). *Rechnerische Dimensionierung von Asphaltbefestigungen über ein Finite Elemente Modell - Verbesserung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit*. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik. ISBN: 3956062787.
- Olsson, E., D. Jelagin und M. N. Partl (2019). "New discrete element framework for modelling asphalt compaction". In: *Road Materials and Pavement Design* 92, S. 1–13. ISSN: 1468-0629. DOI: 10.1080/14680629.2019.1633750.
- Ormel, T.J. (2012). "Modelling Asphalt with Discrete an Continuum Methods". Masterarbeit.
- Padros, C. B. (2017). *Simulating complex cohesive materials in EDEM*. URL: <https://www.edemsimulation.com/blog/simulating-complex-cohesive-materials-in-edem/> (besucht am 06.08.2019).
- Papula, L. (2011). *Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung: Mit 550 Abbildungen, zahlreichen Beispielen aus Naturwissenschaft und Technik sowie 295 Übungsaufgaben mit ausführlichen Lösungen*. 7., überarbeitete und erweiterte Auflage. Bd. / Lothar Papula ; Band 3. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-8348-1227-8.
- Partl, M. N., H. U. Bahia, F. Canestrari, C. de La Roche, H. Di Benedetto, H. Piber und D. Sybilski (2013). *Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB*. Bd. 9. RILEM

- State-of-the-Art Reports. Dordrecht: Springer. ISBN: 9789400751033. DOI: 10.1007/978-94-007-5104-0. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-5104-0>.
- Peschel, A. (1977). *Natursteine*.
- Piechatzek, T. (2009). *Charakterisierung von Rührwerkskugelmöhlen auf Basis der Diskrete-Elemente-Methode (DEM)*. Braunschweig: Sierke.
- Popov, Valentin L. (2015). *Kontaktmechanik und Reibung: Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik*. 3., aktualisierte Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-45975-1. DOI: 10.1007/978-3-662-45975-1. URL: <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4334117>.
- Rackl, M. (2018). "Verifikation eines methodischen Kalibrierungsverfahrens für Diskrete-Elemente-Methode-Parameter unter Einbeziehung des Rayleigh-Zeitschritts". Dissertation. Technische Universität München.
- Radenberg, M und M Gehrke (2012). "Rheologische Charakterisierung bitumenhaltiger Bindemittel im Temperaturbereich von -10 bis 150°C". In: *Straße und Autobahn* 63.7, S. 417–424.
- Radenberg, M. (2014). *Einfluss der chemischen, rheologischen und physikalischen Grundeigenschaften von Straßenbaubitumen auf das Adhäsionsverhalten unterschiedlicher Gesteinskörnungen: geförderten Vorhaben 16639 N / 1*. Bochum. URL: http://www.lvw.ruhr-uni-bochum.de/mam/content/forschung/projekte/bericht_aif_igf_16639_n-1.pdf (besucht am 06.08.2019).
- Rao, K. Kesava und Prabhu R. Nott (2008). *An Introduction to Granular Flow*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN: 9780511611513. DOI: 10.1017/CB09780511611513.
- Razali, N. M. und B. Yap (2011). "Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests". In: *J. Stat. Model. Analytics* 2.
- Read, J. und D. Whiteoak (2003). *The Shell bitumen handbook*. 5th ed. London: Thomas Telford. ISBN: 072773220X.
- Reiner, M. und E. Müller (1969). *Rheologie in elementarer Darstellung*. 2. Aufl. Leipzig: Fachbuchverl. VEB.
- Remond, S. und P. Pizette (2014). "A DEM hard-core soft-shell model for the simulation of concrete flow". In: *Cement and Concrete Research* 58, S. 169–178. ISSN: 00088846. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.01.022.
- Renken, P. und M. P. Wistuba (2018). *Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte*. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen. URL: https://bast.opus.hbz-nrw.de/files/1881/S118_barrierefreies_ELBA_PDF.pdf.
- Richefeu, V., M. S. El Youssoufi, R. Peyroux und F. Radjai (2008). "A model of capillary cohesion for numerical simulations of 3D polydisperse granular media". In: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 32.11, S. 1365–1383. ISSN: 1096-9853.
- Richter, D. und M. Heindel (2011). *Straßen- und Tiefbau: Mit lernfeldorientierten Projekten*. 11., aktualisierte, überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden. ISBN: 978-38348-0869-1.

- Rooch, A. (2014). *Statistik für Ingenieure: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Datenauswertung endlich verständlich*. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer Spektrum. ISBN: 978-3-642-54856-7.
- Rosauer, V. (2010). “Abschätzung der herstellungsbedingten Qualität und Lebensdauer von Asphaltdeckschichten mit Hilfe der Risikoanalyse”. Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2010.
- Ruge, P., C. Birk und M. Wermuth (2014). *Das Ingenieurwissen: Mathematik und Statistik*. Ingenieurwissen. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-642-40474-0. DOI: 10.1007/978-3-642-40474-0.
- Runkler, T. A. (2015). *Data Mining: Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse*. 2. Aufl. Computational Intelligence. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. ISBN: 3834816949.
- Sakai, M. u. a. (2014). “Verification and validation of a coarse grain model of the DEM in a bubbling fluidized bed”. In: *Chemical Engineering Journal* 244, S. 33–43. ISSN: 13858947. DOI: 10.1016/j.cej.2014.01.029.
- Salazar, A., E. Sáez und G. Pardo (2015). “Modeling the direct shear test of a coarse sand using the 3D Discrete Element Method with a rolling friction model”. In: *Computers and Geotechnics* 67, S. 83–93. ISSN: 0266352X. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.02.017.
- Sand-Schulz GmbH, Hrsg. (2018). *Produktdatenblatt: Filterkies, Quarzkies SI/FQK (f) 5,6-8 mm*.
- Schindler, K. (2008). “Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalt zur Bestimmung von Materialkennwerten für die Dimensionierung”. Dissertation. Braunschweig: Technische Universität Carolo-Wilhelmina.
- Schneider, B. J. (2012). *Polygonale diskrete Elemente zur Modellierung heterogener Materialien*. Stuttgart.
- Schulze, D. (2014). *Pulver und Schüttgüter: Fließeigenschaften und Handhabung*. VDI-Buch / Chemische Technik / Verfahrenstechnik. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-642-53884-1.
- Shapiro, S. S. und M. B. Wilk (1965). “An Analysis of Variance Test for Normality”. In: *Biometrika* 52.3/4, S. 591–611.
- Siebertz, K., D. van Bebber und Th. Hochkirchen (2010). *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. VDI-Buch. Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-05493-8.
- Simsek, E. (2011). *Mischung und Segregation auf Rostsystemen: Experimentelle Untersuchung und numerische Simulation mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode: Dissertation*. Shaker. ISBN: 978-3-8322-9925-5.
- Stein, Thoralf und Henning Jürgen Meyer (2018). “Automatic machine and implement identification of an agricultural process using machine learning to optimize farm management information system”. In: *6th International Conference on Machine Control and Guidance*, S. 19–26.
- Steinauer, B. und A. Ueckermann (2001). “Die Längsunebenheit – auch eine Beanspruchungskomponente für Straße und Fahrer”. In: *Straße und Autobahn* 51.8, S. 445–454.
- Stöckert, U. (2002). “Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphaltstraßenbau”. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.

- Syed, Zamir, Mehari Tekeste und David White (2017). “A coupled sliding and rolling friction model for DEM calibration”. In: *Journal of Terramechanics* 72, S. 9–20. ISSN: 00224898. DOI: 10.1016/j.jterra.2017.03.003.
- Taylor, J. R. (1988). *Fehleranalyse: Eine Einführung in die Untersuchung von Unsicherheiten in physikalischen Messungen*. 1. Aufl. Weinheim: VCH. ISBN: 3527268782.
- Thakur, S. C., J. P. Morrissey, J. Sun, J. F. Chen und J. Y. Ooi (2014). “Micromechanical analysis of cohesive granular materials using the discrete element method with an adhesive elasto-plastic contact model”. In: *Granular Matter* 16.3, S. 383–400. ISSN: 1434-5021. DOI: 10.1007/s10035-014-0506-4.
- Thakur, S. C., J. Y. Ooi und H. Ahmadian (2016). “Scaling of discrete element model parameters for cohesionless and cohesive solid”. In: *Powder Technology* 293, S. 130–137. ISSN: 00325910. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.05.051.
- Thornton, C. (2015). *Granular Dynamics, Contact Mechanics and Particle System Simulations: A DEM study*. 1st ed. 2015. Particle Technology Series. ISBN: 9783319187105. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-18711-2>.
- Thurner, H., Hrsg. (2001). *Qualitätssicherung und Eigenüberwachung im Straßenbau - Messtechnische Voraussetzungen: AB, Geodynamik*. 4. Internationales Symposium Technik und Technologie des Straßenbaus. München.
- Tichý, R. (2009). “Beitrag zur numerischen Untersuchung der Bewegungs- und Beanspruchungsprofilen in einer Kugelmühle unter Verwendung von physikalisch begründeten Stoßparametern”. Diss. Freiberg: Technischen Universität Bergakademie Freiberg.
- Treiber, M. und A. Kesting (2010). *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 9783642052279. DOI: 10.1007/978-3-642-05228-6.
- Ulrich, Alfred (1996). “Neue Straßenbautechnik”. In: 11, S. 722–730. URL: <http://www.BauPortal-digital.de/BauP.11.1996.722> (besucht am 06.08.2019).
- (2015). *Arbeitsweise und Funktionen eines Straßenfertigers: Gespräch*. Köln.
- Utterodt, R. (2013). “Der Einfluß schwankender Mischguttemperaturen und Materialfüllstände vor der Einbaubohle auf ausgewählte Funktionseigenschaften einer Deckschicht aus Splittmastixasphalt”. Dissertation. Berlin: TU Berlin.
- Velske, S., P. Eymann und H. Mentlein (2013). *Strassenbau, Strassenbautechnik*. 7., neu bearb. Aufl. Köln: Werner. ISBN: 9783804138834.
- Verein Deutscher Ingenieure (1993). *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf.
- (2004). *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Düsseldorf.
- Vizi, L. und Ch. Büttner (1981). *Verdichten von Asphalt im Straßenbau: Ein Handbuch für die Praxis*. 1. Auflage. Düsseldorf: Werner. ISBN: 3804138284.
- Vonk, W. C., M. C. Phillips und M. Roele (1994). “Alterungsbeständigkeit von Straßenbaubitumen Vorteile der Modifizierung mit SBS”. In: *Bitumen* 3, S. 98–104.
- Weiler, R. (2012). *Numerische Simulation von Misch- und Fließvorgängen in grobkörnigen Schüttgütern mit der Diskrete-Elemente-Methode*. Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik MVT, Verlag Technische Universität Kaiserslautern.

- Wensrich, C. M. und A. Katterfeld (2012). “Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM”. In: *Powder Technology* 217, S. 409–417. ISSN: 00325910. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.10.057.
- Wirtgen Group, Hrsg. (2011). *Benutzerhandbuch*.
- Wittmann, S. (2011). “Verfahren zur Simulation und Analyse der Auswirkungen toleranzbedingter Bauteilabweichungen”. Dissertation. Erlangen-Nürnberg: Friedrich-Alexander-Universität. URL: <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/frontdoor/index/index/docId/1641> (besucht am 06.08.2019).
- Wydra, M., A. Bauer, Ch. Geiger und M. Geimer (2020). “Moderne Steueralgorithmen für Forstkräne mittels künstlichen neuronalen Netzen imitieren und optimieren: LANDTECHNIK, Bd. 75 Nr. 2 (2020) / LANDTECHNIK, Bd. 75 Nr. 2 (2020)”. In: DOI: 10.15150/1t.2020.3241.
- Yan, Z., S. K. Wilkinson, E. H. Stitt und M. Marigo (2015). “Discrete element modelling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis”. In: *Computational Particle Mechanics* 2.3, S. 283–299. ISSN: 2196-4378. DOI: 10.1007/s40571-015-0056-5.
- Yap, B. W. und C. H. Sim (2011). “Comparisons of various types of normality tests”. In: *Journal of Statistical Computation and Simulation* 81.12, S. 2141–2155. ISSN: 0094-9655. DOI: 10.1080/00949655.2010.520163.
- Yu, H. und S. Shen (2013). “A micromechanical based three-dimensional DEM approach to characterize the complex modulus of asphalt mixtures”. In: *Construction and Building Materials* 38, S. 1089–1096. ISSN: 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.036.
- Zander, U. (2017). “Herausforderung Infrastrukturerhaltung: Challenge infrastructure maintenance”. In: *Straße und Autobahn* 68.9, S. 710–717. URL: <https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/1960>.

Anhang

A Simulationsparameter

A.1 Validierung Simulationsmodell

Tabelle A.1.1: Messwerte zur Validierung des Simulationsmodells

Name	Haltemoment [N· m]	Normalkraft [N]
SIM1	3,96	111,98
SIM2	4,76	116
SIM3	11,66	335,37
SIM4	3,24	72,82
SIM5	8,52	230,83
SIM6	3,46	90,51
SIM7	3,24	72,97
SIM8	4,74	129,77
SIM9	2,62	75,11
SIM10	8,55	224,42
SIM11	6,75	180,21
SIM12	2,49	57,78
SIM13	4,49	110,31
SIM14	4,23	119,51
SIM15	6,42	211,4
SIM16	3,34	82,48
SIM17	2,45	70,24
SIM18	2,19	54,39
SIM19	3,1	69,41
SIM20	5,4	123,88
SIM21	3,83	89,27
SIM22	10,89	274,72
SIM23	7,57	202,94
SIM24	2,17	67,71
SIM25	4,28	110,3
SIM26	3,68	79,68
SIM27	7,47	217,76
SIM28	2,72	62,2
SIM29	6,58	172,56
SIM30	2,38	54,79

A.2 Prüfstand

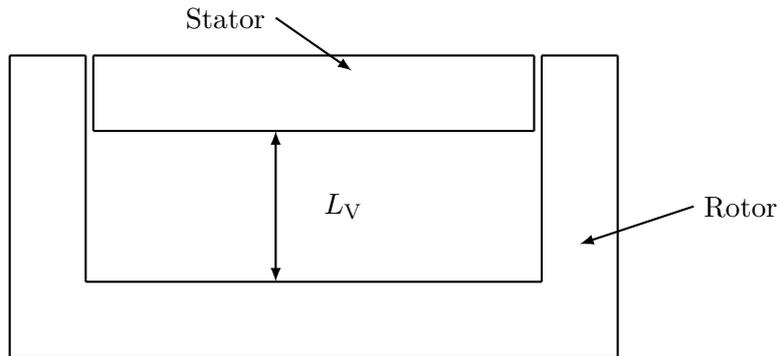


Abbildung A.1.1: Skizze zur Veranschaulichung des Vertikalabstands im Simulationsmodell

Tabelle A.2.1: Parameter für den Prüfstand

Parameter	Werte	
Querkontraktionszahl Aluminium	ν_{Al}	0,35
Elastizitätsmodul Aluminium	$\frac{N}{m^2}$ E_{Al}	$7,0 \cdot 10^{10}$
Dichte des Aluminiums	$\frac{g}{cm^3}$ ρ_{Al}	2,699

Tabelle A.2.2: Materialparameter der Gesteinsmischung (Mischgut 1 und Mischgut 3) (Peschel 1977, S. 59 f., 94)

Name	Dichte [$\frac{g}{cm^3}$]	E-Modul in 10^9 [$\frac{N}{m^2}$]
Grauwacke	2,58 - 2,73	12 - 54
Rhyolith	2,35 - 2,70	30 - 76
Kalkstein	1,75 - 2,72	16 - 90
Sandstein	1,95 - 2,70	12 - 71
Quarzit	2,6 - 2,65	50 - 75

A.3 Simulationswiederholungen

Tabelle A.3.1: Lage- und Streuungsparameter der 30 Simulationsdurchläufe nach Tab. A.1.1

Lageparameter	Wert
Arith. Mittelwert des Haltemoments am Stator [N· m]	4,906
Standardabweichung [N· m]	2,568
Unsicherheit [N· m]	0,468
KIB ($z_{N(0,1)} = 1,96$)	1,4
Arith. Mittelwert der Statornormalkraft [N]	129,044
Standardabweichung [N]	73,684
Unsicherheit [N]	13,452
KIB ($z_{N(0,1)} = 1,96$)	52

Tabelle A.3.2: Lage- und Streuungsparameter der 30 Simulationsdurchläufe nach Bereinigung der Ausreißer *SIM3* und *SIM22*

Lageparameter	Wert
Arith. Mittelwert des Haltemoments am Stator [N· m]	4,45
Standardabweichung [N· m]	1,963
Unsicherheit [N· m]	0,37
KIB ($z_{N(0,1)} = 1,96$)	1,9
Arith. Mittelwert der Statornormalkraft [N]	116,472
Standardabweichung [N]	57,488
Unsicherheit [N]	10,864
KIB ($z_{N(0,1)} = 1,96$)	41

Tabelle A.3.3: Simulationsergebnisse in Abhängigkeit von den Wiederholungen bei Mischgut 4 (M4-2-R₀-1) und Mischgut 5 (M5-2-R₅-3)

Mischgut	Simulationswdh.	Arith. Mittelwert	Abweichung Mittelwert	Konfidenzintervall
		N· m	N· m	N· m
M5	5	17,907	±1,480	±1,243
	12	17,2	±0,748	±0,957
	20	17,641	±0,75	±1,23
M4	5	5,265	±0,743	±0,624
	12	5,206	±0,403	±0,515
	20	5,213	±0,369	±0,605

A.4 Zeitschritte

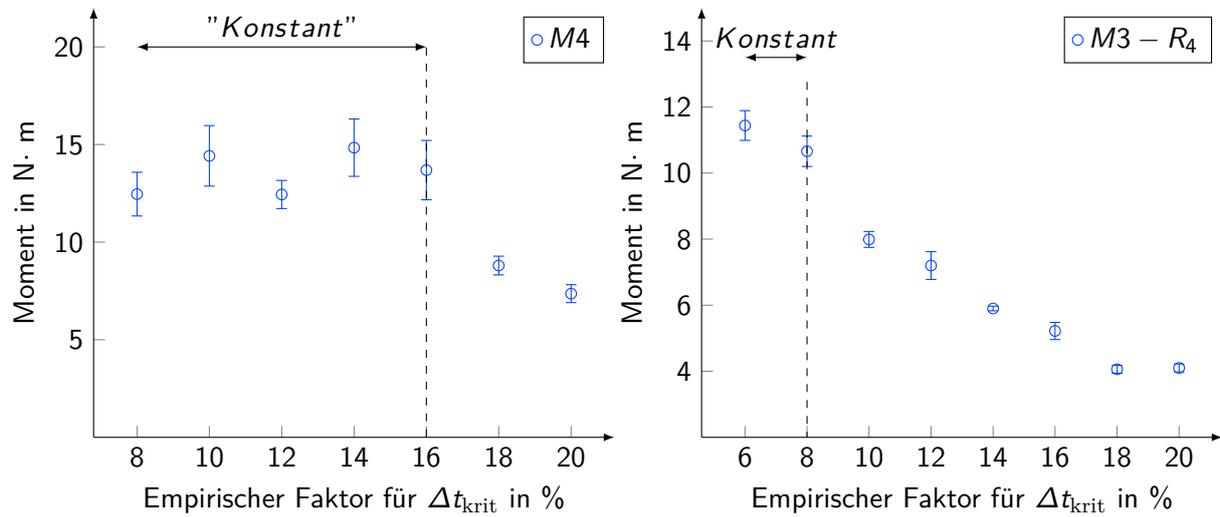


Abbildung A.4.1: Auswertung der verschiedenen Zeitschritte für die Mischgüter 3 und 4

Tabelle A.4.1: Zusammenhang zwischen dem empirischen Faktor und dem Simulationszeitschritt Δt_{krit}

Mischgut	Empirischer Faktor [%]	Zeitschritt [10^{-6} s]
M3- R_4	6	1,6199
	8	2,1599
	10	2,6998
	12	3,2398
	14	3,7798
	16	4,3191
	18	4,8597
	20	5,3997
M4	8	2,5141
	10	3,1426
	12	3,7711
	14	4,3997
	16	5,0282
	18	5,6567
	20	6,2853
M5- R_5	6	2,9891
	7	3,4877
	8	3,9859
	10	4,9824
	12	5,9789
	14	6,9754
	16	7,9719
	18	8,9684
	20	9,9649

Tabelle A.4.2: Modellparameter der Simulation für die Evaluierung des Zeitschritts bei Mischgut 3

Parameter	Einheit	Bez.	Werte
Partikelverteilung		R	R_4
Querkontraktionszahl Material		ν_{M5}	0, 2
Elastizitätsmodul Material	N/m ²	E_{M2}	$6, 25 \cdot 10^8$
Dichte Material	g/cm ³	ρ_{M2}	2,65
Restitutionszahl		e_{ij}	1
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	0,796
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	0, 2
Belastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,1}$	1
Entlastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,2}$	1,25
Kohäsionssteifigkeit	N/m	k_{adh}	0,1
Kohäsionskraft	N	$F_{hys,0}$	-0,002
Vertikalabstand	mm	L_V	32

Tabelle A.4.3: Modellparameter der Simulation für die Evaluierung des Zeitschritts bei Mischgut 4

Parameter	Einheit	Bez.	Werte
Partikelradius	mm	R	3,00
Querkontraktionszahl Material		ν_{St}	0,25
Elastizitätsmodul Material	N/m ²	E_{M5}	$2,1 \cdot 10^9$
Dichte Material	g/cm ³	ρ_M	7,86
Restitutionszahl		e_{ij}	0,8
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	0,191
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	0,1
Belastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,1}$	1
Entlastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,2}$	1,25
Kohäsionssteifigkeit	kN/m	k_{adh}	0,1
Kohäsionskraft	N	$F_{hys,0}$	-0,002
Vertikalabstand	mm	L_V	27,1

Tabelle A.4.4: Modellparameter der Simulation für die Evaluierung des Zeitschritts bei Mischgut 5

Parameter	Einheit	Bez.	Werte
Partikelverteilung		R	R_5
Querkontraktionszahl Material		ν_{M5}	0,2
Elastizitätsmodul Material	N/m ²	E_{M5}	$1 \cdot 10^8$
Dichte Material	g/cm ³	ρ_{M5}	2,4
Restitutionszahl		e_{ij}	0,5
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	0,831
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	0,2
Belastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,1}$	1
Entlastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,2}$	1,25
Kohäsionssteifigkeit	N/m	k_{adh}	0,1
Kohäsionskraft	N	$F_{hys,0}$	-0,002
Vertikalabstand	mm	L_V	38

A.5 Korngrößenverteilungen

Tabelle A.5.1: Korngrößenverteilung (R_2 , R_4) des Mischguts 2

Ansatz R_2		Ansatz R_4	
Massen-Aufteilung [%]	Korngröße [mm]	Massen-Aufteilung [%]	Korngröße [mm]
40	3		
56,2	4,8	96,2	4,8
3,8	6,8	1,6	6,8

Tabelle A.5.2: Korngrößenverteilung (R_5 , R_6) des Mischguts 1 für die Simulation

Ansatz R_5		Ansatz R_6	
Massen-Aufteilung [%]	Korngröße [mm]	Massen-Aufteilung [%]	Korngröße [mm]
		58,5	3,0
94,4	3,8	39,9	3,8
1,6	6,8	1,6	6,8

Tabelle A.5.3: Modellparameter der Simulation für die Evaluierung der Partikelverteilungen bei Mischgut 2

Parameter	Einheit	Bez.	
Partikelverteilung		R	R_1, R_2, R_3, R_4
Querkontraktionszahl Material		ν_{M2}	0, 2
Elastizitätsmodul Material	N/m ²	E_{M2}	$6,25 \cdot 10^8$
Dichte Material	g/cm ³	ρ_{M2}	2,65
Restitutionszahl		e_{ij}	0, 2
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	3,492
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	0, 5
Vertikalabstand	mm	L_V	32

A.6 Parameter Vertikalabstand

Tabelle A.5.4: Modellparameter der Simulation für die Evaluierung der Partikelverteilungen bei Mischgut 1

Parameter	Einheit	Bez.	Werte
Partikelverteilung		R	$R_5; R_6$
Querkontraktionszahl Material		ν_{M1}	0,2
Elastizitätsmodul Material	N/m ²	E_{M1}	$4,5125 \cdot 10^8$
Dichte Material	g/cm ³	ρ_{M1}	2,43
Restitutionszahl		e_{ij}	0,5
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	0,5
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	3,06
Vertikalabstand	mm	L_V	35

Tabelle A.6.1: Modellparameter der Simulation für die Evaluierung des Vertikalabstands bei Mischgut 2

Parameter	Einheit	Bez.	
Partikelverteilung		R	R_1 bis R_4
Querkontraktionszahl Material		ν_{M2}	0,2
Elastizitätsmodul Material	N/m ²	E_{M2}	$6,25 \cdot 10^8$
Dichte Material	g/cm ³	ρ_{M2}	2,65
Restitutionszahl		e_{ij}	0,2
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	3,492
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	1
Vertikalabstand	mm	L_V	27,5-32

Tabelle A.6.2: Modellparameter der Simulation für die Evaluierung des Vertikalabstands bei Mischgut 5

Partikelverteilung		R	R_5
Querkontraktionszahl Material		ν_{M5}	0,2
Elastizitätsmodul Material	N/m ²	E_{M5}	$1 \cdot 10^8$
Dichte Material	g/cm ³	ρ_{M5}	2,4
Restitutionszahl		e_{ij}	0,5
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	0,831
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	0,2
Belastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,1}$	1
Entlastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,2}$	1,25
Kohäsionssteifigkeit	N/m	k_{adh}	0,1
Kohäsionskraft	N	$F_{hys,0}$	-0,002
Vertikalabstand	mm	L_V	36-40

Tabelle A.6.3: Modellparameter der Simulation für die Evaluierung des Vertikalabstands bei Mischgut 5*

Partikelverteilung		R	R_5
Querkontraktionszahl Material		ν_{M5}	0,2
Elastizitätsmodul Material	N/m ²	E_{M5}	$1 \cdot 10^8$
Dichte Material	g/cm ³	ρ_{M5}	2,4
Restitutionszahl		e_{ij}	0,5
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	0,831
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	0,2
Belastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,1}$	1
Entlastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,2}$	1,25
Kohäsionssteifigkeit	N/m	k_{adh}	10
Kohäsionskraft	N	$F_{hys,0}$	-0,002
Vertikalabstand	mm	L_V	32-35

Tabelle A.6.4: Modellparameter der Simulation für die Evaluierung des Vertikalabstands bei Mischgut 5

Partikelverteilung		R	R_6
Querkontraktionszahl Material		ν_{M5}	0,2
Elastizitätsmodul Material	N/m ²	E_{M5}	$1 \cdot 10^8$
Dichte Material	g/cm ³	ρ_{M5}	2,4
Restitutionszahl		e_{ij}	0,5
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	0,831
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	0,2
Belastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,1}$	1
Entlastungssteifigkeit	kN/m	$k_{n,2}$	1,25
Kohäsionssteifigkeit	N/m	k_{adh}	0,1
Kohäsionskraft	N	$F_{hys,0}$	-0,002
Vertikalabstand	mm	L_V	36-40

Tabelle A.6.5: Ergebnisse der Normalkraft und des Haltemoments für die Parametersätze Tab. A.6.1 und Tab. A.6.4 bei unterschiedlichen Vertikalabständen

Nr.	Abstand L_V [mm]	Normalkraft [N]	Moment [N·m]
M2			
1	27,5	1153,75	41,25
2	28,0	900,00	35,00
3	29,0	450,00	18,00
4	29,5	376,00	15,00
5	30,5	240,00	9,00
6	31,0	170,00	8,80
7	31,5	130,00	6,00
8	32,0	98,00	5,17
M5			
1	29,50	366,00	55,00
2	29,75	138,00	33,50
3	29,90	105,00	22,00

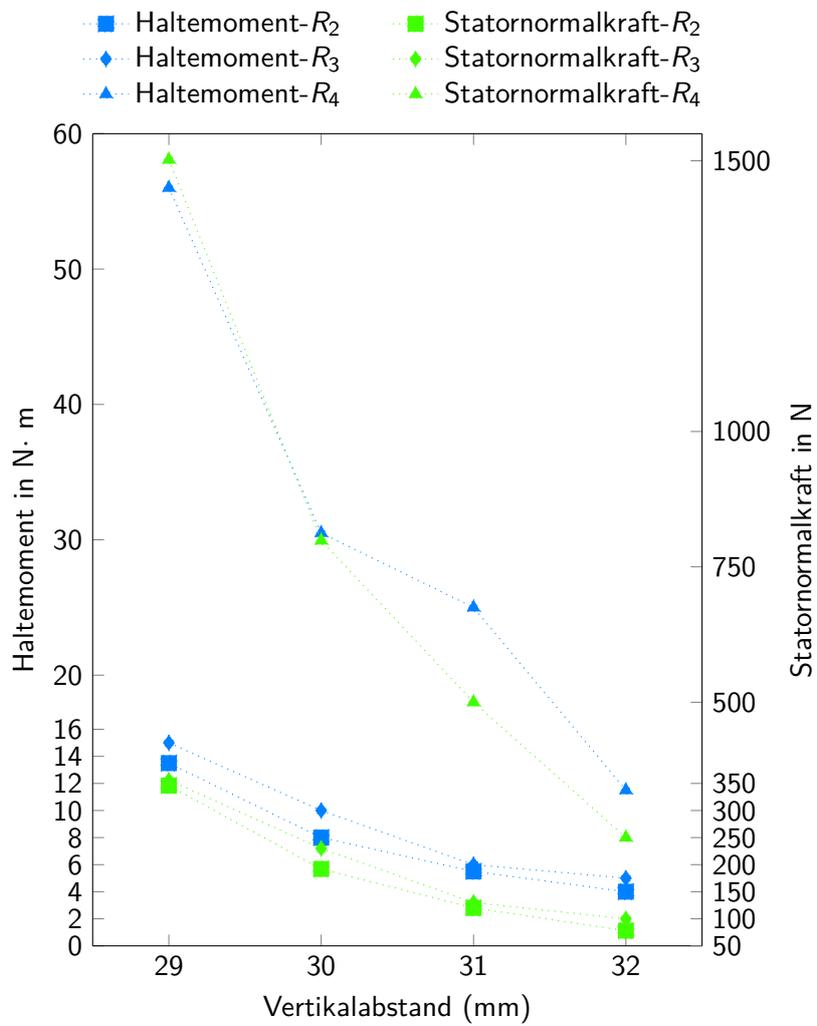


Abbildung A.6.1: Verlauf des Haltemoments und der Statornormalkraft für die Kornverteilungsansätze R_2 - R_4 bei verschiedenen Vertikalabständen mit den Parametersätzen aus Tab. A.6.1

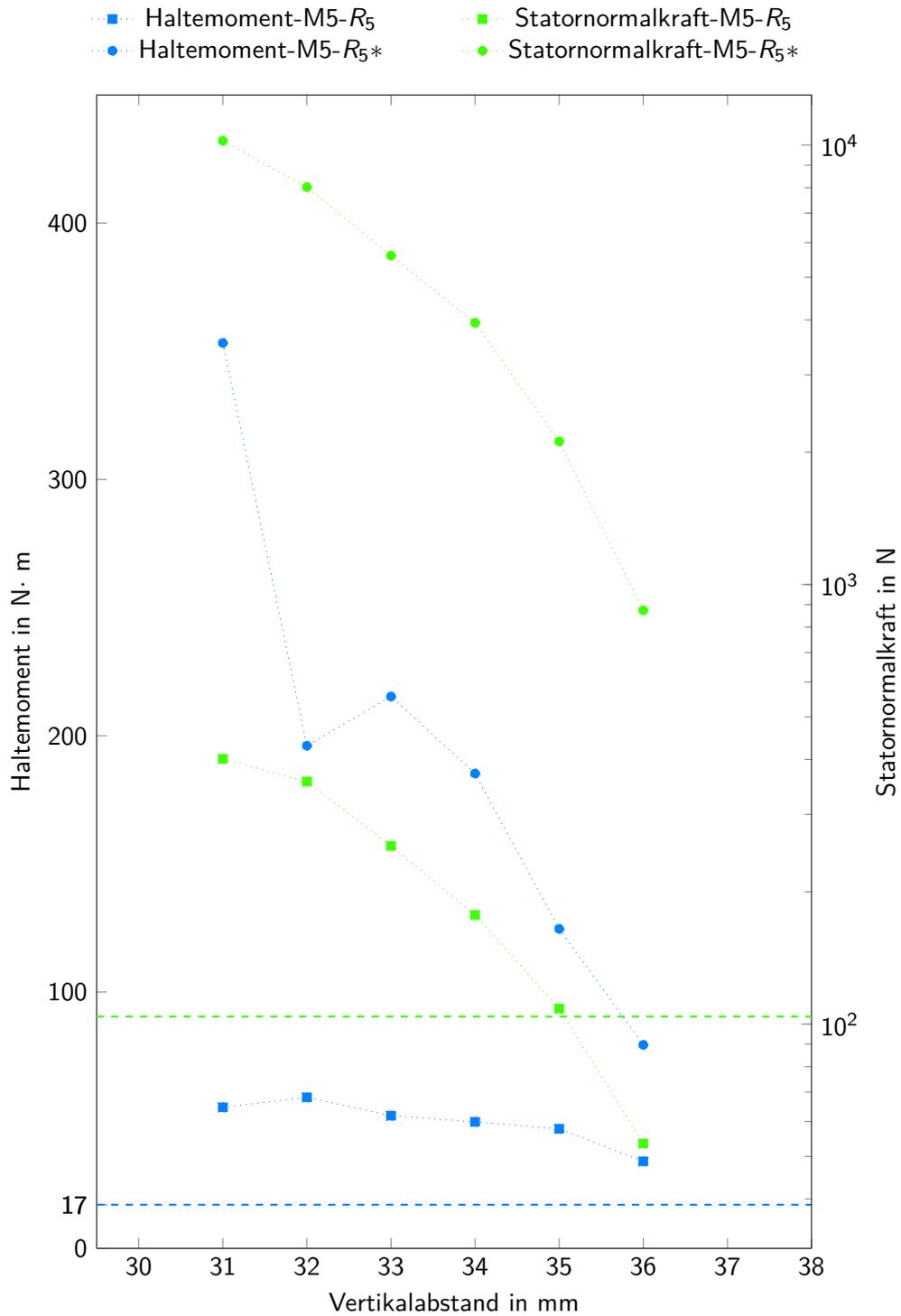


Abbildung A.6.2: Verlauf des Haltemoments und der Statornormalkraft für verschiedene Vertikalabstände mit den Parametersätzen aus Tab. A.6.2 und Tab. A.6.4

B Ergebnisse der physikalischen Untersuchungen

B.1 Mischgut 1

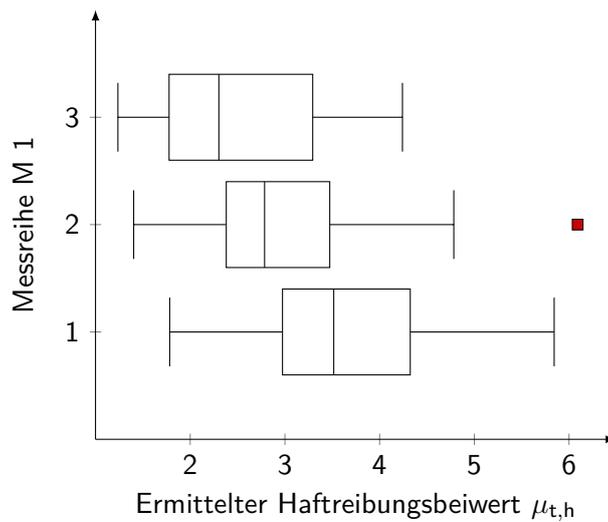


Abbildung B.1.1: Ergebnisse der Untersuchungen zum Mischgut 1, 3 Messreihen mit jeweils 30 Wiederholungen

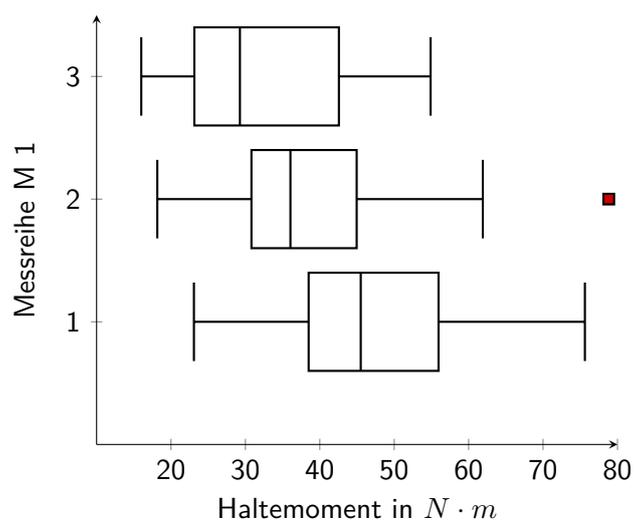


Abbildung B.1.2: M1-Momente

Tabelle B.1.1: Ergebnisse der Messungen für den Haftbeiwert

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit des Mittelwerts
M1-1	104	26	3,627	0,967	0,176
M1-2	104	26	3,033	1,015	0,185
M1-3	104	26	2,520	0,883	0,161

Tabelle B.1.2: Ergebnisse der Messungen für das Haltemoment

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert [N·m]	Standardabweichung [N·m]	Unsicherheit des Mittelwerts
M1-1	104	26	46,950	12,519	2,285
M1-2	104	26	39,2666	13,141	2,399
M1-3	104	26	32,515	11,255	2,055

B.2 Mischgut 2

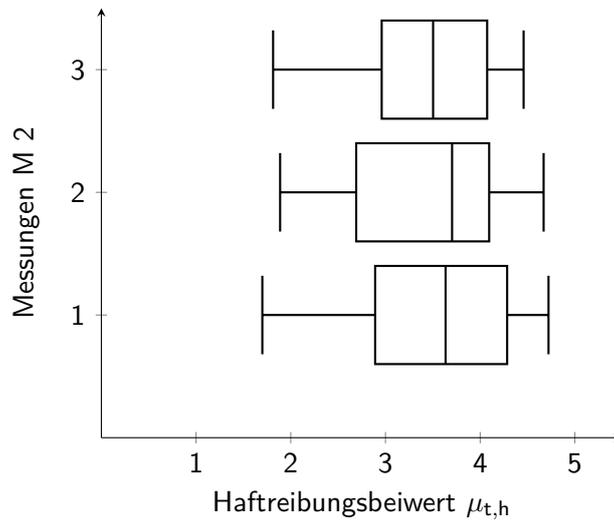


Abbildung B.2.1: Ergebnisse der Untersuchungen zum Mischgut 2 von 3 Messreihen mit 30 bis 50 Wiederholungen

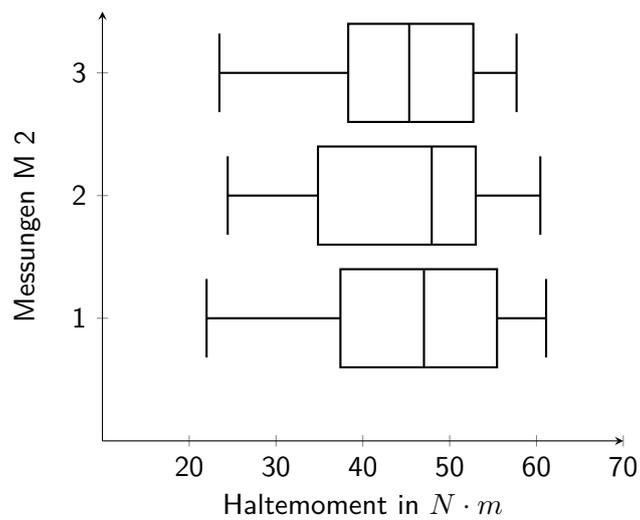


Abbildung B.2.2: M2-Momente

Tabelle B.2.1: Ergebnisse der Messungen für den Haftbeiwert

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit des Mittelwerts
M2-1	104	26	3,592	0,843	0,153
M2-2	104	26	3,468	0,816	0,149
M2-3	104	26	3,416	0,777	0,141

Tabelle B.2.2: Ergebnisse der Messungen für das Haltemoment

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert [N·m]	Standardabweichung [N·m]	Unsicherheit des Mittelwerts
M2-1	104	26	46,499	10,913	1,992
M2-2	104	26	44,885	10,568	1,929
M2-3	104	26	44,211	10,064	1,837

B.3 Mischgut 3

Tabelle B.3.1: Ergebnisse der Messungen für den Haftbeiwert

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit des Mittelwerts
M3-1	165,4	120	0,820	0,256	0,036
M3-2	165,4	140	0,816	0,255	0,036
M3-3	165,4	160	0,752	0,250	0,035

Tabelle B.3.2: Ergebnisse der Messungen für das Haltemoment

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert [N·m]	Standardabweichung [N·m]	Unsicherheit des Mittelwerts
M3-1	165,4	120	16,881	5,285	0,747
M3-2	165,4	140	16,796	5,260	0,743
M3-3	165,4	160	15,486	5,151	0,728

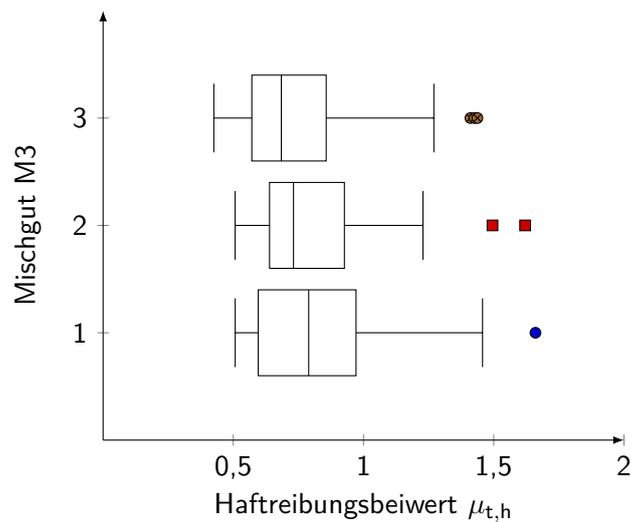


Abbildung B.3.1: Ergebnisse der Untersuchungen zum Mischgut 3

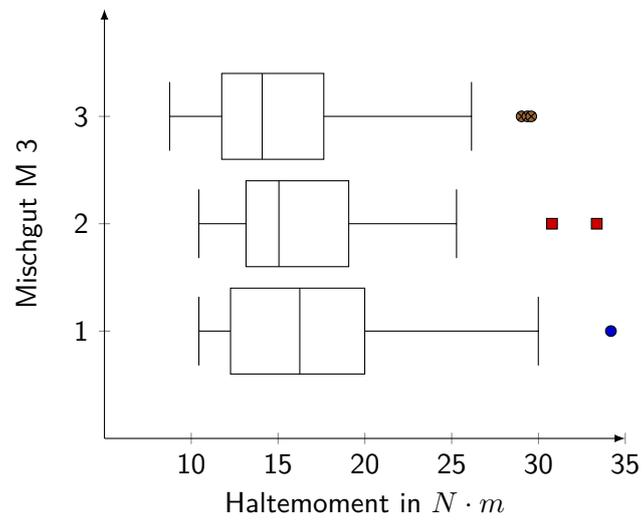


Abbildung B.3.2: M3-Momente

B.4 Mischgut 4

Tabelle B.4.1: Ergebnisse der Messungen für den Haftbeiwert

Messreihe	Normal- kraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert	Standard- abweichung	Unsicherheit des Mittelwerts
M4-1	153,6	60	0,852	0,085	0,012
M4-2	153,6	80	0,460	0,026	0,003
M4-3	153,6	100	0,290	0,023	0,003
M4-4	153,6	120	0,211	0,025	0,004
M4-5	153,6	140	0,196	0,024	0,004
M4-6	153,6	160	0,191	0,015	0,002

Tabelle B.4.2: Ergebnisse der Messungen für das Haltemoment

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert [N·m]	Standardabweichung [N·m]	Unsicherheit des Mittelwerts
M4-1	153,6	60	21,208	2,121	0,300
M4-2	153,6	80	11,456	0,651	0,092
M4-3	153,6	100	7,221	0,596	0,084
M4-4	153,6	120	5,263	0,642	0,090
M4-5	153,6	140	4,88	0,604	0,110
M4-6	153,6	160	4,767	0,388	0,055

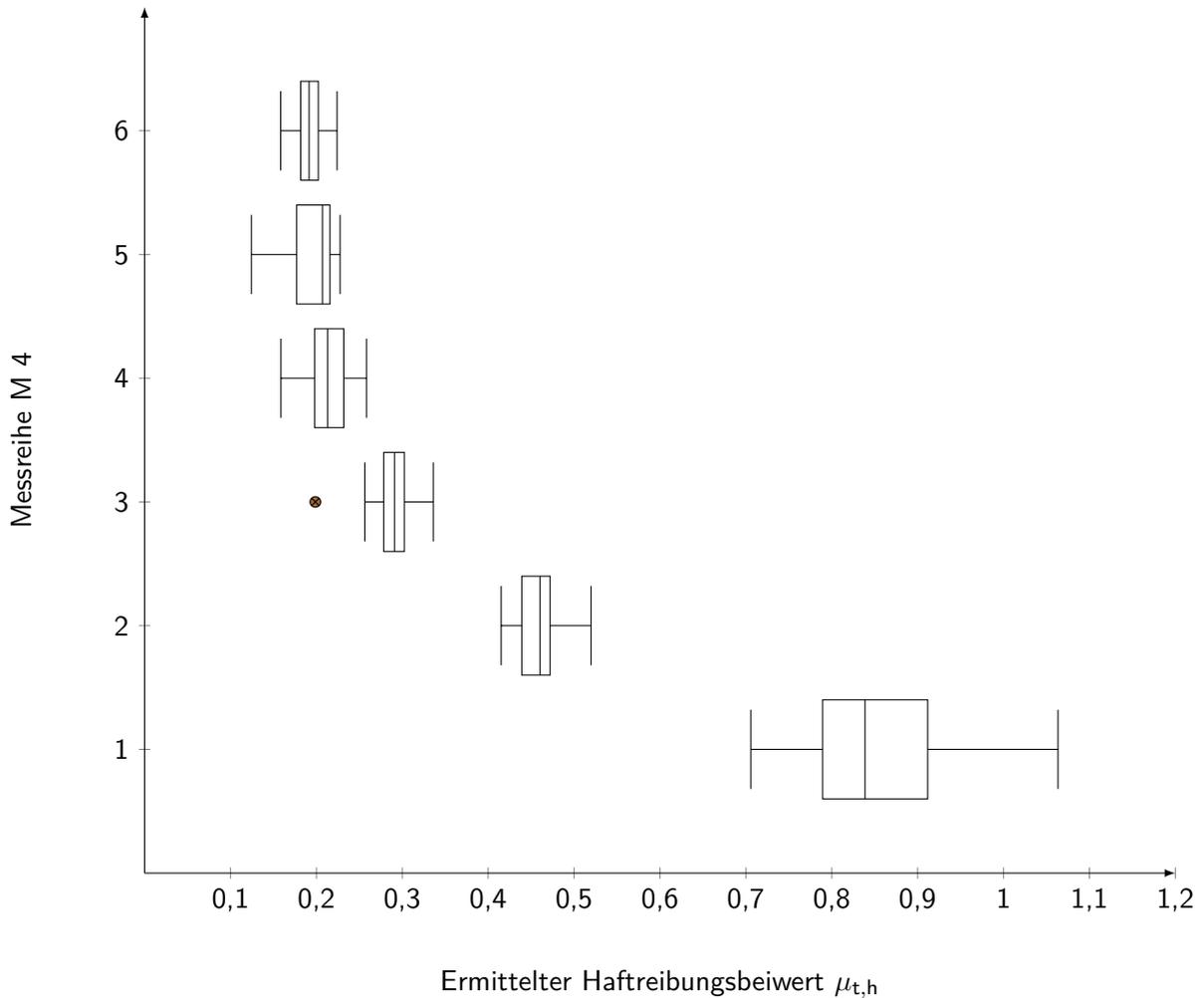


Abbildung B.4.1: Ergebnisse der Untersuchungen zum Mischgut 4, 6 Messreihen mit 50 Wiederholungen

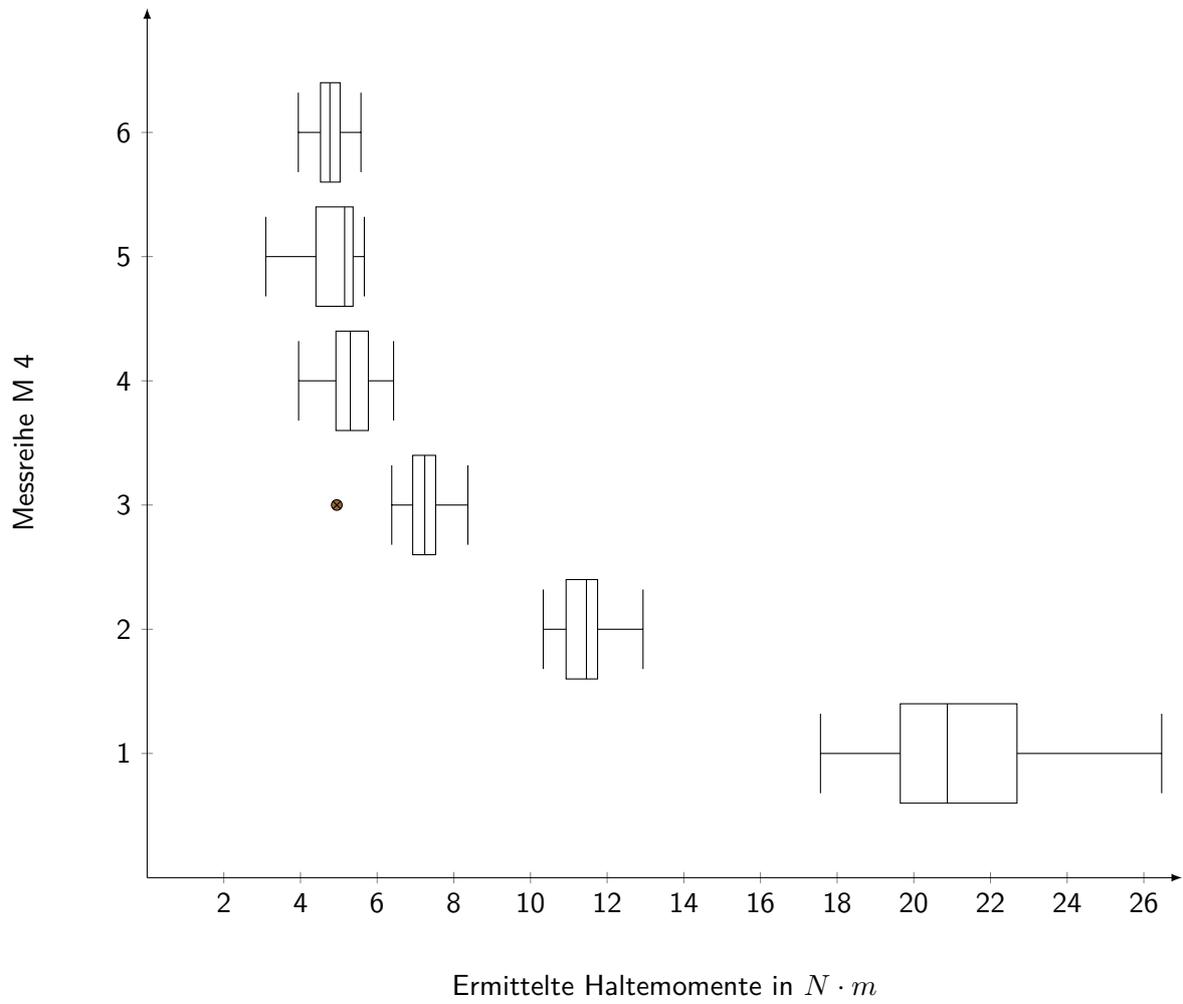


Abbildung B.4.2: Ergebnisse der Untersuchungen zum Mischgut 4, 6 Messreihen mit 50 Wiederholungen

B.5 Mischgut 5- Teil 1

Tabelle B.5.1: Ergebnisse der Messungen für den Haftbeiwert 5-1

Messreihe	Normal- kraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert	Standard- abweichung	Unsicherheit des Mittelwerts
M5-1-1	165,4	80	1,410	0,286	0,040
M5-1-2	165,4	100	1,159	0,206	0,027
M5-1-3	165,4	120	1,071	0,147	0,020
M5-1-4	165,4	140	0,930	0,117	0,019
M5-1-5	165,4	160	0,926	0,123	0,017

Tabelle B.5.2: Ergebnisse der Messungen für das Haltemoment 5-1

Messreihe	Normal- kraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert [N· m]	Standard- abweichung [N· m]	Unsicherheit des Mittelwerts
M5-1-1	165,4	80	26,966	5,483	0,732
M5-1-2	165,4	100	22,163	3,940	0,526
M5-1-3	165,4	120	22,009	3,025	0,407
M5-1-4	165,4	140	19,469	2,889	0,386
M5-1-5	165,4	160	19,141	2,554	0,350

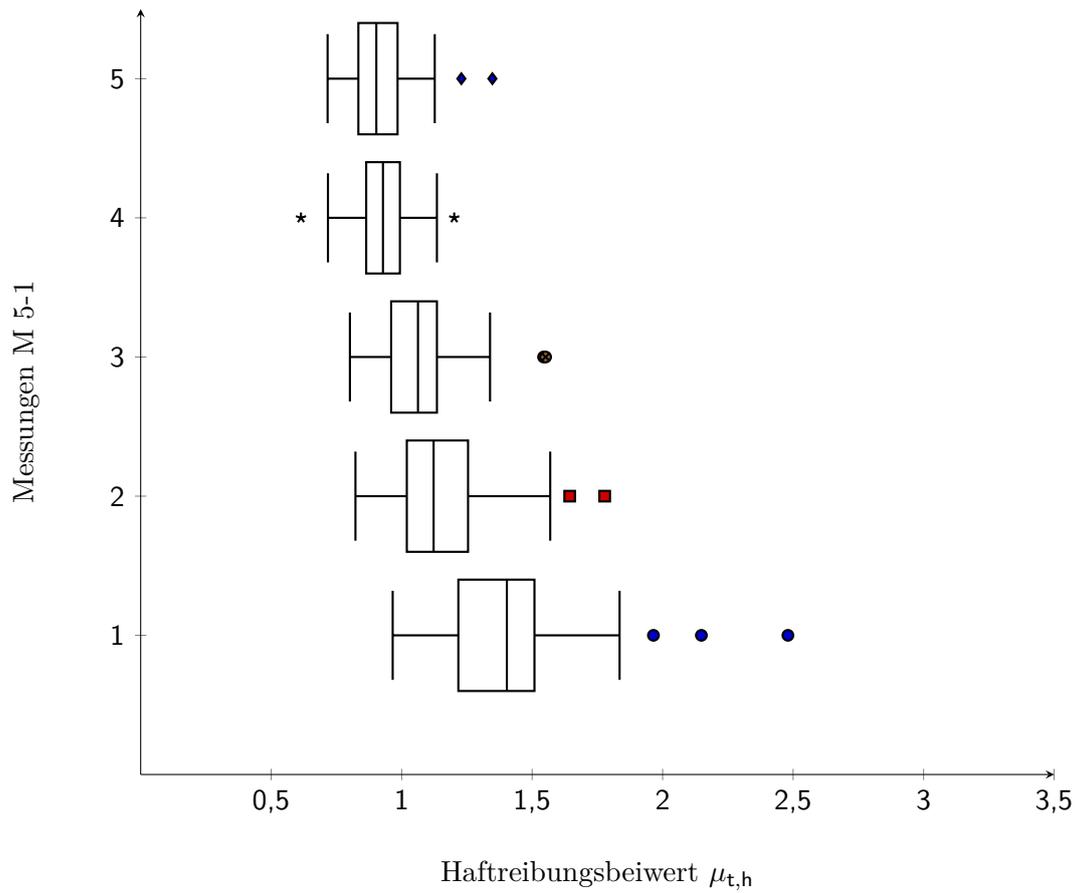


Abbildung B.5.1: Ergebnisse der Untersuchungen zum Mischgut 5-1 Messreihen mit 50 Wiederholungen

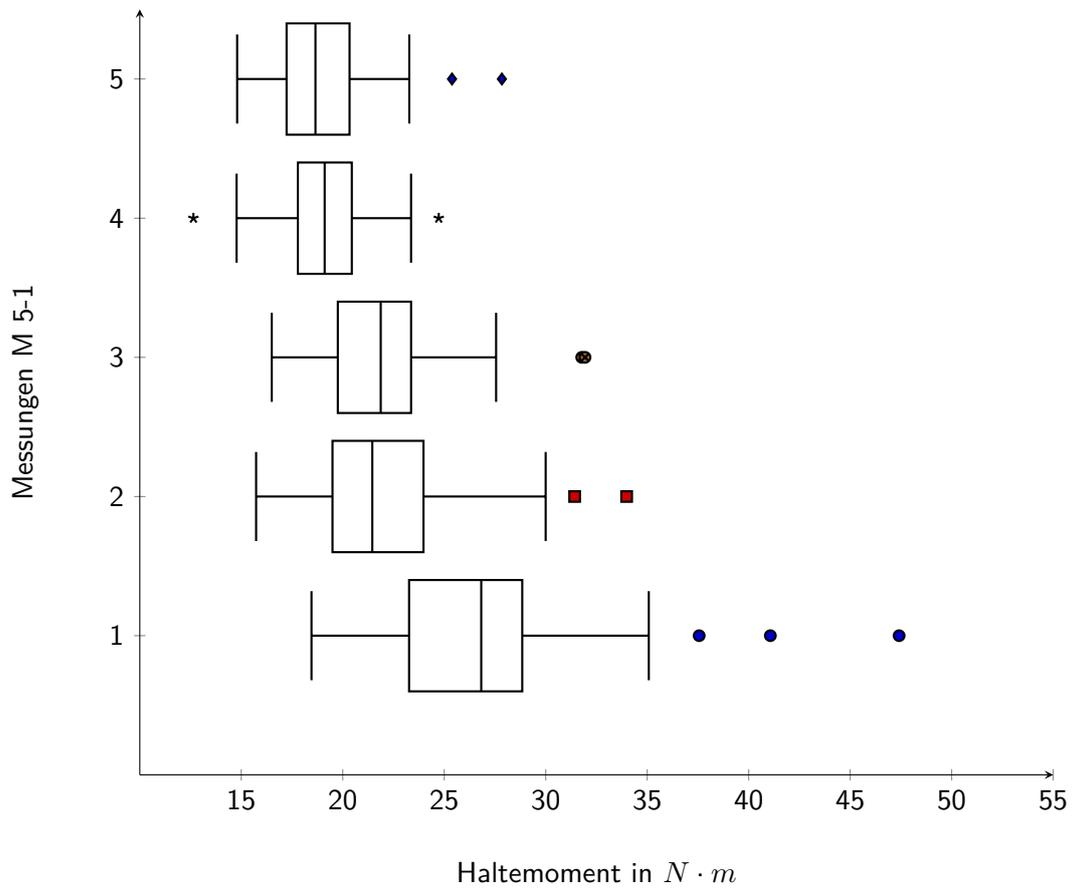


Abbildung B.5.2: Ergebnisse der Untersuchungen zum Mischgut 5-1 Messreihen mit 50 Wiederholungen

B.6 Mischgut 5-Teil 2

Tabelle B.6.1: Ergebnisse der Messungen für den Haftbeiwert 5-2

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit des Mittelwerts
M5-2-1	165,4	80	1,884	0,263	0,037
M5-2-2	165,4	100	1,181	0,136	0,019
M5-2-3	165,4	120	1,052	0,123	0,017
M5-2-4	165,4	140	0,875	0,211	0,029
M5-2-5	165,4	160	0,778	0,211	0,029

Tabelle B.6.2: Ergebnisse der Messungen für das Haltemoment 5-2

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert [N· m]	Standardabweichung [N· m]	Unsicherheit des Mittelwerts
M5-2-1	165,4	80	38,789	5,421	0,766
M5-2-2	165,4	100	29,078	3,353	0,474
M5-2-3	165,4	120	21,669	2,549	0,356
M5-2-4	165,4	140	18,015	4,360	0,610
M5-2-5	165,4	160	16,030	4,535	0,609

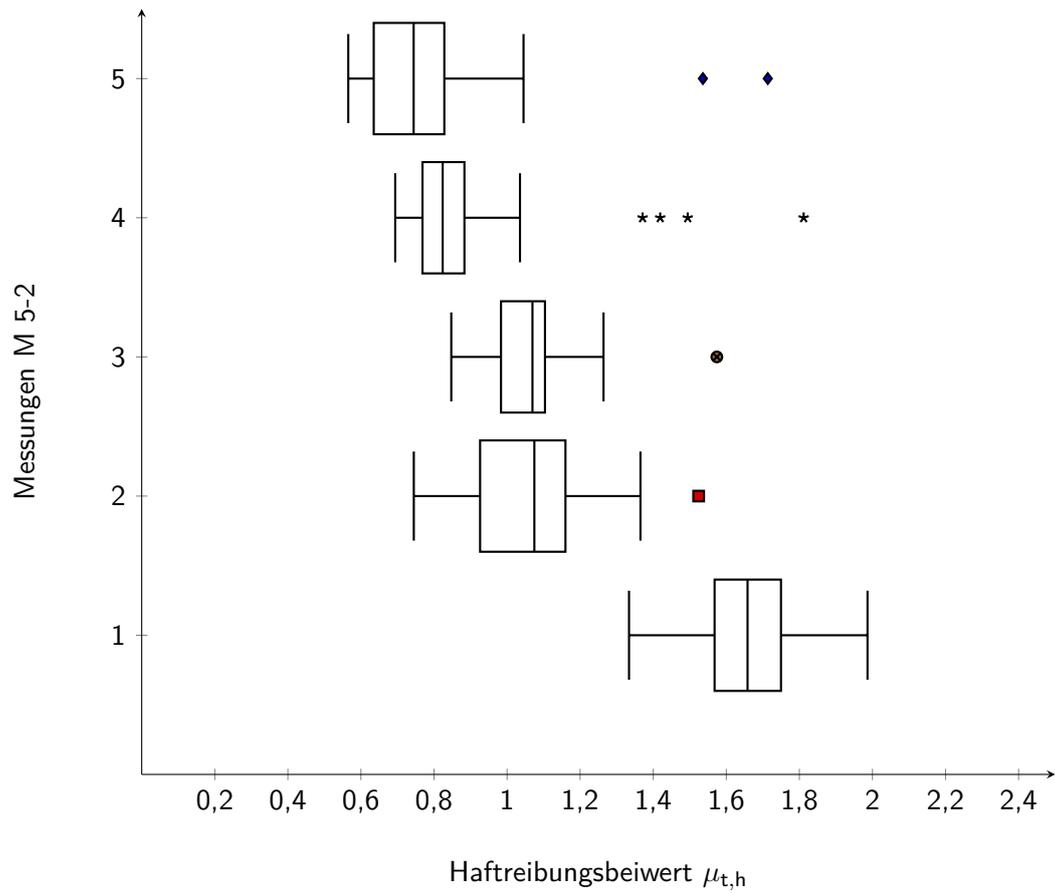


Abbildung B.6.1: Ergebnisse der Untersuchungen zum Mischgut 5-2 Messreihen mit 50 Wiederholungen

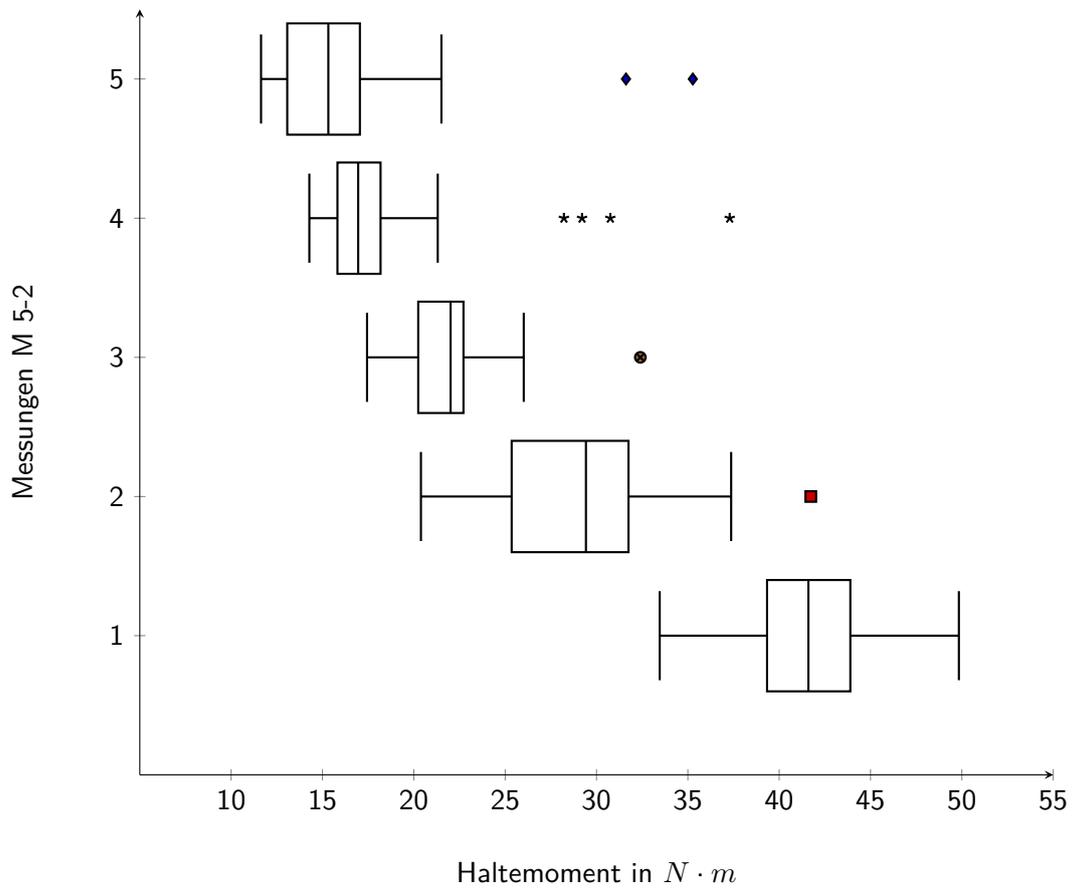


Abbildung B.6.2: Ergebnisse der Untersuchungen zum Mischgut 5-2 Messreihen mit 50 Wiederholungen

B.7 Mischgut 5-Teil 3

Tabelle B.7.1: Ergebnisse der Messungen für den Haftbeiwert 5-3

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit des Mittelwerts
M5-3-1	165,4	80	1,440	0,161	0,022
M5-3-2	165,4	100	1,199	0,131	0,018
M5-3-3	165,4	120	1,034	0,089	0,012
M5-3-4	165,4	140	0,945	0,175	0,024
M5-3-5	165,4	160	0,789	0,113	0,015

Tabelle B.7.2: Ergebnisse der Messungen für das Haltemoment 5-3

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert [N· m]	Standardabweichung [N· m]	Unsicherheit des Mittelwerts
M5-3-1	165,4	80	35,466	3,966	0,555
M5-3-2	165,4	100	24,688	2,706	0,379
M5-3-3	165,4	120	21,295	1,851	0,259
M5-3-4	165,4	140	19,457	3,60	0,504
M5-3-5	165,4	160	16,245	2,340	0,327

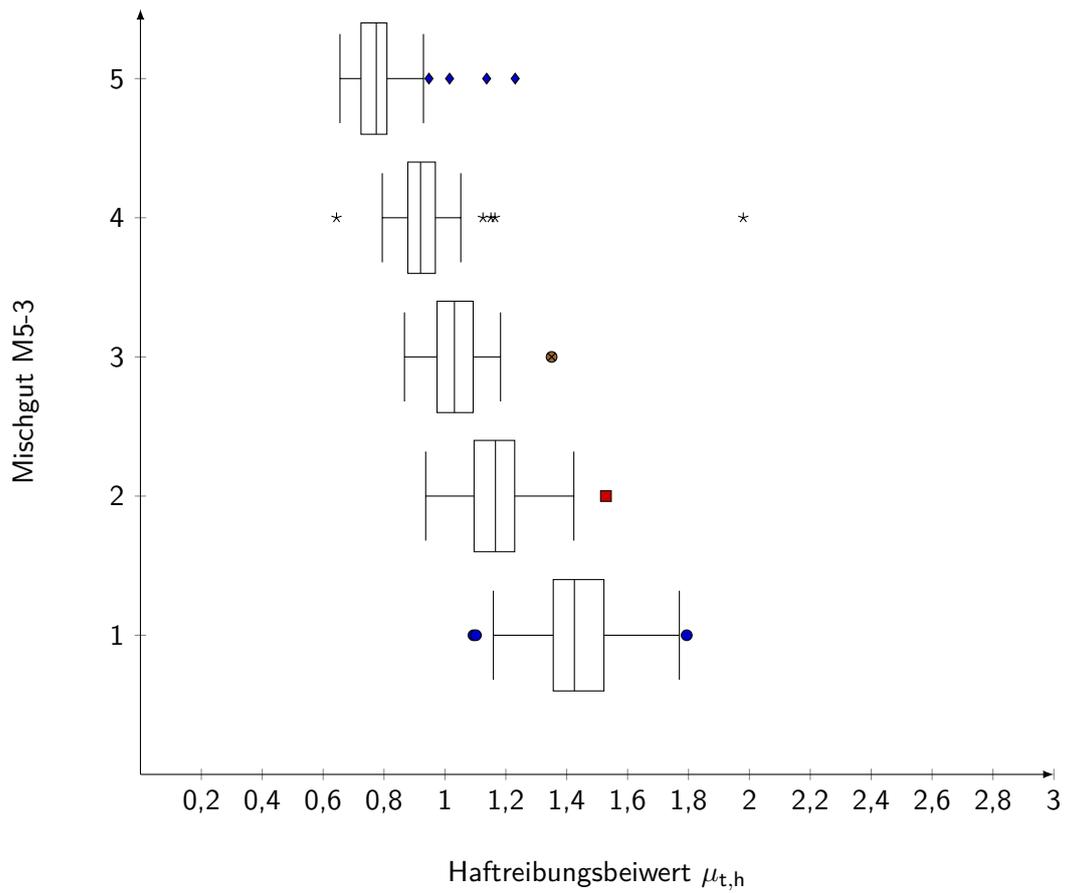


Abbildung B.7.1: Ergebnisse der Untersuchungen zum Mischgut 5-3 Messreihen mit 50 Wiederholungen

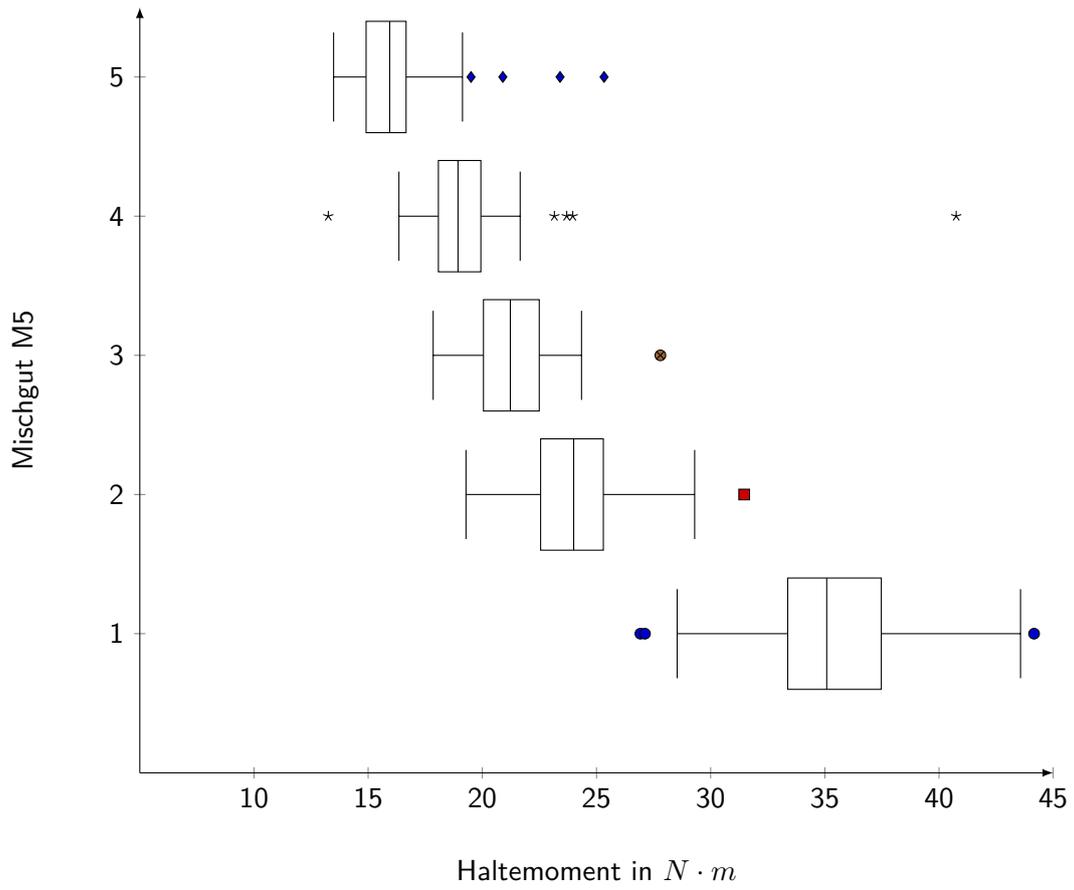


Abbildung B.7.2: Ergebnisse der Untersuchungen zum Mischgut 5-3 Messreihen mit 50 Wiederholungen

B.8 Mischgut 5-Teil 1-20s

Tabelle B.8.1: Ergebnisse der Messungen für den Haftbeiwert 5-1-20s

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit des Mittelwerts
M5-1-20s-1	165,4	120	1,337	0,168	0,030
M5-1-20s-2	165,4	140	1,537	0,248	0,045
M5-1-20s-3	165,4	160	0,395	0,072	

Tabelle B.8.2: Ergebnisse der Messungen für das Haltemoment 5-1-20s

Messreihe	Normalkraft [N]	Temp. [°C]	Arith. Mittelwert [N·m]	Standardabweichung [N·m]	Unsicherheit des Mittelwerts
M5-1-20s-1	165,4	120	27,525	3,459	0,631
M5-1-20s-2	165,4	140	31,645	5,108	0,932
M5-1-20s-3	165,4	160	33,917	8,126	1,483

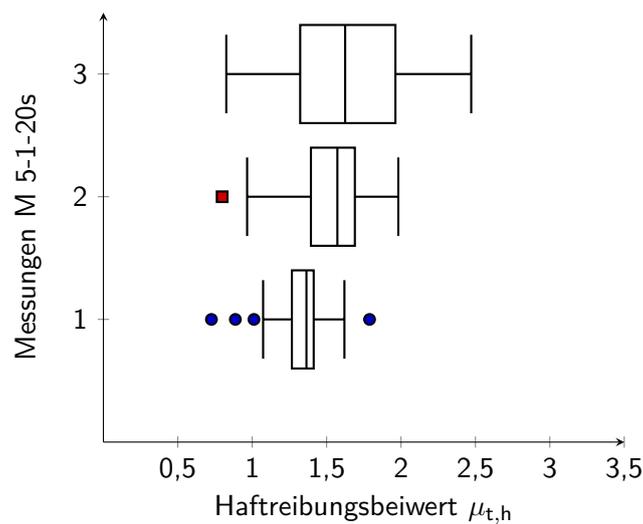


Abbildung B.8.1: Ergebnisse der Untersuchungen zum Mischgut 5-1-20s Messreihen mit 50 Wiederholungen

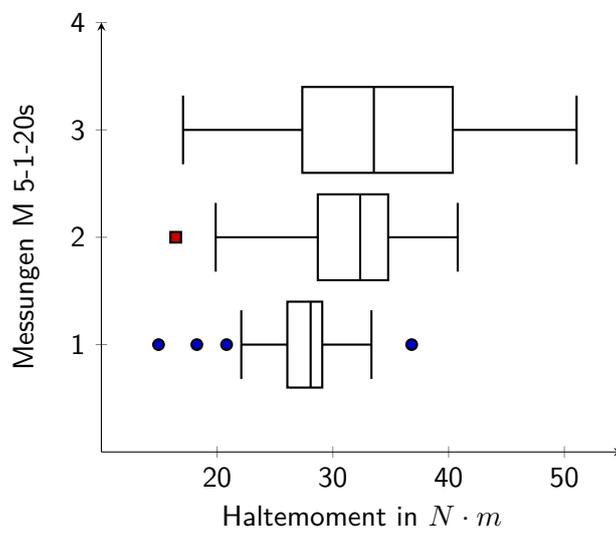


Abbildung B.8.2: Ergebnisse der Untersuchungen zum Mischgut 5-1-20s Messreihen mit 50 Wiederholungen

C Versuchspläne

C.1 Mischgut 2

Tabelle C.1.1: Veränderliche Parameter für Mischgut 2

Faktor	Name		-	+
A	Querkontraktionszahl	ν_M	0,2	0,5
B	Restitutionszahl	e_{ij}	0,2	0,8
C	Rollreibungszahl	$\mu_{t,r}$	0,5	1

Tabelle C.1.2: Vollfaktoriellen Versuchsplan für Mischgut 2 (M2-1-R1-)

Nr.	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Ergebnisse			
								Mittelwert [N · m]	Varianz [N · m]	Varianz [N]	
1	-	-	-	+	+	+	-	8,11	0,43	140,13	225,2
2	+	-	-	-	-	+	+	7,58	0,55	130,24	210,55
3	-	+	-	-	+	-	+	11,26	0,54	205,48	371,67
4	+	+	-	+	-	-	-	11,78	1,87	212,25	401,27
5	-	-	+	+	-	-	+	6,02	0,10	108,05	65,40
6	+	-	+	-	+	-	-	6,26	0,17	114,50	131,31
7	-	+	+	-	-	+	-	11,10	1,36	196,95	220,84
8	+	+	+	+	+	+	+	11,34	2,40	206,04	1086,49
$\sum Nm$	0,45	17,52	-4,01	1,05	0,48	2,81	-1,04				
Effekt	0,11	4,38	-1,00	0,26	0,12	0,70	-0,26				
$\sum N$	12,41	327,8	62,56	19,29	18,67	33,08	-14,01				
Effekt	3,10	81,95	-15,65	4,82	4,66	8,27	-3,50				

C.2 Mischgut 4

C.2.1 Eepa Kontaktmodell

Tabelle C.2.1: Veränderliche Faktoren für Mischgut Mischgut 4 für das EEPA Kontaktmodell

Faktor	Name		Einheit	-	+
A	Entlastungssteifigkeit	$k_{n,2}$	kN/m	1,25	100
B	Kohäsionssteifigkeit	k_{adh}	kN/m	0,1	100
C	Kohäsionskraft	$F_{hys,0}$	N	-0,002	-0,05

Tabelle C.2.2: Angepasste Faktoren für Mischgut Mischgut 4 für das EEPA Kontaktmodell

Faktor	Name		Einheit	-	+
A	Entlastungssteifigkeit	$k_{n,2}$	kN/m	1,25	100
B	Kohäsionssteifigkeit	k_{adh}	N/m	0,1	100
C	Kohäsionskraft	$F_{hys,0}$	N	-0,002	-0,05

Tabelle C.2.3: Vollfaktoriellen Versuchsplan für Mischgut 4 (M4-2-R₀-) mit der Parameterkombination aus Tab. C.2.2

Nr.	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Ergebnisse			
								Mittelwert [N · m]	Varianz [N · m]	Mittelwert [N]	Varianz [N]
1	-	-	-	+	+	+	-	5,21	0,07	131,19	1575,3
2	+	-	-	-	-	+	+	1,23	0,07	31,91	72,17
3	-	+	-	-	+	-	+	6,33	3,35	166,13	4353,92
4	+	+	-	+	-	-	-	1,23	0,05	29,49	50,27
5	-	-	+	+	-	-	+	8,20	2,19	217,74	1667,75
6	+	-	+	-	+	-	-	1,51	0,07	33,70	57,75
7	-	+	+	-	-	+	-	9,17	2,56	247,22	2127,79
8	+	+	+	+	+	+	+	1,77	0,08	41,36	118,03
$\sum Nm$	-23,16	2,35	6,65	-1,81	-5,0	0,11	0,41				
Effekt	-5,79	0,588	1,66	-0,45	-1,25	0,029	0,1042				
$\sum N$	-625,72	69,73	181,37	-59,26	-154,06	4,51	15,62				
Effekt	-156,43	17,43	45,34	-14,81	-38,51	1,12	3,90				

C.2.2 Jkr Kontaktmodell

Tabelle C.2.4: Ergebnisse für Mischgut 4 für das JKR Kontaktmodell

M4-3- R_0 -	Kohäsionsparameter [J/m^2]	Haltemoment [$N \cdot m$]	Normalkraft [N]
1	1	$23,3 \pm 4,9$	$679,75 \pm 160,82$
2	0,5	$18,13 \pm 5,39$	$484,92 \pm 170,96$
3	0,25	$14,17 \pm 5,86$	$380,93 \pm 172,81$
4	0,01	$9,75 \pm 5,25$	$265,69 \pm 159,97$
5	0,001	$9,46 \pm 3,61$	$238,79 \pm 100,65$
6	0,0001	$8,0 \pm 3,65$	$207,09 \pm 95,21$

Tabelle C.2.5: Faktoren für Mischgut Mischgut 4 für das JKR Kontaktmodell

Faktor	Name	Einheit	-	+
A	Restitutionszahl	e_{ij}	0,2	0,8
B	Rollreibungszahl	$\mu_{t,r}$	0,5	1
C	Kohäsionsparameter	γ_K J/m^2	0,001	0,0001

Tabelle C.2.6: Modellparameter der Simulation für Mischgut 4 mit den Faktoren A, B und C aus Tab. C.2.5

Parameter	Einheit	Bez.	JKR-Modell
Partikelradius	mm	R	3,00
Querkontraktionszahl Stahl		ν_{St}	0,25
Elastizitätsmodul Stahl	N/m^2	E_{St}	$2,1 \cdot 10^9$
Dichte Material	g/cm^3	ρ_M	7,86
Restitutionszahl		e_{ij}	A
Rollreibungszahl		$\mu_{t,r}$	B
Haftreibungszahl		$\mu_{t,h}$	0,191
Kohäsionsparameter (JKR)	J/m^2	γ_K	C
Vertikalabstand	mm	L_V	32,1

Tabelle C.2.7: Vollfaktoriellen Versuchsplan für Mischgut 4 (M4-3- R_0 - f_0) mit der Parameterkombination aus Tab. C.2.5

Nr.	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Ergebnisse			
								Mittelwert [N · m]	Varianz [N · m]	Mittelwert [N]	Varianz [N]
1	-	-	-	+	+	+	-	7,56	11,29	202,75	12040,8
2	+	-	-	-	-	+	+	7,58	1,12	177,59	1567,8
3	-	+	-	-	+	-	+	4,17	0,75	105,78	1259,88
4	+	+	-	+	-	-	-	6,88	1,77	167,71	671,39
5	-	-	+	+	-	-	+	7,6	2,77	192,84	3908,84
6	+	-	+	-	+	-	-	9,37	9,28	234,07	13539
7	-	+	+	-	-	+	-	4,12	0,6	102,41	612,64
8	+	+	+	+	+	+	+	8,65	3,8	233,99	4036,33
$\sum Nm$	-9,02	-8,28	3,55	5,45	3,56	-0,12	0,08				
Effekt	2,25	-2,07	0,88	1,36	0,89	-0,03	0,02				
$\sum N$	209,56	-197,35	109,47	177,44	136,05	16,35	3,25				
Effekt	53,39	-49,33	27,36	44,36	34,01	4,08	0,81				

Tabelle C.2.8: Ergebnis des vollständigen faktoriellen Versuchsplans für Mischgut 4 mit JKR-Kontaktmodell

M4-3- R_0 - f_0	Ergebnisse		Abweichung zu Referenzwerten	
	Haltemoment	Normalkraft	Haltemoment	Normalkraft
	[N· m]	[N]	[%]	[%]
1	7,56	202,76	58,8	32,00
2	7,58	177,59	59,31	15,62
3	4,17	105,78	12,2	31,12
4	6,88	167,71	44,68	9,18
5	7,60	192,84	59,86	25,5
6	9,37	234,7	96,9	52,39
7	4,12	102,41	13,35	33,32
8	8,65	233,996	81,87	50,34

C.3 Mischgut 5

Tabelle C.3.1: Veränderliche Parameter für Mischgut 5

Faktor	Name	Einheit	-	+
A	Entlastungssteifigkeit	$k_{n,2}$ kN/m	1,25	100
B	Kohäsionssteifigkeit	k_{adh} N/m	0,1	100
C	Kohäsionskraft	$F_{hys,0}$ N	-0,002	-0,05
D	Rollreibungszahl	$\mu_{t,r}$	0,2	0,8
E	Restitutionszahl	e_{ij}	0,5	1

Tabelle C.3.2: Fraktioneller faktorieller Versuchsplan für Mischgut 5 (M5-2-R₅-)-2⁵⁻²
Teil 1

Nr	A	B	C	D	E
1	-	-	-	-	+
2	+	-	-	-	-
3	-	+	-	-	-
4	+	+	-	-	+
5	-	-	+	-	-
6	+	-	+	-	+
7	-	+	+	-	+
8	+	+	+	-	-
9	-	-	-	+	-
10	+	-	-	+	+
11	-	+	-	+	+
12	+	+	-	+	-
13	-	-	+	+	+
14	+	-	+	+	-
15	-	+	+	+	-
16	+	+	+	+	+
$\sum Nm$	-45,72	8,93	-2,23	1,70	20,22
Effekte	-5,72	1,12	-0,28	0,21	2,53
$\sum N$	-1211,61	443,43	174,74	-15,75	548,97
Effekte	-151,45	55,43	21,84	-1,97	68,62

Tabelle C.3.3: Fraktioneller faktorieller Versuchsplan für Mischgut 5 (M5-2-R5-)-2⁵⁻² Teil 2

Nr	AB	AC	BC	AD	BD	CD	AE	BE	CE	DE
1	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
2	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+
3	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+
4	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-
5	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+
6	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-
7	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-
8	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+
9	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-
10	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+
11	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+
12	+	-	-	+	+	-	-	-	+	-
13	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+
14	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-
15	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
\sum Nm	-28,89	-27,17	-7,69	2,77	-8,52	-7,31	-16,11	5,02	13,80	15,02
Effekte	-3,61	-3,40	-0,96	0,35	-1,06	-0,91	-2,01	0,63	1,72	1,88
\sum N	-597,27	-464,93	-68,83	170,69	-216,41	-342,41	-371,92	119,21	109,66	265,08
Effekte	-74,66	-58,12	-8,60	21,34	-27,05	-42,80	-46,49	14,90	13,71	33,13

Tabelle C.3.4: Fraktioneller faktorieller Versuchsplan für Mischgut 5 (M5-2-R₅-)-2⁵⁻² Teil 3

Nr	ABC	ABD	ACD	BCD	ABE	ACE	BCE	ADE	BDE	CDE	ABCD
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
2	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-
3	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+
5	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-
6	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+
8	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-
9	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-
10	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+
11	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+
12	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-
13	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+
14	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-
15	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
∑ Nm	15,02	13,80	5,02	-16,11	-7,31	-8,52	2,77	-7,69	-27,17	-28,89	20,22
Effekte	1,88	1,72	0,63	-2,01	-0,91	-1,06	0,35	-0,96	-3,40	-3,61	2,53
∑ N	265,08	109,66	119,21	-371,92	-342,41	-216,41	170,69	-68,83	-464,93	-597,27	548,97
Effekte	33,13	13,71	14,90	-46,49	-42,80	-27,05	21,34	-8,60	-58,12	-74,66	68,62

Tabelle C.3.5: Fraktioneller faktorieller Versuchsplan für Mischgut 5 (M5-2-R5-)-2⁵⁻² Teil 4

Nr	ABCE	ABDE	ACDE	BCDE	ABCDE	Ergebnisse			
						Mittelwert [N·m]	Varianz [N·m]	Mittelwert [N]	Varianz [N]
1	-	-	-	-	+	11,6	7,6	82,7	141,1
2	-	-	-	+	+	14,2	6,5	35,8	419,0
3	-	-	+	-	+	17,9	10,9	178,3	1016,3
4	-	-	+	+	+	10,7	15,6	27,5	594,3
5	-	+	-	-	+	14,5	5,5	147,0	421,9
6	-	+	-	+	+	10,9	8,1	22,2	277,1
7	-	+	+	-	+	23,7	6,2	391,2	878,4
8	-	+	+	+	+	7,8	16,4	25,4	527,2
9	+	-	-	-	+	13,3	2,6	52,1	529,9
10	+	-	-	+	+	14,9	5,1	118,5	430,8
11	+	-	+	-	+	20,5	0,3	277,7	1689,9
12	+	-	+	+	+	9,8	5,9	42,2	140,5
13	+	+	-	-	+	19,7	3,0	217,1	2500,6
14	+	+	-	+	+	10,1	11,9	9,6	33,9
15	+	+	+	-	+	14,0	0,1	151,2	443,6
16	+	+	+	+	+	9,1	7,5	21,8	307,1
\sum Nm	1,70	-2,23	8,93	-45,72	222,82				
Effekte	0,21	-0,28	1,12	-5,72	27,85				
\sum N	-15,75	174,74	443,43	-1211,61	1806,74				
Effekte	-1,97	21,84	55,43	-151,45	225,84				

Tabelle C.3.6: Ergebnis des fraktionellen faktoriellen Versuchsplans für Mischgut 5

M5-2- R_5 -	Ergebnisse		Abweichung zu Referenzwerten	
	Haltemoment	Normalkraft	Haltemoment	Normalkraft
	[N· m]	[N]	[[%]]	[[%]]
1	11,61	82,73	32	49
2	14,26	35,84	16	78
3	17,91	178,33	4	8
4	10,71	27,56	37	83
5	14,57	147,02	14	10
6	10,97	22,27	35	86
7	23,79	391,24	39	137
8	7,82	25,43	54	84
9	13,38	52,03	21	68
10	14,96	118,58	12	28
11	20,52	277,70	20	68
12	9,88	42,23	42	74
13	19,70	217,13	15	31
14	10,14	9,65	40	94
15	14,08	151,23	17	8
16	9,16	21,84	46	86

D Mathematischer Zusammenhang bei einer Ringscherzelle

Das Haltemoment $M_{V,s}$ lässt sich mit Hilfe der Hebelradien $R_{V,s,1} = R_{V,s,2} = R_{V,s}$ am Stator und der gemessenen Kräfte $F_{V,m,1}$ sowie $F_{V,m,2}$ (vgl. hierzu Abb. D.0.1) wie folgt bestimmen

$$\begin{aligned} M_{V,s} &= F_{V,m,1} \cdot R_{V,s} + F_{V,m,2} \cdot R_{V,s} \\ &= R_{V,s} \cdot (F_{V,m,1} + F_{V,m,2}) \end{aligned} \quad (\text{D.0.1})$$

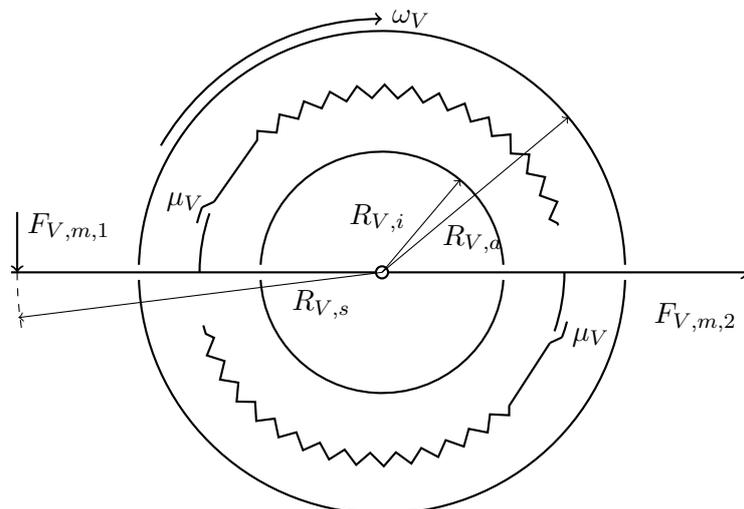


Abbildung D.0.1: Schematische Darstellung der Geometrie und Kräfte einer Ringscherzelle nach SCHULZE

Der Reibbeiwert μ wird über den Anteil der Reibkraft in tangentialer Richtung $dF_{K,r}$ ermittelt. Hierzu wird der Kraftanteil $dF_{K,n}$ in normaler Richtung gebraucht, der mit Hilfe der Kreissegmentfläche dA_P , den dazugehörigen Polarkoordinaten φ und r und dem beaufschlagten Druck p_V gebildet wird. Der mathematische Zusammenhang ist in Gleichung D.0.2 dargestellt.

$$\begin{aligned} dA_P &= r \cdot d\varphi \cdot dr \\ dF_{K,n} &= r \cdot d\varphi \cdot dr \cdot p_V \\ dF_{K,r} &= r \cdot d\varphi \cdot dr \cdot \mu \cdot p_V \end{aligned} \quad (\text{D.0.2})$$

Das Reibmoment wird durch die Einführung des Anteils des Reibmoments $dM_{K,r} = dF_{K,r} \cdot r$ zu

$$dM_{K,r} = r^2 \cdot d\varphi \cdot dr \cdot \mu \cdot p_V \quad (\text{D.0.3})$$

substituiert. Das Integral kann durch die Kenntnis der Radien $R_{V,a}$ und $R_{V,i}$ an der Außen- bzw. Innenseite der Scherzelle gelöst werden, siehe Gleichung D.0.4.

$$\begin{aligned} M_{K,r} &= \mu \cdot p_V \cdot \int_{R_{V,i}}^{R_{V,a}} \int_0^{2\pi} r^2 d\varphi dr \\ &= \mu \cdot p_V \cdot \int_{R_{V,i}}^{R_{V,a}} 2 \cdot \pi \cdot r^2 dr \\ &= 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot p_V \cdot \left. \frac{r^3}{3} \right|_{R_{V,i}}^{R_{V,a}} \\ &= 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot p_V \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(R_{V,a}^3 - R_{V,i}^3 \right) \end{aligned} \quad (\text{D.0.4})$$

Der Druck p_V lässt sich über den Kraftanteil in normaler Richtung $F_{V,n}$ und der Probenfläche A_P bestimmen. Dadurch lässt sich das Reibmoments $dM_{K,r,t}$, wie in Gleichung D.0.5 dargestellt umformen.

$$M_{K,r} = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot F_{V,n} \cdot \frac{R_{V,a}^3 - R_{V,i}^3}{R_{V,a}^2 - R_{V,i}^2} \quad (\text{D.0.5})$$

Durch das Gleichsetzen der Zusammenhänge D.0.5 und D.0.1 und dem anschließenden Auflösen kann der Reibbeiwert μ ermittelt werden.

$$\begin{aligned} M_{V,s} &= M_{K,r} \\ R_{V,s} \cdot (F_{V,m,1} + F_{V,m,2}) &= \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot F_{V,n} \cdot \frac{R_{V,a}^3 - R_{V,i}^3}{R_{V,a}^2 - R_{V,i}^2} \\ \rightsquigarrow \mu &= \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{V,m,1} + F_{V,m,2}}{F_{V,n}} \cdot \frac{R_{V,s} \cdot (R_{V,a}^2 - R_{V,i}^2)}{R_{V,a}^3 - R_{V,i}^3} \end{aligned} \quad (\text{D.0.6})$$

Je nachdem, ob zur Bestimmung des Reibbeiwerts das Haltemoment $M_{V,s}$ beim Übergang von Haft- zu Gleitreibung bzw. während des stationären Gleitens in Beziehung D.0.6 eingesetzt wird, erhält man $\mu_{t,h}$ respektive $\mu_{t,g}$ als Ergebnis.

E Tabellen und Berechnung für Shapiro -Wilk

E.1 Eigenwert und Faktoren für Shapiro-Wilk

Tabelle E.1.1: Faktoren a_j

n=30	Wiederholungen n	
	n=40	n=50
0,4254	0,3964	0,3751
0,2944	0,2737	0,2574
0,2487	0,2368	0,226
0,2148	0,2098	0,2032
0,187	0,1878	0,1847
0,163	0,1691	0,1691
0,1415	0,1526	0,1554
0,1219	0,1376	0,143
0,1036	0,1237	0,1317
0,0862	0,1108	0,1212
0,0697	0,0986	0,1113
0,0537	0,087	0,102
0,0381	0,0759	0,0932
0,0227	0,0651	0,0846
0,0076	0,0546	0,0764
0	0,0444	0,0685
0	0,0343	0,0608
0	0,0244	0,0532
0	0,0146	0,0459
0	0,0049	0,0386
0	0	0,0314
0	0	0,0244
0	0	0,0174
0	0	0,0104
0	0	0,0035

Tabelle E.1.2: Kritischer Wert SW_{krit}

Wiederholungen n	30	40	50
Kritischer Wert SW_{krit}	0,927	0,94	0,947

E.2 Prüfstandsvalidierung-physikalisch

Tabelle E.2.1: Messwerte des Haltemoments bei Normalkraft 104 N und 21 Grad

Messwerte (N· m)	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
0,1936	0,1665	0,3076	0,1411	0,0595	0,2028	0,0411	0,9494
0,2371	0,1736	0,3058	0,1322	0,0386			
0,2409	0,1747	0,2826	0,1079	0,0267			
0,2735	0,1878	0,2735	0,0857	0,0184			
0,2702	0,1878	0,2702	0,0824	0,0154			
0,2826	0,1936	0,2689	0,0754	0,0124			
0,1938	0,1938	0,2657	0,0720	0,0103			
0,1665	0,1993	0,2625	0,0632	0,0079			
0,2625	0,2012	0,2470	0,0457	0,0049			
0,3076	0,2047	0,2409	0,0362	0,0033			
0,2657	0,2074	0,2371	0,0297	0,0022			
0,2689	0,2092	0,2360	0,0268	0,0016			
0,2104	0,2104	0,2354	0,0250	0,0011			
0,2300	0,2115	0,2300	0,0185	0,0005			
0,3058	0,2120	0,2183	0,0063	0,0001			
0,2354	0,2150	0,2150	0,0000				
0,1878	0,2183	0,2120	-0,0063				
0,1878	0,2300	0,2115	-0,0185				
0,2470	0,2354	0,2104	-0,0250				
0,2150	0,2360	0,2092	-0,0268				
0,2092	0,2371	0,2074	-0,0297				
0,1736	0,2409	0,2047	-0,0362				
0,2074	0,2470	0,2012	-0,0457				
0,2183	0,2625	0,1993	-0,0632				
0,2120	0,2657	0,1938	-0,0720				
0,1747	0,2689	0,1936	-0,0754				
0,2012	0,2702	0,1878	-0,0824				
0,2360	0,2735	0,1878	-0,0857				
0,2047	0,2826	0,1747	-0,1079				
0,1993	0,3058	0,1736	-0,1322				
0,2115	0,3076	0,1665	-0,1411				

Tabelle E.2.2: Messwerte des Haltemoments bei Normalkraft 150 N und 21 Grad

Messwerte (N· m)	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
0,192	0,192	0,247	0,055	0,023	0,078	0,006	0,968
0,217	0,197	0,246	0,049	0,014			
0,247	0,201	0,244	0,043	0,011			
0,224	0,204	0,239	0,034	0,007			
0,212	0,205	0,236	0,030	0,006			
0,227	0,206	0,235	0,029	0,005			
0,213	0,207	0,235	0,028	0,004			
0,239	0,207	0,229	0,022	0,003			
0,235	0,208	0,227	0,019	0,002			
0,197	0,212	0,225	0,013	0,001			
0,219	0,213	0,224	0,011	0,001			
0,235	0,213	0,222	0,009	0,001			
0,213	0,214	0,221	0,007	0,000			
0,222	0,217	0,221	0,004	0,000			
0,225	0,217	0,219	0,002	0,000			
0,207	0,219	0,219	0,000				
0,205	0,219	0,217	-0,002				
0,206	0,221	0,217	-0,004				
0,229	0,221	0,214	-0,007				
0,221	0,222	0,213	-0,009				
0,214	0,224	0,213	-0,011				
0,217	0,225	0,212	-0,013				
0,204	0,227	0,208	-0,019				
0,244	0,229	0,207	-0,022				
0,221	0,235	0,207	-0,028				
0,207	0,235	0,206	-0,029				
0,246	0,236	0,205	-0,030				
0,236	0,239	0,204	-0,034				
0,219	0,244	0,201	-0,043				
0,208	0,246	0,197	-0,049				
0,201	0,247	0,192	-0,055				

Tabelle E.2.3: Messwerte des Haltemoments bei Normalkraft 200 N und 21 Grad

Messwerte (N· m)	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
0,2312	0,1836	0,2593	0,0758	0,0320	0,1094	0,0120	0,9506
0,2510	0,1862	0,2550	0,0688	0,0201			
0,2294	0,1955	0,2510	0,0555	0,0137			
0,2356	0,2011	0,2503	0,0491	0,0105			
0,2354	0,2054	0,2502	0,0447	0,0084			
0,2069	0,2069	0,2487	0,0418	0,0069			
0,2437	0,2084	0,2455	0,0371	0,0053			
0,2165	0,2111	0,2450	0,0339	0,0042			
0,2054	0,2122	0,2437	0,0314	0,0033			
0,2503	0,2161	0,2391	0,0229	0,0021			
0,2011	0,2165	0,2387	0,0222	0,0016			
0,1862	0,2218	0,2356	0,0138	0,0008			
0,2487	0,2294	0,2354	0,0060	0,0003			
0,2450	0,2297	0,2335	0,0038	0,0001			
0,2550	0,2298	0,2327	0,0029	0,0000			
0,2593	0,2312	0,2312	0,0000				
0,2218	0,2327	0,2298	-0,0029				
0,2084	0,2335	0,2297	-0,0038				
0,2297	0,2354	0,2294	-0,0060				
0,1955	0,2356	0,2218	-0,0138				
0,2455	0,2387	0,2165	-0,0222				
0,2391	0,2391	0,2161	-0,0229				
0,1836	0,2437	0,2122	-0,0314				
0,2387	0,2450	0,2111	-0,0339				
0,2335	0,2455	0,2084	-0,0371				
0,2502	0,2487	0,2069	-0,0418				
0,2327	0,2502	0,2054	-0,0447				
0,2111	0,2503	0,2011	-0,0491				
0,2161	0,2510	0,1955	-0,0555				
0,2122	0,2550	0,1862	-0,0688				
0,2298	0,2593	0,1836	-0,0758				

Tabelle E.2.4: Messwerte des Haltemoments bei Normalkraft 104 N und 120 Grad

Messwerte (N· m)	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
0,1821	0,1696	0,2240	0,0544	0,0230	0,0788	0,0062	0,9453
0,1796	0,1721	0,2154	0,0433	0,0127			
0,1989	0,1723	0,2109	0,0386	0,0096			
0,2019	0,1750	0,2103	0,0353	0,0076			
0,1721	0,1767	0,2083	0,0316	0,0059			
0,1944	0,1770	0,2081	0,0311	0,0051			
0,1796	0,1791	0,2072	0,0281	0,0040			
0,2154	0,1791	0,2064	0,0273	0,0034			
0,1767	0,1796	0,2047	0,0251	0,0027			
0,1854	0,1796	0,2019	0,0222	0,0020			
0,2064	0,1821	0,2002	0,0181	0,0013			
0,1840	0,1840	0,1989	0,0149	0,0009			
0,1770	0,1847	0,1944	0,0098	0,0004			
0,1928	0,1854	0,1928	0,0074	0,0002			
0,1926	0,1883	0,1926	0,0043	0,0001			
0,1791	0,1889	0,1889	0,0000				
0,2002	0,1926	0,1883	-0,0043				
0,1883	0,1928	0,1854	-0,0074				
0,2081	0,1944	0,1847	-0,0098				
0,2083	0,1989	0,1840	-0,0149				
0,2103	0,2002	0,1821	-0,0181				
0,2240	0,2019	0,1796	-0,0222				
0,2109	0,2047	0,1796	-0,0251				
0,2072	0,2064	0,1791	-0,0273				
0,1750	0,2072	0,1791	-0,0281				
0,2047	0,2081	0,1770	-0,0311				
0,1791	0,2083	0,1767	-0,0316				
0,1889	0,2103	0,1750	-0,0353				
0,1847	0,2109	0,1723	-0,0386				
0,1723	0,2154	0,1721	-0,0433				
0,1696	0,2240	0,1696	-0,0544				

Tabelle E.2.5: Messwerte des Haltemoments bei Normalkraft 150 N und 120 Grad

Messwerte (N· m)	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
0,2071	0,1816	0,2636	0,0820	0,0343	0,0966	0,0093	0,9747
0,2332	0,1949	0,2604	0,0655	0,0190			
0,2178	0,2050	0,2451	0,0401	0,0099			
0,2357	0,2054	0,2412	0,0358	0,0077			
0,1949	0,2071	0,2404	0,0333	0,0063			
0,2107	0,2084	0,2381	0,0297	0,0049			
0,2412	0,2085	0,2365	0,0280	0,0041			
0,2404	0,2107	0,2357	0,0250	0,0032			
0,2115	0,2115	0,2348	0,0233	0,0025			
0,2130	0,2116	0,2332	0,0216	0,0020			
0,2163	0,2130	0,2268	0,0139	0,0011			
0,2253	0,2144	0,2267	0,0123	0,0008			
0,2348	0,2156	0,2263	0,0107	0,0005			
0,2365	0,2163	0,2253	0,0090	0,0003			
0,2116	0,2178	0,2235	0,0057	0,0001			
0,2085	0,2183	0,2211	0,0028				
0,2451	0,2211	0,2183	-0,0028				
0,2268	0,2235	0,2178	-0,0057				
0,2050	0,2253	0,2163	-0,0090				
0,2156	0,2263	0,2156	-0,0107				
0,2084	0,2267	0,2144	-0,0123				
0,1816	0,2268	0,2130	-0,0139				
0,2235	0,2332	0,2116	-0,0216				
0,2183	0,2348	0,2115	-0,0233				
0,2381	0,2357	0,2107	-0,0250				
0,2054	0,2365	0,2085	-0,0280				
0,2263	0,2381	0,2084	-0,0297				
0,2267	0,2404	0,2071	-0,0333				
0,2604	0,2412	0,2054	-0,0358				
0,2636	0,2451	0,2050	-0,0401				
0,2211	0,2604	0,1949	-0,0655				
0,2144	0,2636	0,1816	-0,0820				

Tabelle E.2.6: Messwerte des Haltemoments bei Normalkraft 200 N und 120 Grad

Messwerte (N· m)	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
0,2017	0,1968	0,2347	0,0379	0,0148	0,0509	0,0026	0,9446
0,2080	0,1981	0,2262	0,0281	0,0076			
0,2152	0,2002	0,2256	0,0253	0,0059			
0,2197	0,2005	0,2220	0,0215	0,0045			
0,2114	0,2006	0,2197	0,0191	0,0036			
0,2347	0,2012	0,2179	0,0167	0,0028			
0,2117	0,2014	0,2172	0,0158	0,0024			
0,2172	0,2017	0,2160	0,0143	0,0020			
0,2256	0,2025	0,2152	0,0127	0,0016			
0,2089	0,2026	0,2144	0,0119	0,0013			
0,2027	0,2027	0,2136	0,0108	0,0011			
0,2220	0,2031	0,2127	0,0096	0,0009			
0,2031	0,2032	0,2124	0,0093	0,0007			
0,2072	0,2051	0,2123	0,0072	0,0005			
0,2160	0,2055	0,2117	0,0062	0,0004			
0,2115	0,2057	0,2115	0,0057	0,0003			
0,2026	0,2072	0,2114	0,0041	0,0002			
0,2084	0,2076	0,2110	0,0034	0,0001			
0,2055	0,2080	0,2104	0,0025	0,0001			
0,2057	0,2082	0,2089	0,0007	0,0000			
0,2179	0,2084	0,2084	0,0000	0,0000			
0,2014	0,2089	0,2082	-0,0007				
0,2006	0,2104	0,2080	-0,0025				
0,2144	0,2110	0,2076	-0,0034				
0,2123	0,2114	0,2072	-0,0041				
0,2136	0,2115	0,2057	-0,0057				
0,2262	0,2117	0,2055	-0,0062				
0,2076	0,2123	0,2051	-0,0072				
0,2104	0,2124	0,2032	-0,0093				
0,2124	0,2127	0,2031	-0,0096				
0,2005	0,2136	0,2027	-0,0108				
0,2025	0,2144	0,2026	-0,0119				
0,2032	0,2152	0,2025	-0,0127				
0,2002	0,2160	0,2017	-0,0143				
0,1968	0,2172	0,2014	-0,0158				
0,2012	0,2179	0,2012	-0,0167				
0,1981	0,2197	0,2006	-0,0191				
0,2051	0,2220	0,2005	-0,0215				
0,2127	0,2256	0,2002	-0,0253				
0,2082	0,2262	0,1981	-0,0281				
0,2110	0,2347	0,1968	-0,0379				

E.3 Prüfstandsvalidierung-simulativ

Tabelle E.3.1: Simulationsergebnisse der Validierung für das Haltemoment

Messwerte (N· m)	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
3,96	2,17	11,66	9,49	4,037046	12,898086	166,3606225	0,869753411
4,76	2,19	10,89	8,7	2,56128			
11,66	2,38	8,55	6,17	1,534479			
3,24	2,45	8,52	6,07	1,303836			
8,52	2,49	7,57	5,08	0,94996			
3,46	2,62	7,47	4,85	0,79055			
3,24	2,72	6,75	4,03	0,570245			
4,74	3,1	6,58	3,48	0,424212			
2,62	3,24	6,42	3,18	0,329448			
8,55	3,24	5,4	2,16	0,186192			
6,75	3,34	4,76	1,42	0,098974			
2,49	3,46	4,74	1,28	0,068736			
4,49	3,68	4,49	0,81	0,030861			
4,23	3,83	4,28	0,45	0,010215			
6,42	3,96	4,23	0,27	0,002052			
3,34	4,23	3,96	-0,27				
2,45	4,28	3,83	-0,45				
2,19	4,49	3,68	-0,81				
3,1	4,74	3,46	-1,28				
5,4	4,76	3,34	-1,42				
3,83	5,4	3,24	-2,16				
10,89	6,42	3,24	-3,18				
7,57	6,58	3,1	-3,48				
2,17	6,75	2,72	-4,03				
4,28	7,47	2,62	-4,85				
3,68	7,57	2,49	-5,08				
7,47	8,52	2,45	-6,07				
2,72	8,55	2,38	-6,17				
6,58	10,89	2,19	-8,7				
2,38	11,66	2,17	-9,49				

Tabelle E.3.2: Simulationsergebnisse der Validierung für die Normalkraft

Messwerte (N)	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
111,98	54,39	335,37	280,98	119,528892	366,834611	134567,6318	0,854660513
116	54,79	274,72	219,93	64,747392			
335,37	57,78	230,83	173,05	43,037535			
72,82	62,2	224,42	162,22	34,844856			
230,83	67,71	217,76	150,05	28,05935			
90,51	69,41	211,4	141,99	23,14437			
72,97	70,24	202,94	132,7	18,77705			
129,77	72,82	180,21	107,39	13,090841			
75,11	72,97	172,56	99,59	10,317524			
224,42	75,11	129,77	54,66	4,711692			
180,21	79,68	123,88	44,2	3,08074			
57,78	82,48	119,51	37,03	1,988511			
110,31	89,27	116	26,73	1,018413			
119,51	90,51	111,98	21,47	0,487369			
211,4	110,3	110,31	0,01	7,6E-05			
82,48	110,31	110,3	-0,01				
70,24	111,98	90,51	-21,47				
54,39	116	89,27	-26,73				
69,41	119,51	82,48	-37,03				
123,88	123,88	79,68	-44,2				
89,27	129,77	75,11	-54,66				
274,72	172,56	72,97	-99,59				
202,94	180,21	72,82	-107,39				
67,71	202,94	70,24	-132,7				
110,3	211,4	69,41	-141,99				
79,68	217,76	67,71	-150,05				
217,76	224,42	62,2	-162,22				
62,2	230,83	57,78	-173,05				
172,56	274,72	54,79	-219,93				
54,79	335,37	54,39	-280,98				

E.4 Mischgut 1

Tabelle E.4.1: Messwerte für Mischgut 1-1 (Reibwerte)

Messwerte	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
1,783	1,783	5,843	4,060	1,727	5,163	26,660	0,982
4,446	2,340	5,103	2,763	0,814			
2,555	2,360	5,044	2,684	0,668			
2,972	2,363	4,985	2,622	0,563			
4,544	2,555	4,544	1,989	0,372			
3,986	2,816	4,522	1,707	0,278			
3,839	2,824	4,446	1,623	0,230			
3,231	2,972	4,356	1,384	0,169			
3,343	2,981	4,226	1,245	0,129			
4,226	3,050	4,071	1,020	0,088			
4,071	3,231	4,067	0,836	0,058			
5,103	3,241	3,986	0,745	0,040			
5,843	3,273	3,839	0,566	0,022			
4,067	3,343	3,634	0,291	0,007			
5,044	3,500	3,532	0,032	0,000			
2,816	3,532	3,500	-0,032				
4,522	3,634	3,343	-0,291				
3,241	3,839	3,273	-0,566				
4,985	3,986	3,241	-0,745				
3,500	4,067	3,231	-0,836				
3,273	4,071	3,050	-1,020				
3,634	4,226	2,981	-1,245				
3,050	4,356	2,972	-1,384				
2,981	4,446	2,824	-1,623				
3,532	4,522	2,816	-1,707				
2,363	4,544	2,555	-1,989				
2,360	4,985	2,363	-2,622				
2,340	5,044	2,360	-2,684				
2,824	5,103	2,340	-2,763				
4,356	5,843	1,783	-4,060				

Tabelle E.4.2: Messwerte für Mischgut 1-2 (Reibwerte)

Messwerte	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
2,536	1,403	6,091	4,688	1,994	5,276	27,832	0,931
2,752	1,624	4,783	3,159	0,294			
1,403	1,651	4,767	3,115	0,249			
4,020	2,223	4,227	2,004	0,215			
3,539	2,244	4,020	1,776	0,187			
3,751	2,322	3,808	1,486	0,163			
4,783	2,342	3,751	1,409	0,142			
2,467	2,352	3,539	1,188	0,122			
2,653	2,467	3,275	0,809	0,104			
2,819	2,536	3,181	0,645	0,086			
1,624	2,561	3,169	0,608	0,070			
2,561	2,653	3,115	0,462	0,054			
2,658	2,658	3,061	0,402	0,038			
3,169	2,700	2,925	0,225	0,023			
4,227	2,752	2,819	0,067	0,008			
2,223	2,819	2,752	-0,067				
2,342	2,925	2,700	-0,225				
2,700	3,061	2,658	-0,402				
3,115	3,115	2,653	-0,462				
3,061	3,169	2,561	-0,608				
2,244	3,181	2,536	-0,645				
2,925	3,275	2,467	-0,809				
4,767	3,539	2,352	-1,188				
2,352	3,751	2,342	-1,409				
2,322	3,808	2,322	-1,486				
1,651	4,020	2,244	-1,776				
3,275	4,227	2,223	-2,004				
3,181	4,767	1,651	-3,115				
6,091	4,783	1,624	-3,159				
3,808	6,091	1,403	-4,688				

Tabelle E.4.3: Messwerte für Mischgut 1-3 (Reibwerte)

Messwerte	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
2,261	1,237	4,241	3,004	1,278	4,566	20,845	0,941
1,502	1,362	4,069	2,706	0,797			
1,835	1,502	3,991	2,489	0,619			
2,595	1,518	3,652	2,134	0,458			
3,390	1,744	3,397	1,653	0,309			
3,066	1,762	3,390	1,629	0,265			
3,312	1,766	3,312	1,546	0,219			
1,766	1,766	3,298	1,533	0,187			
3,991	1,810	3,279	1,469	0,152			
1,766	1,835	3,066	1,231	0,106			
3,298	1,844	2,941	1,097	0,076			
4,241	1,911	2,875	0,964	0,052			
2,941	1,940	2,843	0,903	0,034			
3,652	2,076	2,595	0,518	0,012			
2,875	2,261	2,344	0,082	0,001			
3,279	2,344	2,261	-0,082				
4,069	2,595	2,076	-0,518				
2,344	2,843	1,940	-0,903				
1,940	2,875	1,911	-0,964				
1,911	2,941	1,844	-1,097				
1,844	3,066	1,835	-1,231				
1,762	3,279	1,810	-1,469				
1,744	3,298	1,766	-1,533				
2,843	3,312	1,766	-1,546				
1,237	3,390	1,762	-1,629				
1,518	3,397	1,744	-1,653				
3,397	3,652	1,518	-2,134				
1,362	3,991	1,502	-2,489				
2,076	4,069	1,362	-2,706				
1,810	4,241	1,237	-3,004				

E.5 Mischgut 2

Tabelle E.5.1: Messwerte für Mischgut 2-1 (Reibwerte)

Messwerte	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
3,552	1,700	4,722	3,022	1,286	4,394	19,311	0,937
3,947	2,325	4,698	2,374	0,699			
2,325	2,473	4,693	2,220	0,552			
3,515	2,568	4,599	2,031	0,436			
2,793	2,650	4,598	1,948	0,364			
2,986	2,784	4,457	1,673	0,273			
2,568	2,793	4,404	1,611	0,228			
2,650	2,871	4,287	1,416	0,173			
3,465	2,952	4,280	1,328	0,138			
2,473	2,986	4,268	1,283	0,111			
3,922	2,986	4,146	1,160	0,081			
4,268	3,465	3,959	0,494	0,027			
3,959	3,469	3,947	0,478	0,018			
2,871	3,515	3,922	0,407	0,009			
4,280	3,552	3,717	0,165	0,001			
4,722	3,717	3,552	-0,165				
4,457	3,922	3,515	-0,407				
2,784	3,947	3,469	-0,478				
2,952	3,959	3,465	-0,494				
4,599	4,146	2,986	-1,160				
1,700	4,268	2,986	-1,283				
4,598	4,280	2,952	-1,328				
3,469	4,287	2,871	-1,416				
4,698	4,404	2,793	-1,611				
4,146	4,457	2,784	-1,673				
2,986	4,598	2,650	-1,948				
3,717	4,599	2,568	-2,031				
4,693	4,693	2,473	-2,220				
4,287	4,698	2,325	-2,374				
4,404	4,722	1,700	-3,022				

Tabelle E.5.2: Messwerte für Mischgut 2-2 (Reibwerte)

Messwerte	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
3,207	1,888	4,670	2,782	1,165	4,374	19,136	0,989
2,405	2,159	4,531	2,372	0,687			
3,881	2,187	4,492	2,305	0,568			
4,307	2,312	4,370	2,058	0,441			
3,954	2,405	4,338	1,933	0,363			
1,888	2,494	4,307	1,813	0,299			
2,799	2,613	4,271	1,658	0,240			
4,041	2,628	4,258	1,630	0,206			
2,312	2,712	4,041	1,329	0,145			
4,531	2,799	3,954	1,155	0,108			
4,258	3,133	3,923	0,789	0,061			
3,923	3,207	3,917	0,710	0,045			
3,725	3,250	3,881	0,631	0,031			
4,370	3,547	3,858	0,311	0,011			
4,670	3,606	3,823	0,217	0,004			
4,492	3,682	3,725	0,042	0,000			
3,133	3,725	3,682	-0,042				
4,271	3,823	3,606	-0,217				
3,606	3,858	3,547	-0,311				
3,823	3,881	3,250	-0,631				
3,547	3,917	3,207	-0,710				
2,159	3,923	3,133	-0,789				
4,338	3,954	2,799	-1,155				
3,858	4,041	2,712	-1,329				
2,187	4,258	2,628	-1,630				
3,250	4,271	2,613	-1,658				
2,494	4,307	2,494	-1,813				
3,682	4,338	2,405	-1,933				
2,628	4,370	2,312	-2,058				
2,712	4,492	2,187	-2,305				
3,917	4,531	2,159	-2,372				
2,613	4,670	1,888	-2,782				

Tabelle E.5.3: Messwerte für Mischgut 2-3 (Reibwerte)

Messwerte	Sortiert (A-Z)	Sortiert (Z-A)	Δ	$\Delta \cdot a_i$	Summe	$Summe^2$	SW
3,575	1,814	4,459	2,645	0,992	5,249	27,548	0,982
2,055	1,838	4,431	2,593	0,668			
4,285	1,842	4,430	2,588	0,585			
3,904	1,926	4,372	2,446	0,497			
3,856	2,055	4,304	2,248	0,415			
3,497	2,064	4,285	2,220	0,375			
2,428	2,428	4,265	1,837	0,285			
3,129	2,519	4,245	1,726	0,247			
3,676	2,570	4,207	1,637	0,216			
4,265	2,573	4,171	1,598	0,194			
4,148	2,749	4,148	1,399	0,156			
1,842	2,893	4,134	1,241	0,127			
3,417	2,953	4,119	1,167	0,109			
3,763	2,968	4,028	1,060	0,090			
3,503	2,971	3,944	0,973	0,074			
3,326	3,016	3,931	0,915	0,063			
1,814	3,056	3,904	0,848	0,052			
2,573	3,129	3,880	0,751	0,040			
2,519	3,325	3,856	0,531	0,024			
2,749	3,326	3,785	0,459	0,018			
1,926	3,417	3,763	0,345	0,011			
3,880	3,455	3,729	0,274	0,007			
2,064	3,489	3,713	0,224	0,004			
3,056	3,492	3,676	0,185	0,002			
2,570	3,497	3,575	0,078	0,000			
3,785	3,503	3,503	0,000				
3,016	3,575	3,497	-0,078				
2,893	3,676	3,492	-0,185				
2,968	3,713	3,489	-0,224				
3,944	3,729	3,455	-0,274				
3,325	3,763	3,417	-0,345				
3,455	3,785	3,326	-0,459				
2,971	3,856	3,325	-0,531				
4,119	3,880	3,129	-0,751				
4,028	3,904	3,056	-0,848				
4,245	3,931	3,016	-0,915				
4,207	3,944	2,971	-0,973				
2,953	4,028	2,968	-1,060				
4,134	4,119	2,953	-1,167				
4,372	4,134	2,893	-1,241				
4,304	4,148	2,749	-1,399				
1,838	4,171	2,573	-1,598				
3,489	4,207	2,570	-1,637				
3,713	4,245	2,519	-1,726				
4,430	4,265	2,428	-1,837				
4,171	4,285	2,064	-2,220				
3,931	4,304	2,055	-2,248				
4,459	4,372	1,926	-2,446				
3,729	4,430	1,842	-2,588				
3,492	4,431	1,838	-2,593				

F Mischgut -Datenblätter und Fotos

F.1 Datenblätter

Daten zu Filterkies

Filterkies, feuergetrocknet

Quartzkies Si/FQK (f) 3,15-5,6 mm

Tabelle F.1.1: Chemische Zusammensetzung

Chemische Stoffe	Ma.-%
SiO_2	97
Al_2O_3	1,62
Fe_3O_3	0,06
K_2O	0,98
Na_2O	>0,05
CaO	>0,02

Tabelle F.1.2: Physikalische Daten

Kennwerte	
Feuchtigkeit	> 0,1 Ma.-%
Dichte	2,65 g/ml
Schüttdichte	1,6 g/ml
pH-Wert	6,6
Härte nach Mohs	7
Farbe	hellbeige

Tabelle F.1.3: Korngrößenverteilung

Kennwerte	Rückstandsanteile [Ma.-%]
< 2,0	> 1
2,0-3,15	2,9
3,15-4,0	36,1
4,0-5,6	56,2
5,6-8,0	3,8

DEUTAG Ost

Zweigniederlassung der Basalt-Actien-Gesellschaft

Labor Berlin
Am Schlangengraben 17
13597 Berlin

Telefon: 030 33088 481/482
Telefax: 030 33088 460



REZEPTUR FÜR ASPHALTMISCHGUT

Erstprüfungs-Nr.: 310509.6040 vom 20.03.2017

Ersetzt EP: vom 13.09.2010

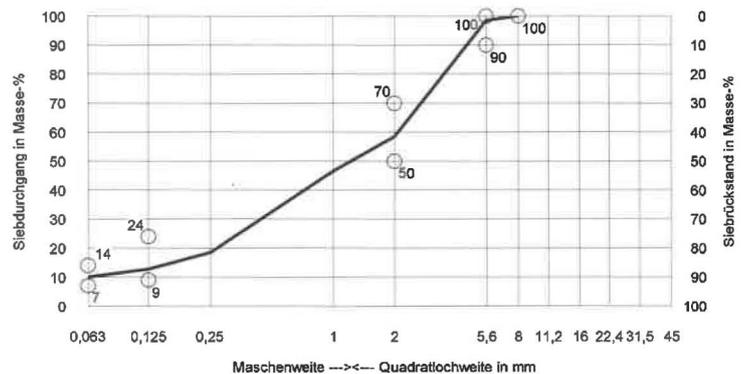
Mischgutart/-sorte: **AC 5 D L**
 Artikel: **320167**
 Ausgangsbindemittel: **Bitumen 70/100**
 Lieferwerk: **MW Frankfurt/O.**
 Grundlagen: **TL Asphalt-StB 07/13, TP Asphalt-StB**

Kornzusammensetzung des Mineralstoffgemisches für die Vordosierung an der Mischanlage						
Nr.	Masse-%	Bezeichnung	Lieferkörnung	Gewinnungsstätte	Zulassungs-Nr.	Hersteller
M 1	9,0	Kalkstein	Füller	Rüdersdorf	BBG F-085	Cemex OstZement GmbH
M 2	25,0	Natursand	feine GK 0/2	Lossow	BBG S-D-154	SKBB GmbH
M 3	25,0	Rhyolith	feine GK 0/2	Großsteinberg	SA H 23	Basalt AG
M 4	41,0	Grauwacke	grobe GK 2/5	Koschenberg	BBG H-D-005	Basalt AG

Mineralstoffanteile	Istwert	Sollwert		
		min	max	
Füller	Masse-%	10,0	7,0	14,0
Durchgang 0,125 mm	Masse-%	12,8	9,0	24,0
feine Gesteinskörnung	Masse-%	48,5		
grobe Gesteinskörnung	Masse-%	41,5	30,0	50,0
Größtkorn	Masse-%	41,5	30,0	50,0
Überkorn	Masse-%	1,6		10,0

Kornzusammensetzung des Mineralstoffgemisches				
mm	Rückstand	Durchgang	Masse-%	
> 45,00			grobe GK 41,5	
45,00				
31,50				
22,40				
16,00				
11,20				
8,00		100,0	feine GK 48,5	
5,60	1,6	98,4		
2,00	39,9	58,5		
1,00	12,1	46,4		
0,25	27,8	18,6		
0,125	5,8	12,8		
0,063	2,8	10,0		
< 0,063	10,0			Füller

Sieblinienbereich für AC 5 D L



Erstprüfung 310509.6040

vom 20.03.2017

Mischwerk

6040

Bindemittel / Zusätze				
AC 5 D L		Mischgut- zusammensetzung	Sollwert	
			min	max
rechnerischer Mindestbindemittelgehalt	Masse-%		6,9	
Gesamt-Bindemittelgehalt	Masse-%	7,1	6,9	
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	47,0		

Mischguteigenschaften					
Material:	AC 5 D L		Mischgut- zusammensetzung	Sollwert	
				min	max
Rohdichte	g/cm ³	2,400			
Raumdichte	g/cm ³	2,352			
Verdichtungstemperatur der Marshall-Probekörper	°C	135,0			
Hohlraumgehalt (ber.)	Vol.-%	2,0	1,0	2,5	
Hohlraumfüllungsgrad	%	89,1			
Rohdichte des Mineralstoffgemisches	g/cm ³	2,677			

Die eingesetzten Mineralstoffe sind güteüberwacht und entsprechen den Anforderungen der TL Gestein-StB 04.

Diese Mischung erfüllt die Anforderungen nach TL Asphalt-StB 07/13 an AC 5 D L.

Mischguttemperaturen gem. TL Asphalt Pkt.3.1.2 Tab.3

Es gelten die in der ZTV Asphalt für Asphaltmischgut angegebenen Grenzwerte und Toleranzen.

Die Angaben zur Rezeptur, die über die zum Eignungsnachweis nach ZTV Asphalt geforderten Angaben hinausgehen, sind rein informativ und nicht bindend.



Eignungsnachweis im Sinne der ZTV Asphalt-StB 07/13:

Hiermit erklärt der Auftragnehmer,

gegenüber dem Auftraggeber,

für die Baumaßnahme

folgendes:

a) Die Angaben zur Zusammensetzung und im Rahmen der Erstprüfung nach TL Asphalt-StB 07/13 durchgeführten Prüfungen sind der oben aufgeführten Rezeptur für Asphaltmischgut der Erstprüfung 310509.6040 vom 20.03.2017 zu entnehmen.

b) Das Asphaltmischgut ist für den vorgesehenen Verwendungszweck, wie er sich aus den im Bauvertrag festgelegten Anforderungen ergibt, geeignet.

Ort/ Datum

Auftragnehmer (Stempel/Unterschrift)

F.2 Bilder Schüttgut

Bei den nachfolgenden Bildern handelt es sich um, die im Mischgut *AC 5DL* enthaltenen Mineralstoffe. Die Mineralstoffe werden in Tab. F.2.1 mit der Lieferkörnung aufgelistet. Die Bilder sollen einen Eindruck über die Spreizung der Korngrößenverteilung geben.

Tabelle F.2.1: Mineralstoffgemisch

Bild	Bezeichnung	Lieferkörnung	Rohdichte [g/cm^3]	Quelle
F.2.3	Kalkstein	Füller	1,7-2,85	(M. Radenberg 2014, S. 18)
F.2.2	Natursand	fein Gk 0/2	2,6	(Nösler 2000, S. 110)
F.2.4	Rhyolith	fein Gk 0/2	2,6	(M. Radenberg 2014, S. 36)
F.2.1	Grauwacke	grob Gk 2/5	2,6-2,65	(M. Radenberg 2014, S. 18)
F.2.5	Filterkies	3,15-5,6	2,65	
F.2.6	Mischgut 1		2,4	



Abbildung F.2.1: Aufnahme von 20 g Grauwacke auf Millimeterpapier



Abbildung F.2.2: Aufnahme von 20 g Natursand auf Millimeterpapier

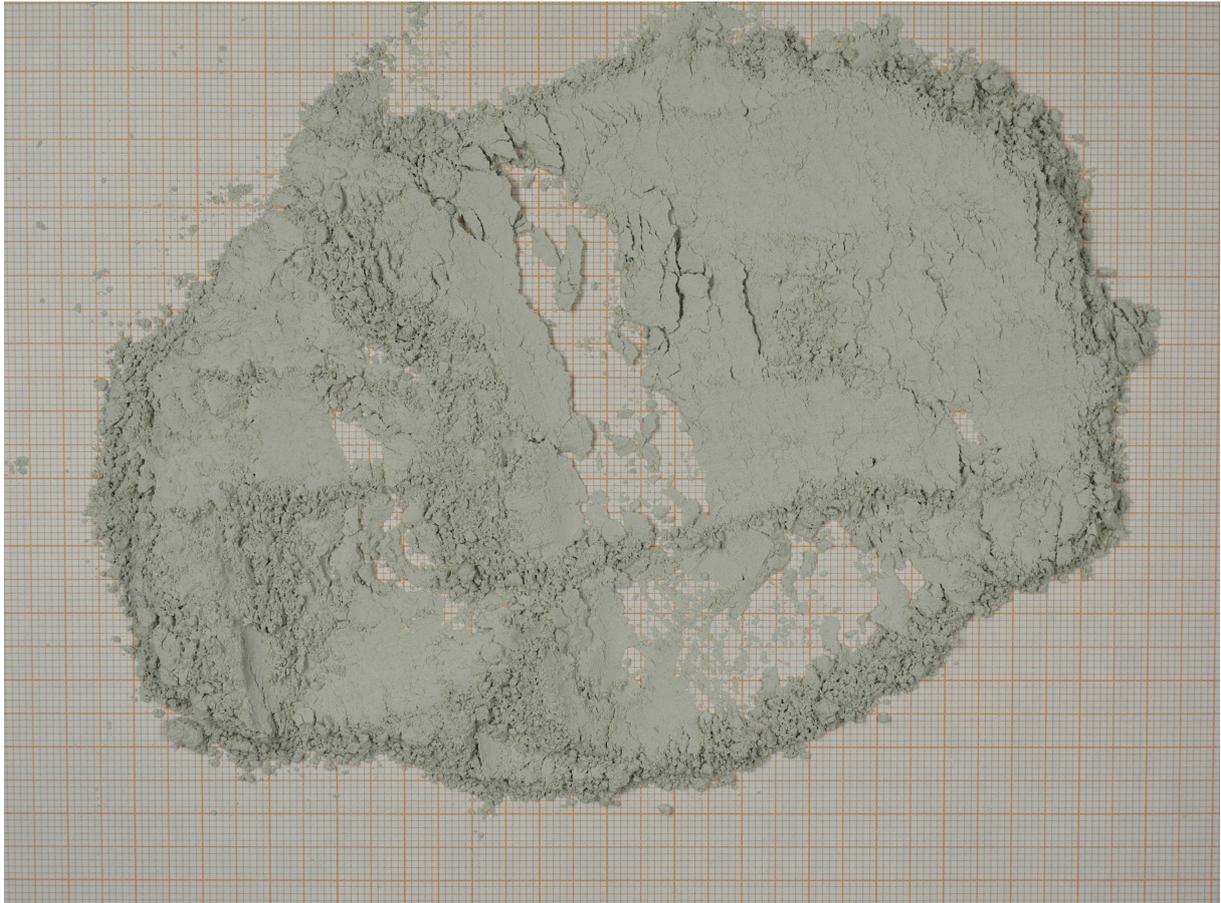


Abbildung F.2.3: Aufnahme von 20 g Kalkstein auf Millimeterpapier



Abbildung F.2.4: Aufnahme von 20 g Rhyolith auf Millimeterpapier



Abbildung F.2.5: Aufnahme von 20 g Filterkies (3,15-5,6 mm) auf Millimeterpapier

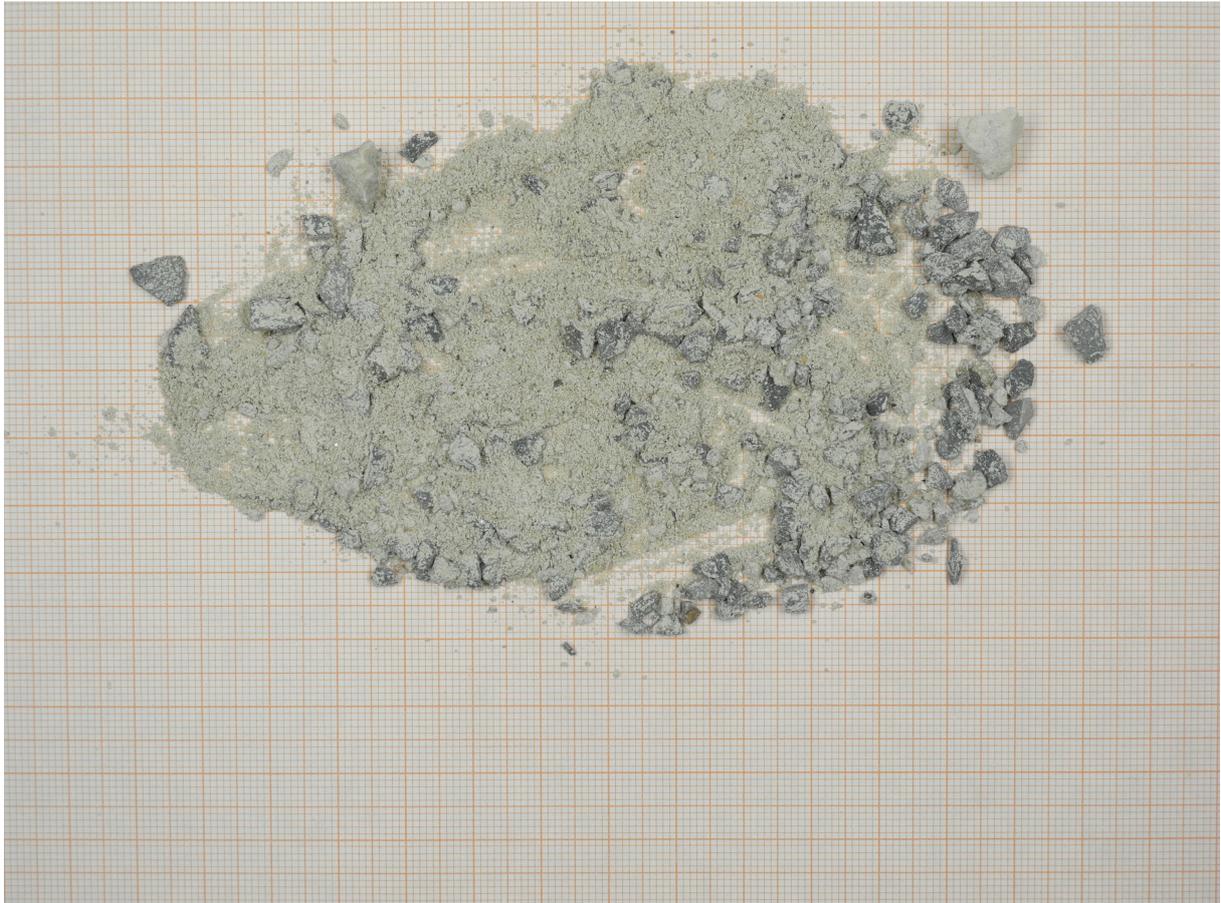


Abbildung F.2.6: Aufnahme von 20 g Mischgut 4 (AC 5 DL ohne Bitumen) auf Millimeterpapier