

# Schlussbericht vom 30.11.2021

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20096 N/1

Thema

MARS - Radschiene - RBG

Berichtszeitraum

01.08.2018 - 31.08.2021

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme (iFL) e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)

Gefördert durch:



## Kurzfassung

---

Für die Auslegung des Rad-Schiene-Systems von Regalbediengeräten kommen hauptsächlich Normen und Richtlinien, die das Rad-Schiene-System von Kranen adressieren, zum Einsatz. Zu nennen sind hier die inzwischen zurückgezogene DIN 15070 und die FEM 1.001. Die Auslegung nach diesen beiden Methoden führt aus einer Reihe von Gründen zu ungenauen Ergebnissen. Diese sind insbesondere die Verwendung eines ungenauen Lastkollektivs, welches lediglich die maximalen und minimalen Kontaktkräfte berücksichtigt, sowie die Nichtberücksichtigung der Gesamtzahl der Rollkontakte über die Auslegungsdauer. Diese methodischen Schwächen werden von der DIN EN 13001-3-3 aufgegriffen. Daher ist zu erwarten, dass diese zu einer genaueren Auslegung des Rad-Schiene-Systems führt. Das darin verwendete Lastkollektiv sowie die Gesamtzahl der Rollkontakte sind zum Auslegungszeitpunkt bei Regalbediengeräten allerdings nur schwer abschätzbar.

Vor diesem Hintergrund war das Ziel des Forschungsprojekts MARS die Entwicklung einer Auslegungsmethode, welche die einfache Anwendbarkeit der DIN 15070 bzw. der FEM 1.001 mit der genauen Berechnung nach DIN EN 13001-3-3 vereint. Insbesondere sollten Modelle entwickelt werden, welche in der Lage sind, basierend auf zum Auslegungszeitpunkt bekannten RBG- und Lagerparametern die Lastkollektive sowie die Gesamtzahl der Rollkontakte vorherzusagen. Diese Vorhersagemodelle sollten gemeinsam mit dem Berechnungsvorgehen nach DIN EN 13001-3-3 in einen Softwaredemonstrator implementiert werden. Zum Abschluss sollte die so entwickelte Auslegungsmethode getestet und mit der bisherigen Auslegung nach DIN 15070 und FEM 1.001 verglichen werden.

Daher wurde im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojekts zunächst ein Simulationsmodell zur Berechnung dieser beiden Auslegungsgrößen erstellt. Dieses nutzt in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss ausgewählte Eingangsgrößen zur Berechnung der beiden Zielgrößen. Das erstellte Simulationsmodell wurde im Anschluss zur Generierung von Datensätzen genutzt. Dabei wurden die Eingangsgrößen mithilfe von Methoden der statistischen Versuchsplanung so kombiniert, dass eine maximale Informationsdichte erreicht wurde. Die generierten Datensätze wurden zum Training und zum Test der beiden Zielgrößen genutzt. Im Anschluss wurde ein Softwaredemonstrator erstellt, welcher die Vorhersagemodelle mit den Berechnungen der DIN EN 13001-3-3 verbindet. Zum Abschluss fand ein Test der neu entwickelten Auslegungsmethode und ein Vergleich mit den bisher verwendeten Methoden statt.

Die Projektziele wurden erreicht.



# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Vorgehensweise und Lösungsweg	3
<b>2 Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>5</b>
2.1 Regalbediengeräte	5
2.1.1 Aufbau von Regalbediengeräten	6
2.1.2 Betrieb von Regalbediengeräten	6
2.2 Schäden an Rad-Schiene-Systemen von RBG	7
2.3 Methoden zur Auslegung des Rad-Schiene-Systems von RBG	8
2.3.1 DIN 15070	9
2.3.2 FEM 1.001	10
2.3.3 DIN EN 13001-3-3	11
<b>3 Grundlagen</b>	<b>17</b>
3.1 Mehrkörpersimulation	17
3.1.1 Modellierung der Körper	17
3.1.2 Kinematische Verbindungs- und Kraftelemente	18
3.1.3 Kontaktelemente	19
3.2 Statistische Versuchsplanung	19
3.2.1 Grundlegende Begriffe	20
3.2.2 Plackett-Burman Versuchspläne	21
3.2.3 Morris-Screening	22
3.2.4 Latin Hypercube Design	23
3.2.5 Optimierung von LHD	24
3.3 Maschinelles Lernen	25
3.3.1 Grundlegende Begriffe	26
3.3.2 Trainingsprozess	27
3.3.3 Gauß-Prozesse	28
<b>4 Simulationsmodell</b>	<b>31</b>
4.1 Eingangsgrößen und Simulationsannahmen	31
4.1.1 Eingangsgrößen	31
4.1.2 Simulationsannahmen	31

4.2	Erzeugung Auftragslisten	32
4.2.1	Erzeugung der Startbelegung	33
4.2.2	Erzeugung der Zyklen	33
4.3	Bewegungssteuerung	34
4.3.1	Trapezfahrt	36
4.3.2	Spitzfahrt	37
4.3.3	Zeitschritt	38
4.4	Berechnung der Radkräfte und des Kontaktkraftkollektivbeiwerts	40
4.4.1	Starrkörpermodell	40
4.4.2	Elastisches Modell	42
4.4.3	Berechnung des Kontaktkraftkollektivbeiwerts	45
4.4.4	Vergleich der Modellierungsansätze	46
<b>5</b>	<b>Erstellung und Test der Vorhersagemodelle</b>	<b>53</b>
5.1	Bestimmung und Validierung minimaler Anzahl von Arbeitsspielen zur Berechnung des Kontaktkraftkollektivbeiwerts	53
5.1.1	Bestimmung von der minimal nötigen Anzahl von Arbeitsspielen	54
5.1.2	Validierung von der ermittelten minimal nötigen Anzahl von Arbeitsspielen	56
5.2	Screening relevanter Parameter für den Kontaktkraftkollektivbeiwert	57
5.3	Gauß-Prozesse zur Vorhersage des Kontaktkraftkollektivbeiwerts	59
5.3.1	Datensätze	60
5.3.2	Training der Gauß-Prozesse	62
5.3.3	Test der Gauß-Prozesse	64
5.4	Berechnung der Gesamtzahl der Rollkontakte	66
5.4.1	Datensätze	66
5.4.2	Vereinfachte Berechnung für die insgesamt zurückgelegte Fahrdistanz	68
5.4.3	Test der vereinfachten Berechnung	68
<b>6</b>	<b>Softwardemonstrator</b>	<b>71</b>
6.1	Eingabe der erforderlichen Parameter	71
6.2	Berechnung und Ergebnisausgabe	73
6.2.1	Nachweismodus	73
6.2.2	Auslegungsmodus	74
6.2.3	Ergebnisausgabe	74
<b>7</b>	<b>Vergleich und Diskussion der entwickelten Auslegungsmethode</b>	<b>75</b>
7.1	Vergleich mit DIN 15070 und FEM 1.001	75
7.1.1	RBG-Konfigurationen	75
7.1.2	Auslegung nach DIN 15070	77
7.1.3	Auslegung nach FEM 1.001	77
7.1.4	Auslegung nach DIN EN 13001-3-3	78
7.1.5	Ergebnisse des Vergleichs	79

---

7.2	Diskussion der entwickelten Auslegungsmethode	80
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>83</b>
<b>9</b>	<b>Angaben zur Ergänzung des Schlussberichts gem. IGF-Leitfaden</b>	<b>85</b>
9.1	Verwendung der Zuwendung	85
9.2	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	86
9.2.1	Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	86
9.2.2	Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit und Einschätzung der Realisierbarkeit	88
9.2.3	Zusammenfassung der wichtigsten bereits erfolgten Maßnahmen	89
9.3	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzens der Forschungsergebnisse	90
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>91</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>95</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>97</b>
<b>A</b>	<b>Anhang A - Anhänge der DIN 15070, FEM 1.001 und DIN EN 13001-3-3</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Anhang B - Ergebnisse des Morris Screenings</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Anhang C - Eingabedaten des Softwaredemonstrators</b>	<b>C-1</b>



## Abkürzungsverzeichnis

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
EE	elementary effect
GD	Gradient Descent
GP	Gauß-Prozess
LAM	Lastaufnahmemittel
LE	Ladungseinheit
LHD	Latin Hypercube Design
LR	Learnrate
MARS	Methodik zur praxisgerechten Auslegung des Rad-Schiene-Systems von Regalbediengeräten
MKS	Mehrkörpersimulation
mll	marginal log likelihood
RBF	Radial Basis Function
RBG	Regalbediengerät
SA	Simulated Annealing
SGD	Stochastic Gradient Descent



## Formelzeichenverzeichnis

---

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$D_W$	[mm]	Raddurchmesser
$D$	[–]	Anzahl der Dimensionen von zu untersuchenden Faktoren
$E_R$	$[\frac{N}{mm^2}]$	Elastizitätsmodul der Schiene
$E_W$	$[\frac{N}{mm^2}]$	Elastizitätsmodul der Räder
$E_m$	$[\frac{N}{mm^2}]$	Äquivalenter Elastizitätsmodul
$E$	$[\frac{N}{mm^2}]$	Elastizitätsmodul
$F_W$	[N]	Radkraft
$F_u$	[N]	Bezugskontaktkraft
$F_{Rd,f}$	[N]	Grenzwert der Bemessungskontaktkraft für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis
$F_{Rd,s}$	[N]	Grenzwert der Bemessungskontaktkraft für den statischen Festigkeitsnachweis
$F_{Sd,f,i}$	[N]	Bemessungskontaktkraft bei Kontakt $i$
$F_{Sd,f}$	[N]	Bemessungskontaktkraft für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis
$F_{Sd,s}$	[N]	Bemessungskontaktkraft für den statischen Festigkeitsnachweis
$F_{W,f,dyn}$	[N]	Dynamischer Anteil der Kontaktkraft am Vorderrand
$F_{W,f,stat}$	[N]	Statischer Anteil der Kontaktkraft am Vorderrand
$F_{W,f}$	[N]	Kontaktkraft am Vorderrad
$F_{W,max}$	[N]	Maximal im Betrieb auftretende Radkraft
$F_{W,min}$	[N]	Minimal im Betrieb auftretende Radkraft
$F_{W,r,dyn}$	[N]	Dynamischer Anteil der Kontaktkraft am Hinterrad
$F_{W,r,stat}$	[N]	Statischer Anteil der Kontaktkraft am Hinterrad

$F_{W,r}$	[N]	Kontaktkraft am Hinterrad
$F_{sd0,s}$	[N]	maximale faktorlose Bemessungskontaktkraft innerhalb der Lastkombinationen A bis C der DIN EN 13001-2
$HB$	$[\frac{N}{mm^2}]$	Einheitenkonforme Härte
$H_0$	[-]	Nullhypothese
$H_1$	[-]	Alternativhypothese
$M$	[-]	Morris Screening: Anzahl der generierten Versuchspläne
$P_L$	$[\frac{N}{mm^2}]$	Zulässige Flächenpressung
$T_0$	[-]	Latin Hypercube: Basis-Versuchsplan Simulated Annealing: Starttemperatur
$T_k$	[-]	Simulated Annealing: Temperaturfaktor
$X$	[-]	Menge von Vektoren der unabhängigen Variablen
$\bar{F}_{W,i}$	[N]	mittlere Radkraft im Belastungsfall $i$
$\bar{\mathbf{f}}_*$	[-]	Mittelwertvektor einer Vorhersage mit Gauß-Prozessen
$\bar{x}_{cycle}$	[m]	Durchschnittlich zurückgelegte Strecke pro Arbeitsspiel
$\Delta t$	[s]	Zeitschritt
$\Delta$	[-]	Morris Screening: grid jump Weitere Bedeutungen: Differenz
$\alpha_{en}$	[rad]	Schräglaufwinkel
$\alpha$	[-]	Simulated Annealing: Abkühlfaktor
$\boldsymbol{\theta}$	[-]	Vektor mit Parametern eines Vorhersagemodells
$\gamma_m$	[-]	Allgemeiner Widerstandsbeiwert
$\gamma_{P,SC}$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für die Masse des RBG
$\gamma_{ef}$	[-]	Kontaktwiderstandsbeiwert für Ermüdung
$\mu^*$	[-]	Absoluter Mittelwert
$\mu$	[-]	Mittelwert
$\nabla$	[-]	Gradient
$\phi_{SC}$	[-]	Dynamikbeiwert für die Masse des RBG

$\phi_a$	[–]	Dynamikbeiwert für Beschleunigungen
$\sigma_B$	$[\frac{N}{mm^2}]$	Zugfestigkeit
$\sigma_n^2$	[–]	Gauß-sches Rauschen
$\sigma_s$	[–]	Scale
$\sigma$	[–]	Standardabweichung
$\text{cov}(\mathbf{f}_\star)$	[–]	Kovarianzmatrix einer Vorhersage mit Gauß-Prozessen
$\mathbf{I}$	[–]	Identitätsmatrix
$\mathbf{K}_{X,X_\star}$	[–]	$n \times n_\star$ Kovarianzmatrix zwischen den Punkten $X$ und $X_\star$
$\Pi^{LHD}$	[–]	Latin Hypercube Design
$\Pi$	[–]	Matrix zur Erstellung eines Latin Hypercube Designs
$\mathbf{x}$	[–]	Vektor mit unabhängigen Variablen
$\mathbf{y}$	[–]	Vektor mit abhängigen Variablen
$a_{max,x}$	$[\frac{m}{s^2}]$	Maximale Beschleunigung in x-Richtung
$a_{max,y}$	$[\frac{m}{s^2}]$	Maximale Beschleunigung in y-Richtung
$a_x(t)$	$[\frac{m}{s^2}]$	Beschleunigungsverlauf des RBG in x-Richtung
$a_y(t)$	$[\frac{m}{s^2}]$	Beschleunigungsverlauf des Hubwagens in y-Richtung
$b_R$	[mm]	lasttragende Breite der Schiene
$b_W$	[mm]	lasttragende Breite des Rads
$b_M$	[m]	Mast: Breite
$b$	[mm]	effektive lasttragende Breite
$c_{1,FEM}$	[–]	Drehzahl-Beiwert der FEM 1.001
$c_{2,DIN}$	[–]	Drehzahl-Beiwert der DIN 15070
$c_{2,FEM}$	[–]	Beiwert in Abhängigkeit des Fahrwerks der FEM 1.001
$c_{3,DIN}$	[–]	Betriebsdauer-Beiwert der DIN 15070
$cap_L$	[1]	Hubwagen: Kapazität
$cg_{L,x}$	[%, m]	Hubwagen: Schwerpunkt in x-Richtung
$cg_{L,y}$	[m]	Hubwagen: Schwerpunkt in y-Richtung (tiefste Position)

$cg_{M,x}$	[%]	Mast: Schwerpunkt in x-Richtung
$cg_{SC,y}$	[%]	Gesamt-RBG: Schwerpunkt in y-Richtung (ohne Hubwagen)
$cg_{T,x}$	[%]	Traverse: Schwerpunkt in x-Richtung
$cm$	[–]	Lagerbetriebsstrategie
$d_e$	[–]	Euklidische Distanz
$d_R$	[–]	Lagertiefe
$dist_{L,x}$	[m]	Hubwagen: Abstand des Schwerpunkts zum Hinterrad in x-Richtung
$dist_{M,x}$	[m]	Mast: Abstand des Schwerpunkts zum Hinterrad in x-Richtung
$dist_M$	[m]	Mast: Abstand (nur 2-Mast)
$dist_{SC,y}$	[m]	Gesamt-RBG: Abstand des Schwerpunkts zum Hinterrad in y-Richtung (ohne Hubwagen)
$dist_{T,x}$	[m]	Traverse: Abstand des Schwerpunkts zum Hinterrad in x-Richtung
$dis$	[%]	Streuung von $k_c$ nach $k$ Arbeitsspielen
$d$	[–]	Distanz zwischen zwei Vektoren
$f_1$	[–]	Minderungsfaktor für Kantenpressung
$f_2$	[–]	Minderungsfaktor für ungleichmäßige Flächenpressung
$f_y$	$[\frac{N}{mm^2}]$	Streckgrenze des Materials unterhalb der gehärteten Oberfläche
$f_{f3}$	[–]	Faktor für den Schräglauf
$f_{f4}$	[–]	Mechanischer Abriebsfaktor
$g$	$[\frac{m}{s^2}]$	Gravitationsbeschleunigung; $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$
$h_{CELL}$	[m]	Fachhöhe
$h_{SC}$	[m]	RBG- und Lagerhöhe
$i_D$	[–]	Anzahl der Rollkontakte am Bezugspunkt
$i_{tot}$	[–]	Gesamtzahl der Rollkontakte

$j$	$[\frac{\text{m}}{\text{s}^3}]$	Ruck
$k_c$	$[-]$	Kontaktkraftkollektivbeiwert
$k_{c,conf}$	$[-]$	Oberer Wert des vorhergesagten Konfidenzintervalls für $k_c$
$k$	$[-]$	Kovarianzfunktion
$l(\boldsymbol{\theta})$	$[-]$	Verlustfunktion
$l_s$	$[-]$	Lengthscale
$l_M$	$[\text{m}]$	Mast: Länge
$l_R$	$[\text{m}]$	Lagerlänge
$l_T$	$[\text{m}]$	Radstand / Traverse: Länge
$m_M$	$[\text{kg}]$	Mast: Masse insgesamt
$m_T$	$[\text{kg}]$	Traverse: Masse insgesamt
$m_{LD}$	$[\text{kg}]$	Zuladung: durchschnittliche Masse
$m_L$	$[\text{kg}]$	Hubwagen: Leermasse
$m_{M,a}$	$[\text{kg}]$	Mast: Zusatzmassen
$m_{M,h}$	$[\frac{\text{kg}}{\text{m}}]$	Mast: Masse pro Höhe
$m_{T,a}$	$[\text{kg}]$	Traverse: Zusatzmasse
$m_{T,l}$	$[\frac{\text{kg}}{\text{m}}]$	Traverse: Masse pro Länge
$m_W$	$[\text{kg}]$	Rad: Masse
$m_{en}$	$[-]$	Exponent für Laufrad/Schiene-Kontakt, $m_{en} = \frac{10}{3}$
$md_{SC}$	$[-]$	Bewegungsrichtung des RBG relativ zum Regal und zum E/A-Punkt
$n_c$	$[-]$	Minimal notwendige Anzahl von Arbeitsspielen
$n_r$	$[-]$	Anzahl Stufen
$n_M$	$[-]$	Anzahl Maste
$n_{cycles}$	$[-]$	Geplante Anzahl der Arbeitsspiele für die Räder oder die Schiene

$r_3$	[mm]	Schiene: Radius der Schienenkante; Rad: Radius der Radkante
$r_k$	[mm]	Schiene: Radius des gewölbten Schienenkopfes; Rad: zweiter Radradius
$r$	[–]	Anzahl der elementary effects
$s_c$	[–]	Kontaktverlaufparameter
$so_R$	[%]	Lagerfüllgrad
$t_1$	[mm]	Wandstärke 1 eines RBG-Mast
$t_2$	[mm]	Wandstärke 2 eines RBG-Mast
$t_{slip,x}$	[s]	Verschleißzeit in x-Richtung
$t_{slip,y}$	[s]	Verschleißzeit in y-Richtung
$v_P$	[–]	Querkontraktionszahl
$v_c$	[–]	Relative Anzahl der Rollkontakte
$v_{max,x}$	$[\frac{m}{s}]$	Maximale Geschwindigkeit in x-Richtung
$v_{max,y}$	$[\frac{m}{s}]$	Maximale Geschwindigkeit in y-Richtung
$v_x(t)$	$[\frac{m}{s}]$	Geschwindigkeitsverlauf des RBG in x-Richtung
$v_y(t)$	$[\frac{m}{s}]$	Geschwindigkeitsverlauf des Hubwagens in y-Richtung
$w$	[mm]	Breite der vorstehenden nicht Kontaktfläche
$x_{tot}$	[m]	Zurückgelegte Gesamtdistanz eines RBG
$x_x(t)$	[m]	Positionsverlauf des RBG in x-Richtung
$x_y(t)$	[m]	Positionsverlauf des Hubwagens in y-Richtung
$x$	[–, m]	Unabhängige Variable / Faktor; oder: Weg
$y$	[–]	Abhängige Variable
$z_{ml}$	[mm]	Tiefe der maximalen Scherbeanspruchung im Linienkontaktfall
$z_{mp}$	[mm]	Tiefe der maximalen Scherbeanspruchung im Punktkontaktfall
$z$	[mm]	Tiefe der gehärteten Schicht

# 1 Einleitung

---

Regalbediengeräte (RBG) sind ein fester Bestandteil moderner Logistikkonzepte. Sie ermöglichen die automatische Ein- und Auslagerung unterschiedlicher Güter sowohl in Hochregallagern als auch in automatischen Kleinteilelagern. RBG kommen, unabhängig von der Unternehmensgröße, branchenübergreifend immer dort zum Einsatz, wo große Umschlagleistungen sowie hohe Verfügbarkeiten bei hoher Lagerdichte gefragt sind. Ein RBG besteht aus den Hauptbaugruppen Tragwerk, Hubwerk, Lastaufnahmemittel und Fahrantrieb [FEM-9101]. Jede Baugruppe wird dabei so ausgelegt, dass sie die Anforderung des spezifischen Einsatzfalls erfüllt. Dem Rad-Schiene-System kommt dabei eine besondere Wichtigkeit zu, da ein Schaden an diesem Teilsystem häufig und sehr schnell zu einem Ausfall des Gesamtsystems und damit zum Stillstand des RBG führt.

Vorherrschend werden heute Geräte eingesetzt, die auf einer Bodenschiene fahren und von einer oberen Schiene geführt werden [Log-2017]. In der Regel handelt es sich dabei um die Kombination aus einer Metallschiene gepaart mit Metall- bzw. Kunststofflaufrädern (Polyurethan, Polyamid). Beschädigungen während des Betriebs eines RBG am Rad-Schienen-System führen zu hohen Reparatur bzw. Austauschkosten der betroffenen Komponenten. Zudem wirkt sich die damit verbundene Stillstandszeit negativ auf den Durchsatz und damit auf die Wirtschaftlichkeit des Lagersystems aus. Aus diesen Gründen sind Schäden an Laufrädern und Schienen in jedem Fall durch eine entsprechende Dimensionierung zu vermeiden.

## 1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung

Bisher erfolgt die Auslegung des Rad-Schiene-Systems (Metallrad auf Metallschiene) analog zur Auslegung von Kranschienen nach DIN 15070 [DIN-15070] (siehe z. B. [Gri-2015]) oder FEM 1.001 [FEM-1001]. Hierbei erfolgt die Berechnung der zulässigen Radkraft für einen gegebenen Laufraddurchmesser mithilfe der Geometrie- und Werkstoffdaten von Laufrad und Schiene. Äußere Einflüsse (Drehzahl, Betriebsdauer) werden durch Beiwerte berücksichtigt, die sich mithilfe der Norm aus entsprechenden Tabellen bestimmen lassen. Diese beiden Auslegungsmethoden weisen allerdings einige methodischen Schwächen auf, weshalb sie zu ungenauen Ergebnissen führen. Eine praxistaugliche und gleichzeitig genaue Auslegungsmethode im Hinblick auf RBG fehlt.

Mit der DIN EN 13001-3-3 [DIN-EN-13001-3-3] steht inzwischen ein neuer Berechnungsansatz in Form einer Norm zur Verfügung. Dieser ist ebenfalls vorwiegend für die Auslegung

des Laufrad-Schiene-Systems von Kranen (Metallrad auf Metallschiene) konzipiert, eine große Anzahl der Schwächen der DIN 15070 sind jedoch behoben. Es ist daher davon auszugehen, dass die Anwendung der DIN EN 13001-3-3 zu genaueren Ergebnissen der Auslegungsrechnung führt. Bei der Anwendung der DIN EN 13001-3-3 ist jedoch zu beachten, dass für die Durchführung des geforderten Ermüdungsfestigkeitsnachweis sowohl die maximalen Belastungen an Laufrad und Schiene als auch das vollständige Lastkollektiv sowie die Gesamtzahl der Rollkontakte bekannt sein müssen. Das ist bei RBG zum Auslegungszeitpunkt in der Regel nicht der Fall. Insbesondere das Lastkollektiv lässt sich zum Auslegungszeitpunkt nur näherungsweise durch Ersatzlasten bestimmen. Das Vorgehen der DIN EN 13001-3-3 ist demzufolge derzeit nicht praxistauglich für die Auslegung des Rad-Schiene-Systems von RBG anwendbar.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel des Forschungsprojektes *Methodik zur praxisgerechten Auslegung des Rad-Schiene-Systems von Regalbediengeräten (MARS)* ist die Entwicklung eines Verfahrens, welches die praxisgerechte Auslegung des Rad-Schiene-Kontakts von RBG ermöglicht. Die zu entwickelnde Methodik soll eine sichere Auslegung der Kontaktpaarung Laufrad-Schiene hinsichtlich der statischen Belastung und der Ermüdungsfestigkeit sowohl des Laufrads als auch der Schiene ermöglichen. Dabei ist es notwendig, das Auslegungsverfahren so zu gestalten, dass alle Einflüsse, die zum Auslegungszeitpunkt nicht bekannt sind oder nur grob geschätzt werden können, für die Auslegung aus gegebenen Größen abgeleitet werden können. Insbesondere sind hier das Lastkollektiv und die Gesamtzahl der Rollkontakte zwischen Rad und Schiene zu nennen, die zum Auslegungszeitpunkt in der Regel nicht genau bestimmt werden können, jedoch für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis bekannt sein müssen. Die Auslegungsmethodik muss demzufolge so anzuwenden sein, dass ausschließlich Randbedingungen des RBG, die zum Auslegungszeitpunkt bekannt sind, in die Bemessung einfließen. Das Forschungsprojekt soll somit im Wesentlichen drei Forschungsfragen beantworten:

- Welche Eingangsgrößen wirken sich auf die Anzahl der Rollkontakte sowie das Lastkollektiv über die Auslegungslebensdauer aus?
- Lassen sich die Anzahl der Rollkontakte und das Lastkollektiv über die Auslegungslebensdauer aus bekannten Eingangsgrößen vorhersagen?
- Wie unterscheidet sich die Auslegung nach DIN EN 13001-3-3 von den bisher angewandten Auslegungsmethoden?

Da der Einsatz von Kunststofflaufrädern bzw. kunststoffbeschichteten Laufrädern von keiner der betrachteten Normen abgedeckt ist, beschränkte sich das Forschungsprojekt auf RBG mit Metallrädern.

## 1.3 Vorgehensweise und Lösungsweg

Die Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen orientiert sich an den im Antrag festgeschriebenen Arbeitspaketen des Projekts. Das Forschungsprojekt umfasste insgesamt sieben Arbeitspakete, welche in Abbildung 1-1 dargestellt sind. Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik gegeben. Darauf folgt ein Überblick über die Grundlagen der im Forschungsprojekt angewandten Methoden. Die Ergebnisse der Auswahl relevanter Eingangsgrößen sind in Kapitel 4 zusammen mit der Beschreibung des in Arbeitspaket 2 erstellten Simulationsmodells dokumentiert. Das Vorgehen sowie die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 3 bis 5 sind in Kapitel 5 beschrieben. Darauf folgt ein Überblick des in Arbeitspaket 6 erstellten Softwaredemonstrators. Die Ergebnisse des Vergleichs der im Projekt entwickelten Auslegungsmethode mit bisher genutzten Methoden befinden sich in Kapitel 7. Der Bericht schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse sowie einem Ausblick auf weitere Forschung.

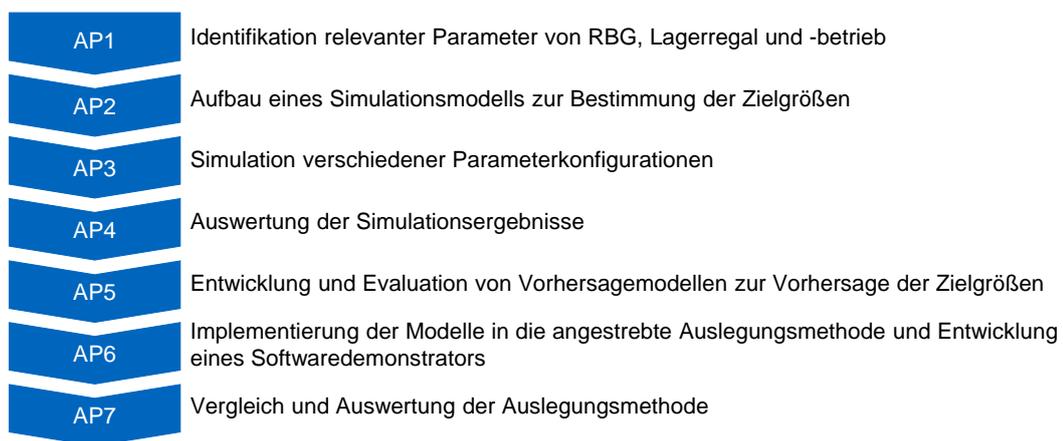


Abbildung 1-1: Arbeitspakete des Forschungsprojekts



## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über den aktuellen Stand der Technik bei RBG. Zudem werden das Rad-Schiene-System sowie dessen meist genutzten Auslegungsmethoden vorgestellt und deren Schwächen analysiert.

### 2.1 Regalbediengeräte

Dieser Abschnitt wurde im Wesentlichen im Rahmen der Semesterarbeit [Kel-2019] erarbeitet.

RBG sind schienengebundene Flurförderzeuge, welche im Bereich der Hochregallager zum Einsatz kommen. Sie verfügen unter anderem über eine gute Raumnutzung sowie kurze Zugriffszeiten [Koe-2007]. Dabei wird bei RBG in eine 1- und 2-Mastausführung unterschieden [FEM-9101]. Abbildung 2-1 zeigt den schematischen Aufbau eines 1-Mast und eines 2-Mast RBG. Die Hauptbaugruppen sind hierbei der Mast, der Hubwagen inklusive Lastaufnahmemittel (LAM), der Fahrwagen, sowie die beiden Räder.

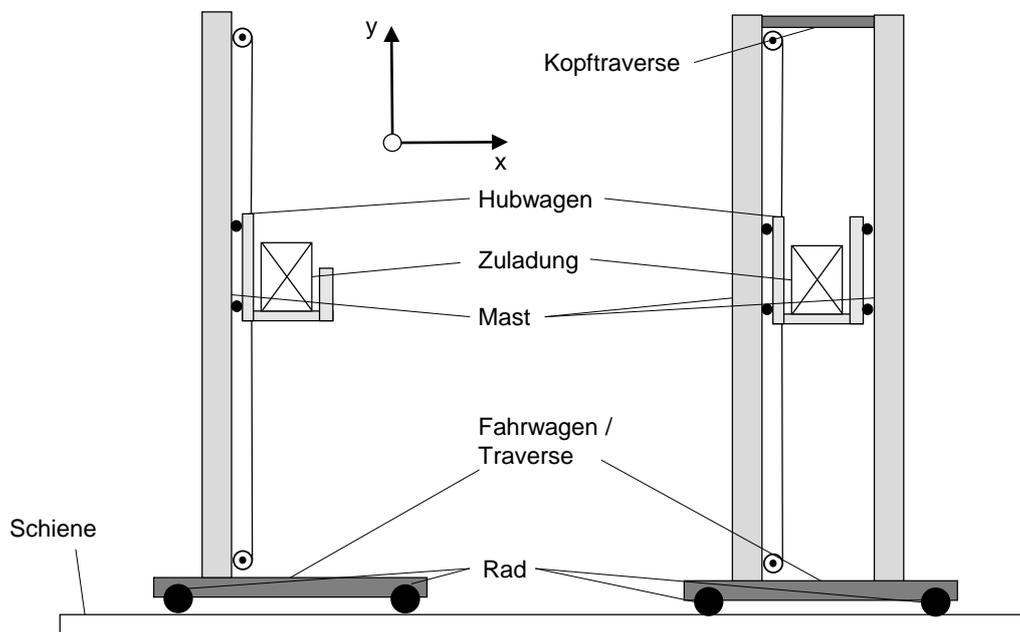


Abbildung 2-1: Aufbau RBG: Links: 1-Mast; Rechts 2-Mast. Nach [Rüc-2020]

### 2.1.1 Aufbau von Regalbediengeräten

#### Mast

Hauptaufgabe des Masts ist das Tragen des Hubwagens, welcher vertikal entlang des Masts verfährt [Lin-2018]. Der Mast ist an seinem unteren Ende mit dem Fahrwagen verbunden. Zur Verhinderung des Kippens des Masts ist dieser am oberen Ende durch eine Schiene geführt [FEM-9101]. Im Fall der 2-Mastausführung sind zwei Masten mit dem Fahrwagen verbunden. Der Hubwagen befindet sich zwischen diesen beiden Masten. Die beiden Masten sind am oberen Ende durch eine Kopftraverse verbunden. 2-Mast RBG erfordern einen größeren Materialeinsatz. Ein Vorteil ist die geringere Belastung auf die Verbindung zwischen Masten und Fahrwagen durch den Hubwagen [Sch-2018].

#### Fahrwagen

Am Fahrwagen erfolgt der Antrieb des gesamten RBG. Auf diesem sitzt zum einen der Mast bzw. die Maste, zum anderen sind die beiden Räder mit dem Fahrwagen verbunden. Die eigentliche Baugruppe des Fahrwagens wird fortan auch als Traverse bezeichnet. [FEM-9101]

#### Hubwagen und Lastaufnahmemittel

Der Hubwagen verfährt vertikal entlang des Masts. Aufgabe des Hubwagens ist das Führen und Fixieren des LAMs während der Vertikalbewegung. Dabei kann der Hubwagen über ein oder zwei LAMs verfügen. [Lin-2018] Das LAM dient zur Ein- und Auslagerung von Ladeeinheiten. Unterschieden wird hierbei zwischen ziehenden und aushebenden LAM. Die Teleskopgabel, welche zu den aushebenden LAM gehört, ist am weitesten verbreitet. [See-2005, Arn-2019]

### 2.1.2 Betrieb von Regalbediengeräten

RBG in Hochregallagern werden nach dem Prinzip Ware-zu-Mann betrieben [Sch-2018]. Das bedeutet, dass ein RBG im Falle einer Einlagerung eine Ladeeinheit am Einlagerpunkt aufnimmt und diese anschließend an einem Lagerplatz einlagert. Eine Auslagerung erfolgt analog. Das RBG transportiert hierbei eine Ladeeinheit von einem Lagerplatz zum Auslagerpunkt. Dabei sind unterschiedliche Positionierungen des Ein- und des Auslagerpunkts (E/A-Punkt) möglich. Die Standardfälle sind in der FEM 9.851 [FEM-9851] definiert. Der am häufigsten angewandte Fall ist Fall 1: *Ein- und Auslagerung am unteren Eckpunkt*.

Die Bewegungsabläufe von RBG, also eine Ein- oder Auslagerung bzw. eine Kombination von beidem, werden als Arbeitsspiele bezeichnet. Diese sind in die drei Lagerbetriebsstra-

tegien, Einzel-, Doppel- und Vierfachspiel, unterteilt (vgl. Abbildung 2-2). Bei einem Einzelspiel findet eine einzelne Ein- oder Auslagerung statt. Dabei verfährt das RBG immer zwischen einem einzelnen Lagerplatz und dem Ein- bzw. Auslagerpunkt. Ein Doppelspiel setzt sich aus einer Ein- und einer Auslagerung zusammen. Dabei nimmt das RBG eine Ladeeinheit am Einlagerpunkt auf und lagert diese ein. Anschließend nimmt es eine weitere Ladeeinheit im Regal auf und bringt diese zum Auslagerpunkt. Bei einem Vierfachspiel findet zudem eine Umlagerung statt. Das RBG fährt während eines Spiels also vier Lagerplätze an. [Lan-2015]

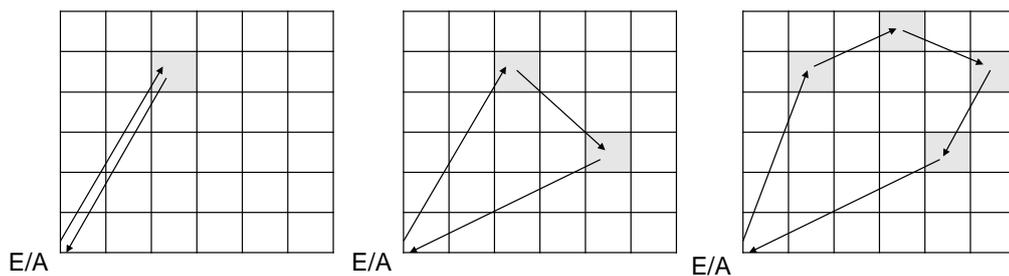


Abbildung 2-2: Links: Einzelspielstrategie, Mitte: Doppelspielstrategie, Rechts: Vierfachspielstrategie

## 2.2 Schäden an Rad-Schiene-Systemen von RBG

Dieser Unterabschnitt basiert im Wesentlichen auf der Masterarbeit [Wol-2016].

Bei RBG mit Stahlrädern kommen laut Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses hauptsächlich Vignolschienen und Räder zylindrischer Form ohne Spurkranz zum Einsatz. Das Rad ist hierbei breiter als die Schiene. Es treten grundsätzlich zwei Schadensarten auf, welche im Folgenden näher beschrieben werden. Der Abschnitt schließt mit einer Übersicht über die verschiedenen Auslegungsmethoden des Rad-Schiene-Systems sowie ihrer Schwächen.

Die beiden Schadensarten, welche beim Rad-Schiene-Kontakt vorrangig auftreten, sind Gleitverschleiß und Rollkontaktermüdung [Tun-2007, Bro-2014]. Dabei findet eine Unterscheidung hinsichtlich der Bewegungsart der Kontaktflächen zueinander statt (vgl. Abbildung 2-3). Die beiden Kontaktkörper bewegen sich beim Rollen senkrecht aufeinander zu. Bei Gleitbewegungen findet eine tangentielle Bewegung statt. Die Belastungen für das Rad und die Schiene ähneln sich bei einem Kontakt stark. Allerdings sind die Radflächen deutlich häufiger Belastungen ausgesetzt als ein betrachteter Punkt auf der Schiene.

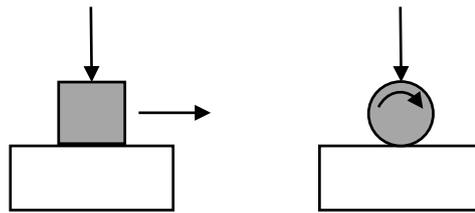


Abbildung 2-3: Unterscheidung Bewegungsarten. Links: Gleiten. Rechts: Rollen. Nach [GfT-2002]

### **Gleitverschleiß**

In [GfT-2002] ist der Gleitverschleiß als „Verschleiß bei tangentialer Relativbewegung in Kontakt befindlicher Festkörper“ definiert. In [Lew-2009] wird hinsichtlich der Verschleißmechanismen bei Rad-Schiene-Kontakten zwischen adhäsivem, oxidativem, thermischem und abrasivem Verschleiß unterschieden. Adhäsiver Verschleiß ist dabei eine Folge von starker Reibbeanspruchung. Abrasiver Verschleiß wird durch harte Fremdpartikel verursacht. Oxidativer und thermischer Verschleiß sind die Folge von chemischen und thermischen Effekten.

### **Rollkontaktermüdung**

Rollkontaktermüdung tritt vorrangig durch Oberflächenzerrüttung auf. Dabei geschieht die Rissbildung unterhalb oder an der Oberfläche. Diese Art der Risse (bis zu 3 mm Materialtiefe) sind eine Folge plastischer Deformation oder stufenweiser Verformung [Ekb-2002]. Anschließend wachsen die Risse bis zu 50 mm unterhalb der Oberfläche. In Schienen begünstigt Schmierung die Ausbreitung der Oberflächenrisse [Ekb-2002].

Risse unterhalb der Oberfläche kommen selten vor. Diese sind meist eine Folge von Materialdefekten, welche die Ermüdungsgrenze lokal reduzieren. Ein Überschreiten der Ermüdungsgrenze durch Scherspannungsspitzen führt zur Rissinitiierung [Ekb-2014].

## **2.3 Methoden zur Auslegung des Rad-Schiene-Systems von RBG**

Es gibt bis heute keine Norm oder Richtlinie zur Auslegung des Rad-Schiene-Systems von RBG. Daher kommen in der Praxis Normen und Richtlinien, welche das Rad-Schiene-System von Kranen adressieren, zum Einsatz. Die beiden meist genutzten Auslegungsmethoden, die zur Auslegung des Rad-Schiene-Systems von RBG eingesetzt werden,

sind die DIN 15070 [DIN-15070] und die FEM 1.001 [FEM-1001]. Die DIN EN 13001-3-3 [DIN-EN-13001-3-3] hat inzwischen die DIN 15070 bei der Auslegung von Kranlaufrädern ersetzt, wird aber bei RBG noch nicht umfassend eingesetzt. Diese drei Normen bzw. Richtlinien werden im folgenden genauer vorgestellt.

### 2.3.1 DIN 15070

Die DIN 15070 adressiert die Auslegung von Kran-Laufrädern. Sie legt den Durchmesser des Rads  $D_W$  in Abhängigkeit der auftretenden Radlasten fest. Der Umfang der Norm ist vergleichsweise gering. Folgende Ungleichung muss erfüllt sein:

$$F_W \leq P_L \cdot D_W \cdot c_{2,DIN} \cdot c_{3,DIN} \cdot b_R \quad (2-1)$$

mit

$P_L$ : Zulässige Flächenpressung; Bestimmung entsprechend Tabelle A-3

$F_W$ : Radkraft

$c_{2,DIN}$ : Drehzahl-Beiwert der DIN 15070; Bestimmung entsprechend Tabelle A-2

$c_{3,DIN}$ : Betriebsdauer-Beiwert der DIN 15070; Bestimmung entsprechend Tabelle A-1

$b_R$ : lasttragende Breite der Schiene; Bestimmung entsprechend Abbildung 2-4

Die Radkraft berechnet sich dabei wie folgt:

$$F_W = \frac{F_{W,min} + 2F_{W,max}}{3} \quad (2-2)$$

mit

$F_{W,min}$ : Minimal im Betrieb auftretende Radkraft

$F_{W,max}$ : Maximal im Betrieb auftretende Radkraft

Die Kraft  $F_W$  repräsentiert hierbei das in der DIN 15070 verwendete Lastkollektiv, welches lediglich die minimal und maximal auftretende Radlast berücksichtigt. Hesse [Hes-1983] kritisiert diese einfache Auslegungsformel. Demnach liefert die DIN 15070 unbefriedigende Ergebnisse für die Laufrad-Schiene-Auslegung von Fördermitteln. Hesses Hauptkritikpunkte sind hierbei:

- unrealistische Berechnung der Flächenpressung am Rollkontakt (Stribeck'sche Pressung statt Hertz'sche Pressung)
- keine Berücksichtigung von Schräglauf und Bauteiltoleranzen
- unrealistische Kontaktbedingung: Annahme von Linienberührung entlang der Schienenkopfbreite
- keine Aussage über auftretenden Verschleiß und Lebensdauer möglich

Hinsichtlich RBG lässt sich die Kritik um folgende Punkte erweitern:

- Überrollungszahlen sind bei RBG deutlich höher als bei Kranen (bis  $10^8$ ): dadurch fällt der fehlende Lebensdauernachweis noch stärker ins Gewicht.
- Fahrgeschwindigkeiten und Beschleunigungen sind bei RBG höher
- dynamische Radlastverteilung ist bei RBG ausgeprägter als bei Kranen

Die letzten beiden Punkte verschärfen nochmals das Problem des unzureichenden Lastkollektivs.

### 2.3.2 FEM 1.001

Die FEM 1.001 [FEM-1001] ist eine Richtlinie zur Berechnung der Laufraddurchmesser bei Kranen. Aufgrund des Mangels an Normen und Richtlinien für das Rad-Schiene-System von RBG kommt auch diese Richtlinie hier häufig zum Einsatz. Für die Berechnung des Lastkollektivs definiert diese Richtlinie drei Belastungsfälle, für welche jeweils die minimal und maximal auftretende Radkräfte,  $F_{W,min}$  und  $F_{W,max}$  bestimmt werden. Basierend darauf werden mit einem gegebenen Raddurchmesser  $D_W$  folgende beiden Bedingungen geprüft:

$$\frac{\bar{F}_{W,3}}{b_R \cdot D_W} \leq 1,38 \cdot P_L \quad (2-3)$$

$$\frac{\bar{F}_{W,i}}{b_R \cdot D_W} \leq P_L \cdot c_{1,FEM} \cdot c_{2,FEM} \quad \text{für } i \in \{1,2\} \quad (2-4)$$

mit

$\bar{F}_{W,i}$ : mittlere Radkraft im Belastungsfall  $i$

$b_R$ : lasttragende Breite der Schiene

$P_L$ : Zulässige Flächenpressung; Bestimmung entsprechend Tabelle A-4

$c_{1,FEM}$ : Drehzahl-Beiwert der FEM 1.001; Bestimmung entsprechend Tabelle A-2

$c_{2,FEM}$ : Beiwert in Abhängigkeit des Fahrwerks der FEM 1.001; Bestimmung entsprechend Tabelle A-5

Die mittlere Radlast im Belastungsfall  $i$  berechnet sich dabei nach:

$$\bar{F}_{W,i} = \frac{F_{W,i,min} + 2F_{W,i,max}}{3} \quad (2-5)$$

Die Kräfte  $F_{W,i,max}$  und  $F_{W,i,min}$  sind dabei mit einem in der Richtlinie definierten Beiwert zu multiplizieren. Die Belastungsfälle 2 und 3 beziehen sich auf einen Kranbetrieb bei Wind bzw. außergewöhnlichem Wind. Da diese beiden Fälle für RBG nicht relevant sind, wird hier lediglich der Belastungsfall 1, regulärer Betrieb, berücksichtigt. Somit ist auch die Gleichung

2-3 für RBG nicht relevant. Die Auslegung nach FEM 1.001 erlaubt zwar im Gegensatz zur DIN 15070 die Berücksichtigung verschiedener Belastungsfälle und von Risikobeiwerten, ist allerdings grundsätzlich ähnlich aufgebaut. Damit gelten die an der DIN 15070 geäußerten Kritikpunkte auch für die FEM 1.001.

### 2.3.3 DIN EN 13001-3-3

Die DIN EN 13001-3-3 [DIN-EN-13001-3-3] ersetzt seit 2014 die DIN 15070. Im Gegensatz zur DIN 15070 ist sie keine Auslegungsnorm, sondern eine Nachweisnorm. Im Rahmen der DIN EN 13001-3-3 sind zwei Nachweise sowohl für die Räder als auch für die Schiene zu erbringen: der statische Festigkeitsnachweis und der Ermüdungsfestigkeitsnachweis. In beiden Nachweisen ist zu zeigen, dass die jeweilige Bemessungskontaktkraft einen berechneten Grenzwert nicht überschreitet. Zur Berechnung der Bemessungskontaktkräfte,  $F_{Sd,s}$  (statischer Festigkeitsnachweis) und  $F_{Sd,f}$  (Ermüdungsfestigkeitsnachweis) sind wiederum Belastungsfälle in der DIN EN 13001-2 [DIN-EN-13001-2] definiert.

Aufgrund des Umfangs der DIN EN 13001-3-3 gibt dieses Kapitel lediglich eine Übersicht über die relevantesten Berechnungsschritte. Für Details einzelner Berechnungen sei an dieser Stelle auf die Norm selbst verwiesen.

#### Kontaktfälle

Zunächst unterscheidet die DIN EN 13001-3-3 zwischen Linien- und Punktkontaktfällen. Abbildung 2-4 zeigt den Unterschied zwischen den beiden Kontaktarten. Dabei gilt:

$r_k$ : Schiene: Radius des gewölbten Schienenkopfes; Rad: zweiter Radradius

$b_R$ : lasttragende Breite der Schiene

$b_W$ : lasttragende Breite des Rads

$r_3$ : Schiene: Radius der Schienenkante; Rad: Radius der Radkante

Gilt folgende Bedingung, ist es möglich Punktkontakte mithilfe der Formeln für Linienkontakt zu berechnen:

$$r_k \geq 200 \times b; \quad b = \min [b_R, b_W] \quad (2-6)$$

mit

$b$ : effektive lasttragende Breite

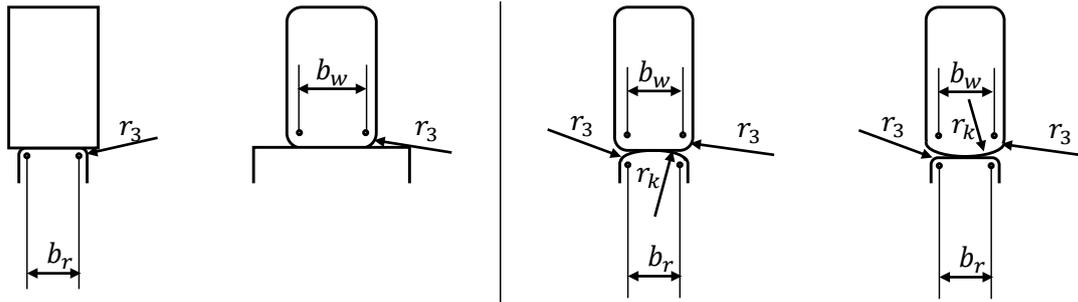


Abbildung 2-4: Unterscheidung zwischen Linien- und Punktkontakt. Links: Linienkontakt; Rechts: Punktkontakt. Nach [DIN-EN-13001-3-3]

### Tiefe der maximalen Scherbeanspruchung

Für oberflächengehärtete Materialien ist folgende Bedingung zur Tiefe der gehärteten Schicht  $z$  der maximalen Scherbeanspruchung zu prüfen:

$$z > 2 \cdot z_{ml} \text{ bzw. } z > z_{mp} \quad (2-7)$$

wobei  $z_{ml}$  und  $z_{mp}$  die Tiefe der maximalen Scherbeanspruchung für den Linien- bzw. Punktkontaktfall darstellen. Diese berechnen sich folgendermaßen:

$$z_{ml} = 0,5 \cdot \sqrt{F_{sd0,s} \cdot \frac{\pi \cdot D_W \cdot (1 - v_P^2)}{b \cdot E_m}} \quad (2-8)$$

$$z_{mp} = 0,68 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_{sd0,s}}{E_m} \cdot \frac{(1 - v_P^2)}{\left(\frac{2}{D_W} + \frac{1}{r_k}\right)}} \quad (2-9)$$

mit

$F_{sd0,s}$ : maximale faktorlose Bemessungskontaktkraft innerhalb der Lastkombinationen A bis C der DIN EN 13001-2

$D_W$ : Raddurchmesser

$b$ : effektive lasttragende Breite

$E_m$ : Äquivalenter Elastizitätsmodul

$v_P$ : Querkontraktionszahl

$r_k$ : Schiene: Radius des gewölbten Schienenkopfes; Rad: zweiter Radradius

Der äquivalente Elastizitätsmodul  $E_m$  berechnet sich zu:

$$E_m = \frac{2 \cdot E_R \cdot E_W}{E_W + E_R} \quad (2-10)$$

$E_W$ : Elastizitätsmodul der Räder

$E_R$ : Elastizitätsmodul der Schiene

Für die Berechnung weiterer Größen ist für oberflächengehärtete Material zudem zu prüfen, ob gilt:

$$HB \geq 0,6 \cdot f_y \quad (2-11)$$

mit

$HB$ : Einheitenkonforme Härte

$f_y$ : Streckgrenze des Materials unterhalb der gehärteten Oberfläche

### Statischer Festigkeitsnachweis

Zum Nachweis der *statischen Festigkeit* darf die Bemessungskontaktkraft  $F_{Sd,s}$  für keinen der relevanten Belastungsfälle ihren Grenzwert  $F_{Rd,s}$  überschreiten. Dabei sind bei der Berechnung der Bemessungskontaktkraft Dynamik-, Teilsicherheits- und Risikobeiwerte zu berücksichtigen, welche in der DIN EN 13001–2 definiert sind. Der Grenzwert  $F_{Rd,s}$  ist separat für die Räder und die Schiene zu berechnen. Bei der Berechnung des Grenzwerts der Bemessungskontaktkraft wird zwischen oberflächengehärteten und nicht oberflächengehärteten Materialien unterschieden. Für nicht oberflächengehärtete Materialien berechnet sich  $F_{Rd,s}$  wie folgt:

$$F_{Rd,s} = \frac{(7 \cdot HB)^2}{\gamma_m} \cdot \frac{\pi \cdot D_W \cdot b \cdot (1 - v_P^2)}{E_m} \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (2-12)$$

Für oberflächengehärtete Materialien gilt, sofern die Bedingungen 2-7 und 2-11 erfüllt sind, folgende Formel:

$$F_{Rd,s} = \frac{(4,2 \cdot f_y)^2}{\gamma_m} \cdot \frac{\pi \cdot D_W \cdot b \cdot (1 - v_P^2)}{E_m} \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (2-13)$$

mit

$E_m$ : Äquivalenter Elastizitätsmodul

$v_P$ : Querkontraktionszahl ( $v_P = 0,3$  für Stahl)

$D_W$ : Raddurchmesser

$b$ : effektive lasttragende Breite

$HB$ : Einheitenkonforme Härte

$\gamma_m$ : Allgemeiner Widerstandsbeiwert

$f_y$ : Streckgrenze des Materials unterhalb der gehärteten Oberfläche

$f_1$ : Minderungsfaktor für Kantenpressung; Bestimmung entsprechend Tabelle A-6

$f_2$ : Minderungsfaktor für ungleichmäßige Flächenpressung; Bestimmung entsprechend Tabelle A-9

## Ermüdungsfestigkeitsnachweis

Zum Nachweis der *Ermüdungsfestigkeit* ist zu zeigen, dass die Bemessungskontaktkraft  $F_{Sd,f}$  für keinen der relevanten Belastungsfälle ihren Grenzwert  $F_{Rd,f}$  überschreitet. Bei diesem Nachweis sind bei der Berechnung von  $F_{Sd,f}$  keine Beiwerte zu berücksichtigen. Der Grenzwert  $F_{Rd,f}$  ist folgendermaßen separat für die Räder und Schiene zu berechnen:

$$F_{Rd,f} = \frac{F_u}{\gamma_{cf} \cdot m_{en} \sqrt{s_c}} \cdot f_1 \cdot f_{f3} \cdot f_{f4} \quad (2-14)$$

mit

$F_u$ : Bezugskontaktkraft

$s_c$ : Kontaktverlaufparameter

$\gamma_{cf}$ : Kontaktwiderstandsbeiwert für Ermüdung

$f_{f3}$ : Faktor für den Schräglauf; Bestimmung entsprechend Tabelle A-7

$f_{f4}$ : Mechanischer Abriebsfaktor; Bestimmung entsprechend Tabelle A-8

$m_{en}$ : Exponent für Laufrad/Schiene-Kontakt,  $m_{en} = \frac{10}{3}$

Die Bezugskontaktkraft  $F_u$  berechnet sich für oberflächengehärtete Materialien, sofern die Bedingungen 2-7 und 2-11 erfüllt sind, wie folgt:

$$F_u = \frac{(3 \cdot HB)^2}{\gamma_m} \cdot \frac{\pi \cdot D_W \cdot b \cdot (1 - v_P^2)}{E_m} \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (2-15)$$

und für nicht oberflächengehärtete Materialien:

$$F_u = \frac{(1,8 \cdot f_y)^2}{\gamma_m} \cdot \frac{\pi \cdot D_W \cdot b \cdot (1 - v_P^2)}{E_m} \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (2-16)$$

Der Kontaktverlaufparameter berechnet sich aus dem Kontaktkraftkollektivbeiwert  $k_c$  und der relativen Gesamtzahl der Rollkontakte  $i_{tot}$  wie folgt:

$$s_c = k_c \cdot v_c \quad (2-17)$$

Der Kontaktkraftkollektivbeiwert, welcher das Lastkollektiv der DIN EN 13001-3-3 repräsentiert, berechnet sich folgendermaßen:

$$k_c = \frac{1}{i_{tot}} \cdot \sum_{i=1}^{i_{tot}} \left( \frac{F_{Sd,f,i}}{F_{Sd,f}} \right)^{m_{en}} \quad (2-18)$$

mit

$i_{tot}$ : Gesamtzahl der Rollkontakte

$F_{Sd,f,i}$ : Bemessungskontaktkraft bei Kontakt  $i$

$F_{Sd,f}$ : Bemessungskontaktkraft für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis

Im Falle der Räder ist jede komplette Umdrehung als ein Rollkontakt zu zählen. Für einen betrachteten Punkt auf der Schiene gilt das Überfahren eines Laufrads als Rollkontakt.

Die relative Anzahl der Rollkontakte ist wie folgt zu berechnen:

$$v_c = \frac{i_{tot}}{i_D} \quad (2-19)$$

wobei  $i_D = 6,4 \cdot 10^6$  die Anzahl der Rollkontakte am Bezugspunkt für die Berechnung der Bezugskontaktkraft  $F_u$  ist.

In Bezug auf RBG ist anzumerken, dass die Mehrheit der in der DIN EN 13001-2 definierten Lastfälle nicht relevant sind. Vielmehr ist hier davon auszugehen, dass die maximal auftretenden Kräfte im regulären Betrieb sowohl für den statischen als auch den Ermüdungsfestigkeitsnachweis die relevante Bemessungskontaktkraft darstellt. Daraus leitet sich folgende Annahme ab:

$$F_{sd0,s} = F_{Sd,f} \quad (2-20)$$

Die maximale faktorlose Bemessungskontaktkraft  $F_{sd0,s}$  ist also identisch mit der Bemessungskontaktkraft für Ermüdung  $F_{Sd,f}$ . Zur Durchführung des statischen Festigkeitsnachweises sind für diese noch geeignete Dynamik- und Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN EN 13001-2 auszuwählen.

### Diskussion der DIN EN 13001-3-3

Die DIN EN 13001-3-3 greift zahlreiche der von Hesse an der DIN 15070 kritisierten Punkte auf. Ebenfalls sind die speziell auf RBG bezogenen Schwächen behoben. Insbesondere ist aufgrund des Ermüdungsfestigkeitsnachweises eine Aussage über die Lebensdauern der

Räder sowie der Schiene möglich. Im Gegensatz zur DIN 15070 und FEM 1.001 verwendet die DIN EN 13001-3-3 ein realistisches Lastkollektiv, welches sämtliche während der Lebensdauer auftretende Kontaktkräfte berücksichtigt. Allerdings bringt die DIN EN 13001-3-3 zwei Probleme mit sich, welche ihre praxistaugliche Anwendung schwierig machen:

- Zur exakten Berechnung des Kontaktkraftkollektivbeiwerts  $k_c$  müssen sämtliche während der Auslegungslebensdauer auftretenden Kontaktkräfte bekannt sein. Ohne dieses Kenntnis lässt sich  $k_c$  wiederum lediglich näherungsweise mithilfe von Ersatzlasten berechnen.
- Zur Bestimmung der Gesamtzahl der Rollkontakte der Räder muss die während der Auslegungslebensdauer insgesamt zurückgelegte Distanz des RBG bekannt sein, was nicht der Fall ist. Somit ist die Anzahl der Rollkontakte der Räder zum Auslegungszeitpunkt nur grob abschätzbar. Die Anzahl der Rollkontakte für die Schienenstelle mit den meisten Überrollungen ist hingegen bestimmbar. Hierbei ist, sofern Ein- und Auslagerpunkt identisch sind, von vier Rollkontakten pro Arbeitsspiel auszugehen. Bei unterschiedlichen Ein- und Auslagerpunkten ist eine Annahme von zwei Kontakten pro Arbeitsspiel gerechtfertigt, sofern die Anzahl der Ein- und Auslagerungen gleich hoch sind.

Diese beiden Punkte verschärfen sich bei der Anwendung in Bezug auf RBG nochmals, da hier die Anzahl der Rollkontakte höher sowie die dynamischen Lastverteilungen ausgeprägter als bei Kranen sind (siehe Kritik an DIN 15070). Aufgrund dessen ist eine praxistaugliche Anwendung der DIN EN 13001-3-3 für RBG derzeit nicht möglich. Daher war es Ziel des Forschungsprojekts,  $k_c$  und  $i_{tot}$  bzw. die zurückgelegte Gesamtdistanz, mithilfe von einer Simulation und Methoden des maschinellen Lernens aus zum Auslegungszeitpunkt bekannten Parametern vorherzusagen. Mithilfe dieser Vorhersagemodelle in Kombination mit einem Softwaredemonstrator, welcher den statischen Festigkeitsnachweis sowie Ermüdungsfestigkeitsnachweis automatisiert durchführt, soll die DIN EN 13001-3-3 zur praxistauglichen Auslegung des Rad-Schiene-Systems von RBG verwendet werden können. Somit steht am Ende des Forschungsprojekts eine Auslegungsmethode zur Verfügung, welche die einfache Auslegung nach DIN 15070 und FEM 1.001 mit der genauen Berechnung nach DIN 13001-3-3 vereint.

## 3 Grundlagen

---

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht der im Rahmen des Forschungsprojekts angewandten Methoden. Es gliedert sich in drei Teile. Der nächste Abschnitt zeigt die Grundlagen der Mehrkörpersimulation auf, welche in Abschnitt 4.4.2 zur Berechnung der Kontaktkräfte verwendet wird. Anschließend werden die Grundlagen der statistischen Versuchsplanung vorgestellt. Diese werden in 3.2.3 genutzt, um insignifikante Eingangsgrößen zu identifizieren. Zudem dienen die hier vorgestellten Methoden zu Planung der Simulationen, zur Erzeugung der Datensätze sowie zur Entwicklung und Validierung der Vorhersagemodelle. Das Kapitel schließt mit einer Übersicht über verschiedene Methoden des maschinellen Lernens, welche zur Vorhersage des Kontaktkraftkollektivbeiwerts  $k_c$  in Abschnitt 5.3 genutzt werden.

### 3.1 Mehrkörpersimulation

Dieser Abschnitt wurde im Wesentlichen in der Semesterarbeit [Kel-2019] und der Masterarbeit [Wol-2016] erarbeitet.

Zur Berechnung der Kräfte unter Berücksichtigung von dynamischen Effekten, insbesondere den Mastschwingungen, wird im Forschungsprojekt die Methode der Mehrkörpersimulation (MKS) verwendet. Dieser Abschnitt gibt eine kurze Übersicht über deren Grundlagen sowie über die im Forschungsprojekt verwendete MKS-Software SIMPACK.

Die MKS beschäftigt sich mit der Bewegungssimulation und Modellierung technischer Systeme. Die Modelle bestehen aus Körpern und Verbindungselementen. Die Verbindungselemente gliedern sich wiederum in kinematische Verbindungselemente, sogenannte *Joints*, Kraftelemente, beispielsweise Feder-/Dämpferelemente, und Kontakte. Während die Körper massebehaftet sind, sind die Verbindungselemente masselos. Letztere dienen lediglich zur Übertragung von Bewegungen oder Kräften und definieren die Freiheitsgrade der einzelnen Körper. Das Mehrkörpersystem wird durch Bewegungsdifferentialgleichungen beschrieben. Diese werden mithilfe einer numerischen Integration gelöst. [Ril-2017]

#### 3.1.1 Modellierung der Körper

Die Körper lassen sich in der MKS sowohl starr als auch elastisch modellieren. Während bei einer starren Modellierung die auftretenden Kräfte lediglich von den Massen, Trägheitsmomenten und Schwerpunkten der Körper abhängen, lassen sich durch eine elastische Modellierung ebenfalls dynamische Effekte wie Schwingungen abbilden. Für Modellierung elastischer Körper sind zwei Methoden relevant.

Die sogenannte *lumped-mass*-Methode approximiert elastische Körper durch mehrere starre Körper, die durch Feder-Dämpfer-Elemente verbunden sind. Hierdurch lassen sich näherungsweise nicht lineare Verformungen abbilden. Dabei steigt mit der Anzahl von Starrkörpern die Genauigkeit, mit welcher sich die elastischen Verformungen abbilden lassen. Des Weiteren haben die gewählten Dämpfungs- und Steifigkeitseigenschaften der Feder-Dämpferelemente einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse. [Ril-2017, Sim-2018]

Eine weitere Möglichkeit zur Modellierung elastischer Körper ist die Nutzung von *Balkenelementen*. Dabei wird ein elastischer Körper wie bei der *lumped-mass*-Methode durch mehrere Elemente abgebildet. Allerdings handelt es sich bei diesen statt um starre Körper um elastische Balken, in der Regel Euler-Bernoulli-Balken. Die Modellierung mithilfe von Euler-Bernoulli-Balken unterliegt der Annahme, dass bei einer Biegung nur kleine Verformungen auftreten. Schlanke Balken, deren Länge mindestens das Zehnfache des Querschnitts betragen, erfüllen diese Annahme. [Ril-2017, Mag-2016, Sim-2018]

Die im Rahmen des Forschungsprojekts genutzte MKS-Software SIMPACK [Sim-2018] unterstützt beide hier vorgestellten Modellierungsmethoden für elastische Körper. Für eine noch größere Genauigkeit lassen sich zudem FEM-Modelle importieren. Aufgrund deren langer Rechenzeit wurden FEM-Modelle im Rahmen des Forschungsprojekts allerdings nicht betrachtet.

### 3.1.2 Kinematische Verbindungs- und Krafftelemente

Durch kinematische Verbindungselemente lassen sich zwei Körper miteinander verbinden. Die Verbindungselemente definieren dabei die Freiheitsgrade, die die beiden Körper zueinander haben. Es lassen sich sowohl translatorische, als auch rotatorische Freiheitsgrade definieren. Die Verbindungselemente dienen darüber hinaus der Bewegungsanregung. Sie können einen Positions-, einen Geschwindigkeits-, sowie einen Beschleunigungsverlauf erhalten, durch welche einer der beiden verbundenen Körper angeregt wird. [Ril-2017, Sim-2018]

Eine weitere Gruppe von Verbindungselementen sind Krafftelemente. Ähnlich wie kinematische Verbindungselemente können Krafftelemente, beispielsweise Feder-Dämpferelemente, die Freiheitsgrade der beiden beteiligten Körper einschränken. Im Gegensatz zu Ersteren lassen sich hierdurch auch Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften der Verbindungen modellieren. [Ril-2017, Sim-2018]

### 3.1.3 Kontaktelemente

Kontaktelemente dienen zur Modellierung des Kontakts zwischen zwei Körpern. So lassen sich mithilfe dieser Elemente verschiedene Kontakteigenschaften, wie beispielsweise Reibung zwischen zwei Körpern, modellieren.

Ein für das Forschungsprojekt besonderes Kontaktelement ist dabei der Rad-Schiene-Kontakt. Die im Rahmen des Projekts eingesetzte MKS-Software SIMPACK verfügt über eine speziell zur Modellierung dieser Kontaktart konzipiertes Rad-Schiene-Modul. Das Rad-Schiene-Element berechnet die Normalkraft nach der Hertz'schen Theorie [Her-1881]. Tangentialkräfte werden nach Kalker [Kal-1990] berechnet. Darüber hinaus lässt sich der Verschleiß des Rads und der Schiene modellieren. [Sim-2018]

Abbildung 3-1 zeigt beispielhaft den Aufbau eines Mehrkörpermodells in der im Forschungsprojekt verwendeten Software SIMPACK.

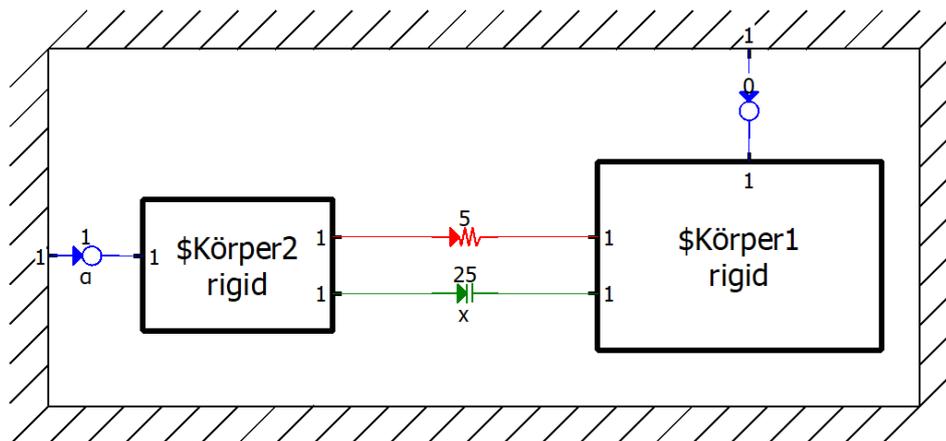


Abbildung 3-1: Beispielhafte MKS in SIMPACK: Zwei starre (rigid) Körper sind durch kinematische Verbindungselemente mit dem Koordinatensystem (blau) und miteinander (grün) verbunden. Zudem sind sie durch ein Kraftelement (rot) verbunden.

## 3.2 Statistische Versuchsplanung

Dieser Abschnitt wurde im Wesentlichen in der Masterarbeit [Kel-2021] erarbeitet.

Ziel der statistischen Versuchsplanung ist die Generierung eines möglichst hohen Informationsgehalts bei der Durchführung von möglichst wenigen Versuchen. Dabei werden die Versuche so gestaltet, dass jeder einzelne Versuch einen möglichst großen Informationsgewinn bezüglich der Zusammenhänge zwischen unabhängigen und abhängigen Variablen eines betrachteten Systems liefert. [Sie-2017]

Dieser Abschnitt gibt zunächst eine kurze Übersicht über die grundlegenden Begriffe der statistischen Versuchsplanung. Anschließend werden die im Forschungsprojekt eingesetzten Versuchspläne näher vorgestellt: Placket-Burman-Pläne, das Morris-Screening sowie der Latin Hypercube.

### 3.2.1 Grundlegende Begriffe

Auf ein zu untersuchendes *System* wirken *Einflussgrößen*, welche im Rahmen der statistischen Versuchsplanung in kontrollierbare und unkontrollierbare Einflussgrößen, oder auch Störgrößen, unterteilt werden. Die kontrollierbaren Einflussgrößen werden im weiteren Verlauf als *unabhängige Variablen*, *Eingangsrößen* oder *Faktoren* bezeichnet. Die Zielgrößen oder auch *abhängige Variablen* bilden die Ergebnisse des Systems. Abbildung 3-2 zeigt schematisch einen beispielhaften Systemaufbau. [Sie-2017, Kle-2016]

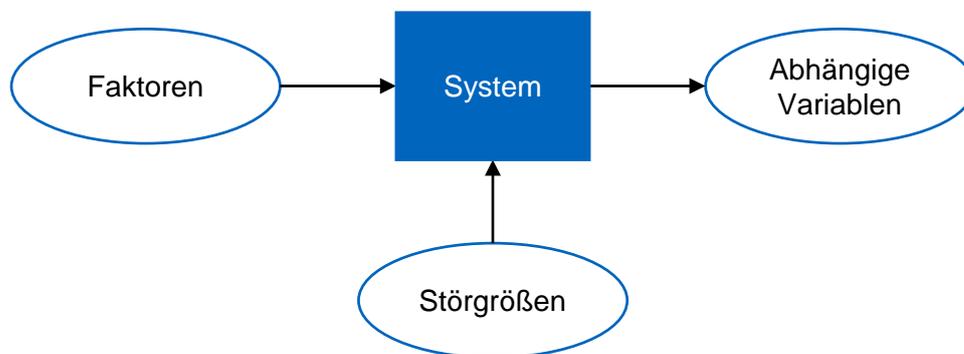


Abbildung 3-2: Beispielhafter Systemaufbau nach [Sie-2017]

Bei einer Versuchsplanung werden die Faktoren auf verschiedenen *Stufen* variiert. Die Anzahl der Stufen unterscheidet sich je nach Versuchsplan. Ein *vollfaktorieller Versuchsplan* bezeichnet einen Plan, der die Faktoren auf allen ihren möglichen Werten variiert und alle möglichen Kombinationen aus den Werten der Faktoren bildet. Diese Art der Versuchsplanung benötigt bei einer großen Zahl von Faktoren sowie bei großen Wertebereichen sehr viele Versuche.

Die Planung von Computereperimenten stellen einen Sonderfall der statistischen Versuchsplanung dar. Im Gegensatz zu physischen Experimenten unterliegen Computereperimente mit Ausnahme von numerischem Rauschen keinen unkontrollierbaren Einflussgrößen. Daher werden diese Art von Versuchen als *deterministisch* bezeichnet. Dies bedeutet, dass eine Wiederholung des gleichen Versuchs stets zum selben Ergebnis führt. [San-2003]

Ein Versuchsplan lässt sich tabellarisch darstellen. Dabei repräsentieren die Spalten die Faktoren und die Zeilen die Versuchsnummern.

### 3.2.2 Plackett-Burman Versuchspläne

Plackett-Burman-Versuchspläne gehören zu der Gruppe der *Screening*-Versuchspläne. Diese kommen zur Identifikation von signifikanten bzw. insignifikanten Faktoren zum Einsatz. Zu den meist genutzten Versuchsplänen dieser Art gehören zweistufige Versuchspläne, welche die Faktoren lediglich auf ihrem maximalen bzw. minimalen Wert untersuchen. Die maximalen und minimalen Werte sind dabei durch „+“ bzw. „-“ kodiert. [Kle-2016, Sie-2017]

Plackett-Burman Pläne sind *irreguläre* Pläne. Diese Art von Plänen entstehen durch sukzessives Austauschen der Kodierungen („+“ und „-“) von Spalte zu Spalte. Dies ist beispielhaft für einen sogenannten L12-Plan in Tabelle 3-1 dargestellt. L12 bedeutet hierbei, dass zwölf Versuchsläufe durchgeführt werden. Ausgehend von Spalte A „rutscht“ die Kodierung bei jeder neuen Spalte eine Zeile nach unten. Die letzte Zeile besteht allerdings stets ausschließlich aus „-“-Einträgen. Plackett-Burman-Versuchspläne existieren in Abstufungen von 8 bis 96 Versuchsläufen mit dem Inkrement 4. Die maximale Anzahl zu untersuchender Faktoren ist stets um eins geringer als die Zahl der Versuchsläufe. Mit einem L12-Plan können also maximal elf Faktoren untersucht werden. Nach unten ist die Zahl der Faktoren nicht begrenzt. In diesem Fall hat der Versuchsplan weniger Spalten. Ein Plackett-Burman-Plan zur Untersuchung von zehn Faktoren ist also fast identisch mit dem Plan in Tabelle 3-1, ohne die Spalte K. Diese Art des Versuchsplans ist einer der am häufigsten angewandte in der Praxis. [Sie-2017]

Tabelle 3-1: Beispielhafter Plackett-Burman Versuchsplan mit zwölf Versuchen und 11 (A-K) Faktoren. Quelle: [Sie-2017]

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+
+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+
+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+
+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+
+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-
-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-
-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-
-	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+
+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-
-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Dadurch, dass Versuchspläne nach Placket-Burman die Faktoren ausschließlich auf ihrem minimalen bzw. maximalen Wert variieren, repräsentieren die daraus entstehenden Faktorkombinationen Extremwerte des zu untersuchenden Systems. Da dies eine nützliche Eigenschaft bei der Bestimmung der minimal nötigen Anzahl von Arbeitsspielen zur Berechnung eines repräsentativen  $k_c$  in Abschnitt 5.1 ist, kommt diese Art Versuchsplan hier zum Einsatz.

### 3.2.3 Morris-Screening

Die meisten Screening-Pläne treffen Annahmen über die Art des Zusammenhangs zwischen den unabhängigen und abhängigen Variablen, beispielsweise ein linearer oder quadratischer Zusammenhang. Beispielsweise untersuchen Placket-Burman-Pläne ebenso wie reguläre Pläne nach Yates lineare Effekte (vgl. [Sie-2017]). Für quadratische Zusammenhänge existieren beispielsweise das Central-Composite-Design, das Box-Behnken-Design sowie das Monte-Carlo-Verfahren (vgl. [Sie-2017]). Das *Morris-Screening* [Mor-1991] trifft hingegen keine solcher einschränkenden Annahmen. Die Ergebnisse aus dieser Art Screening geben ganz allgemein Auskunft über die Größe des Einflusses der Faktoren, sowie darüber, ob dieser Einfluss nicht linear ist und ob Wechselwirkungen bestehen.

Bei der Erstellung eines Versuchsplans zum Morris-Screening werden  $D$  Faktoren auf  $n_r$  Stufen variiert. Dazu werden diese zunächst auf die Zahl Eins normiert, sodass alle Faktoren die Werte  $\{0, 1/(n_r - 1), 2/(n_r - 1), \dots, 1\}$  annehmen. Basis zur Beurteilung des Einflusses Faktoren sind die sogenannten *elementary effects* (*EE*). Der elementary effect  $EE_i$  für den Faktor  $x_i (i \in \{1, \dots, D\})$  auf die abhängige Variable  $y$  berechnet sich folgendermaßen:

$$EE_i = \frac{[y(x_1, \dots, x_i + \Delta, \dots, x_D) - y(x_1, \dots, x_D)]}{\Delta} \quad (3-1)$$

wobei  $\Delta$ , der sogenannte *grid jump*, die Änderung der betrachteten Variable  $x_i$  angibt. Morris schlägt in seinem ursprünglichen Paper  $\Delta = n_r/2$  vor [Mor-1991].

Zur Bestimmung der Höhe und der Art des Einflusses der Faktoren auf die abhängige Variable werden mehrere EE für jedes  $x_i$  berechnet. Dazu wird das oben beschriebene Vorgehen  $r$  mal wiederholt. Die Reihenfolge, in welcher die unabhängigen Variablen variiert werden, unterscheidet sich dabei bei jeder Wiederholung.

Campolongo et. al [Cam-2007] schlagen eine Optimierung dieser zufälligen Reihenfolge vor. Sie wählen die  $r$  verschiedenen Pläne so aus, dass ihr Abstand im Parameterraum der unabhängigen Variablen maximiert wird. Dabei starten Sie mit  $M$  Versuchsplänen und wählen  $r$  Pläne aus, die den Abstand der Pläne im Parameterraum maximieren.

Zur Berechnung der Größe des Einflusses eines Faktors  $x$  schlagen die Autoren in [Cam-2007] den absoluten Mittelwert  $\mu^*$  der EE vor. Dieser berechnet sich wie folgt:

$$\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{t=1}^r |EE_{it}| \quad (3-2)$$

Die Autoren argumentieren, dass bei dem von Morris ursprünglich vorgeschlagenen Maß, dem Mittelwert  $\mu$ , sich EE mit positivem und negativem Vorzeichen gegenseitig aufheben können. Somit besteht die Gefahr, dass der Mittelwert den Effekt einer unabhängigen Variablen unterschätzt.

Die Standardabweichung  $\sigma$  gibt Auskunft darüber, ob bei einer unabhängigen Variable  $x_i$  ein nicht linearer Einfluss bzw. Wechselwirkungen mit anderen Variablen vorliegen. Diese berechnet sich wie folgt:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{t=1}^r (EE_{it} - \mu_i)^2} \quad (3-3)$$

Mithilfe von  $\mu^*$  und  $\sigma$  lässt sich für jeden Faktor die Größe seines Effekts bestimmen, sowie eine Aussage darüber treffen, ob ein nicht linearer Effekt oder eine Wechselwirkung vorliegen. Eine Unterscheidung zwischen Nichtlinearitäten und Wechselwirkungen ist nicht möglich.

Im Rahmen des Forschungsprojekts fand ein Screening der für die Berechnung von  $k_c$  relevanten Eingangsgrößen statt. Ziel war die Identifikation der relevantesten Eingangsgrößen. Dabei war eine Erkenntnis über die genaue Art des Einflusses nicht relevant. Einschränkende Annahmen über die Art des Einflusses waren hingegen unerwünscht. Da das Morris-Screening diese Anforderung erfüllt, fand das Screening, das in Abschnitt 5.2 beschrieben ist, nach dieser Methode statt.

### 3.2.4 Latin Hypercube Design

Latin Hypercube Designs (LHD) gehören zu den für Computerexperimente am meisten genutzten Versuchsplänen. Sie gehören zur Gruppe der *space filling* Designs. LHD streben somit eine gleichmäßige Verteilung der Kombinationen der unabhängigen Variablen im Versuchsraum an. Das Ziel ist somit ein sogenanntes *gleich verteiltes Design*. [Sie-2017, Dea-2017].

Ausgangspunkt für ein LHD mit  $D$  Faktoren und  $n_r$  Stufen ist eine  $n_r \times D$  große Matrix  $\Pi$ . Bei dieser entsteht jede Spalte durch eine zufällige Permutation der Zahlen  $\{1,2,3,\dots,n_r\}$ . Anschließend wird von jedem Element der Matrix eine Zufallszahl aus dem Bereich  $[0,1)$  abgezogen und das Ergebnis durch  $n_r$  geteilt: [Sie-2017, Dea-2017]

$$\Pi_{ij,neu} = \frac{\Pi_{ij} - \text{rand}[0,1)}{n_r} \quad (3-4)$$

Die daraus entstehende Matrix  $\Pi^{LHD}$  wird als LHD bezeichnet. Eine Reihe in dieser Matrix, also eine bestimmte Kombination der  $D$  Faktoren wird im Folgenden auch als Datenpunkt bezeichnet.

### 3.2.5 Optimierung von LHD

Dieses Vorgehen garantiert kein gleich verteiltes Design. Daher existieren Kriterien zur Bewertung der Güte von LHD. Ein gängiges Kriterium ist dabei der minimale Abstand  $d_{min}$  zwischen allen Punkten im Versuchsraum, welche durch die Zeilen des LHD repräsentiert werden. Als Abstandsmaß findet hier die euklidische Distanz  $d_e$  Verwendung. Diese ist zwischen zwei Vektoren  $\mathbf{v}_1$  und  $\mathbf{v}_2$  folgendermaßen definiert: [Sie-2017]

$$d_e(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^D (v_{1i} - v_{2i})^2} \quad (3-5)$$

Ein weit verbreiteter Ansatz ist die Maximierung des minimalen Abstands zwischen allen Punkten im Versuchsraum. Dieses Vorgehen wird als *maximin*-Verfahren bezeichnet. Der Ablauf bei diesem Verfahren ist wie folgt: [Sie-2017]

1. Erzeugung eines Basis-LHD  $\Pi_0^{LHD}$
2. Berechnung des Qualitätskriteriums  $d_{min,0}$
3. Erzeugung eines neuen LHD  $\Pi_i^{LHD}$ , welcher auf einem vorhergehenden  $\Pi_{i-1}^{LHD}$  beruht
4. Berechnung des neuen Qualitätskriteriums  $d_{min,1}$  und der Veränderung des Qualitätskriteriums  $\Delta d_{min}$
5. wenn  $\Delta d_{min}$  eine bestimmte Ersetzungsregel erfüllt, wird  $\Pi_i^{LHD}$  als neues  $\Pi_0^{LHD}$  akzeptiert
6. Beendigung der Optimierung basierend auf einem Stopp-Kriterium, ansonsten wird die Optimierung mit Schritt 3 fortgesetzt

### Erzeugung eines neuen LHD

Als Basis eines neuen LHD  $\Pi_i^{LHD}$  dient der vorhergehende LHD  $\Pi_{i-1}^{LHD}$ . Im ersten Schritt werden zufällig zwei Datenpunkte und ein Faktor ausgewählt. Im Anschluss findet eine Vertauschung der Faktorstufen der beiden Versuchspunkte statt.

### Ersetzungsregel

Eine weit verbreitete Ersetzungsregel ist das sogenannte *Simulated Annealing* (SA) [San-2014]. Morris [Mor-1995] schlägt diese zur Erzeugung von maximin-LHD vor. Dabei ersetzt ein LHD den vorhergehenden, wenn folgendes Kriterium erfüllt ist:

$$e^{-\frac{\Delta d_{min}}{T_k}} \geq \text{rand}(0,1) \quad (3-6)$$

Dabei wird der sogenannte Temperaturfaktor  $T_k$  in Gleichung 3-6 zu Beginn der Optimierung auf eine Starttemperatur  $T_0$  gesetzt und anschließend mithilfe der Abkühlungsgeschwindigkeit  $\alpha$  folgendermaßen reduziert:

$$T_k = \alpha T_{k-1} \quad (3-7)$$

Das Verfahren wird nach einer festen Anzahl von Iterationen gestoppt.

LHD haben in ihrer optimierten Form die Eigenschaft, dass sie den Versuchsraum möglichst gut ausfüllen. Dies ist bei der Erstellung von Vorhersagemodellen besonders hilfreich, da das Modell während des Trainings somit möglichst viele Informationen über den kompletten Versuchsraum erhält. Des Weiteren ist diese Eigenschaft beim Testen von Vorhersagemodellen und von aufgestellten Hypothesen hilfreich, da der Test somit den Versuchsraum möglichst gut abdeckt. Daher kommen LHD zum Testen der minimal erforderlichen Anzahl von Arbeitsspielen in Abschnitt zur Berechnung eines repräsentativen  $k_c$  5.1 sowie zum Training und zum Test der im Forschungsprojekt erstellten Vorhersagemodelle in Abschnitt 5.3 und 5.4 zum Einsatz.

## 3.3 Maschinelles Lernen

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über Methoden des maschinellen Lernens. Zunächst werden grundlegende Konzepte und Begriffe des maschinellen Lernens eingeführt. Anschließend wird der Prozess zum Training moderner Modelle des maschinellen Lernens vorgestellt. Der Abschnitt schließt mit einem Überblick über eine bestimmte Klasse von Modellen, den Gauß-Prozessen.

### 3.3.1 Grundlegende Begriffe

Maschinelles Lernen beschreibt die Fähigkeit von Computern, eine Aufgabe aus ihnen präsentierten Datensätzen zu lernen, ohne dass eine explizite Programmierung der Aufgabe nötig ist [Jos-2020]. Das Ergebnis des maschinellen Lernens ist ein *Modell*, welches die gelernte Aufgabe ausführt. Dabei wird zwischen drei unterschiedliche Arten von maschinellem Lernen unterschieden.

#### Arten des maschinellen Lernens

Beim *überwachten Lernen* erhält das Modell einen Trainings-Datensatz, welcher Beispiele von unabhängigen Variablen und dazugehörigen Werten der abhängigen Variable, die sogenannten *Labels*, enthält. Die unabhängigen Variablen werden dabei in einem Vektor  $\mathbf{x}$  der Länge  $D$  zusammengefasst. Ziel für das Modell ist es eine mathematische Funktion  $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$  zu erlernen. Der Vektor  $\boldsymbol{\theta}$  fasst dabei die *erlernbaren Parameter* des Modells zusammen, die während des Trainingsprozesses fortlaufend angepasst werden. Überwachtes Lernen gliedert sich in zwei Gruppen. Bei einer *Regression* nehmen die abhängigen Variablen einen kontinuierlichen Wertebereich an. Bei einer *Klassifikation* nehmen die abhängigen Variablen diskrete Werte an. Diese werden einer bestimmten Kategorie zugeordnet. [Jos-2020]

Beim *unüberwachten Lernen* sind keine Labels für die Trainingsdaten vorhanden. Ziel des Modells ist es, die Trainingsdaten in Cluster zu unterteilen, welche Datenpunkte enthalten, die sich sehr ähnlich sind. [Jos-2020]

*Bestärkendes Lernen* ist eine Methode, bei der das Modell *Feedback* von seiner Umgebung erhält. Allerdings liegen keine expliziten Labels vor. [Jos-2020]

#### Verlustfunktionen und Metriken

Eine Verlustfunktion  $l(\boldsymbol{\theta})$  dient zur Quantifizierung der Güte eines Modells. Sie ist abhängig von den Modellparametern  $\boldsymbol{\theta}$  und beschreibt, wie gut ein Modell die ihm präsentierten Daten abbildet. Dabei wird zunächst mithilfe des Modells für jeden Punkt des Datensatzes eine *Vorhersage* berechnet. Anschließend wird mit den Vorhersagen und den zugehörigen Labels der Verlust berechnet. Basierend darauf können die Parameter  $\boldsymbol{\theta}$  angepasst und das Modell somit verbessert werden. Dieser *Trainingsprozess* wird in Abschnitt 3.3.2 genauer beschrieben. Die Verlustfunktion hängt von der Art des Modells sowie von seiner Aufgabe ab. [Jos-2020]

Eine *Metrik* ist eine vom Anwender zu definierende Größe, anhand welcher eine Auswahl zwischen mehreren möglichen Modellen stattfindet. Die Metrik kann dabei mit der Verlustfunktion identisch sein. Es ist allerdings auch möglich, dass sich Metrik und Verlustfunktion

unterscheiden. Im Gegensatz zur Verlustfunktion wird die Metrik nicht anhand der Trainingsdaten berechnet, sondern anhand eines separaten Datensatzes, den *Validierungsdaten*, welche nicht zur Optimierung der Modellparameter  $\theta$  genutzt werden. Dies soll sicherstellen, dass das Modell *generalisiert*, also auch für Datenpunkte gute Vorhersagen liefert, welche nicht Teil der Trainingsdaten waren. [Jos-2020]

Die Verlustfunktion, die im Rahmen des Forschungsprojekts zum Einsatz kam, wird in 3.3.3 beschrieben.

### 3.3.2 Trainingsprozess

Das Training eines Modells beschreibt die Optimierung seiner Parameter  $\theta$  mit dem Ziel, die Verlustfunktion  $l(\theta)$  zu minimieren. Die Methode, auf welcher das Training vieler moderner Methoden des maschinellen Lernens, beispielsweise von neuronalen Netzen oder Gauß-Prozessen, basiert, ist das sogenannte Gradient Descent (GD). Das Vorgehen (vgl. Abbildung 3-3) ist dabei wie folgt: [Rud-2016]

1. Initialisierung der Parameter  $\theta$  mit zufälligen Werten
2. Berechnung der Vorhersage aller Trainingspunkte
3. Berechnung des Verlusts und der Metrik aus den Vorhersagen und den Labels
4. Berechnung des Gradienten der Verlustfunktion nach den Parametern  $\theta$
5. Anpassung der Parameter  $\theta$  basierend auf dem Gradienten, auch *Optimierungsschritt* genannt
6. Stopp, falls ein definiertes Kriterium erfüllt ist, ansonsten Fortsetzung mit 2.

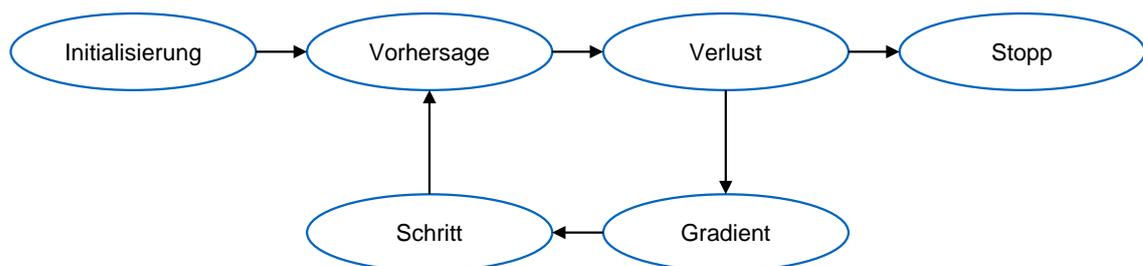


Abbildung 3-3: Ablauf Trainingsprozess Gradient Descent

Der Gradient, also die Veränderung der Verlustfunktion in Abhängigkeit der Parameter  $\theta$ , berechnet sich dabei wie folgt: [Rud-2016]

$$\nabla l(\theta) = \frac{\partial l(\theta)}{\partial \theta} \quad (3-8)$$

Die Berechnung der angepassten Parameter in Schritt 5 findet folgendermaßen statt: [Rud-2016]

$$\boldsymbol{\theta}_{neu} = \boldsymbol{\theta} - \nabla l(\boldsymbol{\theta}) \cdot LR \quad (3-9)$$

wobei LR die sogenannte *Learnrate* ist. Sie bestimmt die Schrittweite eines Optimierungsschritts. Das Stopp-Kriterium ist vom Nutzer zu definieren. Häufig wird das Training gestoppt, sobald sich die Verlustfunktion nicht mehr nennenswert verbessert. Dieses Vorgehen ist auch als *early stopping* bekannt. Die Parameter, welche den Trainingsprozess definieren, beispielsweise die LR, heißen *Hyperparameter*. [Rud-2016]

Smith [Smi-2017] schlägt zur Auswahl einer LR ein Verfahren vor, bei welchem zu Beginn des Trainingsprozesses die LR sehr klein ist, während des Trainings sukzessive erhöht wird und zum Ende wieder abnimmt. Beim Training von neuronalen Netzen zeigte sich, dass dieses Verfahren zu besseren Ergebnissen führt.

Insbesondere beim Training mit sehr großen Datensätzen wird dieses Vorgehen nicht mit dem kompletten Trainingsdatensatz durchgeführt. Stattdessen wird der Datensatz zufällig in mehrere *Batches* eingeteilt und bei jeder Iteration nur ein einzelner Batch verwendet. Ein Durchlauf durch alle Batches heißt *Epoch*. Bei der Verwendung von Batches heißt der Trainingsprozess *Stochastic Gradient Descent* (SGD). [Rud-2016]

### 3.3.3 Gauß-Prozesse

Dieser Unterabschnitt wurde im Wesentlichen in der Masterarbeit [Kel-2021] erarbeitet.

Gauß-Prozesse (GP) sind *probabilistische* Vorhersagemodelle. Sie basieren auf der Annahme, dass Konfigurationen der unabhängigen Variablen, die in ihren Wertebereichen nahe beieinanderliegen, zu ähnlichen Werten der abhängigen Variablen führen. Zwei Werte der abhängigen Variablen, die sich aus ähnlichen Werten der unabhängigen Variablen ergeben, haben also eine hohe Korrelation. GP gehören zur Gruppe der Methoden des überwachten Lernens. [Dea-2017]

Ein GP ist eine Erweiterung der mehrdimensionalen Gaußverteilung auf eine unendliche Anzahl von Variablen, der durch eine Mittelwertfunktion  $\mu(\mathbf{x})$  sowie seine Kovarianzfunktion  $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_*)$  vollständig beschrieben ist. Mithilfe eines GP lässt sich eine Verteilung über Funktionen formulieren: [Gar-2018a]

$$f(\mathbf{x}) \sim \mathcal{GP}(\mu(\mathbf{x}), k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_*)) \quad (3-10)$$

Nach Definition sind die Funktionswerte eines GP an einer beliebigen endlichen Menge von Eingangsgrößen  $[\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n]$  Teil einer mehrdimensionalen Gaußverteilung: [Wil-2015]

$$\mathbf{f} = [f(\mathbf{x}_1), \dots, f(\mathbf{x}_n)] \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_X, \mathbf{K}_{XX}) \quad (3-11)$$

wobei  $\boldsymbol{\mu}_X = [\mu(\mathbf{x}_1), \dots, \mu(\mathbf{x}_n)]$  und  $\mathbf{K}_{XX} = [k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)]_{i,j=1}^n$  gilt.

Ausgehend von  $n$  Trainingsdaten mit den Werten für die unabhängigen Variablen  $X = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n]$  und den korrespondierenden Labels  $\mathbf{y} = [y(\mathbf{x}_1), \dots, y(\mathbf{x}_n)]$  sowie  $n_*$  Vorhersagedaten mit  $X_* = [\mathbf{x}_{*,1}, \dots, \mathbf{x}_{*,n_*}]$  lassen sich für die Vorhersagen eine Gaußverteilung  $\mathbf{f}_*$  mit dem Mittelwertvektor  $\bar{\mathbf{f}}_*$  sowie der Kovarianzmatrix  $\text{cov}(\mathbf{f}_*)$  berechnen: [Wil-2015, Ras-2008]

$$\bar{\mathbf{f}}_* = \boldsymbol{\mu}_{X_*} + \mathbf{K}_{X_*,X} [\mathbf{K}_{X,X} + \sigma_n^2 \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{y} \quad (3-12)$$

$$\text{cov}(\mathbf{f}_*) = \mathbf{K}_{X_*,X_*} - \mathbf{K}_{X_*,X} [\mathbf{K}_{X,X} + \sigma_n^2 \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{K}_{X,X_*} \quad (3-13)$$

mit

$\mathbf{I}$ : Identitätsmatrix

$\sigma_n^2$ : Gauß-sches Rauschen

$\mathbf{K}_{X,X_*}$ :  $n \times n_*$  Kovarianzmatrix zwischen den Punkten  $X$  und  $X_*$ .

Abbildung 3-4 zeigt exemplarisch die Vorhersagen eines GP mit einer eindimensionalen unabhängigen Variable. Die roten Punkte repräsentieren die Trainingsdaten. Die schwarze Linie verbindet die Vorhersagen  $\bar{\mathbf{f}}_*$ . Der graue Bereich zeigt die Konfidenzintervalle der Vorhersagen, die sich aus  $\text{cov}(\mathbf{f}_*)$  berechnen lassen. Die Abbildung zeigt, dass Vorhersagen, die nahe an bekannten Trainingsdaten liegen, ein kleineres Konfidenzintervall aufweisen.

### Mittelwert- und Kovarianzfunktion

Der Auswahl einer geeigneten Mittelwert- und Kovarianzfunktion kommt bei der GP-Modellierung eine besonders große Bedeutung zu. Eine sehr häufig genutzte Mittelwertfunktion ist die *zero-mean*-Funktion  $\mu(\mathbf{x}) = 0$ , welche ein Spezialfall der konstanten Mittelwertfunktion ist. Die zero-mean-Funktion zeigt in der Praxis häufig gute Ergebnisse. [Ras-2008, Sie-2017]

Zur Berechnung der Kovarianzmatrix  $\mathbf{K}$  stehen eine Reihe möglicher Kovarianzfunktionen zur Verfügung. Die am häufigsten verwendete Funktion ist die *Radial Basis Function* (RBF). Diese ist zwischen zwei Vektoren  $\mathbf{x}$  und  $\mathbf{x}'$  der Länge  $D$  definiert als: [Ras-2008]

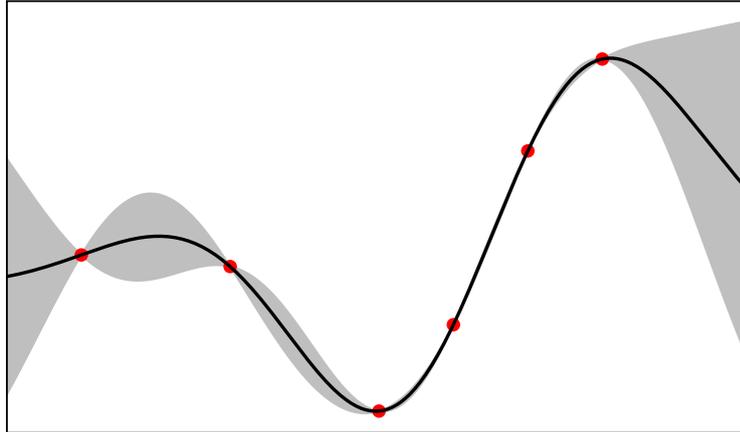


Abbildung 3-4: Beispielhafter GP. Rote Punkte: Trainingsdaten. Schwarze Linie: Mittelwert der Vorhersagen. Grauer Bereich: Konfidenzintervall der Vorhersagen.

$$k_{RBF}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \prod_{i=1}^D \sigma_{s,i} \cdot \exp\left(-\frac{1}{l_{s,i}}(x_i - x'_i)^2\right) \quad (3-14)$$

mit

$\sigma_s$ : Scale

$l_s$ : Lengthscale

Die RBF ist ein Spezialfall der Matérn-Funktion. Eine weitere Variante dieser ist die Matérn-5/2-Funktion: [Ras-2008]

$$k_{Mat-5/2} = \prod_{i=1}^D \sigma_{s,i} \left(1 + \frac{\sqrt{5}(x_i - x'_i)^2}{l_{s,i}} + \frac{5(x_i - x'_i)^4}{3l_{s,i}^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\sqrt{5}(x_i - x'_i)^2}{l_{s,i}}\right) \quad (3-15)$$

Die beiden Parameter  $\sigma_s$  und  $l_s$  werden im Parametervektor  $\boldsymbol{\theta}$  zusammengefasst und lassen sich mithilfe des in 3.3.2 beschriebenen Prozesses optimieren. Die zu optimierende Funktion von GP, welche dafür benötigt wird, ist die *marginal log likelihood* (mll): [Gar-2018a]

$$\log p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta}) = -\frac{1}{2}\mathbf{y}^\top [\mathbf{K}_{X,X} + \sigma_n^2 \mathbf{I}] \mathbf{y} - \frac{1}{2} \log |\mathbf{K}_{X,X} + \sigma_n^2 \mathbf{I}| \quad (3-16)$$

Diese hängt ausschließlich von den Parametern  $\boldsymbol{\theta}$  ab. Ziel beim Training von GP ist die Maximierung von  $\log p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta})$ . Bei der Anwendung des in 3.3.2 beschriebenen Verfahrens ist die Verlustfunktion daher  $-\log p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta})$ .

## 4 Simulationsmodell

---

Dieses Kapitel stellt das im Rahmen des Forschungsprojektes eingesetzte Simulationsmodell, welches in [Lai-2021a] erstellt wurde, vor. Zunächst wird eine Übersicht über die definierten Eingangsgrößen des Simulationsmodells gegeben. Diese hatten einen zu erwartenden Einfluss auf die beiden Zielgrößen  $k_c$  und  $i_{tot}$ . Die Eingangsgrößen und deren Werteintervalle wurden in Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses definiert. Darüber hinaus werden einige Annahmen, welche der Simulation zugrunde liegen, definiert. Anschließend erfolgt eine Vorstellung der einzelnen Phasen des Modells.

### 4.1 Eingangsgrößen und Simulationsannahmen

#### 4.1.1 Eingangsgrößen

Gemeinsam mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurden die Eingangsgrößen des Simulationsmodells definiert. Bei diesen war ein Einfluss auf eine der beiden Zielgrößen,  $k_c$  und  $i_{tot}$ , oder auf beide zu erwarten. Zudem wurden realistische Werteintervalle festgelegt. Diese unterscheiden sich für RBG mit einem Mast (1-Mast RBG) und RBG mit zwei Masten (2-Mast RBG) ein wenig. Die Eingangsgrößen unterteilen sich in drei Gruppen: konstruktive Eigenschaften der Hauptbaugruppen des RBG (vgl. Abbildung 2-1), Bewegungsparameter sowie Lagerparameter. Die Tabellen 4-1 bis 4-4 zeigen die definierten Eingangsgrößen sowie die Werteintervalle.

Die Fahrtrichtung ist lediglich eine für 1-Mast RBG relevante Eingangsgröße (vgl. Abbildung 4-1). Diese definiert die Position des Hubwagens relativ zum Mast, dem Regal und dem E/A-Punkt. Im Fall der Fahrtrichtung rechts ist der Hubwagen dem Regal zugewandt, im Fall der Fahrtrichtung links dem E/A-Punkt. Dies hat ebenfalls Auswirkungen darauf, welches Rad in der Simulation als Vorder- bzw. als Hinterrad deklariert ist.

#### 4.1.2 Simulationsannahmen

Dem Simulationsmodell liegen eine Reihe von Annahmen zugrunde. Die Phase 1 des Modells, die Auftragslistenerzeugung, simuliert eine chaotische Lagerhaltung. Dies bedeutet, dass alle Lagerfächer bei einer Ein- oder Auslagerung mit der gleichen Wahrscheinlichkeit ausgewählt werden. Eine Zonierung des Lagers mit unterschiedlichen Zugriffshäufigkeiten findet nicht statt. Diese Annahme leitet sich aus dem Sachverhalt ab, dass die Belegungsstrategie zum Zeitpunkt der RBG-Auslegung in der Regel nicht bekannt ist. Des Weiteren

Tabelle 4-1: Konstruktive Eigenschaften 1

Parameter	Symbol	Einheit	[Von; Bis] 1-Mast	[Von; Bis] 2-Mast
RBG- und Lagerhöhe	$h_{SC}$	[m]	[8; 45]	[8; 45]
Gesamt-RBG: Schwerpunkt in y-Richtung (ohne Hubwagen)	$cg_{SC,y}$	[%]	[25; 50]	[25; 50]
Mast: Masse pro Höhe	$m_{M,h}$	$[\frac{kg}{m}]$	[150; 350]	[75; 500]
Mast: Schwerpunkt in x-Richtung	$cg_{M,x}$	[%]	[20; 50]	[25; 75]
Mast: Zusatzmassen	$m_{M,a}$	[kg]	[200; 2000]	[1500; 8000]
Mast: Länge	$l_M$	[m]	[0,8; 1,2]	[0,5; 1]
Mast: Breite	$b_M$	[m]	[0,2; 0,5]	[0,2; 0,5]
Wandstärke 1 eines RBG-Mast	$t_1$	[mm]	[1; 3]	[1; 3]
Wandstärke 2 eines RBG-Mast	$t_2$	[mm]	[0,5; 2]	[0,5; 2]
Mast: Abstand (nur 2-Mast)	$dist_M$	[m]	-	[1; 3]

ist der Ein- und Auslagerpunkt während der Simulation stets in der linken (1-Mast Bewegungsrichtung rechts und 2-Mast) bzw. rechten (1-Mast Bewegungsrichtung links) unteren Ecke des Lagers. Dies ist der häufigste Fall für den Ein- und Auslagerpunkt. Die Fachbreite des Lagers beträgt 1,1 m, was laut den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses eine realistische Annahme ist.

Bei der Berechnung der Kräfte in Phase 3 des Modells wird stets davon ausgegangen, dass der Hubwagen bei jeder Bewegung mit seiner durchschnittlichen Zuladung beladen ist. Diese Annahme wurde wiederum in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss festgelegt und als zulässig erachtet, da die Hubmasse nur einen kleinen Teil der Gesamtmasse des RBG ausmacht.

## 4.2 Erzeugung Auftragslisten

Die im Rahmen des Forschungsprojekts eingesetzte Simulation zur Erzeugung der Auftragslisten wurde bereits in [Rüc-2020] vorgestellt. Die Erzeugung der Auftragslisten basiert ausschließlich auf den Lagerparametern (vgl. Tabelle 4-4). Ausgangspunkt für die Simulation sind zwei Regalwände, deren Lagerpositionen sich aus der Lagerlänge sowie -höhe und der Fachlänge und -höhe bestimmen. Die Kapazität des Lagers hängt zudem von der Lagertiefe ab.

Tabelle 4-2: Konstruktive Eigenschaften 2

Parameter	Symbol	Einheit	[Von; Bis] 1-Mast	[Von; Bis] 2-Mast
Radstand / Traverse: Länge	$l_T$	[m]	[2,5; 8]	[3; 11]
Traverse: Masse pro Länge	$m_{T,l}$	$[\frac{\text{kg}}{\text{m}}]$	[150; 450]	[150; 550]
Traverse: Zusatzmasse	$m_{T,a}$	[kg]	[200; 2000]	[200; 3000]
Traverse: Schwerpunkt in x-Richtung	$cg_{T,x}$	[%]	[30; 50]	[30; 70]
Hubwagen: Leermasse	$m_L$	[kg]	[850; 3000]	[850; 3000]
Zuladung: durchschnittliche Masse	$m_{LD}$	[kg]	[150; 1500]	[300; 3000]
Hubwagen: Schwerpunkt in x-Richtung (1-Mast: Abstand zu $cg_{M,x}$ ; 2-Mast: % d. Radstands)	$cg_{L,x}$	[%; m]	[1,1; 3,2]	[40; 60]
Hubwagen: Schwerpunkt in y-Richtung (tiefste Position)	$cg_{L,y}$	[m]	[0,8; 1,8]	[0,8; 1,8]
Bewegungsrichtung des RBG relativ zum Regal und zum E/A-Punkt	$md_{SC}$	[-]	[links, rechts]	-
Raddurchmesser	$D_W$	[mm]	[200; 800]	[200; 800]
Rad: Masse	$m_W$	[kg]	[100; 800]	[100; 800]

#### 4.2.1 Erzeugung der Startbelegung

Zu Beginn der Belegungserzeugung ist das Regal vollständig gefüllt. Anschließend wird das Regal so lange geleert, bis der gewünschte Lagerfüllgrad erreicht ist. Die Auswahl der Lagerfächer erfolgt dabei zufällig. Ergebnis dieser Simulationsphase ist eine Liste, welche die freien und belegten Lagerplätze enthält.

#### 4.2.2 Erzeugung der Zyklen

Nach der Erzeugung der Startbelegung erfolgt die Erzeugung der Zyklen über eine Schleife. Zu Beginn jedes Zyklus werden in Abhängigkeit der Lagerbetriebsstrategie die Anzahl der anzufahrenden Lagerpositionen bestimmt. Die Anzahl der einzulagernden Einheiten wird über einen gleichverteilten, diskreten Zufallsgenerator bestimmt. Der Auswahlbereich liegt zwischen eins und einer Maximalzahl an einzulagernden Ladungseinheiten (LE). Die Maximalzahl der einzulagernden LE ist durch die Kapazität des LAM, die Lagerbetriebsstrategie und der Anzahl der freien Positionen begrenzt. Basierend auf diesen Werten werden die Positionen zur Einlagerung bestimmt.

Tabelle 4-3: *Bewegungsparameter*

Parameter	Symbol	Einheit	[Von; Bis]
Maximale Geschwindigkeit in x-Richtung	$v_{max,x}$	$[\frac{m}{s}]$	[1; 5]
Maximale Geschwindigkeit in y-Richtung	$v_{max,y}$	$[\frac{m}{s}]$	[0,5; 2]
Maximale Beschleunigung in x-Richtung	$a_{max,x}$	$[\frac{m}{s^2}]$	[0,5; 2]
Maximale Beschleunigung in y-Richtung	$a_{max,y}$	$[\frac{m}{s^2}]$	[0,5; 2]
Verschleißzeit in x-Richtung	$t_{slip,x}$	[s]	[0,25; 2]
Verschleißzeit in y-Richtung	$t_{slip,y}$	[s]	[0,25; 1]

Tabelle 4-4: *Lagerparameter*

Parameter	Symbol	Einheit	[Von; Bis]
Lagerlänge	$l_R$	[m]	[30; 150]
Fachhöhe	$h_{CELL}$	[m]	[0,5; 3]
Hubwagen: Kapazität	$cap_L$	[1]	[1; 4]
Lagertiefe	$d_R$	[–]	[1; 4]
Lagerfüllgrad	$so_R$	[%]	[50; 90]
Lagerbetriebsstrategie	$cm$	[–]	[Einzel, Doppel, Vierfach]

Die Bestimmung der Auslagerungspositionen erfolgt analog zur Einlagerung. Bei der Bestimmung der Anzahl der auszulagernden LE ist die Maximalzahl durch die Kapazität des LAM und die Anzahl der belegten Positionen begrenzt. Jeder Zyklus endet mit einer Rückfahrt zum Ein- und Auslagerpunkt.

Ergebnis dieses Teils der Simulation sind die Positionen, die das RBG abfährt. Für den Fall, dass die Bewegungsrichtung eines 1-Mast RBG den Wert *links* hat, erhalten die Positionen in x-Richtung ein negatives Vorzeichen, da sich das RBG gemäß dem definierten Koordinatensystem in negative Richtung bewegt (vgl. Abbildung 4-1).

### 4.3 Bewegungssteuerung

Nach der Erzeugung der Auftragslisten erfolgt die Simulation der Bewegungssteuerung. Ziel ist hierbei die Berechnung der Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Positionsverläufe in x- und y-Richtung. Die Bewegungssteuerung ergibt sich aus drei Parametern: der Verschleißzeit  $t_{slip}$ , der maximalen Beschleunigung  $a_{max}$  sowie der maximalen Geschwindigkeit  $v_{max}$ . Zunächst wird aus der maximalen Beschleunigung und der Verschleißzeit der Ruck  $j$  folgendermaßen berechnet:

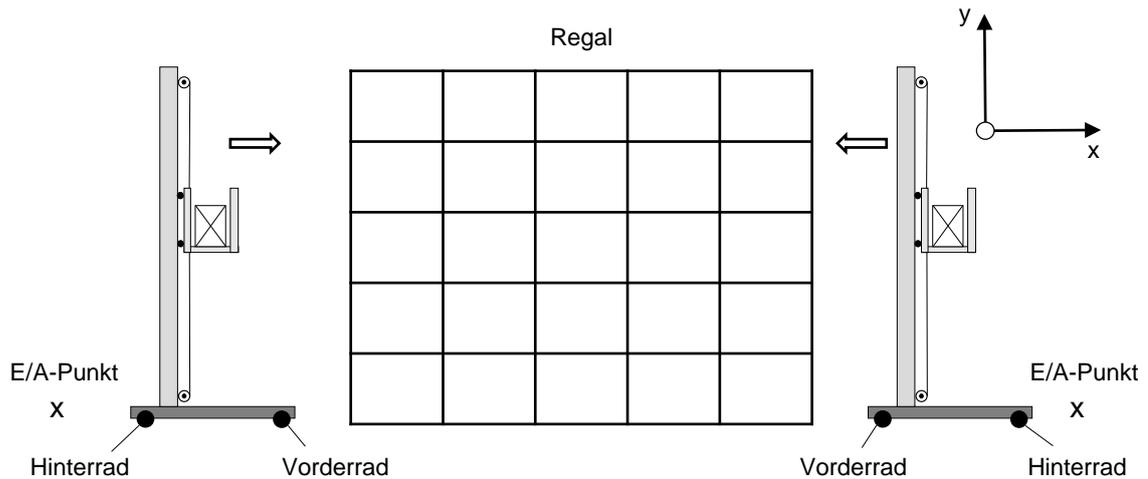


Abbildung 4-1: Bewegungsrichtung des 1-Mast RBG. Links: Bewegungsrichtung rechts. Rechts: Bewegungsrichtung links.

$$j = \frac{a_{max}}{t_{slip}} \quad (4-1)$$

Anschließend werden durch dreimaliges Integrieren des Rucks der Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Positionsverlauf berechnet. Dazu wird die Bewegung in sieben Phasen unterteilt. Diese Phasen sind in Abbildung 4-2 dargestellt. In Phase 1 wird der Ruck auf seinen positiven Nennwert gesetzt. Die Dauer dieser Phase ist die Verschleißzeit. Am Ende von Phase 1 ist die maximale Beschleunigung erreicht. Anschließend beträgt der Ruck in Phase 2  $j = 0$ . Die Beschleunigung ist nun konstant. In Phase 3 wird der Ruck auf seinen negativen Nennwert gesetzt bis die Beschleunigung wieder  $a = 0$  beträgt. Phase 4 ist durch eine konstante Geschwindigkeit  $v = v_{max}$  geprägt. Anschließend beginnt der Bremsvorgang. Zunächst wird in Phase 5 wiederum der Ruck für die Dauer der Verschleißzeit auf seinen negativen Nennwert gesetzt. In Phase 6 tritt die maximale Verzögerung auf. In Phase 7 wird der Ruck auf seinen positiven Nennwert gesetzt. Am Ende von Phase 7 nehmen Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit den Wert 0 an.

Zur Ausführung der korrekten Bewegung müssen die Zeitintervalle dieser sieben Phasen aus der Verschleißzeit der maximalen Beschleunigung und Geschwindigkeit sowie der zurückzulegenden Distanz  $x_{ges}$  berechnet werden. Das Beschleunigen und Bremsen erfolgt symmetrisch. Daher gilt:

$$t_1 = t_3 = t_5 = t_7 \quad (4-2)$$

$$t_2 = t_6 \quad (4-3)$$

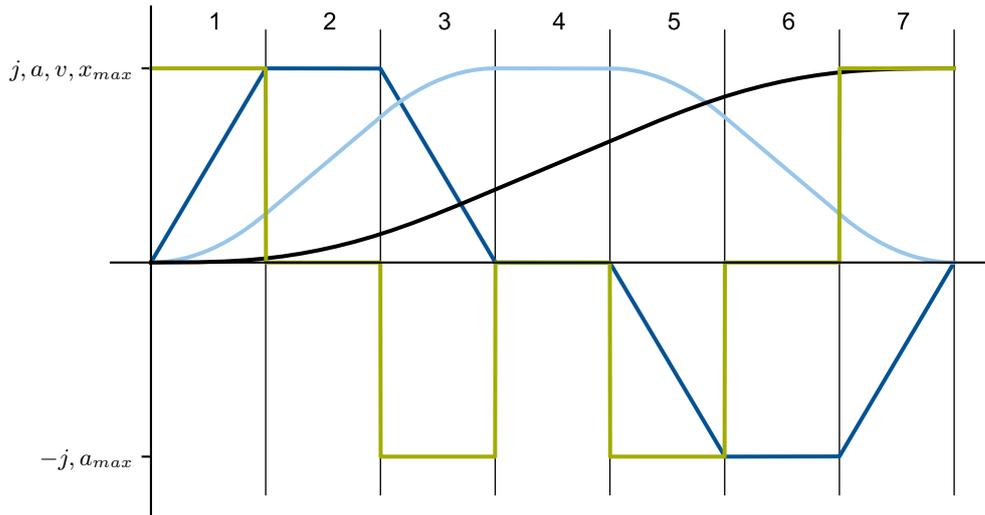


Abbildung 4-2: Simulation der Bewegungsverläufe: Ruck (grün), Beschleunigung (dunkelblau), Geschwindigkeit (hellblau), Position (schwarz)

Für die erste, dritte, fünfte und siebte Phase gilt:

$$t_1 = t_{slip} \quad (4-4)$$

Bei der Berechnung von  $t_2$  und  $t_4$  wird zwischen zwei Fällen unterschieden, der Trapez- und der Spitzfahrt.

### 4.3.1 Trapezfahrt

Bei der Trapezfahrt ist die Länge der Strecke ausreichend zur Erreichung der maximalen Geschwindigkeit  $v_{max}$ . Die Dauer der zweiten und sechsten Phase  $t_2$  beträgt in diesem Fall:

$$t_2 = \frac{v_{max} - a_{max} \cdot t_1}{a_{max}} \quad (4-5)$$

Die Dauer der vierten Phase lässt sich aus der dabei zurückgelegten Strecke  $x_4$  sowie der maximalen Geschwindigkeit  $v_{max}$  berechnen:

$$t_4 = \frac{x_4}{v_{max}} \quad (4-6)$$

Die zurückgelegte Strecke  $x_4$  lässt sich wiederum aus der Gesamtstrecke  $x_{ges}$  sowie den bei den Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen zurückgelegten Strecken  $x_1, x_2, x_3$  berechnen:

$$x_4 = x_{ges} - 2 \cdot (x_1 + x_2 + x_3) \quad (4-7)$$

Die Strecken  $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$  lassen sich mithilfe der bereits berechneten Zeiten  $t_1$  und  $t_2$  berechnen:

$$x_1 = \frac{1}{6} \cdot j \cdot t_1^3 \quad (4-8)$$

$$x_2 = \frac{1}{2} \cdot j \cdot t_1^2 \cdot t_2 + \frac{1}{2} \cdot a_{max} \cdot t_2^2 \quad (4-9)$$

$$x_3 = \left( \frac{1}{2} \cdot j \cdot t_1^2 + a_{max} \cdot t_2 \right) t_1 + \frac{1}{2} \cdot a_{max} \cdot t_1^2 - \frac{1}{6} \cdot j \cdot t_1^3 \quad (4-10)$$

Diese drei Strecken sind im Fall der Trapezfahrt unabhängig von  $x_{ges}$ . Daher wird ihre Summe fortan als  $x_{1-3,Trapez} = x_1 + x_2 + x_3$  bezeichnet.

### 4.3.2 Spitzfahrt

Bei der Spitzfahrt ist die Strecke zu kurz, um die maximale Geschwindigkeit  $v_{max}$  zu erreichen. Dies bedeutet, dass es keine Phase mit konstanter Geschwindigkeit gibt. Daher gelten folgende Bedingungen:

$$t_4 = 0 \quad (4-11)$$

$$x_4 = 0 \quad (4-12)$$

Aus diesen Bedingungen folgt:

$$\frac{x_{ges}}{2} = x_1 + x_2 + x_3 \quad (4-13)$$

Im Fall der Spitzfahrt muss  $t_2$  so angepasst werden, dass die erforderliche maximale Geschwindigkeit erreicht wird. Durch Einsetzen der Formeln 4-8 bis 4-10 in 4-13 ergibt sich durch das Lösen einer quadratischen Gleichung für  $t_2$ :

$$t_2 = -\frac{3}{2} \frac{a_{max}}{j} + \sqrt{\left( \frac{3}{2} \frac{a_{max}}{j} \right)^2 - \left( 2 \left( \frac{a_{max}}{j} \right)^2 - \frac{x_{ges}}{a_{max}} \right)^2} \quad (4-14)$$

Damit sind die Bewegungsverläufe sowohl für die Trapez- als auch die Spitzfahrt bestimmt. Die Bewegungssteuerung wurde im Forschungsprojekt mithilfe von MATLAB umgesetzt. Dabei wird bei jeder Bewegung zunächst geprüft, ob es sich um eine Trapez- oder Spitzfahrt handelt. Es handelt sich um eine Trapezfahrt, wenn gilt:

$$x_{1-3, \text{Trapez}} \geq \frac{x_{\text{ges}}}{2} \quad (4-15)$$

Ergebnis dieses Teils der Simulation sind:

- $x_x(t)$ : Positionsverlauf des RBG in x-Richtung
- $v_x(t)$ : Geschwindigkeitsverlauf des RBG in x-Richtung
- $a_x(t)$ : Beschleunigungsverlauf des RBG in x-Richtung
- $x_y(t)$ : Positionsverlauf des Hubwagens in y-Richtung
- $v_y(t)$ : Geschwindigkeitsverlauf des Hubwagens in y-Richtung
- $a_y(t)$ : Beschleunigungsverlauf des Hubwagens in y-Richtung

Diese Art der Bewegungssteuerung, bei welcher der Anfahr- und Bremsvorgang symmetrisch abläuft und bei jeder Fahrt möglichst schnell die maximalen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten erreicht werden, stellt eine Annahme dar. In der Realität existiert keine einheitliche Steuerung bzw. Regelung der Bewegungen. Die hier getroffene Annahme kommt der Realität nach Aussagen von Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses allerdings sehr nahe. Darüber hinaus treten bei der hier simulierten Steuerung stets die maximal erreichbaren Beschleunigungen auf. Somit bildet das Modell ein Worst-Case-Szenario bei der Berechnung der Radkräfte und somit auch bei der Berechnung von  $k_c$  ab.

### 4.3.3 Zeitschritt

Bei der Durchführung der Bewegungssteuerung muss ein Zeitschritt  $\Delta t$  festgelegt werden. Ein möglichst großer Zeitschritt minimiert hierbei die Simulationsdauer. Allerdings sinkt bei steigendem Zeitschritt die Genauigkeit der Simulation. Daher wird zur Festlegung des Zeitschritts eine Testsimulation durchgeführt. Die Simulation besteht aus fünf Lagerpositionen, die im Einzelspiel angefahren werden. Die anzufahrenden Lagerpositionen sind in Tabelle 4-5 dargestellt. Da die Simulation in x- und y-Richtung identisch sind, wird der Test lediglich in die x-Richtung durchgeführt.

Die Beschleunigung und Geschwindigkeit werden auf ihre Maximalwerte gesetzt. Diese sind in Tabelle 4-6 zusammengefasst.

Die Simulation wird mit zwei Zeitschritten,  $\Delta t = 0,01$  s und  $\Delta t = 0,001$  s, getestet. Auswertgröße ist hierbei die Abweichung der Ist- von der Sollposition am Ende der Simulation. Die Ergebnisse des Versuchs sind in Tabelle 4-7 zusammengefasst. Diese zeigen, dass bei

Tabelle 4-5: Versuch Zeitschritt: angefahrne Positionen in x-Richtung

Position [m]
116
0
112
0
208
0
114
0
74
0

Tabelle 4-6: Versuch Zeitschritt: Werte der relevanten Eingangsgrößen

Parameter	Einheit	Wert
$v_{max,x}$	$[\frac{m}{s}]$	5
$v_{max,y}$	$[\frac{m}{s}]$	2
$a_{max,x}$	$[\frac{m}{s^2}]$	3
$a_{max,y}$	$[\frac{m}{s^2}]$	2
$t_{slip,x}$	[s]	1
$t_{slip,y}$	[s]	1

beiden Zeitschritten die Abweichung der Ist- von der Sollposition verschwindend gering ist. Bei einer zurückgelegten Gesamtdistanz von 1.248 m liegen die Abweichungen am Simulationseende im Bereich von  $10^{-6}$  m bzw.  $10^{-7}$  m. Die Rechendauer bei einem Zeitschritt von 0,001 s beträgt dabei mehr als das Zehnfache der Dauer bei einem Zeitschritt von 0,01 s. Daher wurde der Zeitschritt für alle weiteren Simulationen auf  $\Delta t = 0,01$  festgelegt.

Tabelle 4-7: Versuch Zeitschritt Ergebnis

Zeitschritt [s]	Abweichung [m]	Simulationsdauer [ms]
0,01	0,000000214	14
0,001	0,0000161	207

## 4.4 Berechnung der Radkräfte und des Kontaktkraftkollektivbeiwerts

Nach der Bestimmung der Bewegungsverläufe sind alle Daten zur Berechnung der Radkräfte bekannt. Für die Erstellung des Modells zur Berechnung der Radkräfte sind zwei Anforderungen gegeneinander abzuwägen. Zum einen soll das Modell möglichst realitätsgetreu sein. Dies bedeutet insbesondere, dass die auftretenden Kräfte infolge der Mastschwingungen zu berücksichtigen sind. Die MKS-Umgebung SIMPACK erlaubt hierzu die Modellierung des Masts / der Maste mithilfe von elastischen Balkenelementen.

Auf der anderen Seite ist eine möglichst kurze Simulationsdauer anzustreben, da das Modell zur Berechnung einer Vielzahl von Konfigurationen genutzt werden soll. Bei zu langen Simulationsdauern ist die erforderliche Anzahl von Simulationen nicht realistisch durchzuführen. Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Simulationsdauer ist die Verwendung eines Starrkörpermodells.

Aufgrund dieses Zielkonflikts wurden im Rahmen des Forschungsprojekts zwei Modelle zur Berechnung der Radkräfte entwickelt. Zur Berücksichtigung von Kräften infolge von Mastschwingungen wurde ein MKS-Modell mit elastischem Mast in der Umgebung SIMPACK umgesetzt. Des Weiteren wurde ein Starrkörpermodell mithilfe von MATLAB umgesetzt. Im Folgenden werden zunächst diese beiden Modelle vorgestellt. Anschließend erfolgt ein Überblick über die Berechnung von  $k_c$  aus den Simulationsergebnissen. Der Abschnitt schließt mit einem Vergleich der beiden Modelle hinsichtlich der Zielgröße  $k_c$ .

### 4.4.1 Starrkörpermodell

Das Starrkörpermodell basiert auf einem starrkörperkinetischen Ansatz. Zunächst wird aus den Massen und Abmessungen der Hauptbaugruppen deren Gesamtmasse sowie der Abstand ihres Schwerpunkts zum Hinterrad nach Tabelle 4-8 berechnet. Da der Hubwagen sich während der Simulation bewegt, wird dieser hier nicht berücksichtigt. Anschließend wird der jeweils statische Anteil der Kontaktkräfte am Vorderrad  $F_{W,f,stat}$  und Hinterrad  $F_{W,r,stat}$  unter Berücksichtigung der Gravitationsbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  berechnet:

$$F_{W,f,stat} = \frac{g}{l_T} \cdot [dist_{M,x} \cdot m_M + dist_{T,x} \cdot m_T + dist_{L,x}(m_L + m_{LD})] \quad (4-16)$$

Tabelle 4-8: Berechnung der Gesamtmassen und Schwerpunkte der Hauptbaugruppen

Parameter	Symbol	Berechnung 1-Mast	Berechnung 2-Mast
Mast: Masse insgesamt	$m_M$	$m_{M,h} \cdot h_{SC} + m_{M,a}$	$2 \cdot (m_{M,h} \cdot h_{SC} + m_{M,a})$
Traverse: Masse insgesamt	$m_T$	$m_{T,l} \cdot l_T + m_{T,a}$	siehe 1-Mast
Mast: Abstand des Schwerpunkts zum Hinterrad in x-Richtung	$dist_{M,x}$	$l_T \cdot cg_{M,x}$	siehe 1-Mast
Traverse: Abstand des Schwerpunkts zum Hinterrad in x-Richtung	$dist_{T,x}$	$l_T \cdot cg_{T,x}$	siehe 1-Mast
Hubwagen: Abstand des Schwerpunkts zum Hinterrad in x-Richtung	$dist_{L,x}$	$dist_{M,x} + cg_{L,x}$	$l_T \cdot cg_{L,x}$
Gesamt-RBG: Abstand des Schwerpunkts zum Hinterrad in y-Richtung (ohne Hubwagen)	$dist_{SC,y}$	$h_{SC} \cdot cg_{SC,y}$	siehe 1-Mast

$$F_{W,r,stat} = \frac{g}{l_T} \cdot [(l_T - dist_{M,x})m_M + (l_T - dist_{T,x})m_T + (l_T - dist_{L,x})(m_L + m_{LD})] \quad (4-17)$$

Die dynamischen Anteile  $F_{W,f,dyn}$  und  $F_{W,r,dyn}$  berechnen sich wie folgt:

$$F_{W,f,dyn}(t) = \frac{1}{l_T} \cdot [dist_{SC,y} \cdot (m_M + m_T) \cdot a_x(t) + (x_y(t) + cg_{L,y}) \cdot (m_L + m_{LD}) \cdot a_x(t) + dist_{L,x} \cdot (m_L + m_{LD}) \cdot a_y(t)] \quad (4-18)$$

$$F_{W,r,dyn}(t) = \frac{1}{l_T} \cdot [dist_{SC,y} \cdot (m_M + m_T) \cdot a_x(t) + (x_y(t) + cg_{L,y}) \cdot (m_L + m_{LD}) \cdot a_x(t) + (l_T - dist_{L,x}) \cdot (m_L + m_{LD}) \cdot a_y(t)] \quad (4-19)$$

Da die auftretenden Beschleunigungen in x- und y-Richtung,  $a_x(t)$  und  $a_y(t)$  sowie die Position des Hubwagens  $x_y(t)$  zeitabhängig sind, sind die dynamischen Anteile der Kontaktkräfte ebenfalls zeitabhängig. Abschließend ergeben sich die Gesamtkontaktkräfte an den beiden Rädern  $F_{W,f}$  und  $F_{W,r}$  aus den statischen und dynamischen Anteilen:

$$F_{W,f}(t) = F_{W,f,stat} + F_{W,f,dyn}(t) \quad (4-20)$$

$$F_{W,r}(t) = F_{W,r,stat} + F_{W,r,dyn}(t) \quad (4-21)$$

Ergebnis dieses Teils der Simulation sind die Kraftverläufe am Vorder- und Hinterrad,  $F_{W,f}(t)$  und  $F_{W,r}(t)$ .

#### 4.4.2 Elastisches Modell

Das elastische Modell wurde in der MKS-Umgebung SIMPACK umgesetzt. Das Modell besteht aus fünf bzw. sechs Körpern:

- Zwei Rad-Schiene-Kontakte
- Traverse (inkl. Zusatzmassen)
- Mast bzw. zwei Maste
- Mast Zusatzmassen
- Hubwagen

Die Massen der Räder, der Traverse und des Hubwagens werden aus den Eingangsgrößen aus Abschnitt 4.1 berechnet. Zudem lässt sich der Schwerpunkt der Traverse und des Hubwagens in x-Richtung direkt aus den Eingangsgrößen berechnen. Der Mast bzw. die Maste werden so auf der Traverse positioniert, dass der definierte Schwerpunkt in x-Richtung erreicht wird.

Da der Mast elastisch modelliert wird, lässt sich sein Schwerpunkt in y-Richtung nicht direkt vorgeben. Da der Mast mit gleichmäßigem Querschnitt modelliert wird, liegt sein Schwerpunkt stets auf seiner halben Höhe. Daher wird der Schwerpunkt der Traverse in y-Richtung, der Schwerpunkt der Zusatzmassen des Masts und der Schwerpunkt der Räder in y-Richtung so angepasst, dass der definierte Gesamtschwerpunkt des RBG in y-Richtung erreicht wird.

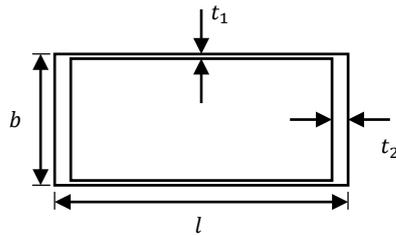


Abbildung 4-3: Querschnitt eines RBG-Masts definiert durch die Länge ( $l$ ), die Breite ( $b$ ) sowie die beiden Wandstärken  $t_1$  und  $t_2$

### Modellierung des Masts

Der Mast bzw. die Masten wurden mithilfe von Balkenelementen modelliert. Die einzelnen Elemente sind dabei Euler-Bernoulli-Balken. Das Schwingverhalten eines einzelnen Masts definiert sich daher über vier Parameter:

- Anzahl Balkenelemente
- Querschnitt
- E-Modul des verwendeten Materials
- Dichte des verwendeten Materials

Um eine möglichst hohe Realitätstreue zu erreichen, besteht ein einzelner Mast aus 20 Balkenelementen. Da RBG-Maste in der Regel aus Stahl sind, beträgt der E-Modul  $E = 210.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ .

Der Querschnitt von RBG Masten ist in der Regel ein Vierkantrohr. Dieses ist definiert durch seine Länge, seine Breite und seine beiden Wandstärken  $t_1$  und  $t_2$  (siehe Abbildung 4-3). Damit erhält das Modell bei elastischer Modellierung der Masten vier zusätzliche variable Parameter. Die Dichte des Materials wird so gewählt, dass bei gegebenem Querschnitt die definierte Masse pro Höhe erreicht wird.

### Modellierung der Rad-Schiene-Kontakte

Das Modell nutzt zur Modellierung der beiden Rad-Schiene-Kontakte das Rad-Schiene-Modul von SIMPACK. Als Rad- und Schienenprofil werden die Standardprofile aus SIMPACK genutzt. Diese sind zwar für die Simulation von Eisenbahnen konzipiert, beim vorliegenden Modell liegt der Fokus allerdings auf den Normalkräften des Kontakts, für welche das Profil keine Rolle spielt. Daher ist die Verwendung dieser Profile ausreichend. Die Normalkräfte werden nach der Hertz'schen Kontakttheorie berechnet.

## Verbindungselemente

Die Verbindungselemente zwischen den einzelnen Körpern definieren deren Freiheitsgrade zueinander. Tabelle 4-9 zeigt die einzelnen Verbindungen sowie deren translatorische und rotatorische Freiheitsgrade. Der Boden bzw. das Koordinatensystem, zu welchem sich die Körper relativ bewegen, wird hierbei gemäß den Konventionen von SIMPACK als Isys bezeichnet.

Tabelle 4-9: Verbindungselemente in der MKS

Von	Zu	Translatorische Freiheitsgrade	Rotatorische Freiheitsgrade
Isys	Vorderrad	x	-
Vorderrad	Traverse	-	-
Traverse	Mast / Maste	-	-
Traverse	Hinterrad	-	-
Mast	Zusatzmassen Mast	-	-
Mast	Hubwagen	y	-
Mast 1	Mast 2	-	-
Mast	Isys	x, y	z

Das Verbindungselement zwischen Mast 1 und Mast 2 beim 2-Mast RBG repräsentiert die Kopftraverse und ist am oberen Ende der beiden Maste definiert. Die Verbindung zwischen dem Mast/den Masten und Isys ist ebenfalls am oberen Ende der Maste definiert. Diese repräsentiert eine obere Führungsschiene, welche ein Schwingen der Maste in z-Richtung, also in laterale Richtung, verhindert.

## Bewegungsvorgabe

Die Bewegungsvorgabe des RBG und des Hubwagens erfolgt an den Verbindungselementen zwischen Isys und Vorderrad sowie zwischen Mast und Hubwagen. Diese erhalten die in der Bewegungssteuerung erzeugten Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Positionsverläufe als Bewegungsanregungen. Als Zeitschritt wird der Zeitschritt der Bewegungssteuerung verwendet. SIMPACK's Co-Simulation ermöglicht die Steuerung der Simulation mithilfe von MATLAB. Ein Simulink-Modell übergibt die Bewegungsverläufe an das MKS-Modell mithilfe von sogenannten u-Inputs.

Mit dem Start der Zeitintegration des Modells werden die beiden Kraftverläufe am Vorder- und Hinterrad,  $F_{W,f}(t)$  und  $F_{W,r}(t)$ , berechnet.

#### 4.4.3 Berechnung des Kontaktkraftkollektivbeiwerts

Der Kontaktkraftkollektivbeiwert  $k_c$  lässt sich mithilfe der simulierten Kraft- (Ergebnis der letzten Phase des Simulationsmodells) und Positionsverläufe (Ergebnis der zweiten Phase des Simulationsmodells) berechnen. Der Positionsverlauf aus Abschnitt 4.3 definiert dabei die Position des Vorderrads. Die Position des Hinterrads ergibt sich aus der Subtraktion des Radstandes von der Position des Vorderrads. Aus dem Positionsverlauf lässt sich zudem die zu jedem Zeitpunkt bereits zurückgelegte Gesamtdistanz  $\Delta x(t)$  berechnen. Die Anzahl der Umdrehungen der Räder lassen sich daher mithilfe des Raddurchmessers  $D_W$  wie folgt berechnen:

$$i_{tot}(t) = \frac{\Delta x(t)}{D_W \cdot \pi} \quad (4-22)$$

Eine Radkraft,  $F_{W,f}(t)$  bzw.  $F_{W,r}(t)$ , wird dann als Bemessungskontaktkraft  $F_{sd,f,i}$  für ein Rad zur Berechnung von  $k_c$  verwendet, wenn gilt:

$$i_{tot}(t) - i_{tot}(t - 1) \geq 1 \quad (4-23)$$

Dies bedeutet, dass zwischen zwei Zeitschritten  $t$  und  $t - 1$  eine vollendete Radumdrehung stattgefunden hat.

Eine Radkraft,  $F_{W,f}(t)$  bzw.  $F_{W,r}(t)$ , wird als Bemessungskontaktkraft  $F_{sd,f,i}$  zur Berechnung von  $k_c$  an einer Schienenstelle  $j$  verwendet, wenn die Position des jeweiligen Rades diese passiert hat.

#### Berechnung des Maximums aller Bemessungskontaktkräfte

Dem Maximum aller Bemessungskontaktkräfte  $F_{sd,f}$  kommt bei der Berechnung von  $k_c$  eine besondere Bedeutung zu. Da diese in jedem Summanden auftaucht (vgl. Gleichung 2-18), hat sie einen großen Einfluss auf  $k_c$ . Eine Umformulierung des Ermüdungsfestigkeitsnachweises zeigt allerdings, dass  $F_{sd,f}$  keine Auswirkungen auf dessen Ergebnis hat. Durch Einsetzen der Definition von  $s_c$  und  $k_c$  und der Verwendung eines alternativen Kontaktkraftkollektivbeiwerts  $k'_c$  lässt sich der Ermüdungsfestigkeitsnachweis folgendermaßen darstellen:

$$k'_c = \frac{1}{i_{tot}} \sum_{i=1}^{i_{tot}} F_{sd,f,i}^{m_{en}} \quad (4-24)$$

$$F_{sd,f} \leq \frac{F_u}{\gamma_{cf} \cdot m_{en} \sqrt{v_c \cdot k'_c}} \cdot F_{sd,f} \cdot f_1 \cdot f_{f3} \cdot f_{f4} \quad (4-25)$$

In Ungleichung 4-24 taucht  $F_{sd,f}$  auf beiden Seiten im Zähler auf, ließe sich somit kürzen und der Ermüdungsfestigkeitsnachweis folgendermaßen formulieren:

$$1 \leq \frac{F_u}{\gamma_{cf} \cdot \sqrt[m_{en}]{v_c \cdot k'_c}} \cdot f_1 \cdot f_{f3} \cdot f_{f4} \quad (4-26)$$

Dies zeigt, dass  $F_{sd,f}$  bei der Durchführung des Ermüdungsfestigkeitsnachweises nicht relevant ist. Daher wird  $F_{sd,f}$  bei sämtlichen Simulationen, auch unter Verwendung des elastischen MKS-Modells, analytisch berechnet. Dabei wird der ungünstigste Lastfall angenommen: Hubwagen an höchster Stelle sowie maximal mögliche Beschleunigungen in x- und y-Richtung. Eine weitere Möglichkeit wäre es, den Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach Ungleichung 4-26 unter Verwendung von  $k'_c$  durchzuführen und auf die Berechnung von  $F_{sd,f}$  zu verzichten. Allerdings hat  $k_c$  die Eigenschaft, dass es stets zwischen 0 und 1 normiert ist und sich somit innerhalb eines festen Intervalls befindet. Diese Eigenschaft wurde als hilfreich bei der Entwicklung eines Vorhersagemodells eingeschätzt. Der alternative Kontaktkraftkollektivbeiwert  $k'_c$  hat diese Eigenschaft nicht. Hier ist das Intervall abhängig von den jeweiligen RBG-Parametern.

Daher wird im weiteren Verlauf  $k_c$  folgendermaßen berechnet (vgl. Gleichung 2-18):

$$k_c = \frac{1}{i_{tot}} \sum_{i=1}^{i_{tot}} \left( \frac{F_{sd,f,i}}{F_{sd,f}} \right)^{m_{en}}$$

Die maximale Bemessungskontaktkraft  $F_{sd,f}$  wird dabei wie oben beschrieben berechnet.

#### 4.4.4 Vergleich der Modellierungsansätze

Dieser Abschnitt stellt den Vergleich der Berechnung der Radkräfte zwischen einem starrkörperkinetischen und einem elastischen Ansatz zur Modellierung des Masts bzw. der Masten vor. Ziel ist es herauszufinden, ob die Mastschwingungen einen relevanten Einfluss auf  $k_c$  haben und ob sich dieser Einfluss vereinfacht abbilden lässt. Da die erwartbaren Schwingungen bei 1-Mast RBG aufgrund des geringeren Flächenträgheitsmoments in Fahrtrichtung im Vergleich zu zwei miteinander verbundenen Masten größer sind, wird der Vergleich anhand eines 1-Mast RBG durchgeführt. Die Konfiguration ist so gewählt, dass die Schwingungen maximal ausfallen. Das heißt, die Massen der Körper nehmen ihre maximal möglichen Werte ein. Zudem ist die gewählte RBG-Höhe maximal. Die Parameter, welche den Querschnitt des Masts bestimmen, werden so gewählt, dass das Flächenträgheitsmoment in x-Richtung minimal und somit die erwartbaren Schwingungen maximal sind. Die Länge

des Masts unterschreitet hierbei die in der Praxis gewählten Längen bei RBG dieser Höhe. Damit werden beim Vergleich der Modellierungsansätze die Mastschwingungen überschätzt. Des Weiteren werden die maximalen möglichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen gewählt. Da bei RBG dieser Höhe die maximale Beschleunigung in x-Richtung laut den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses nie  $a_{max,x} = 0,5 \frac{m}{s^2}$  überschreitet, wird dieser Wert für den Vergleich gewählt.

Tabelle 4-10 und Tabelle 4-11 zeigen die Eingangsgrößen des Vergleichs.

Tabelle 4-10: Modellvergleich: Bewegungsparameter

Parameter	Einheit	Wert
Maximale Geschwindigkeit in x-Richtung	$[\frac{m}{s}]$	5
Maximale Beschleunigung in x-Richtung	$[\frac{m}{s^2}]$	0,5
Verschleißzeit in x-Richtung	[s]	1
Maximale Geschwindigkeit in y-Richtung	$[\frac{m}{s}]$	2
Maximale Beschleunigung in y-Richtung	$[\frac{m}{s^2}]$	2
Verschleißzeit in y-Richtung	[s]	1

Tabelle 4-11: Modellierungsvergleich: RBG- und Lagerparameter

Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
RBG- und Lagerhöhe	[m]	45	Radstand / Traverse: Länge	[m]	8
Gesamt-RBG: Schwerpunkt in y-Richtung (ohne Hubwagen)	[%]	50	Traverse: Masse pro Länge	$[\frac{\text{kg}}{\text{m}}]$	450
Mast: Schwerpunkt in x-Richtung	[%]	20	Traverse: Zusatzmasse	[kg]	2000
Mast: Masse pro Höhe	$[\frac{\text{kg}}{\text{m}}]$	350	Traverse: Schwerpunkt in x-Richtung	[%]	50
Anzahl Maste	[-]	1	Hubwagen: Schwerpunkt in x-Richtung	[% , m]	3,2
Mast: Zusatzmassen	[kg]	5000	Hubwagen: Leermasse	[kg]	3000
Mast: Länge	[m]	0,8	Zuladung: durchschnittliche Masse	[kg]	1500
Mast: Breite	[m]	0,5	Hubwagen: Schwerpunkt in y-Richtung (tiefste Position)	[m]	1,3
Wandstärke 1 eines RBG-Mast	[mm]	0,01	Bewegungsrichtung des RBG relativ zum Regal und zum E/A-Punkt	[-]	rechts
Wandstärke 2 eines RBG-Mast	[mm]	0,02	Raddurchmesser	[mm]	630
Rad: Masse	[kg]	350	Lagerfüllgrad	[%]	80
Lagerlänge	[m]	100	Lagertiefe	[-]	2
Fachhöhe	[m]	1,5	Lagerbetriebsstrategie	[-]	2x
Hubwagen: Kapazität	[1]	1			

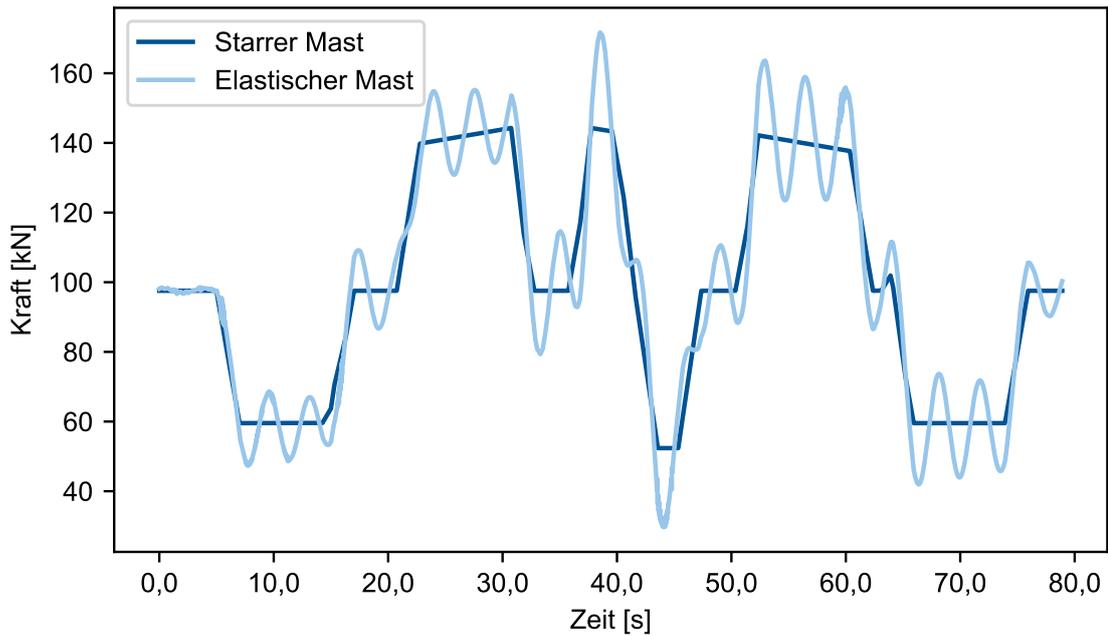


Abbildung 4-4: Kraftverlauf Vorderrad

### Validierung Modell elastischer Mast

Zunächst wird das MKS-Modell, welches einen elastischen Mast verwendet, validiert. Abbildung 4-4 zeigt den Kraftverlauf am Vorderrad des oben beschriebenen RBG. Der Verlauf folgt bei elastischer Modellierung des Masts grundsätzlich dem Verlauf bei starrer Modellierung des Masts. Des Weiteren sind Ausschläge des Kraftverlaufs infolge der Mastschwingungen zu sehen. In der Ruheposition des RBG zu Beginn der Simulation liegen die beiden Kraftverläufe aufeinander. Daher zeigt die Validierung, dass die beiden Arten der Modellierung, abgesehen von der Modellierung des Masts, miteinander übereinstimmen.

### Auswirkungen der Schwingungen auf den Kontaktkraftkollektivbeiwert

Um die Auswirkungen der Mastschwingungen auf das Lastkollektiv  $k_c$  zu bestimmen wird für das oben beschriebene RBG eine Simulation über 1.000 Arbeitsspiele durchgeführt. Anschließend wird  ${}^{m_{en}}\sqrt{k_c}$  sowohl am Vorderrad als auch an der Schienenstelle 1 m hinter dem E/A-Punkt nach jedem Arbeitsspiel ausgewertet. Die beschriebene Schienenstelle liegt sehr nah am E/A-Punkt und erfährt somit die größte Belastung über die Lebensdauer. Da nicht direkt  $k_c$  in die Auswertung des Ermüdungsfestigkeitsnachweises eingeht, sondern  ${}^{m_{en}}\sqrt{k_c}$  wird letzterer Wert für den Vergleich der beiden Modellierungsansätze ausgewertet.

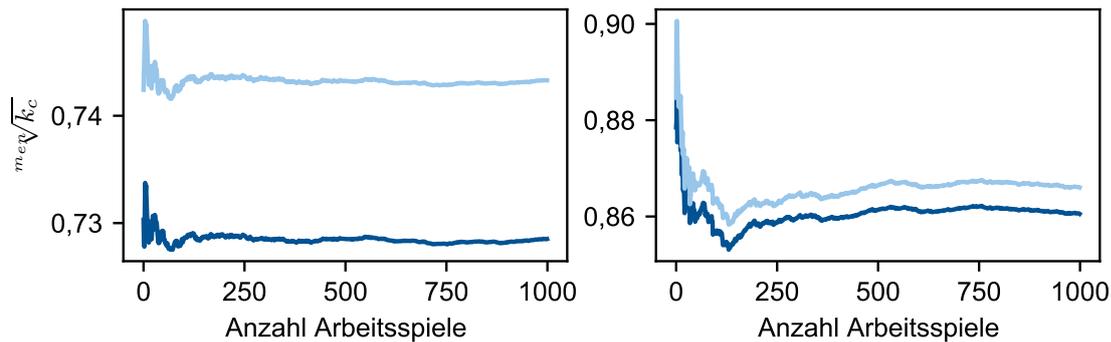


Abbildung 4-5: Vergleich  $m_{en}\sqrt{k_c}$  am Vorderrad und der Schiene. Dunkelblau: starrer Mast. Hellblau: elastischer Mast

Abbildung 4-5 zeigt den Verlauf von  $m_{en}\sqrt{k_c}$  am Vorderrad und der Schiene. Dabei liegt der Verlauf bei elastischer Modellierung während der gesamten Simulation über dem Verlauf bei starrer Modellierung. Des Weiteren ist zu sehen, dass der Abstand zwischen den beiden Kurven jeweils recht konstant ist.

Abbildung 4-6 zeigt den Verlauf der prozentualen Abweichung von  $m_{en}\sqrt{k_c}$  bei elastischer Modellierung des Masts gegenüber einer starren Modellierung. Die Abweichung am Vorderrad pendelt hierbei um etwa 2 %. An der ausgewerteten Schienenstelle pendelt die Abweichung um etwa 0,75 %. In beiden Fällen ist die Abweichung gering. Ebenso verläuft sie in beiden Fällen über den Simulationsverlauf recht konstant. Die Schwankungen an der ausgewerteten Schienenstelle sind etwas größer als am Vorderrad. Sowohl für das Vorderrad als auch die Schiene lässt sich der Einfluss der Mastschwingungen auf  $k_c$  für die simulierte RBG-Konfiguration durch einen konstanten Beiwert berücksichtigen. Für das Vorderrad beträgt dieser 1,068 ( $= 1,02^{m_{en}}$ ), für die Schiene 1,026 ( $= 1,0075^{m_{en}}$ ).

Hinsichtlich der Simulationsdauer unterscheiden sich die beiden Modellierungsarten deutlich. Die Simulation bei starrer Modellierung des Masts dauert auf einem Standardlaptop (vgl. Tabelle 4-12) 30 Sekunden. Bei elastischer Modellierung des Masts dauert die Simulation 3 Stunden und 24 Minuten.

Tabelle 4-12: CPU- und RAM-Daten des verwendeten Laptops

Parameter	Wert
Prozessor	Intel(R) Core(TM) i7-8550U CPU @ 1,8 Ghz
RAM	16 GB

Zusammenfassend deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Mastschwingungen  $m_{en}\sqrt{k_c}$  nicht maßgeblich beeinflussen und durch einen konstanten Beiwert berücksichtigt werden können. Bei der Entscheidung, welche der beiden Modellierungsarten für die Entwicklung eines Vorhersagemodells verwendet wird, ist die Möglichkeit zur Berücksichtigung der

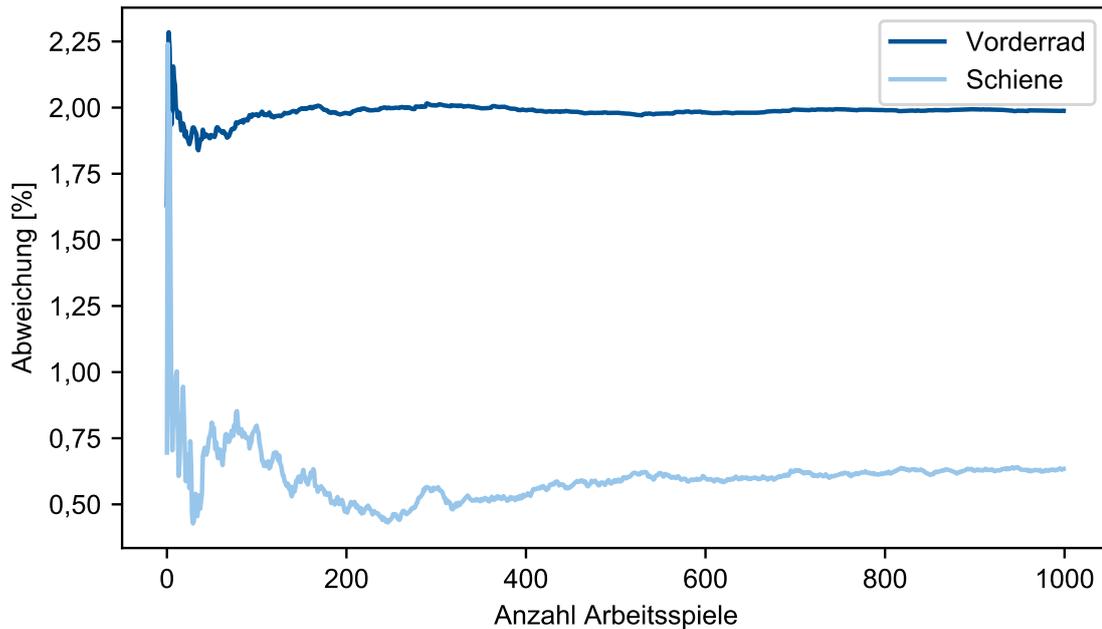


Abbildung 4-6: Prozentuale Abweichung zwischen elastischer und starrer Modellierung

Mastschwingungen nicht alleine ausschlaggebend. Da das Modell mit starrem Mast eine deutlich schnellere Rechengeschwindigkeit aufweist, wird dieses Modell zur Erstellung der Vorhersagemodelle genutzt. Da im weiteren Verlauf nicht nur 1.000 Arbeitsspiele, sondern ein Vielfaches davon simuliert werden und dies für eine Vielzahl von Konfigurationen durchgeführt wird, ist eine Verwendung des Modells mit elastischem Mast nicht sinnvoll, da der entstehende Zusatzaufwand in keinem Verhältnis zur Ergebnisverbesserung steht.



## 5 Erstellung und Test der Vorhersagemodelle

---

Dieses Kapitel beschreibt das Vorgehen zur Erstellung und zum Test der Vorhersagemodelle für die beiden Zielgrößen  $k_c$  und  $i_{tot}$ . Ziel der Vorhersagemodelle war die Berechnung dieser beiden Größen, ohne das rechenintensive Simulationsmodell nutzen zu müssen. Das Simulationsmodell wurde zur Generierung der Datensätze, die als Basis für die Vorhersagemodelle dienen, genutzt.

Dieses Kapitel untergliedert sich in fünf Hauptabschnitte. Die ersten vier dieser Abschnitte beschäftigen sich mit dem Kontaktkraftkollektivbeiwert  $k_c$ . Da die Simulation der kompletten geplanten Lebensdauer einer RBG-Schiene, welche bis zu 10 Millionen Arbeitsspiele dauern kann, sehr rechenintensiv ist, ist dieses Vorgehen zur Erzeugung der Datensätze für die Vorhersagemodelle, nicht sinnvoll. Daher wird im ersten Schritt die minimale Anzahl von Arbeitsspielen ermittelt, welche in einem  $k_c$  resultieren, welches für die komplette geplante Lebensdauer für Räder und Schiene repräsentativ ist. Im zweiten Schritt werden mithilfe eines Morris-Screenings die Anzahl unabhängigen Variablen für die Vorhersagemodelle reduziert. Anschließend werden die Vorhersagemodelle entwickelt. Im vierten Schritt werden diese anhand von mit einem weiteren Datensatz getestet. Abschließend erfolgt die Beschreibung des Modells zur Vorhersage der Anzahl der Rollkontakte  $i_{tot}$ .

### 5.1 Bestimmung und Validierung minimaler Anzahl von Arbeitsspielen zur Berechnung des Kontaktkraftkollektivbeiwerts

Die Ergebnisse dieses Abschnitts wurden bereits in [Lai-2021a] veröffentlicht.

Wie die Abbildung 4-5 zeigt, schwankt  $k_c$  während der ersten Arbeitsspiele sehr stark. Im Laufe der Simulation nehmen diese Schwankungen allerdings ab und der Verlauf von  $k_c$  wird gleichmäßiger. Daher ist davon auszugehen, dass sich  $k_c$  nach einer bestimmten Anzahl von Arbeitsspielen  $n_c$  nur noch geringfügig ändert. Diese Anzahl von Arbeitsspielen soll zunächst bestimmt und validiert werden. Dies erfolgt anhand von zwei Simulationsstudien. Zunächst werden für diese aus den Eingangsgrößen der Simulation mit diskreten oder kategorischen Skalen zehn Grundkonfigurationen erstellt. Diese ergeben sich aus einer vollfaktoriellen Kombination dieser Eingangsgrößen:

- Anzahl Maste (1- oder 2-Mast)
- Lagerbetriebsstrategie (Einzel-, Doppel-, Vierfachspiel)
- LAM Kapazität (1 oder 2; bei Vierfachspiel: 2)

Zweck der ersten Simulationsstudie ist die Bestimmung von  $n_c$ , sodass  $n_c$  repräsentativ für die komplette Lebensdauer ist. Die zweite Simulationsstudie dient zur Validierung von  $n_c$ .

### 5.1.1 Bestimmung von der minimal nötigen Anzahl von Arbeitsspielen

Die RBG-Konfigurationen für die Bestimmung von  $n_c$  werden mithilfe eines L32 Placket-Burman Plans erstellt. Die Wahl fiel auf diese Art des Versuchsplans, da sich dieser auf die Extremwerte, also Minima und Maxima der Faktoren, fokussiert. Dies erscheint sinnvoll, da  $n_c$  so gewählt werden soll, dass es auch für Extremwerte gilt. Die Größe des Plans ergibt sich aus der Anzahl der Faktoren (28), welche durch den Plan variiert werden. Der L32-Plan ist der kleinste, der für diese Anzahl von Faktoren möglich ist. Der Plan wird für jede der zehn Grundkonfigurationen erstellt. Die Gesamtzahl der Simulationen beträgt somit 320. Anschließend ist eine Simulationsdauer  $n_{c,lc}$  zu wählen. Abbildung 5-1 zeigt den Verlauf von  $k_c$  für das in Abschnitt 4.4.4 simulierte RBG am Vorderrad über eine Simulationsdauer von 10.000.000 Arbeitsspielen, was die maximale geplante Lebensdauer für die Schiene ist. Diese zeigt, dass der Korridor, in dem sich  $k_c$  bewegt, im Laufe der Simulation immer kleiner wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Simulationsparameter während des gesamten Simulationsverlaufs konstant sind. Aus dieser Beobachtung folgt, dass der Nachweis, dass eine Simulation von  $n_c$  Arbeitsspielen repräsentativ für eine erheblich größere Anzahl von Arbeitsspielen  $n_{c,lc}$  ist, ebenfalls zeigt, dass  $n_c$  repräsentativ für eine beliebige Anzahl Arbeitsspiele  $> n_{c,lc}$  ist. Die durchgeführte Testsimulation legt nahe, dass  $k_c$  ab einer Dauer von  $n_{c,lc} = 500.000$  Arbeitsspielen (grauer Bereich in Abbildung 5-1) nahezu konstant ist, was bedeutet, dass dies die maximal nötige Anzahl von Arbeitsspielen zur Berechnung eines für die Lebensdauer repräsentativen  $k_c$  ist. Daher beträgt die Simulationsdauer zunächst  $n_{c,lc} = 500.000$  Arbeitsspiele. Sollte die Simulationsstudie zu einem  $n_c$  führen, das sehr nahe an  $n_{c,lc}$  liegt, ist die Studie mit einem größeren  $n_{c,lc}$  zu wiederholen.

Basierend auf den Simulationsergebnissen wird  $k_c$  nach jeweils 100 Arbeitsspielen neu berechnet. Die Auswertung geschieht jeweils für die beiden Räder sowie für die Schiene an der Stelle 1 m direkt vor dem E/A-Punkt. Anschließend wird nach jeweils 100 Arbeitsspiele die Streuung von  $k_c$  folgendermaßen berechnet:

$$dis(k) = 1 - \frac{\max_{k \leq i \leq n_{c,lc}} k_c(i)}{\min_{k \leq i \leq n_{c,lc}} k_c(i)} \quad (5-1)$$

wobei  $k$  die Anzahl bereits vollendeter Arbeitsspiele ist.

Diese Streuung beschreibt die Größe des Korridors, in welchem sich  $k_c$  ab  $k$  Arbeitsspielen bis zum Ende der Simulation bewegt.

Im Anschluss wird  $k$  so gewählt, dass für alle 320 Simulationen und Auswertepunkte gilt:

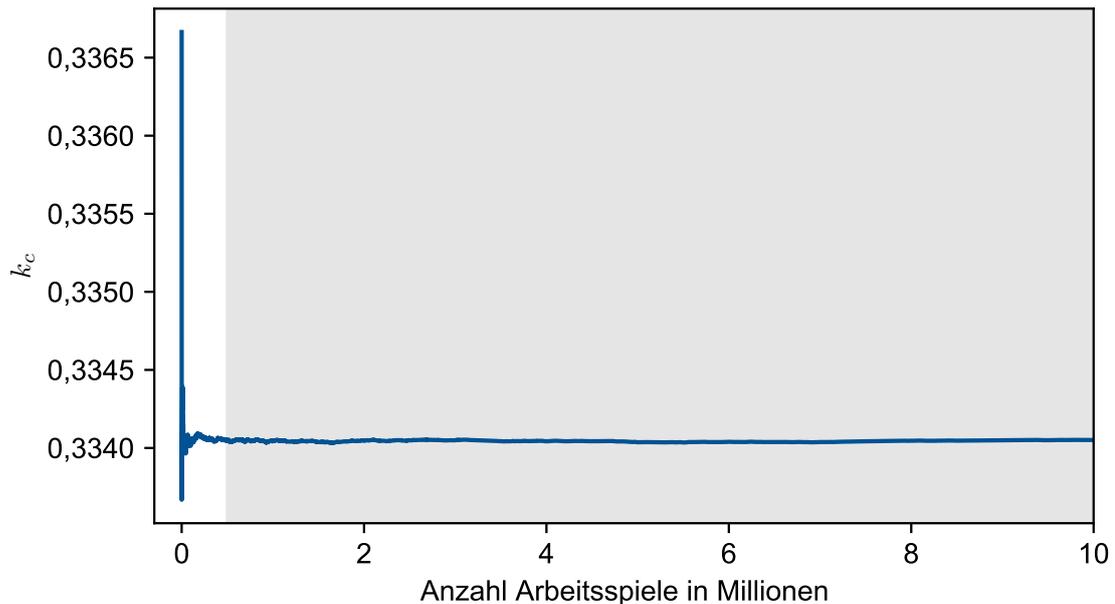


Abbildung 5-1: Verlauf von  $k_c$  am Vorderrad über eine Simulationsdauer von 10.000.000 Arbeitsspielen. Das simulierte RBG ist in Abschnitt 4.4.4 beschrieben.

$$dis(k) \leq 3 \% \quad (5-2)$$

Somit wird eine Anzahl von Arbeitsspielen gewählt, nach welcher sich  $k_c$  innerhalb einer Abweichung von maximal 3 % bewegt. Diese maximale Abweichung wurde von den Industriepartnern im projektbegleitenden Ausschuss als akzeptabel bewertet. Die Auswertung zeigt, dass Gleichung 5-2 für  $n_c = 53.000$  für alle Simulationen, mit Ausnahme eines Ausreißers, gültig ist. Für diesen Ausreißer gilt Gleichung 5-2 erst nach 116.200 Arbeitsspielen. Hierbei handelt es sich allerdings um eine in der Praxis nicht relevante RBG-Konfiguration mit einer RBG-/Lagerhöhe  $h_{SC} = 45$  m, einer Lagerlänge von  $l_R = 30$  m, einer maximalen Geschwindigkeit in x-Richtung  $v_{max,x} = 1 \frac{m}{s}$  und einer maximalen Beschleunigung in x-Richtung  $a_{max,x} = 3 \frac{m}{s^2}$ . Diese Kombination ist aus einer Reihe von Gründen in der Praxis nicht anzutreffen. Zum einen beträgt die Höhe des Lagers das 1,5-fache der Lagerlänge. Zum anderen gibt es aufgrund der Kippmomente keine RBG dieser Höhe mit einer derart großen Beschleunigung. Letztlich wäre die maximale Beschleunigung in Anbetracht der maximalen Geschwindigkeit nicht erreichbar. Aufgrund dessen wird diese Konfiguration bei der Auswahl von  $n_c$  ausgeschlossen und  $n_c = 53.000$  gewählt. Das ermittelte  $n_c$  ist erheblich kleiner als die Simulationsdauer  $n_{c,lc}$ . Daher ist davon auszugehen, dass  $n_c$  auch repräsentativ für eine beliebige Anzahl Arbeitsspiele  $> n_{c,lc}$  ist.

### 5.1.2 Validierung von der ermittelten minimal nötigen Anzahl von Arbeitsspielen

Im nächsten Schritt soll eine weitere Simulationsstudie zeigen, dass das gewählte  $n_c$  für beliebige Parameterkonfigurationen nur zu sehr kleinen Abweichungen gegenüber einer Simulation der gesamten Auslegungslebensdauer führt. Diese Studie umfasst insgesamt 3.000 RBG-Konfigurationen, 300 pro Grundkonfiguration. Im Gegensatz zur vorhergehenden Studie kommt zur Variation ein Latin Hypercube zum Einsatz. Damit schließt die Studie auch Werte zwischen Minimum und Maximum ein und füllt den Versuchsraum somit besser aus. Die Simulationsdauer beträgt wiederum  $n_{c,lc} = 500.000$  Arbeitsspiele. Auswertegröße ist  $dis(53.000)$ .

Abbildung 5-2 zeigt die Verteilung der Abweichung über alle Simulationen. Dabei sind alle drei Auswertepunkte, die beiden Räder und die Schiene, zu einer Verteilung zusammengefasst. Sie umfasst also 9.000 ( $3.000 \times 3$ ) Datenpunkte. Die Verteilung ist durch die Quantile in Tabelle 5-1 charakterisiert. In mehr als 99 % der Fälle ist Gleichung 5-2 erfüllt. Die maximale Abweichung über alle Simulationen und Auswertepunkte beträgt 4,3 %. Die Industriepartner im projektbegleitenden Ausschuss bewerten dieses Ergebnis als gut.

Tabelle 5-1: Quantile der Häufigkeitsverteilung über die Abweichungen über alle 9.000 Datenpunkte (drei Auswertepunkte, zwei Räder und die Schiene, für 3.000 RBG-Konfigurationen)

Quantil	Abweichung [%]
25 %	0,1
50 %	0,2
75 %	0,5
90 %	0,9
99 %	2,1
Maximum	4,3

In einem nächsten Schritt ist der statistische Nachweis zu erbringen, dass die gewonnenen Erkenntnisse auch über die untersuchten 3.000 Parameterkonfigurationen hinaus gültig sind. Daher wird mit den Ergebnissen ein Binomialtest durchgeführt. Dieser soll zeigen, dass die Abweichung nach 53.000 Arbeitsspielen gegenüber dem Simulationsende bei sämtlichen möglichen Parameterkonfigurationen in weniger als 1 % der Fälle 3 % übersteigt. Dies spiegelt sich in der Formulierung der Null- ( $H_0$ ) und Alternativhypothese ( $H_1$ ) wider:

$$H_0 : p_{dis(53.000)>3\%} \geq 1\%$$

$$H_1 : p_{dis(53.000)>3\%} < 1\%$$

Mit  $\alpha = 0,01$  wird ein sehr hohes Signifikanzniveau für den Test gewählt. Die Berechnung der Testgrößen ergibt, dass  $H_0$  zugunsten von  $H_1$  abzulehnen ist. Der Test ergibt also,

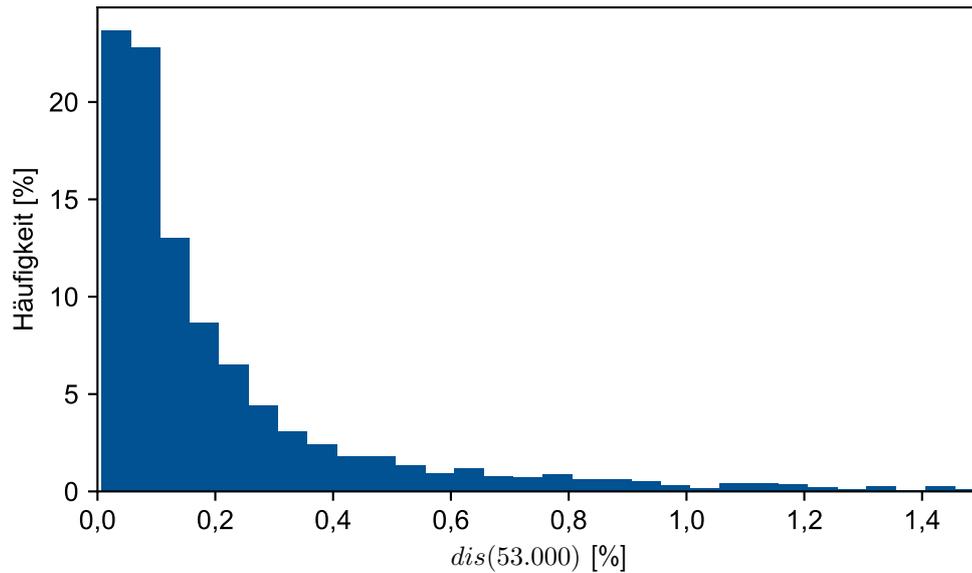


Abbildung 5-2: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen  $dis(53.000)$ . x-Achse bei 2 % abgeschnitten zur besseren Darstellbarkeit

dass  $dis(53.000)$  für beliebige Parameterkonfigurationen in weniger als 1 % der Fälle mehr als 3 % beträgt. Die berechnete Power, welche besagt, mit welcher Wahrscheinlichkeit  $H_0$  korrekterweise zurückgewiesen wird, beträgt  $(1 - \beta) = 99,999$  %

Zusammenfassend zeigt die Validierung von  $n_c$  anhand der Häufigkeitsverteilung der Abweichungen sowie anhand des Binomialtests, dass die gewählte Anzahl von Arbeitsspielen zu einem  $k_c$  führt, welches repräsentativ für die komplette Auslegungslbensdauer ist.

## 5.2 Screening relevanter Parameter für den Kontaktkraftkollektivbeiwert

Die Ergebnisse dieses Abschnitts basieren auf [Lai-2021b].

Die in 4.1 identifizierten RBG- und Lagerparameter mit einem potenziellen Einfluss auf  $k_c$  umfassen 29 Eingangsgrößen, welche die unabhängigen Variablen bzw. Faktoren für die zu erstellenden Vorhersagemodelle darstellen. Um unnötig komplexe Vorhersagemodelle zu vermeiden, werden aus diesen Variablen zunächst jene mit dem größten Einfluss identifiziert. Hierzu kommt ein Morris-Screening zum Einsatz (vgl. Abschnitt 3.2.3). Dieses wird separat für 1- und 2-Mast RBG durchgeführt, wodurch ein Faktor vollfaktoriell betrachtet wird. Somit verbleiben 28 Faktoren für das Morris-Screening. Tabelle 5-2 zeigt die Parameter für die Durchführung des Morris-Screenings. Der Versuchsplan wird nach der Methode in [Cam-2007] optimiert.

Tabelle 5-2: Morris-Screening Parameter

Parameter	Wert
$\Delta$	$n_r/2$
$n_r$	10
$r$	40

Die Simulationsdauer beträgt  $n_c = 53.000$  Arbeitsspiele. Auswertegrößen der Simulation sind wiederum  $k_c$  für die beiden Räder sowie für die Schienenstelle 1 m (direkt am E/A-Punkt). Basierend auf den  $EE$  der untersuchten Faktoren wird im Anschluss deren absoluter Mittelwert  $\mu^*$  sowie deren Standardabweichung  $\sigma$  berechnet. Die Tabellen B-1 und B-2 im Anhang zeigen die berechneten Werte für beide Grundkonfigurationen, 1- und 2-Mast RBG, sowie die drei Auswertegrößen. Abbildung 5-3 stellt für jeden Faktor sowohl das maximale  $\mu^*$  als auch das maximale  $\sigma$  über beide Grundkonfigurationen und alle Auswertegrößen in einem sogenannten Morris-Diagramm gegenüber.

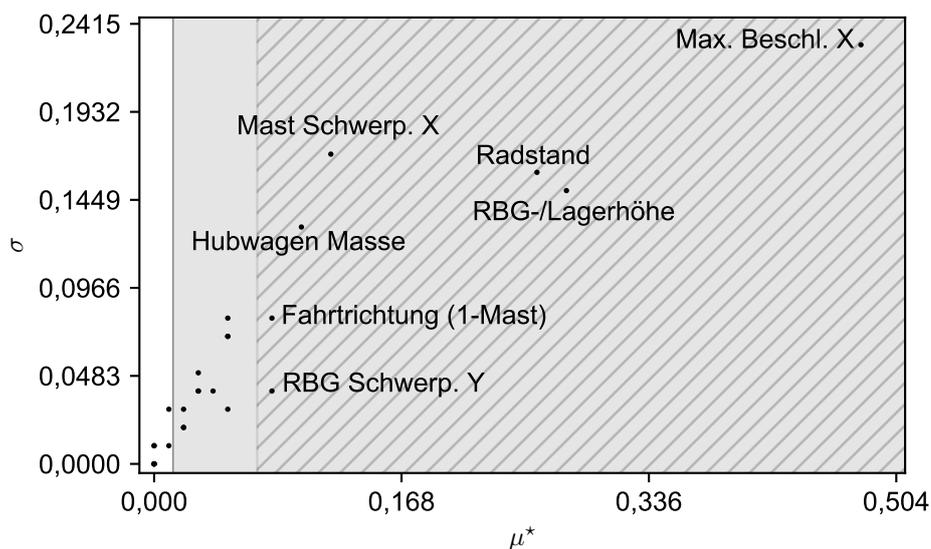


Abbildung 5-3: Ergebnisse des Morris-Screenings

Daraus geht hervor, dass wenige Faktoren einen sehr großen Einfluss auf  $k_c$  haben. Zudem haben die meisten Faktoren mit einem starken (großes  $\mu^*$ ) Einfluss auch einen nicht linearen Einfluss bzw. Wechselwirkungen mit anderen Parametern (großes  $\sigma$ ). Zusammenfassend lassen sich aus den Ergebnissen des Morris-Screenings die folgenden Kernaussagen ableiten:

- Die sieben einflussreichsten Faktoren machen 82 % des Gesamteffekts aus ( $\mu^*$ ). Diese Faktoren sind in Abbildung 5-3 markiert.
- 18 Parameter (grauer Bereich in Abbildung 5-3) machen 99 % des Gesamteffekts aus

Basierend auf diesen beiden Erkenntnissen werden die 18 signifikantesten Faktoren für die Erstellung der Vorhersagemodelle ausgewählt. Einer dieser Faktoren existiert nur für

1-Mast RBG, die Fahrtrichtung. Die 18 ausgewählten Faktoren werden um die Anzahl der Maste, welche beim Morris-Screening vollfaktoriell berücksichtigt wurden, erweitert. Somit verbleiben 19 unabhängige Variablen, welche zur Erstellung der Vorhersagemodelle genutzt werden (vgl. Tabelle 5-3).

Tabelle 5-3: Parameter zur Erstellung von Vorhersagemodellen für  $k_c$

Parameter	Symbol	Einheit
Anzahl Maste	$n_M$	[–]
Fahrtrichtung RBG (1-Mast)	$md_{SC}$	[–]
RBG- und Lagerhöhe	$h_{SC}$	[m]
Gesamt-RBG: Schwerpunkt in y-Richtung (ohne Hubwagen)	$cg_{SC,y}$	[%]
Mast: Masse pro Höhe	$m_{M,h}$	$[\frac{kg}{m}]$
Mast: Schwerpunkt in x-Richtung	$cg_{M,x}$	[%]
Mast: Zusatzmassen	$m_{M,a}$	[kg]
Radstand / Traverse: Länge	$l_T$	[m]
Traverse: Schwerpunkt in x-Richtung	$cg_{T,x}$	[%]
Traverse: Masse pro Länge	$m_{T,l}$	$[\frac{kg}{m}]$
Traverse: Zusatzmasse	$m_{T,a}$	[kg]
Maximale Beschleunigung in x-Richtung	$a_{max,x}$	$[\frac{m}{s^2}]$
Verschleißzeit in x-Richtung	$t_{slip,x}$	[s]
Maximale Geschwindigkeit in x-Richtung	$v_{max,x}$	$[\frac{m}{s}]$
Hubwagen: Schwerpunkt in x-Richtung	$cg_{L,x}$	[% , m]
Hubwagen: Leermasse	$m_L$	[kg]
Zuladung: durchschnittliche Masse	$m_{LD}$	[kg]
Maximale Beschleunigung in y-Richtung	$a_{max,y}$	$[\frac{m}{s^2}]$
Lagerlänge	$l_R$	[m]

### 5.3 Gauß-Prozesse zur Vorhersage des Kontaktkraftkollektivbeiwerts

Die Ergebnisse dieses Abschnitts basieren auf [Lai-2021b].

Mithilfe der identifizierten, signifikanten unabhängigen Variablen werden im nächsten Schritt Gauß-Prozess Modelle zur Vorhersage von  $k_c$  erstellt und getestet. Dazu erfolgt zunächst die Erstellung der Datensätze zum Training und zum Test der Modelle. Dar-

auf folgt das Training. Im letzten Schritt werden die Vorhersagemodelle anhand des Test-Datensatzes getestet und mit einer einfachen Berechnung von  $k_c$  in Einklang mit der Berechnung des Lastkollektivs nach DIN 15070 verglichen.

### 5.3.1 Datensätze

Zur Erstellung der Datensätze werden die 19 verbliebenen unabhängigen Variablen zunächst in kategorische und kontinuierliche Variablen eingeteilt. Zwei der Variablen verfügen über kategorische Werteintervalle. Die restlichen haben kontinuierliche Skalen. Die kategorischen Variablen sind:

- Anzahl Maste
- 1-Mast: Fahrtrichtung

Aus diesen beiden kategorischen Variablen entstehen zunächst drei Grundkonfigurationen:

- 1-Mast RBG mit Fahrtrichtung (FR) rechts
- 1-Mast RBG mit Fahrtrichtung (FR) links
- 2-Mast RBG

Die Variation der übrigen Variablen erfolgt mithilfe eines LHD. Die daraus resultierenden Versuchspläne werden nach der Ersetzungsregel Simulated Annealing (vgl. Abschnitt 3.2.4) optimiert. Für die Optimierungsparameter werden häufig verwendete Standardwerte genutzt. Diese sind in Tabelle 5-4 zusammengefasst. Die Versuchspläne werden jeweils für 3.000 Iterationen optimiert.

Tabelle 5-4: Parameter Optimierung LHD

Parameter	Wert
$T_0$	10
$\alpha$	0,99

Abbildung 5-4 zeigt das Vorgehen zur Erstellung der Datensätze. Der LHD zum Training der Modelle besteht aus 7.000 Konfigurationen. Zum Test wird ein LHD mit 100.000 Konfigurationen genutzt.

Die daraus entstehenden Versuchspläne werden anschließend gefiltert. Dies hat den Zweck unmögliche bzw. extrem unrealistische RBG-Konfigurationen auszuschließen. Ein Ausschluss einer Konfiguration erfolgt, wenn mindestens eine der vier folgenden Bedingungen zutrifft:

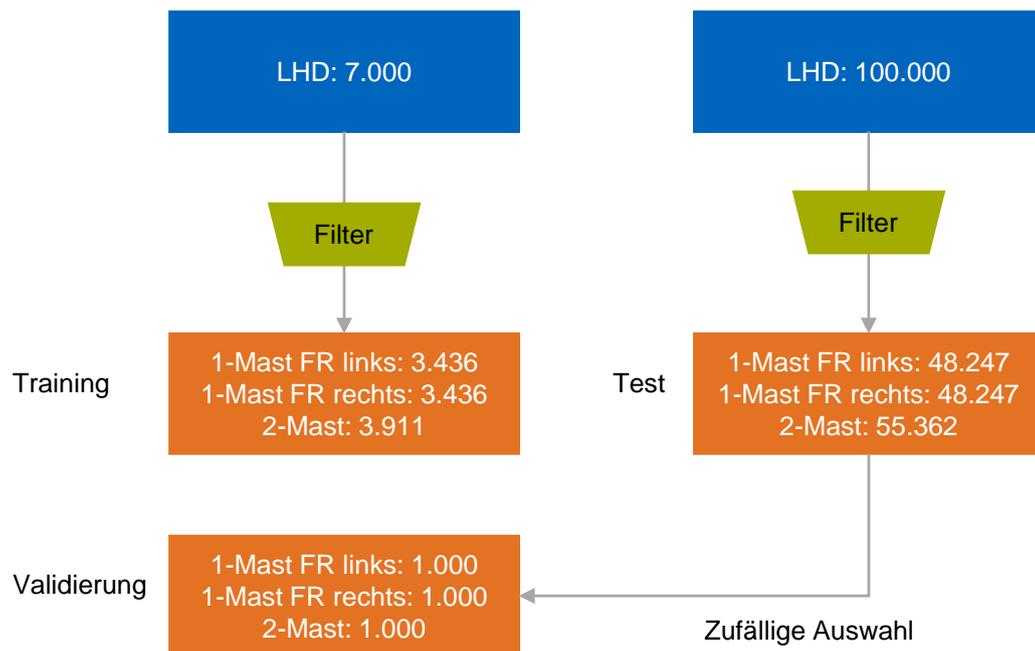


Abbildung 5-4: Vorgehen zur Erstellung der Datensätze zum Training und zum Test der GP. Für jede Grundkonfiguration gibt es drei Auswertepunkte, die beiden Räder und die Schiene, für welche separate GP erstellt werden.

- Die Standmomente sind kleiner als die Kippmomente bei maximaler Fahrbeschleunigung. Dies hätte in der Realität ein Kippen des RBG zur Folge. In der Simulation wären negative Radkräfte möglich, welche die Berechnung von  $k_c$  verzerren würden. Diese unrealistischen Berechnungen von  $k_c$  würden wiederum das Training der Modelle erschweren.
- Die maximale Beschleunigung in Fahr- oder Hubrichtung kann bei den gegebenen maximalen Geschwindigkeiten, der Verschleißzeit sowie der RBG-Höhe bzw. Lagerlänge nicht erreicht werden.
- Die maximale Fahrgeschwindigkeit kann bei gegebener maximaler Beschleunigung, der Verschleißzeit sowie der Lagerlänge nicht erreicht werden.
- Das Verhältnis der Lagerhöhe zur -länge ist  $h_{SC}/l_R \geq 1$  und somit sehr unrealistisch.

Nach der Anwendung der obigen Bedingungen verbleiben zum Training 3.436 Konfigurationen für die beiden 1-Mast Grundkonfigurationen und 3.911 Konfigurationen für das 2-Mast RBG. Die Datensätze zum Testen beinhalten noch 48.247 bzw. 55.362 Konfigurationen. Der komplette Testdatensatz umfasst somit 455.568 Labels,  $2 \times 3 \times 48.247$  Labels für die beiden 1-Mast Konfigurationen und  $3 \times 55.362$  Labels für die 2-Mast Konfiguration. Die Datensätze zum Training liegen über der empfohlenen Größe von 2.000 Datenpunkten der Au-

toren der verwendeten Bibliothek von Gauß-Prozessen GPyTorch [Gar-2018b]. Die Modelle sind allerdings auf einem Standardlaptop, dessen Spezifikationen in Tabelle 4-12 zusammengefasst sind, problemlos berechenbar.

Aus dem Testdatensatz wird zudem zufällig ein 1.000 Konfigurationen umfassender Validierungssatz ausgewählt.

Die Simulationsdauer beträgt jeweils 53.000 Arbeitsspiele. Auswertegrößen sind wiederum  $k_c$  für die beiden Räder sowie die Schiene. Im Fall der Schiene wird  $k_c$  an zehn, gleichmäßig verteilten Stellen beginnend vom E/A-Punkt bis zu zwei Radstandlängen ausgewertet. Zudem werden an jeder Schienenstelle die Anzahl der Rollkontakte gezählt und daraus  $s_c$  berechnet. Als abhängige Variable der Schiene wird anschließend das  $k_c$  der Schienenstelle ausgewählt, dessen korrespondierendes  $s_c$ , also die Kombination aus  $k_c$  und  $i_{tot}$ , maximal ist. Somit fällt die Wahl jeweils auf die Schienenstelle, deren Kombination aus  $k_c$  und  $i_{tot}$  am ungünstigsten ausfällt, und somit die für die Auslegung relevante Schienenstelle ist.

### 5.3.2 Training der Gauß-Prozesse

Insgesamt sind neun GP-Modelle zu trainieren, da drei Grundkonfigurationen mit je drei Auswertegrößen,  $k_c$  für die beiden Räder sowie die Schiene, vorliegen. Als Mittelwertfunktion wird für alle Modelle und alle unabhängigen Variablen die zero-mean-Funktion ausgewählt, da diese eine häufig genutzte Standardfunktion ist und gute Ergebnisse erwarten lässt. Die Matérn-5/2 Funktion ist wiederum eine häufig genutzte Kovarianzfunktion, welche der Annahme unterliegt, dass ähnliche Parameterkonfigurationen über ein ähnliches  $k_c$  verfügen. Daher fällt die Wahl auf diese Kovarianzfunktion. Jede unabhängige Variable erhält eine separate Kovarianzfunktion und verfügt somit über separate optimierbare Parameter  $\theta$ .

Der Trainingsprozess ist in Abschnitt 3.3.2 beschrieben (vgl. Abbildung 3-3). Für diesen sind vier Hyperparameter zu wählen, die Lernrate, die Anzahl an Iterationen, die Verlustfunktion und die Metrik. Die Verlustfunktion für GP ist die marginal log likelihood (vgl. Abschnitt 3.3.3). Die Lernrate wird unter Anwendung des Verfahrens nach [Smi-2017] zwischen  $LR = 0,0002$  und  $LR = 1$  variiert. Die Trainingsdauer beträgt 500 Iterationen. Anhand des Verlaufs der Verlustfunktion lässt sich nach dem Training zeigen, dass sich diese nach 500 Iterationen nicht mehr nennenswert verändert. Nach jeder Iteration werden die jeweiligen Parameter  $\theta$  der Kovarianzfunktionen gespeichert.

Als Metrik ist eine Größe zu wählen, welche aus Sicht der Nutzer der Vorhersagemodelle die Eignung der Modelle am besten quantifiziert. Im vorliegenden Fall soll die maximale relative Abweichung zwischen den Vorhersagen  $k_{c,pred}$  und den Labels  $k_{c,label}$  minimal sein.

Dies soll sicherstellen, dass selbst die ungenauesten Vorhersagen nur geringe Abweichungen in der Auslegung des Rad-Schiene-Systems nach sich ziehen. Um einzelnen Ausreißern dennoch keinen zu großen Einfluss auf die Metrik beizumessen, wird das 99 %-Quantil der relativen Abweichung zwischen den Vorhersagen und den Labels gewählt:

$$Q_{0,99} \left( \left| \frac{k_{c,pred}}{k_{c,label}} - 1 \right| \right) \quad (5-3)$$

Abbildung 5-5 zeigt den Verlauf der Verlustfunktion sowie der Metrik für alle neun Modelle. Aus diesen Verläufen geht hervor, dass sich sowohl die Verlustfunktion als auch die Metrik zum Ende des Trainings für keine Zielgröße noch nennenswert verändern. Die Verlustfunktion ist ab etwa 200 Iterationen für alle Zielgrößen gesättigt. Für die Metrik tritt diese Sättigung bereits ab etwa 100 Iterationen ein. Dass sich sowohl die Verlustfunktion als auch die Metrik bereits deutlich vor Ende des Trainings nicht mehr nennenswert verändern, zeigt, dass die Dauer des Trainingsprozesses ausreichend lang ist. Im Anschluss werden für jedes Modell die Parameterwerte der Kovarianzfunktionen ausgewählt, welche mit dem minimalen Wert der Metrik korrespondieren.

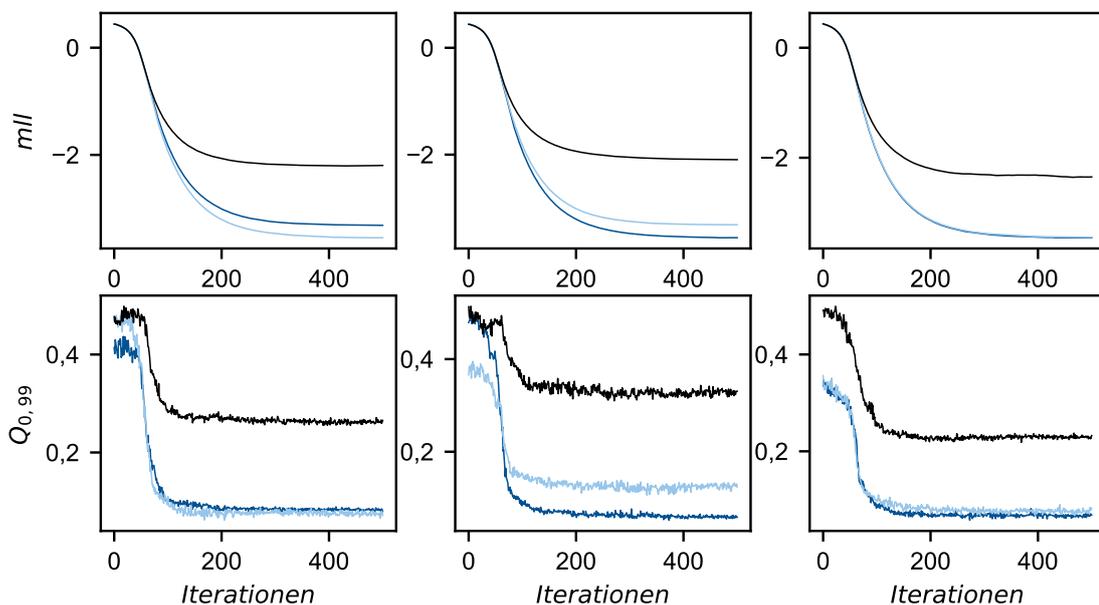


Abbildung 5-5: Obere Reihe: Verlauf der marginal log likelihood während des Trainingsprozesses. Untere Reihe: Verlauf der Metrik während des Trainingsprozesses. Spalten: Grundkonfigurationen; von links nach rechts: 1-Mast Fahrtrichtung links, 1-Mast Fahrtrichtung rechts, 2-Mast. Dunkelblau: Vorderrad, Hellblau: Hinterrad, Schwarz: Schiene

### 5.3.3 Test der Gauß-Prozesse

Im Anschluss an das Training erfolgt der Test der GP anhand des Testdatensatzes. Während dieses Tests findet zudem ein Vergleich mit einer alternativen Berechnung von  $k_c$ , welche sich an dem Berechnungsvorgehen der DIN 15070 [DIN-15070] und FEM 1.001 [FEM-1001] orientiert, statt. Diese alternative Berechnung wird fortan als Basismodell bezeichnet. Dieses berechnet  $k_c$  lediglich anhand der maximal und minimal auftretenden Kontaktkräfte  $F_{sd,f,min}$  und  $F_{sd,f,max}$ . Aus diesen berechnet sich  $k_c$  folgendermaßen:

$$k_c = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \frac{F_{sd,f,min}}{F_{sd,f,max}} \right)^{m_{en}} + \left( \frac{F_{sd,f,max}}{F_{sd,f,max}} \right)^{m_{en}} \right] \quad (5-4)$$

Die Kräfte  $F_{sd,f,min}$  und  $F_{sd,f,max}$  werden hierbei entsprechend des Starrkörpermodells in Abschnitt 4.4.1 unter Annahme des Hubwagens an seiner höchsten Position sowie der maximal möglichen auftretenden Beschleunigungen und der entsprechenden Richtung berechnet.

Zum Test der beiden Modellarten wird für jeden Testpunkt die prozentuale Abweichung zwischen den Labels und den Vorhersagen folgendermaßen berechnet:

$$dev = \left| \sqrt[m_{en}]{\frac{k_{c,pred}}{k_{c,label}}} - 1 \right| \cdot 100 \quad (5-5)$$

mit

$k_{c,pred}$ : Vorhersage für  $k_c$

$k_{c,label}$ : Korrespondierendes Label für  $k_c$ , also der simulierte Wert

$m_{en}$ : Exponent für Laufrad/Schiene-Kontakt,  $m_{en} = \frac{10}{3}$

Da im Ermüdungsnachweis der DIN EN 13001-3-3 nicht  $k_c$  direkt Verwendung findet, sondern  $\sqrt[m_{en}]{k_c}$ , wurde  $dev$  ebenfalls mit diesem Wert berechnet.

Abbildung 5-6 zeigt die Häufigkeitsverteilung von  $dev$  über alle 455.568 Punkte des Testdatensatzes, also alle drei Grundkonfigurationen und alle drei Auswertepunkte von  $k_c$ . Die Tabelle 5-5 zeigt die Quantile der jeweiligen Häufigkeitsverteilungen. Es zeigt sich, dass die Abweichungen der Vorhersagen der GP generell geringer ausfallen als die des Basismodells. Die Abweichungen im Fall der GP streuen zudem weniger. Die Mehrheit der Vorhersagen der GP weichen um weniger als 1 % von den korrespondierenden Labels ab. Im Fall des Basismodells liegt die Mehrheit der Abweichungen im Bereich von 50 %. Über

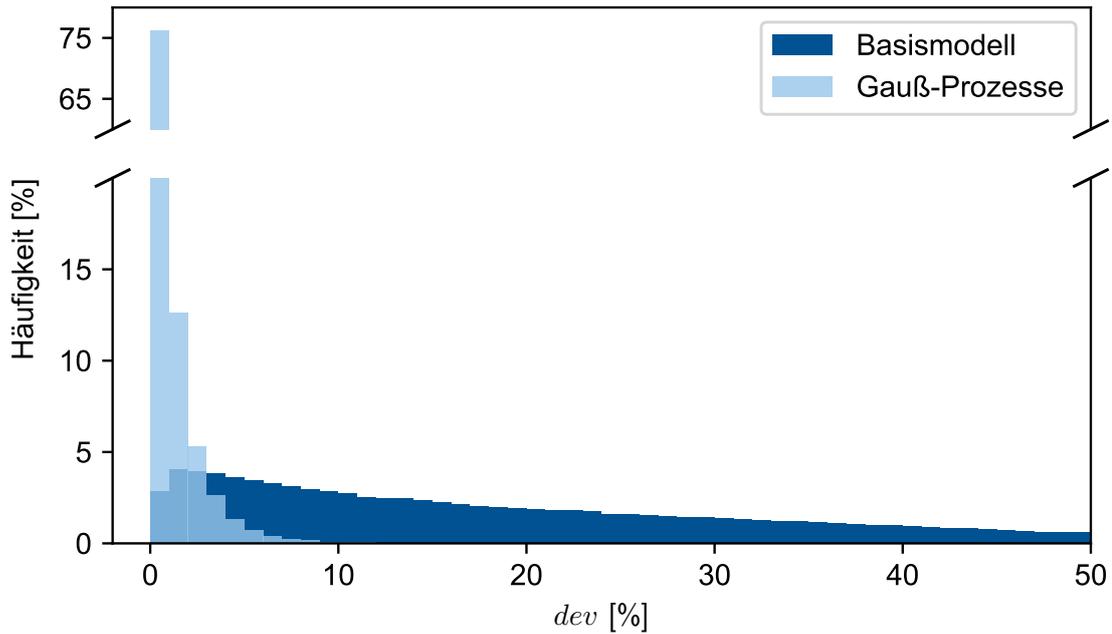


Abbildung 5-6: Häufigkeitsverteilung der betragsmäßigen, prozentualen Abweichung zwischen den Vorhersagen und den Labels des Testdatensatzes. x-Achse bei 50 % zur besseren Darstellbarkeit abgeschnitten.

den kompletten Testsatz weichen 99 % der Vorhersagen der GP um weniger als 7 % von ihren Labels ab. Das 99 %-Quantil liegt für das Basismodell bei 73,23 %. Während die Vorhersagen der GP um maximal 51,08 % abweichen, liegt das Maximum für das Basismodell bei 237,19 %.

Tabelle 5-5: Abweichungen Vorhersage Gauß-Prozesse und Basismodell

Quantil	Abweichung GP [%]	Abweichung Basismodell [%]
25 %	0,23	6,95
50 %	0,43	16,5
75 %	0,94	31,1
90 %	2,15	45,76
99 %	6,31	73,23
Maximum	51,08	237,19

Des Weiteren werden die GP anhand der Korrektheit der berechneten Unsicherheit einer Vorhersage überprüft. Dazu wird aus der berechneten Kovarianzmatrix  $\text{cov}(\mathbf{f}_*)$  (vgl. Abschnitt 3.3.3) ein Konfidenzintervall für jede Vorhersage berechnet. Dieses wird den Labels gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass in 98,73 % das Label innerhalb des jeweils vorhergesagten Konfidenzintervalls liegen.

Die Ergebnisse der Tests zeigen, dass die GP  $k_c$  deutlich genauer vorhersagen als das Basismodell, welches an die bisherige Berechnung von Lastkollektiven angelehnt ist. Sie

zeigen zudem, dass die GP ein zuverlässiges Konfidenzintervall für  $k_c$  vorhersagen und somit eine zuverlässige Aussage über die Unsicherheit der Vorhersage liefern. Bisherige Methoden zur Berechnung von Lastkollektiven erlauben keine Aussage über die Unsicherheit. Damit stellen die GP eine signifikante Verbesserung gegenüber der bisherigen Art zur Berechnung von Lastkollektiven nach DIN 15070 bzw. FEM 1.001 dar.

Allerdings liegen fast alle Abweichungen für das Basismodell im positiven Bereich. Somit überschätzt das Basismodell  $k_c$  in den meisten Fällen. Daher ist davon auszugehen, dass eine andere Gewichtung von  $F_{sd,f,min}$  und  $F_{sd,f,max}$  zu einer Verbesserung der Vorhersagen des Basismodells führen würde. Allerdings zeigt Abbildung 5-6 ebenfalls, dass die Abweichungen der Vorhersagen des Basismodells deutlich stärker streuen als die der GP. Daher ist nicht davon auszugehen, dass ein angepasstes Basismodell bessere Vorhersagen liefern würde als die GP.

## 5.4 Berechnung der Gesamtzahl der Rollkontakte

Dieser Abschnitt stellt das Vorhersagemodell bzw. die vereinfachte Berechnung der Anzahl der Rollkontakte  $i_{tot}$  der Räder vor. Für die Schiene ist in diesem Fall kein neues Vorgehen nötig, da davon auszugehen ist, dass am E/A-Punkt vier Rollkontakte pro Arbeitsspiel stattfinden. Dies ist unabhängig von der Lagerbetriebsstrategie.

### 5.4.1 Datensätze

Tabelle 5-6 zeigt die für die Bestimmung der Anzahl der Rollkontakte relevanten Eingangsgrößen der Simulation. Diese betreffen lediglich den ersten Teil der Simulation, die Erstellung der Auftragsliste. Aus dieser lässt sich direkt die insgesamt zurückgelegte Distanz und daraus die Anzahl der Rollkontakte bestimmen. Da die Zahl der relevanten Eingangsgrößen bereits gering ist, findet hier keine weitere Reduktion durch ein Screening statt.

Abbildung 5-7 zeigt das Vorgehen zur Erstellung der Datensätze. Da die Lagerbetriebsstrategie eine kategorische Variable ist, werden aus dieser drei Grundkonfigurationen gebildet:

- Einfachspiel
- Doppelspiel
- Vierfachspiel

Die übrigen sieben Eingangsgrößen werden mithilfe eines LHD variiert, welcher wiederum mit der SA-Ersetzungsregel optimiert wurde. Die Optimierungsparameter sind dabei identisch mit jenen in Abschnitt 5.3.1 (vgl. Tabelle 5-4). Unter den unabhängigen Variablen

Tabelle 5-6: Eingangsgroßen  $i_{tot}$ 

Parameter	Symbol	Einheit	[Von; Bis]
RBG- und Lagerhöhe	$h_{SC}$	[m]	[8; 45]
Lagerlänge	$l_R$	[m]	[30; 150]
Lagertiefe	$d_R$	[-]	[1; 4]
Fachhöhe	$h_{CELL}$	[m]	[0,5; 3]
Geplante Anzahl der Arbeitsspiele für die Räder oder die Schiene	$n_{cycles}$	[-]	[1000; 1000000]
Lagerfüllgrad	$so_R$	[%]	[50; 90]
Lagerbetriebsstrategie	$cm$	[-]	[Einzel, Doppel, Vierfach]
Hubwagen: Kapazität	$cap_L$	[1]	[1; 4]

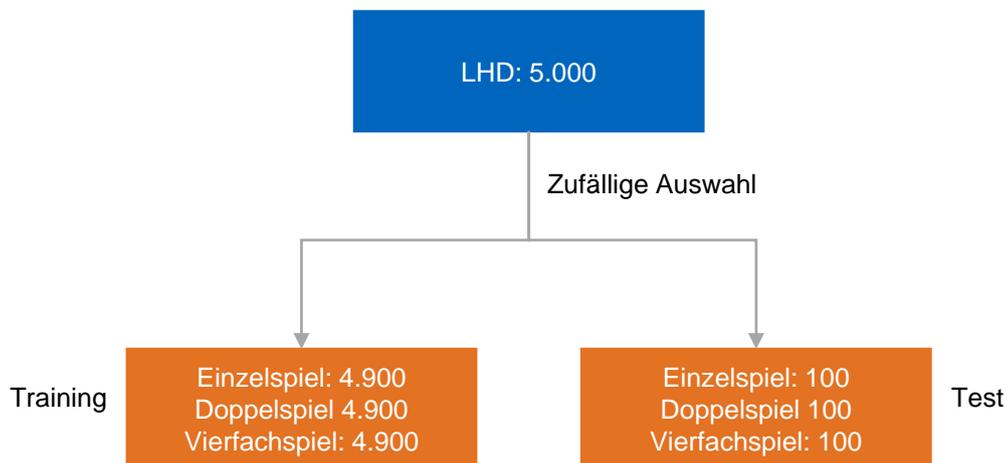


Abbildung 5-7: Vorgehen zur Erstellung der Datensätze zum Training und zum Test der Vorhersage von

finden sich drei Variablen mit einer diskreten Skala, die Anzahl Arbeitsspiele, die Lagertiefe sowie die Kapazität des Hubwagens. Da LHD keine Ganz-, sondern Dezimalzahlen produzieren, werden diese Variablen anschließend gerundet. Der so erstellte Versuchsplan umfasst 5.000 Konfigurationen.

Aus dem erstellten Versuchsplan werden die Labels, in diesem Fall die über die Simulationsdauer zurückgelegte Gesamtdistanz  $x_{tot}$  des RBG, simuliert. Aus dieser lässt sich in Kombination mit dem Raddurchmesser, bzw. dem Radumfang,  $i_{tot}$  berechnen. Da der Raddurchmesser ein zum Auslegungszeitpunkt bekannter bzw. auszulegender Parameter ist und somit im Anschluss an die Simulation bzw. Vorhersage noch angewandt werden kann, ist er keine Eingangsgröße der hier vorgestellten Berechnungsmethode.

Der so erstellte Datensatz wird im Anschluss in einen Trainings- und einen Testdatensatz unterteilt. Der Trainingsdatensatz umfasst dabei 100 zufällig ausgewählte Datenpunkte. Die restlichen Datenpunkte kommen zum Testen der Berechnungsmethode zum Einsatz.

#### 5.4.2 Vereinfachte Berechnung für die insgesamt zurückgelegte Fahrdistanz

Zur vereinfachten Berechnung von  $x_{tot}$  wird für jeden Punkt  $i$  aus dem Trainingsdatensatz eine durchschnittlich zurückgelegte Distanz pro Arbeitsspiel in Abhängigkeit der Lagerlänge gebildet:

$$\bar{x}_{cycle,i} = \frac{x_{tot,i}}{n_{cycles,i} \cdot l_{R,i}} \quad (5-6)$$

Anschließend wird über die so berechneten Durchschnittsdistanz für jeden Datenpunkt der Mittelwert  $\bar{x}_{cycle}$  gebildet. Dies geschieht separat für die drei Grundkonfigurationen. Tabelle 5-7 zeigt die jeweils berechneten Mittelwerte.

Tabelle 5-7: Versuch Zeitschritt Parameter

Grundkonfiguration	$\bar{x}_{cycle}$ [m]
Einzelspiel	1,01
Doppelspiel	0,45
Vierfachspiel	0,39

Zur Anwendung für die Auslegungsmethode erfolgt die Berechnung von  $i_{tot}$  folgendermaßen:

$$i_{tot} = \bar{x}_{cycle} \cdot n_{cycles} \cdot l_R \cdot \pi D_W \quad (5-7)$$

#### 5.4.3 Test der vereinfachten Berechnung

Zum Test der vereinfachten Berechnung werden für die übrigen 4.900 Datenpunkte mithilfe der oben berechneten Mittelwerte eine Vorhersage berechnet und die prozentuale Abweichung zwischen den Vorhersagen und den korrespondierten Labels folgendermaßen berechnet:

$$dev = \left| m_{en} \sqrt{\frac{x_{tot,pred}}{x_{tot,label}}} - 1 \right| \cdot 100 \quad (5-8)$$

mit

$x_{tot,pred}$ : Vorhersage für  $x_{tot}$

$x_{tot,label}$ : Korrespondierendes Label für  $x_{tot}$ , also der simulierte Wert

$m_{en}$ : Exponent für Laufrad/Schiene-Kontakt,  $m_{en} = \frac{10}{3}$

Da im Ermüdungsnachweis der DIN EN 13001-3-3 nicht  $i_{tot}$ , und somit auch nicht  $x_{tot}$ , direkt Verwendung findet, sondern  $m_{en} \sqrt{i_{tot}}$ , wird  $dev$  ebenfalls mit  $m_{en} \sqrt{x_{tot}}$  berechnet.

Abbildung 5-8 zeigt die Häufigkeitsverteilung von  $dev$  über alle Auswertepunkte des Testdatensatzes. Dieser umfasst 14.700 Labels ( $3 \times 4.900$ ). Die maximale prozentuale Abweichung über alle Testpunkte beträgt 2 %. Dies zeigt, dass die vereinfachte Berechnung in jedem Fall sehr nah an der Simulation liegt. Somit zeigen die Ergebnisse des Tests, dass sich die oben berechneten Mittelwerte sehr gut zur Berechnung von  $x_{tot}$  und somit auch  $i_{tot}$  für die beiden Räder eignen. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass  $i_{tot}$  lediglich von drei Eingangsgrößen abhängt, der Anzahl der Arbeitsspiele, der Lagerbetriebsstrategie, sowie der Lagerlänge.

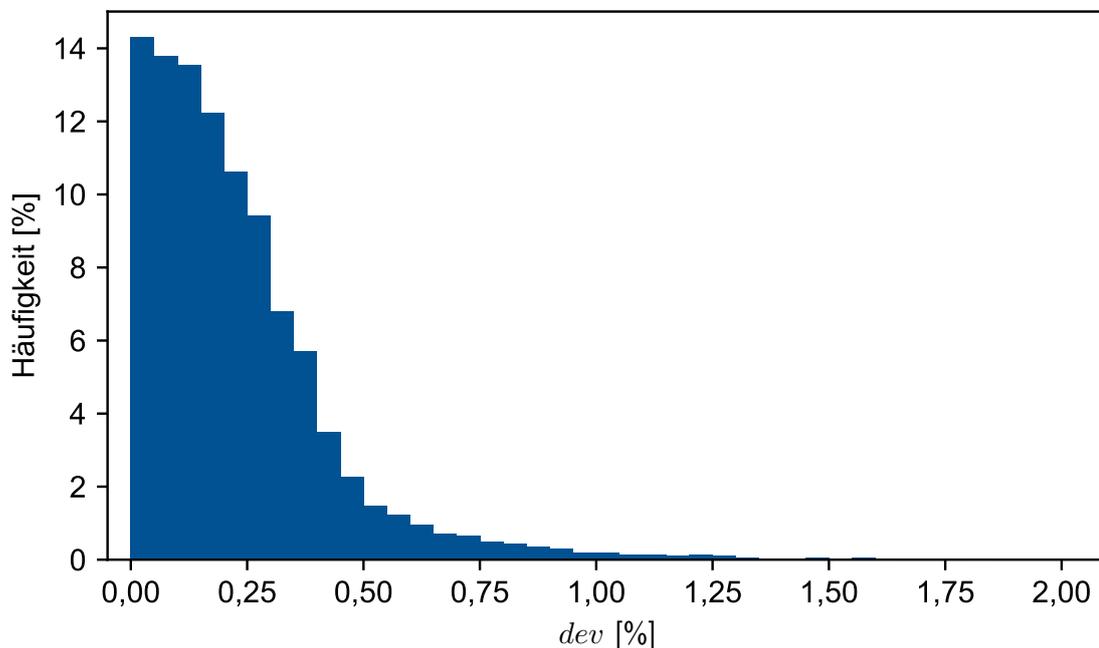


Abbildung 5-8: Häufigkeitsverteilung von  $dev$  über alle Auswertepunkte.



## 6 Softwaredemonstrator

---

Mit den Ergebnissen aus Kapitel 5 stehen Berechnungsmethoden für alle Parameter des Ermüdungsfestigkeitsnachweis der DIN EN 13001-3-3 für RBG zur Verfügung. Die für die Durchführung des statischen Festigkeitsnachweis erforderlichen Parameter sind ebenfalls zum Auslegungszeitpunkt bekannt. Somit sind alle Größen, die die Anwendung der DIN 13001-3-3 auf das Rad-Schiene-System von RBG erfordert, zum Auslegungszeitpunkt bestimmbar.

Auf Basis der bisherigen Ergebnisse wurde im nächsten Schritt ein Softwaredemonstrator erstellt, der die Auslegung des Rad-Schiene-Systems von RBG nach den Nachweisen der DIN EN 13001-3-3 möglich macht. Dieser Demonstrator wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

Der Demonstrator besteht aus drei Modulen: der Eingabe der erforderlichen Parameter, den Auslegungsberechnungen sowie der Ausgabe der Ergebnisse. Der Ablauf einer Berechnung ist schematisch in Abbildung 6-1 dargestellt. Die Umsetzung erfolgte in Python. Zur einfachen Anwendbarkeit wurde der Demonstrator als Online-Tool ausgeführt und mit einer grafischen Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 6-2) ausgestattet. Dieses ist unter [www.mars-softwaredemonstrator.de](http://www.mars-softwaredemonstrator.de) zu finden. Hier findet sich zudem eine kompakte Anleitung des Demonstrators. Das Online-Tool wurde mithilfe der Bibliothek django umgesetzt.

Zudem wurde der Demonstrator als installierbares Paket auf PyPi veröffentlicht. Dies soll die Einbindung weiterer in Python durchgeführten Berechnungen ermöglichen. Der Quellcode findet sich unter [www.github.com/tum-fml/marsDemonstrator](https://www.github.com/tum-fml/marsDemonstrator). Hier befinden sich zudem die Installationsanweisungen unter Python 3 sowie Anwendungsbeispiele.

### 6.1 Eingabe der erforderlichen Parameter

Die Eingangsgrößen des Demonstrators bestehen zum einen aus den Parametern, die die DIN EN 13001-3-3 erfordert, und zum anderen die zur Vorhersage von  $k_c$  und  $x_{tot}$  erforderlichen Parameter. Die Eingabe erfolgt über eine Excel-Datei, welche unter [www.mars-softwaredemonstrator.de/downloadinput](http://www.mars-softwaredemonstrator.de/downloadinput) zum Download bereitsteht. Die Datei enthält zudem detaillierte Beschreibungen zu den Parametern. In der Datei befinden sich fünf Reiter, in welchen die zu berechnenden RBG-Konfigurationen definiert werden. Neben dem Hauptblatt, welches die erforderlichen Parameter enthält, gibt es sowohl für die Räder als auch für die Schiene zwei zusätzliche Blätter, welche die Materialien bzw. die Geometrien definieren.

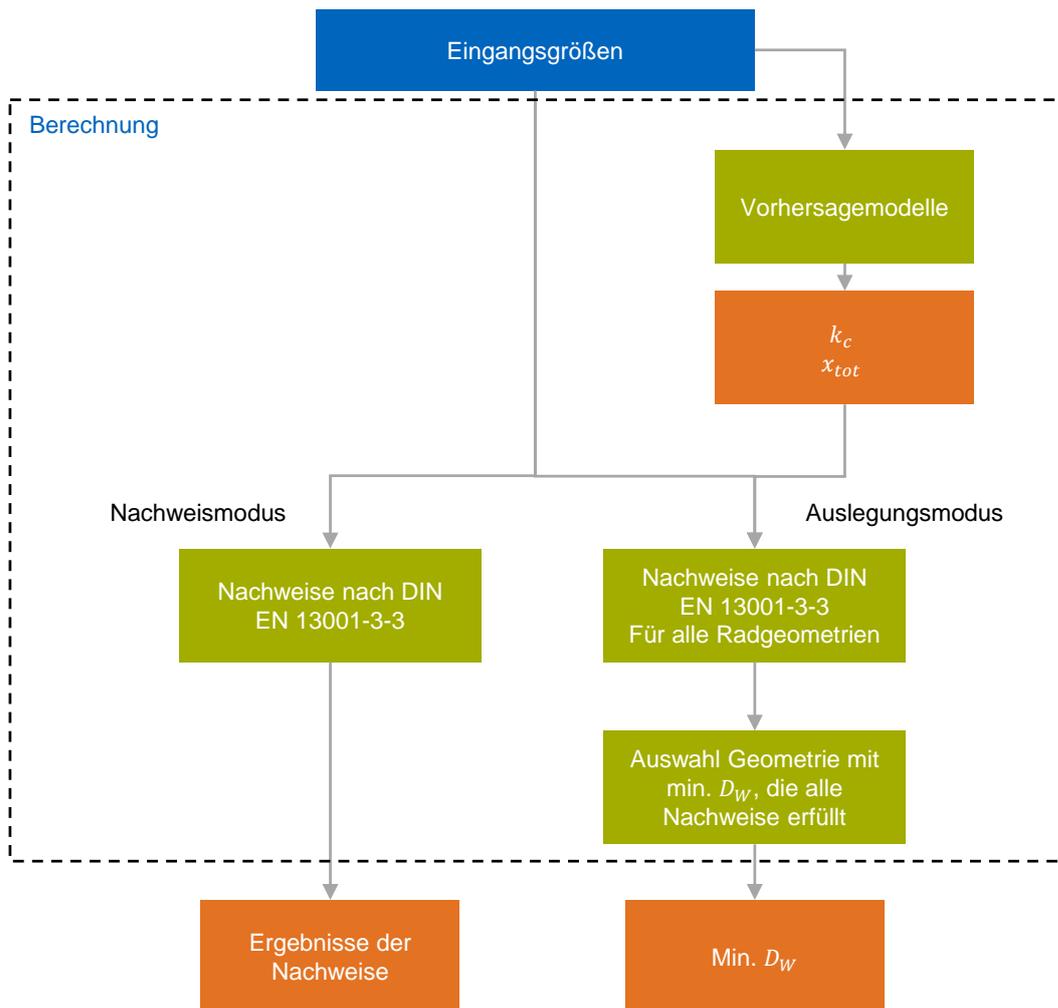


Abbildung 6-1: Ablauf des Softwaredemonstrators

Tabelle C-1 gibt eine Übersicht über die Eingabeparameter, die die DIN EN 13001-3-3 erfordert. Tabelle C-2 zeigt die zur Vorhersage von  $k_c$  und  $x_{tot}$  erforderlichen Parameter. Die Tabellen C-3 und C-4 geben einen Überblick über die Parameter zur Definition von Materialien bzw. Geometrien. Vor der Berechnung ist zudem eine Grundkonfiguration auszuwählen:

- 1-Mast: Fahrtrichtung rechts (vgl. Abbildung 4-1)
- 1-Mast: Fahrtrichtung links (vgl. Abbildung 4-1)
- 2-Mast

Abbildung 6-2: Demonstrator: Benutzeroberfläche

Abschließend ist ein Berechnungsmodus auszuwählen:

- Nachweismodus zur Durchführung der erforderlichen Nachweise für alle definierten RBG-Konfigurationen
- Auslegungsmodus zur Bestimmung der Radgeometrie mit dem kleinsten Durchmesser, die alle Nachweise erfüllt

In der Eingabedatei können beliebig viele RBG-Konfigurationen eingetragen werden. Somit ist es möglich beliebig viele Konfigurationen in einem Durchlauf zu berechnen.

## 6.2 Berechnung und Ergebnisausgabe

Zur Berechnung stehen die beiden o. g. Modi zur Verfügung. Diese werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

### 6.2.1 Nachweismodus

Der Nachweismodus überprüft für die gegebenen RBG-Konfigurationen, ob der statische Festigkeitsnachweis sowie der Ermüdungsfestigkeitsnachweis der DIN EN 13001-3-3 erfüllt sind. Hierzu erfolgt zunächst eine Vorhersage für  $k_c$  und  $x_{tot}$  basierend auf den entwickelten und validierten Vorhersagemodellen. Die Berechnung der Gesamtzahl der Rollkontakte

der Räder erfolgt gemäß Gleichung 5-7. Im Fall der Schiene ist von vier Rollkontakten pro geplantem Arbeitsspiel auszugehen. Die in Abschnitt 5.3 vorgestellten Gauß-Prozesse machen eine Vorhersage für  $k_c$  sowohl für die Räder als auch für die Schiene. Darüber hinaus erfolgt eine Vorhersage für den oberen Wert des Konfidenzintervalls  $k_{c,conf}$ . Dieser gibt dem Anwender Auskunft über die Unsicherheit der Vorhersage von  $k_c$ . Weichen  $k_{c,conf}$  und  $k_c$  stark voneinander ab, so ist von einer unsicheren Vorhersage auszugehen. Darüber hinaus repräsentiert  $k_{c,conf}$  ein Worst-Case-Szenario für  $k_c$ . Somit lässt sich überprüfen, ob eine untersuchte RBG-Konfiguration auch unter Annahme dieses Szenarios alle Nachweise der DIN EN 13001-3-3 erfüllt.

Nach der Vorhersage bzw. Berechnung von  $k_c$  und  $i_{tot}$  erfolgt die Berechnung von  $F_{Rd,s}$  und  $F_{Rd,f}$  für die Räder und die Schiene.  $F_{Rd,f}$  wird sowohl unter Annahme von  $k_c$  als auch unter Annahme von  $k_{c,conf}$  berechnet. Anschließend erfolgt die Überprüfung, ob die beiden Nachweise für beide Räder sowie die Schiene erfüllt sind. Die einzelnen Berechnungsschritte zur Überprüfung der Nachweise sind in Abschnitt 2.3.3 beschrieben.

### 6.2.2 Auslegungsmodus

Der Auslegungsmodus nutzt die DIN EN 13001-3-3, welche eine Nachweisnorm ist, direkt zur Auslegung des Raddurchmessers  $D_W$  für die gegebenen RBG-Konfigurationen. Hierbei werden die Berechnungen des Nachweismodus für sämtliche in der Eingabedatei definierten Radgeometrien durchgeführt. Anschließend wird die Geometrie mit dem kleinsten Raddurchmesser, welche alle Nachweise erfüllt, ausgewählt.

### 6.2.3 Ergebnisausgabe

Die Ergebnisse der Berechnung werden wiederum in einer Excel-Datei zum Download bereitgestellt. Dieses besteht aus zwei Blättern. Das erste Blatt gibt eine Zusammenfassung über die Ergebnisse. Es gibt lediglich an, ob die beiden Nachweise für die Räder sowie die Schiene erfüllt sind. Das zweite Blatt stellt die Ergebnisse detailliert dar. Hier finden sich sämtliche Zwischenergebnisse der Berechnung.

## 7 Vergleich und Diskussion der entwickelten Auslegungsmethode

---

Das folgende Kapitel vergleicht die im Projekt entwickelte Auslegungsmethode mit der bisherigen Auslegung nach DIN 15070 und FEM 1.001. Darauf folgt eine Diskussion der Methode.

### 7.1 Vergleich mit DIN 15070 und FEM 1.001

Mit den bisherigen Ergebnissen liegt eine neue Auslegungsmethode für das Rad-Schiene-System von RBG vor. Diese wird in einem finalen Schritt mit den beiden bisher hauptsächlich angewandten Normen bzw. Richtlinien, der DIN 15070 und der FEM 1.001, verglichen. Ziel ist es zu bestimmen, wie die Auslegungen der drei Methoden bei verschiedenen RBG-Konfigurationen voneinander abweichen. Hierzu werden zunächst zwölf RBG konfiguriert, die realistische Extremwerte der Eingangsgrößen abbilden. Für diese werden im Anschluss eine Auslegung des Raddurchmessers nach der DIN 15070, der FEM 1.001 sowie der im Projekt erstellten Auslegungsmethode nach DIN EN 13001-3-3 durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet.

Die folgenden Abschnitte beschreiben zunächst die untersuchten RBG-Konfigurationen. Im Anschluss wird das konkrete Auslegungsvorgehen entsprechend der drei Methoden zusammengefasst. Der Abschnitt schließt mit einem Vergleich der Ergebnisse.

#### 7.1.1 RBG-Konfigurationen

Die untersuchten RBG sind allesamt 1-Mast RBG mit Fahrtrichtung rechts. Auf eine Differenzierung zwischen 1- und 2-Mast RBG wird verzichtet, da die Wertebereiche der Eingangsgrößen recht ähnlich sind und hier beim Vergleich der Auslegungsmethoden keine großen Unterschiede zu erwarten sind. Anschließend werden aus den konstruktiven Eigenschaften des RBG drei Konfigurationen gebildet, welche die Namen *Groß*, *Mittel*, und *Klein* erhalten. Diese drei Konfigurationen bilden RBG aus den unteren, mittleren und oberen Bereichen der Wertebereiche der Eingangsgrößen ab. Die konstruktiven Konfigurationen sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst. Des Weiteren findet eine Unterscheidung bei der Lagerlänge zwischen  $l_R = 150$  m und  $l_R = 80$  m statt. Eine dritte Unterscheidung findet bei der Zahl der Arbeitsspiele statt. Die beiden Werte betragen  $n_{cycles} = 100.000$  und  $n_{cycles} = 2.000.000$ . Hier gibt es keine Unterscheidung zwischen Rädern und Schiene. Die Lagerlänge und die Anzahl der Arbeitsspiele werden gesondert betrachtet, da sie maßgeblichen Einfluss auf  $i_{tot}$  und somit die Auslegungslebensdauer haben.

Tabelle 7-1: Untersuchten RBG-Konfigurationen

Parameter	Groß	Mittel	Klein
RBG- und Lagerhöhe $h_{SC}$ [m]	45	25	10
Gesamt-RBG: Schwerpunkt in y-Richtung (ohne Hubwagen) $cg_{SC,y}$ [%]	50	20	20
Mast: Masse pro Höhe $m_{M,h}$ [ $\frac{kg}{m}$ ]	350	200	150
Mast: Schwerpunkt in x-Richtung $cg_{M,x}$ [%]	20	20	20
Mast: Zusatzmassen $m_{M,a}$ [kg]	16000	7000	3000
Radstand / Traverse: Länge $l_T$ [m]	8	5	2,5
Traverse: Schwerpunkt in x-Richtung $cg_{T,x}$ [%]	35	35	35
Traverse: Masse pro Länge $m_{T,l}$ [ $\frac{kg}{m}$ ]	450	200	150
Traverse: Zusatzmasse $m_{T,a}$ [kg]	3620,84	1000	800
Maximale Beschleunigung in x-Richtung $a_{max,x}$ [ $\frac{m}{s^2}$ ]	0,5	1,25	2,5
Verschleißzeit in x-Richtung $t_{slip,x}$ [s]	1	1	1
Maximale Geschwindigkeit in x-Richtung $v_{max,x}$ [ $\frac{m}{s}$ ]	5	5	5
Hubwagen: Schwerpunkt in x-Richtung $cg_{L,x}$ [m]	3,2	2	1,1
Hubwagen: Leermasse $m_L$ [kg]	3000	1500	850
Zuladung: durchschnittliche Masse $m_{LD}$ [kg]	1500	500	150
Maximale Beschleunigung in y-Richtung $a_{max,y}$ [ $\frac{m}{s^2}$ ]	2	2	2
Lagerbetriebsstrategie $cm$ [-]	Doppel	Doppel	Doppel

Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Annahmen über die Schienengeometrie, sowie die Rad- und Schienenmaterialien, welche für alle Konfigurationen gleich sind. Diese sind in Tabelle 7-2 und in Tabelle 7-3 zusammengefasst.

Tabelle 7-2: Materialparameter der Räder und der Schiene. Radmaterial: 42CrMo4 Schienenmaterial: R260Mn

	$\sigma_B$ [ $\frac{N}{mm^2}$ ]	HB [ $\frac{N}{mm^2}$ ]	E [ $\frac{N}{mm^2}$ ]	$\nu_P$
Rad	750	225	210000	0,3
Schiene	870	260	210000	0,3

Aus den o. g. drei Unterscheidungen, Größe, Lagerlänge und Anzahl der Arbeitsspiele, werden durch eine vollfaktorielle Kombination insgesamt zwölf Konfigurationen gebildet, für welche eine Auslegung durchgeführt wird. Die zur Auswahl stehenden Radgeometrien umfassen Räder mit einem Raddurchmesser zwischen  $D_W = 200$  mm und  $D_W = 1400$  mm mit einem Inkrement von 10 mm. Die lasttragende Breite aller Räder beträgt  $b_W = 100$  mm. Somit entspricht die effektive lasttragende Breite  $b$  der lasttragenden Breite der Schiene  $b_R$ , was bei RBG den Regelfall darstellt.

Tabelle 7-3: Parameter der Schienengeometrie. Verwendete Schiene: S41-R10

$b_R$ [mm]	$r_k$ [mm]	$r_3$ [mm]
48,1	400	10

### 7.1.2 Auslegung nach DIN 15070

Die Auslegung nach DIN 15070 basiert im Wesentlichen auf dem in 2.3.1 beschriebenen Vorgehen. Die Anwendung der DIN 15070 erfordert eine Wahl der beiden Beiwerte  $c_{2,DIN}$  und  $c_{3,DIN}$ . Der Beiwert  $c_{2,DIN}$  hängt hierbei von der Drehzahl des Laufrads ab, welche aus dem jeweils infrage kommenden Raddurchmesser und der maximalen Geschwindigkeit in x-Richtung bestimmt wird. Anhand der Drehzahl lässt sich  $c_{2,DIN}$  aus Tabelle A-2 entnehmen.

Der Betriebsdauer-Beiwert  $c_{3,DIN}$  hingegen ist frei wählbar in Abhängigkeit der prozentualen Betriebsdauer des Fahrtriebs pro Stunde. Da hier keine Daten vorliegen, werden die Auslegung sowohl unter Anwendung des Maximalwerts  $c_{3,DIN} = 1,25$  als auch des Minimalwerts  $c_{3,DIN} = 0,8$  durchgeführt. Die zulässige Flächenpressung beträgt bei den hier genutzten Rad- und Schienenmaterialien nach Tabelle A-3  $P_L = 7,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ .

Letztlich ist noch das Lastkollektiv  $F_W$  gemäß Gleichung 2-2 zu berechnen. Hierfür werden die beiden Kräfte  $F_{W,min}$  und  $F_{W,max}$  unter Annahme des günstigsten bzw. ungünstigsten Lastfalls berechnet. Dabei wird der Hubwagen an seiner höchsten Position und die auftretenden Beschleunigungen als maximal angenommen. Die Richtungen der Beschleunigungen werden dabei so gewählt, dass die resultierende Kontaktkraft minimal oder maximal ausfällt.

Unter diesen Annahmen wird der Nachweis nach Gleichung 2-1 für alle infrage kommenden Radgeometrien durchgeführt. Anschließend wird die Geometrie mit dem kleinsten Raddurchmesser, welche Gleichung 2-1 erfüllt, ausgewählt.

### 7.1.3 Auslegung nach FEM 1.001

Für die Auslegung nach FEM 1.001 sind ebenfalls zwei Beiwerte  $c_{1,FEM}$  und  $c_{2,FEM}$  festzulegen. Der Drehzahl-Beiwert  $c_{1,FEM}$  ist hierbei identisch mit  $c_{2,DIN}$  der DIN 15070. Daher erfolgt die Auswahl dieses Beiwerts analog. Zur Auswahl eines geeigneten Beiwerts in Abhängigkeit der Triebwerkgruppe  $c_{2,FEM}$  liegen wiederum keine Daten vor. Daher erfolgt sowohl eine Berechnung unter Anwendung des Maximalwerts  $c_{2,FEM} = 1,12$  und des Minimalwerts  $c_{2,FEM} = 0,8$ . Die zulässige Flächenpressung beträgt für die ausgewählten Materialien nach Tabelle A-4  $P_L = 6,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ .

Die Auslegung erfolgt analog zur DIN 15070 nach Gleichung 2-4. Als Lastkollektiv  $\bar{F}_{W,i}$  wird der gleiche Wert wie bei der Auslegung nach DIN 15070 verwendet, da der für RBG relevante Belastungsfall 1 der FEM 1.001 ebenso wie das in der DIN 15070 verwendete Lastkollektiv den regulären Betrieb abdeckt.

#### 7.1.4 Auslegung nach DIN EN 13001-3-3

Die Auslegung nach DIN EN 13001-3-3 erfolgt mithilfe des im Projekts erstellten Auslegungsmodus des Softwaredemonstrators. Hierbei ist zunächst für den statischen Festigkeitsnachweis eine Bemessungskontaktkraft  $F_{Sd,s}$  einzugeben. Hierfür wird der Lastfall A1 nach DIN EN 13001-2 angenommen, welcher die maximalen Lasten im regulären Betrieb abdeckt. Der Hubwagen befindet sich dabei an seiner höchsten Stelle und die auftretenden Beschleunigungen sind maximal. Nach DIN EN 13001-2 wird die Masse des RBG dabei mit einem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{P,SC} = 0,95$  und einem Dynamikbeiwert  $\phi_{SC} = 1,05$  multipliziert. Die Beschleunigungen werden ebenfalls mit einem Dynamikbeiwert  $\phi_a = 1,5$  multipliziert. Dies entspricht dem in der Norm vorgeschriebenen Vorgehen. Da bei der vorliegenden Rad-Schiene-Kombination ein Punktkontakt vorliegt, gilt für die beiden Faktoren  $f_1$  und  $f_2$ :  $f_1 = f_2 = 1,0$ . Da der Schräglaufwinkel  $\alpha_{en}$  laut den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses in der Regel gering ist, wird für den entsprechenden Faktor mit  $f_{f3} = 1,0$  der günstigste Fall angenommen. Der mechanischen Abriebsfaktor beträgt  $f_{f4} = 1,0$ , da laut den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses bei RBG kein Abrasivkorn in der Umgebung des Antriebsrads zu erwarten ist. Tabelle 7-4 fasst die angenommenen Auslegungsparameter für die drei Methoden zusammen.

Tabelle 7-4: Angenommenen Auslegungsparameter der drei Methoden

Parameter	Wert
$c_{3,DIN}$	0,8; 1,25
$P_{L,DIN}$	7,0
$c_{2,FEM}$	0,8; 1,12
$P_{L,FEM}$	6,5
$\phi_{SC}$	1,05
$\phi_a$	1,5
$\gamma_{P,SC}$	0,95
$f_1$	1,0
$f_2$	1,0
$f_{f3}$	1,0
$f_{f4}$	1,0

### 7.1.5 Ergebnisse des Vergleichs

Tabelle 7-5 zeigt die Ergebnisse der drei Auslegungsmethoden. Daraus geht hervor, dass sich die Auslegung nach DIN EN 13001-3-3 teilweise immens von der Auslegung nach DIN 15070 oder FEM 1.001 unterscheidet. In einigen Fällen führt die Auslegung nach DIN EN 13001-3-3 zu erheblich kleineren, in anderen Fällen zu erheblich größeren Raddurchmessern. Dabei zeigen die Ergebnisse, dass dies zum einen stark von der Wahl der Beiwerte,  $c_{3,DIN}$  für die DIN 15070 bzw.  $c_{2,FEM}$  für die FEM 1.001, abhängt. Unter Verwendung der Maximalwerte sind die Raddurchmesser der beiden älteren Auslegungsmethoden fast immer unterdimensioniert. Unter Verwendung der jeweiligen Minimalwerte gibt es sowohl unter- als auch überdimensionierte Raddurchmesser im Vergleich zur Auslegung nach DIN EN 13001-3-3.

Der zweite Faktor, der einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der Auslegungen hat, ist die geplante Lebensdauer bzw. die Anzahl der Arbeitsspiele, für die die Räder nach DIN 13001-3-3, ausgelegt werden. Im Fall der Auslegung auf 100.000 Arbeitsspiele fallen die Räder nach DIN EN 13001-3-3 allesamt kleiner aus, als nach der DIN 15070 und FEM 1.001. Bei der Auslegung auf 2.000.000 Arbeitsspiele sind entweder gleich große oder größere Räder notwendig. Dies verdeutlicht nochmals einen zentralen Schwachpunkt der DIN 15070 und der FEM 1.001, die Nichtberücksichtigung der Auslegungslbensdauer.

Tabelle 7-5: Ermittelte Raddurchmesser der drei verglichenen Methoden in mm

RBG	$l_R$ [m]	$n_{cycles}$ [-]	DIN 15070; $c_{3,DIN} = 0,8$	DIN 15070; $c_{3,DIN} = 1,25$	FEM 1.001; $c_{2,FEM} = 0,8$	FEM 1.001; $c_{2,FEM} = 1,12$	DIN EN 13001-3-3
Groß	150	100.000	740	510	770	390	620
Groß	80	2.000.000	740	510	770	390	1100
Groß	80	100.000	740	510	770	390	550
Groß	150	2.000.000	740	510	770	390	1240
Klein	150	100.000	240	200	210	200	200
Klein	80	2.000.000	240	200	210	200	330
Klein	80	100.000	240	200	210	200	200
Klein	150	2.000.000	240	200	210	200	370
Mittel	150	100.000	390	250	350	200	300
Mittel	80	2.000.000	390	250	350	200	540
Mittel	80	100.000	390	250	350	200	270
Mittel	150	2.000.000	390	250	350	200	600

Die konstruktiven Eigenschaften des RBG sowie die Lagerlänge haben indes keinen erkennbaren Einfluss auf die Unterschiede der Ergebnisse der drei Auslegungsmethoden. Hier fallen die Raddurchmesser nach DIN EN 13001-3-3 in manchen Fällen kleiner und in anderen Fällen größer aus als nach der DIN 15070 und der FEM 1.001.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse des Vergleichs, dass die beiden älteren Auslegungsmethoden, die DIN 15070 und die FEM 1.001, die Räder von RBG teils stark über-, teils stark unterdimensionieren. Die DIN EN 13001-3-3 erfordert bis zu doppelt so große Räder wie die DIN 15070 bzw. die FEM 1.001. In anderen Fällen erlaubt sie etwas mehr als halb so große Räder. Eine derart drastische Unterdimensionierung kann Schäden am Rad-Schiene-System weit vor Erreichen der Auslegungslbensdauer nach sich ziehen. Eine enorme Überdimensionierung verursacht wiederum unnötige Kosten. Daher bietet die genauere Auslegung nach der im Projekt MARS entwickelten Methode einen enormen Mehrwert für Hersteller und Anwender von RBG.

## 7.2 Diskussion der entwickelten Auslegungsmethode

Ergebnis des Forschungsprojekts ist eine Auslegungsmethode für das Rad-Schiene-System von Regalbediengeräten nach der DIN EN 13001-3-3. Diese Auslegung bietet einige Vorteile gegenüber der bisherigen Auslegung nach DIN 15070 oder FEM 1.001. Die zentralen Vorteile sind:

1. Die DIN EN 13001-3-3 berücksichtigt die statische Festigkeit und die Ermüdungsfestigkeit, während die DIN 15070 und die FEM 1.001 lediglich die statische Festigkeit berücksichtigen.
2. Es kommt ein realistisches Lastkollektiv zum Einsatz, welches sämtliche während der Auslegungslbensdauer auftretenden Kontaktkräfte berücksichtigt.
3. Die Anzahl der geplanten Arbeitsspiele findet Berücksichtigung. Damit ist eine Auslegung hinsichtlich der geplanten Lebensdauer möglich. Die Anzahl der geplanten Arbeitsspiele findet sich in der Anzahl der Überrollungen wieder.

Insbesondere die Einführung eines realistischen Lastkollektivs in Form des Kontaktkraftkollektivbeiwerts  $k_c$  stellt einen entscheidenden Vorteil der DIN EN 13001-3-3 dar. Da dieser bisher zum Auslegungszeitpunkt nicht zuverlässig bestimmbar war, wurden im Projekt Modelle des maschinellen Lernens zur möglichst genauen Vorhersage erstellt und anhand eines Simulationsmodells validiert. Die Vorhersagemodelle berechnen zudem ein Konfidenzintervall, das die Quantifizierung der Unsicherheit der Vorhersagen ermöglicht. Damit kann diese Unsicherheit bei der Auslegung Berücksichtigung finden. Weiter wurde ein Berechnungsvorgehen für die zur Anwendung der DIN EN 13001-3-3 benötigte Gesamtzahl

der Rollkontakte  $i_{tot}$  erstellt und ebenfalls anhand eines Simulationsmodells validiert. Somit leistete das Projekt einen wesentlichen Beitrag zur praxisgerechten Anwendung der DIN EN 13001-3-3 für das Rad-Schiene-System von RBG.

Da die vorgestellte Auslegungsmethode eine Reihe bisher unberücksichtigter relevanter Faktoren für die Auslegung des Rad-Schiene-Systems berücksichtigt, ist davon auszugehen, dass diese zu signifikant genaueren Ergebnissen in der Auslegung führt als bisher angewandte Methoden. Der im vorherigen Abschnitt vorgestellte Vergleich zwischen den Auslegungsmethoden zeigt, dass teils enorme Abweichungen zwischen den Ergebnissen der bisher angewandten und neu entwickelten Methode bestehen. Daher ist davon auszugehen, dass die Räder von RBG in der Praxis häufig über- oder unterdimensioniert sind.

Hinsichtlich des Kontaktkraftkollektivbeiwerts  $k_c$  ist anzumerken, dass dieser aktuell keine Schwankungen der Radkräfte infolge von Mastschwingungen berücksichtigt. Dies ist insofern akzeptabel, als der Ermüdungsfestigkeitsnachweis der DIN EN 13001-3-3 bei der Berechnung der Bemessungskontaktkraft keine Dynamikbeiwerte berücksichtigt und somit von einem starrkörperkinetischen Modell ausgeht. Somit ist es sinnvoll bei der Berechnung des Kontaktkraftkollektivbeiwerts ebenfalls von einem starrkörperkinetischen Modell auszugehen. Eine Berücksichtigung von Mastschwingungen würde die Realität allerdings besser abbilden. Diese Ansicht wird ebenfalls vom projektbegleitenden Ausschuss vertreten. Daher fand in 4.4.4 ein Vergleich zwischen der Modellierung mit starrem und elastischem Mast statt. Dieser ergab, dass der daraus resultierende Unterschied bei der Berechnung von  $k_c$  während des Simulationsverlaufs weitgehend konstant ist. Dieser Unterschied lässt sich bei der Anwendung der Auslegungsmethode durch einen manuell festlegbaren Dynamikbeiwert berücksichtigen. Für eine genauere Bestimmung dieses Dynamikbeiwerts sollte zukünftige Forschung allerdings auf ein Vorhersagemodell ähnlich den Modellen zur Vorhersage von  $k_c$  abzielen.

Der Nachweis, ob die Auslegung nach DIN EN 13001-3-3 zuverlässiger ist als bisherige Auslegungsmethoden, kann indes nur in der Praxis erbracht werden. Hierfür ist es notwendig, dass das Rad-Schiene-System von realen RBG nach der im Projekt entwickelten Methode ausgelegt wird und etwaige Schäden dokumentiert werden. Dies ist allerdings nur durch die zukünftige Mitarbeit von RBG-Herstellern möglich.

Des Weiteren ist anzumerken, dass die DIN EN 13001-3-3 und somit auch die hier entwickelte Methode sich hauptsächlich mit der statischen Festigkeit und der Ermüdungsfestigkeit befasst. Der Verschleiß, eine weitere wichtige Schadensart, wird lediglich durch den Schräglaufwinkel bei der Berechnung des Grenzwerts der Bemessungskontaktkraft für Ermüdung  $F_{Rd,f}$  oberflächlich berücksichtigt. Eine Absicherung der Auslegung gegen Gleitverschleiß findet nicht statt. Daher ist ein Forschungsprojekt, das sich primär mit dieser Schadensart befasst, sinnvoll.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

---

Ziel des Forschungsprojekts *Methodik zur praxisgerechten Auslegung des Rad-Schiene-Systems von Regalbediengeräten (MARS)* war die Entwicklung einer neuen Auslegungsmethode für das Rad-Schiene-System von RBG, welches die Schwächen bisher angewandter Methoden behebt. Bisher kommen hauptsächlich die Norm DIN 15070 und die Richtlinie FEM 1.001 zur Auslegung des Rad-Schiene-Systems zum Einsatz. Aufgrund einiger methodischer Schwächen ist die Auslegung nach diesen beiden Methoden allerdings unzureichend und ungenau. Diese Schwächen umfassen insbesondere ein unrealistisches Lastkollektiv sowie eine Nichtberücksichtigung der Auslegungslebensdauer.

Die erwähnten Schwächen werden durch die neuere DIN EN 13001-3-3 behoben. Diese nutzt ein realistisches Lastkollektiv, den Kontaktkraftkollektivbeiwert  $k_c$ , sowie die Gesamtzahl der Rollkontakte während der Auslegungslebensdauer  $i_{tot}$ . In der Praxis sind diese beiden Größen zum Auslegungszeitpunkt allerdings nur schwer bestimmbar.

Daher wurde im Forschungsprojekt zunächst ein Simulationsmodell zur Berechnung dieser beiden Größen erstellt. Dieses nutzt als Eingangsgrößen sämtliche Parameter des RBG und Lagerbetriebs, welche einen potenziellen Einfluss auf die beiden Zielgrößen  $k_c$  und  $i_{tot}$  haben. Die Eingangsgrößen wurden in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss definiert. Somit steht ein Simulationsmodell, welches die beiden zur Auslegung relevanten Parameter berechnet, zur Verfügung. Da dieses Simulationsmodell allerdings für eine praxistaugliche Anwendung eine zu große Rechenzeit aufweist, ist eine direkte Nutzung für die Auslegung nach DIN EN 13001-3-3 nicht sinnvoll.

Im nächsten Schritt wurden daher mithilfe von Methoden des maschinellen Lernens Vorhersagemodelle erstellt, die die Simulation zur Berechnung von  $k_c$  und  $i_{tot}$  ersetzen. Dazu wurden zunächst durch ein Morris Screening aus den Eingangsgrößen des Simulationsmodells diejenigen ausgewählt, welche einen signifikanten Einfluss auf  $k_c$  haben. Aus diesen wurden mithilfe eines Latin Hypercubes Datensätze zum Training und Test von Gauß-Prozess-Modellen zur Vorhersage von  $k_c$  erstellt. Darauf folgte das Training der Vorhersagemodelle sowie ein Test, welcher einen Vergleich mit einer vereinfachten Berechnung von  $k_c$  in Anlehnung an die DIN 15070 und FEM 1.001 einschloss. Dieser zeigte, dass die Gauß-Prozesse die Simulationsergebnisse deutlich besser abbilden, als die vereinfachte Berechnung. Im Anschluss wurde ein Vorgehen zur Berechnung von  $i_{tot}$  erstellt. Dieses basiert wiederum auf einem mithilfe eines Latin Hypercubes erstellten Datensatz. Die Analyse dieser Daten ergab, dass sich  $i_{tot}$  direkt aus der Lagerlänge, der Lagerbetriebsstrategie sowie der Anzahl der Arbeitsspiele berechnen lässt. Somit existiert nun für beide relevanten Auslegungsgrößen ein Vorgehen zur direkten Berechnung ohne die Notwendigkeit einer aufwändigen Simulation.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden im Anschluss in einen Softwaredemonstrator implementiert, welcher zur Auslegung des Rad-Schiene-Systems nach DIN EN 13001-3-3 dient. Somit steht nun eine einfach anzuwendende, genauere Auslegungsmethode zur Verfügung. Diese wurde im Anschluss mit den beiden bereits vorhandenen Methoden verglichen. Dieser Vergleich ergab, dass die Auslegung der beiden bisherigen Methoden teilweise erheblich von der neuen genaueren Auslegung abweicht.

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts haben allerdings einige Einschränkungen. Zum einen finden Mastschwingungen bei der Berechnung des Kontaktkraftkollektivbeiwerts  $k_c$  keine Berücksichtigung. Zukünftige Forschung sollte diese Einschränkung adressieren. Zweitens ist mit diesem Forschungsprojekt noch kein Nachweis erbracht, dass die Auslegung nach DIN EN 13001-3-3 tatsächlich zuverlässiger und genauer ist als nach DIN 15070 oder FEM 1.001. Dieser Nachweis muss erst noch in der Praxis erbracht werden. Letztlich findet die Schadensart Gleitverschleiß in der DIN EN 13001-3-3 und somit auch in der entwickelten Methode keine gesonderte Betrachtung. Daher sollte der Verschleiß Gegenstand von zukünftiger Forschung sein.

## 9 Angaben zur Ergänzung des Schlussberichts gem. IGF-Leitfaden

---

**IGF-Nummer: 20096 N/1, Kurzthema: MARS - Radschiene - RBG**

### 9.1 Verwendung der Zuwendung

#### **Wissenschaftlich-technisches Personal und studentische Hilfskräfte (Einzelansatz A.1 und A.3 des Finanzierungsplans)**

Um die Inhalte zur Entwicklung einer praxisgerechten Auslegungsmethode des Rad-Schiene-Systems von RBG im Forschungsvorhaben bearbeiten zu können, bedurfte es in allen Bereichen der sieben Arbeitspakete Mitarbeitern mit qualifizierter akademischer Ausbildung. Die Analyse der Normen bzw. der Berechnungsrichtlinien, die Erarbeitung der Eingangsgrößen in AP 1 und Erstellung der MKS-Modelle in AP 2 erforderten ein vertieftes mechanisches Verständnis sowie Kenntnisse wissenschaftlicher Recherche- und Bewertungsmethoden. Für die Erstellung der Versuchspläne sowie die Entwicklung und Validierung der Vorhersagemodelle war ein tiefes statistisches Verständnis erforderlich. Die Datenauswertung und Entwicklung des Softwaredemonstrator erforderte eingehende Programmierkenntnisse. Die Auswertung der Methode in AP 7 erforderte Kenntnisse wissenschaftlicher Bewertungsmethoden. Infolgedessen war es notwendig Mitarbeiter der Einstufung TV-L 13 mit der Bearbeitung des Forschungsvorhabens im Umfang von 34 Personenmonaten zu beauftragen. Zur Unterstützung für sich wiederholende Tätigkeiten und Routinearbeiten auf Weisung wurden während der gesamten Projektlaufzeit studentische Hilfskräfte im Umfang von 17 Personenmonaten eingesetzt.

#### **Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)**

Es wurden keine Finanzmittel für Gerätebeschaffungen beantragt.

#### **Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)**

Es wurden keine Finanzmittel für Leistungen Dritter beantragt.

## **9.2 Ergebnistransfer in die Wirtschaft**

Der Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurde mithilfe der geplanten Transfermaßnahmen sichergestellt. Diese gliedern sich in solche während der Projektlaufzeit und solche nach der Projektlaufzeit.

### **9.2.1 Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit**

Tabelle 9-1 enthält die Transfermaßnahmen, die während der Projektzeit stattfanden.

Maßnahme	Rahmen	Zeitraum
A Fortlaufende Diskussion und Abstimmung des Forschungsfortschrittes mit Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA).	<b>A1</b> Vorstellung des Projekts und Diskussion der geplanten Arbeiten; Parameteridentifikation und Festlegung sinnvoller Parameterintervalle	Durchgeführt am 16.01.2019
	<b>A2</b> Vorstellung der ersten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens; Evaluierung der Ergebnisse aus AP 1 - 3	Durchgeführt am 23.07.2020
	<b>A3</b> Zwischenpräsentation, Vorstellung der Vorhersagemodelle, Demonstratorevaluation im industriellen Umfeld	Durchgeführt am 23.07.2020
	<b>A4</b> Abschlusspräsentation, Diskussion der erzielten Ergebnisse	Geplant nach der Projektlaufzeit im I. Quartal 2022
B Vorträge auf Fachtagungen in Industrie und Wissenschaft	<b>B1</b> Präsentation und Tagungsbeitrag auf der ICIEA-EU	Durchgeführt am 08.01.2021
	<b>B2</b> Posterpräsentation auf dem Materialflusskongress	Durchgeführt am 18.03.2021
	<b>B3</b> Präsentation und Tagungsbeitrag auf der ICECCME	Durchgeführt nach Ende der Projektlaufzeit am 07.10.2021
C Veröffentlichungen	<b>C1</b> Vorstellung des Forschungsvorhabens in der Hebezeuge & Fördermittel	Veröffentlicht im Februar 2020
	<b>C2</b> Vorstellung der Projektergebnisse in der Hebezeuge & Fördermittel	Veröffentlicht im November 2021
D Internetdarstellung	<b>D1</b> Vorstellung im Newsletter des am Lehrstuhl fml angesiedelten Logistik-Innovations-Zentrums	Durchgeführt im November 2020 (liz-Newsletter Ausgabe 2020)
	<b>D2</b> Internetauftritt des Forschungsvorhabens auf der Lehrstuhl-Homepage	Online seit 01.02.2019
	<b>D3</b> Ergebnistransfer über den liz-Newsletter	Online seit 01.02.2019
	<b>D4</b> Vorstellung des Softwaredemonstrators auf dem LinkedIn Kanal des Lehrstuhls fml	Online seit Mai 2021
F Übernahme in der Lehre	<b>E1</b> Mitarbeit studentischer Hilfskräfte	Gesamte Projektlaufzeit
	<b>E2</b> Anfertigung von Studienarbeiten im Rahmen des Projekts	Gesamte Projektlaufzeit

Tabelle 9-1: Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

## 9.2.2 Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit und Einschätzung der Realisierbarkeit

Tabelle 9-2 enthält die geplanten Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit.

Maßnahme	Rahmen	Zeitraum
G Beratung	<b>G1</b> Beratung von Unternehmen zu konkreten Problemstellungen	Ab Ende 2021
	<b>G2</b> Schulungsangebote über Veranstaltungen des Logistik-Innovations-Zentrums	Ab Januar 2022
H Dissertation	<b>H1</b> Weitere Verfolgung des Themas nach Abschluss der Forschungsarbeiten in Form einer Dissertation.	2022/23
I Veröffentlichungen	<b>I1</b> Veröffentlichung des Abschlussberichts auf der Homepage des Lehrstuhls fml sowie in gedruckter Form.	IV. Quartal 2021
	<b>I2</b> Ergebnisse und Demonstrator werden bei Lehrstuhlbesichtigungen der Wirtschaft vorgeführt	Ab 2022
J Einbringung der erarbeiteten Ergebnisse in den Lehrbetrieb	<b>J1</b> Ergebnisse des Forschungsprojekts werden in den Lehrbetrieb am Lehrstuhl fml eingebunden (u.a. Vorlesung Maschinensystemtechnik)	Ab 2022
K Ergebnistransfer in die Wirtschaft	<b>K1</b> Die im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse und Zusammenhänge stehen nach Projektende interessierten Unternehmen frei zugänglich zur Verfügung.	Ab Ende 2021
	<b>K2</b> Der prototypisch entwickelte Softwaredemonstrator wird über die Lehrstuhl-Homepage interessierten Unternehmen zugänglich gemacht	Ab Ende 2021

Tabelle 9-2: Geplante Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Die Umsetzung der geplanten Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit kann voraussichtlich trotz der vorherrschenden Einschränkungen vor dem Hintergrund der fortwährenden COVID-19-Pandemie nahezu wie vorgesehen erfolgen. Veranstaltungen des Logistik-Innovations-Zentrums werden adaptiv auf die aktuelle pandemische Situation entweder in Präsenz oder als Online-Veranstaltungen angeboten. Gleiches gilt für die Beratung von Unternehmen zu konkreten Problemstellungen. Der Projektleiter wird das Thema im Rahmen einer Dissertation weiterverfolgen. Der Forschungsbericht wird noch dieses Jahr veröffentlicht und wird in gedruckter Form am Lehrstuhl fml sowie auf der Homepage der Technischen Universität München verfügbar sein. Der Demonstrator ist frei im Internet verfügbar

und kann interessierten Industrievertretern sowohl vor Ort am Lehrstuhl fml als auch online präsentiert werden. Die Forschungsergebnisse werden zum Wintersemester 2022 in die Lehrveranstaltung Maschinensystemtechnik aufgenommen.

### 9.2.3 Zusammenfassung der wichtigsten bereits erfolgten Maßnahmen

#### Veröffentlichungen und Vorträge

- Laile, M.; Fottner, J.: Räder für RBG richtig auslegen. Hebezeuge, Fördermittel (1-2), 2020, 40-41
- Laile, M.; Fottner, J.: Computing a Realistic Load Collective for the Rail-Wheel Contact of Stacker Cranes. 2021 The 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications(Europe) (ICIEA 2021-Europe), Association for Computing Machinery, 2021 (Barcelona, Spain)
- Laile, M.; Fottner, J.: Genaue Auslegung von RBG-Rädern. Hebezeuge, Fördermittel (11-12), 2020, 34-36
- Laile, M.; Fottner, J.: Using Machine Learning to Predict Accurate Load Collectives for the Rail/Wheel System of Stacker Cranes. 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME). 2021. pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECCME52200.2021.9590992.

#### Studienarbeiten

- Camila Abdala Gehling: Ermittlung von Einflussgrößen auf die Auftretenden Radkräfte bei Regalbediengeräten Mithilfe der Mehrkörpersimulation
- Kevin Kelichhaus: Analyse verschiedener Modellierungsansätze und ihres Einflusses auf die Kräfte zwischen Rad und Schiene eines Regalbediengeräts mit der Mehrkörpersimulation
- Peter Preindl: Ermittlung von Referenzszenarien zur Simulation der mechanischen Belastungen an den Rädern automatischer Lagersysteme
- Zaeem Khan Muhammad Ghori: Anwendung von Machine Learning zur Vorhersage der Radlasten von Regalbediengeräten
- Kevin Kelichhaus: Entwicklung statistischer Modelle für die Vorhersage der Radlasten von Regalbediengeräten

### **9.3 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzens der Forschungsergebnisse**

Von einer beanspruchungsgerechten Auslegung des Rad-Schiene-Systems profitieren neben den Herstellern von Regalbediengeräten, insbesondere die Anwender in der Logistik und damit auch deren Kunden und somit eine große Anzahl von KMU aus unterschiedlichen Branchen. Herstellerseitig steht eine sichere und leicht anzuwendende Auslegungsmethode zur Verfügung, die teure Reklamationen und damit verbundene Rechtsstreitigkeiten verhindert und die Qualität der entwickelten RBG erhöht. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens unterstützen somit die Hersteller von RBG direkt bei ihren eigenen Entwicklungen. Neben einigen Großunternehmen gehört hierzu eine große Zahl von KMU, die in der Regel keine eigenen Forschungsbereiche besitzen, und die deshalb gerne auf vorgefertigte Normen und Richtlinien zurückgreifen, die den aktuellen Stand der Technik und Forschung wiedergeben. Somit profitieren KMU unmittelbar von den Forschungsergebnissen. Anwenderseitig werden durch die entwickelte Auslegungsmethodik Ausfallzeiten des RBG und Reparaturkosten für Laufräder und Schienen reduziert. Dies wirkt sich positiv auf den erzielbaren Lagerdurchsatz und die Wirtschaftlichkeit des Lagerbetriebs aus. Hiervon profitieren Anwender der unterschiedlichsten Branchen. Beispielhaft zu nennen sind hier die Logistikbranche, der Groß- und Einzelhandel sowie der gesamte produzierende Mittelstand. Darunter sind insbesondere eine große Zahl von KMU zu sehen. Die Reduktion von Ausfallzeiten und Reparaturkosten für intralogistische Anlagen (insbesondere RBG) wirkt sich somit unmittelbar positiv auf die Wettbewerbsfähigkeit der betreffenden Unternehmen und Branchen aus. KMU profitieren aus diesem Grund wesentlich von einer zuverlässigen und praxistauglichen Auslegung des Rad-Schiene-Systems von RBG. Neben den Anwendern von RBG profitieren ferner deren Kunden unmittelbar von einer erhöhten Zuverlässigkeit der intralogistischen Anlagen, da die Teile- bzw. Produktversorgung für diese Unternehmen verbessert wird. Zusammenfassend lässt sich daher feststellen, dass die entwickelte praxistaugliche Auslegungsmethodik für das Rad-Schiene-System von RBG Potenzial für einen großen branchenübergreifenden Nutzerkreis insbesondere im Umfeld von KMU besitzt.

## Literaturverzeichnis

---

- [Arn-2019] Arnold, Dieter; Furmans, Kai: Materialfluss in Logistiksystemen. 7. Auflage. Springer, Berlin: 2019.
- [Bro-2014] Brouzoulis, Jim: Wear impact on rolling contact fatigue crack growth in rails. In: *Wear* 314.1-2 (2014), S. 13–19.
- [Cam-2007] Campolongo, Francesca; Cariboni, Jessica; Saltelli, Andrea: An effective screening design for sensitivity analysis of large models. In: *Environmental modelling & software* 22.10 (2007), S. 1509–1518.
- [Dea-2017] Dean, Angela; Voss, Daniel; Draguljić, Danel u. a.: Design and analysis of experiments. Springer: 2007.
- [DIN-15070] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Cranes; basic calculation of crane rail wheels. Berlin, 1977.
- [DIN-EN-13001-3-3] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Konstruktion allgemein - Teil 3-3: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von. Berlin, 2014.
- [DIN-EN-13001-2] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Kransicherheit - Konstruktion allgemein - Teil 2: Lasteinwirkungen. Berlin.
- [Ekb-2014] Ekberg, Anders; Åkesson, Bengt; Kabo, Elena: Wheel/rail rolling contact fatigue—Probe, predict, prevent. In: *Wear* 314.1-2 (2014), S. 2–12.
- [Ekb-2002] Ekberg, Anders; Kabo, E.; Andersson, H.: An engineering model for prediction of rolling contact fatigue of railway wheels. In: *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 25.10 (2002), S. 899–909.
- [FEM-1001] Fédération Européenne de la Manutention: Rules for the Design of Hoisting Appliances. 1998.
- [FEM-9851] Federation Europeenne de la Manutention: Terminologie: Leistungsnachweis für Regalbediengeräte - Spielzeiten. 2003.
- [FEM-9101] Federation Europeenne de la Manutention: Terminologie: Terminologie - Regalbediengeräte - Definitionen. 1997.
- [Gar-2018a] Gardner, Jacob u. a.: Product kernel interpolation for scalable Gaussian processes. In: *International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*. PMLR. 2018, S. 1407–1416.

- [Gar-2018b] Gardner, Jacob R u. a.: GPyTorch: Blackbox Matrix-Matrix Gaussian Process Inference with GPU Acceleration. In: Advances in Neural Information Processing Systems. 2018.
- [GfT-2002] GfT: 7: Tribologie–Verschleiß, Reibung, Definitionen, Begriffe, Prüfung. In: Gesellschaft für Tribologie eV (GfT) (2002).
- [Gri-2015] Griemert, Rudolf; Römisch, Peter: Fördertechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden: 2015.
- [Her-1881] Herzt, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper, Journal über die reine angewandte Mathematik 92, S. 156-171. Berlin: 1881.
- [Hes-1983] Hesse, Wilhelm: Verschleißverhalten des Laufrad-Schiene-Systems fördertechnischer Anlagen. Diss. Ruhr-Univ., Inst. für Konstruktions-technik, 1983.
- [Jos-2020] Joshi, Ameet V.: Machine learning and artificial intelligence. Springer: 2020.
- [Kal-1990] Kalker, Joost Jacques: Three-dimensional elastic bodies in rolling contact. Bd. 2. Solid mechanics and its applications. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Bosten, London: 1990.
- [Kel-2019] Kelichhaus, Kevin: Analyse verschiedener Modellierungsansätze und ihres Einflusses auf die Kräfte zwischen Rad und Schiene eines Regalbediengeräts mit der Mehrkörpersimulation. Semesterarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [Kel-2021] Kelichhaus, Kevin: Entwicklung statistischer Modelle für die Vorhersage der Radlasten von Regalbediengeräten. Masterarbeit. Technische Universität München, 2021.
- [Kle-2016] Kleppmann, W: Versuchsplanung–Produkte und Prozesse optimieren. Taschenbuch. 2016.
- [Koe-2007] Koether, Reinhard: Technische Logistik. 3. akt. und erw. In: Aufl. München, Wien: Hanser (2007).
- [Lai-2021a] Laile, Mathias; Fottner, Johannes: Computing a Realistic Load Collective for the Rail-wheel Contact of Stacker Cranes. In: 2021 The 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications(Europe). ACM: 2021.
- [Lai-2021b] Laile, Mathias; Fottner, Johannes: Using Machine Learning to Predict Accurate Load Collectives for the Rail/Wheel System of Stacker Cranes. In: 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME). IEEE: 2021, S. 1–6.

- 
- [Lan-2015] Lantschner, Daniel: Spielzeit automatischer Lagersysteme mit mehreren Übergabepunkten: Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2015. fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik Techn. Univ, München: 2015.
- [Lew-2009] Lewis, Roger; Olofsson, Ulf: Basic tribology of the wheel–rail contact. In: Wheel–rail interface handbook. Elsevier: 2009, S. 34–57.
- [Lin-2018] Linsel, Peter: Leichtbau am Beispiel eines Kleinteile-Regalbediengerätes-Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit durch Einsatz neuer Materialien. Diss. KIT-Bibliothek, 2018.
- [Mag-2016] Magnus, Kurt; Popp, Karl; Sextro, Walter: Schwingungen: Grundlagen–Modelle–Beispiele. Springer-Verlag: 2016.
- [Mor-1995] Morris, Max D; Mitchell, Toby J: Exploratory designs for computational experiments. In: Journal of statistical planning and inference 43.3 (1995), S. 381–402.
- [Mor-1991] Morris, Max D.: Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. In: Technometrics 33.2 (1991), S. 161–174.
- [Ras-2008] Rasmussen, Carl Edward; Williams, Christopher K. I.: Gaussian processes for machine learning. 3. print. Adaptive computation and machine learning. MIT Press, Cambridge, Mass.: 2008.
- [Log-2017] Regalbediengerät schlägt Shuttle. In: Logistik Heute 5 (25.05.2017), S. 10–12. Url: [https://www.wiso-net.de/document/LOGI\\_\\_1006854](https://www.wiso-net.de/document/LOGI__1006854).
- [Ril-2017] Rill, Georg; Schaeffer, Thomas: Grundlagen und Methodik der Mehrkörpersimulation: Vertieft in Matlab-Beispielen, Übungen und Anwendungen. Springer-Verlag: 2017.
- [Rüc-2020] Rucker, Andreas; Rief, J.; Fottner, Johannes: An investigation of mean energy demand, performance and reference cycles for stacker cranes. In: FME Transactions 48.2 (2020), S. 307–312.
- [Rud-2016] Ruder, Sebastian: An overview of gradient descent optimization algorithms. In: arXiv preprint arXiv:1609.04747 (2016).
- [San-2003] Santner, Thomas J u. a.: The design and analysis of computer experiments. Bd. 1. Springer: 2003.
- [San-2014] Santner, Thomas J. u. a.: The design and analysis of computer experiments. Bd. 1. Springer: 2014.
- [Sch-2018] Schmidt, Thorsten: Innerbetriebliche Logistik. Springer: 2018.
- [See-2005] Seemüller, Stefan: Durchsatzberechnung automatischer Kleinteilelager im Umfeld des elektronischen Handels. In: (2005).

- [Sie-2017] Siebertz, Karl; van Bebber, David; Hochkirchen, Thomas: Statistische Versuchsplanung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 2017.
- [Sim-2018] SIMPACK: Dokumentation. 2018.
- [Smi-2017] Smith, Leslie N: Cyclical learning rates for training neural networks. In: 2017 IEEE winter conference on applications of computer vision (WACV). IEEE. 2017, S. 464–472.
- [Tun-2007] Tunna, J.; Sinclair, J.; Perez, J.: A review of wheel wear and rolling contact fatigue. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 221.2 (2007), S. 271–289.
- [Wil-2015] Wilson, Andrew G.; Nickisch, Hannes: Kernel Interpolation for Scalable Structured Gaussian Processes (KISS-GP). In: CoRR abs/1503.01057 (2015).
- [Wol-2016] Wolf, Philip: Analyse und Simulation des Rad-Schiene-Kontakts bei Palettenregalbediengeräten. Masterarbeit. Technische Universität München, 2016.

# Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1-1	Arbeitspakete des Forschungsprojekts	3
Abbildung 2-1	Aufbau RBG: Links: 1-Mast; Rechts 2-Mast. Nach [Rüc-2020]	5
Abbildung 2-2	Links: Einzelspielstrategie, Mitte: Doppelspielstrategie, Rechts: Vierfachspielstrategie	7
Abbildung 2-3	Unterscheidung Bewegungsarten. Links: Gleiten. Rechts: Rollen. Nach [GfT-2002]	8
Abbildung 2-4	Unterscheidung zwischen Linien- und Punktkontakt. Links: Linienkontakt; Rechts: Punktkontakt. Nach [DIN-EN-13001-3-3]	12
Abbildung 3-1	Beispielhafte MKS in SIMPACK: Zwei starre (rigid) Körper sind durch kinematische Verbindungselemente mit dem Koordinatensystem (blau) und miteinander (grün) verbunden. Zudem sind sie durch ein Kraffelement (rot) verbunden.	19
Abbildung 3-2	Beispielhafter Systemaufbau nach [Sie-2017]	20
Abbildung 3-3	Ablauf Trainingsprozess Gradient Descent	27
Abbildung 3-4	Beispielhafter GP. Rote Punkte: Trainingsdaten. Schwarze Linie: Mittelwert der Vorhersagen. Grauer Bereich: Konfidenzintervall der Vorhersagen.	30
Abbildung 4-1	Bewegungsrichtung des 1-Mast RBG. Links: Bewegungsrichtung rechts. Rechts: Bewegungsrichtung links.	35
Abbildung 4-2	Simulation der Bewegungsverläufe: Ruck (grün), Beschleunigung (dunkelblau), Geschwindigkeit (hellblau), Position (schwarz)	36
Abbildung 4-3	Querschnitt eines RBG-Masts definiert durch die Länge ( $l$ ), die Breite ( $b$ ) sowie die beiden Wandstärken $t_1$ und $t_2$	43
Abbildung 4-4	Kraftverlauf Vorderrad	49
Abbildung 4-5	Vergleich $^{mev}\sqrt{k_c}$ am Vorderrad und der Schiene. Dunkelblau: starrer Mast. Hellblau: elastischer Mast	50

Abbildung 4-6	Prozentuale Abweichung zwischen elastischer und starrer Modellierung	51
Abbildung 5-1	Verlauf von $k_c$ am Vorderrad über eine Simulationsdauer von 10.000.000 Arbeitsspielen. Das simulierte RBG ist in Abschnitt 4.4.4 beschrieben.	55
Abbildung 5-2	Häufigkeitsverteilung der Abweichungen $dis(53.000)$ . x-Achse bei 2 % abgeschnitten zur besseren Darstellbarkeit	57
Abbildung 5-3	Ergebnisse des Morris-Screenings	58
Abbildung 5-4	Vorgehen zur Erstellung der Datensätze zum Training und zum Test der GP. Für jede Grundkonfiguration gibt es drei Auswertepunkte, die beiden Räder und die Schiene, für welche separate GP erstellt werden.	61
Abbildung 5-5	Obere Reihe: Verlauf der marginal log likelihood während des Trainingsprozesses. Untere Reihe: Verlauf der Metrik während des Trainingsprozesses. Spalten: Grundkonfigurationen; von links nach rechts: 1-Mast Fahrtrichtung links, 1-Mast Fahrtrichtung rechts, 2-Mast. Dunkelblau: Vorderrad, Hellblau: Hinterrad, Schwarz: Schiene	63
Abbildung 5-6	Häufigkeitsverteilung der betragsmäßigen, prozentualen Abweichung zwischen den Vorhersagen und den Labels des Testdatensatzes. x-Achse bei 50 % zur besseren Darstellbarkeit abgeschnitten.	65
Abbildung 5-7	Vorgehen zur Erstellung der Datensätze zum Training und zum Test der Vorhersage von	67
Abbildung 5-8	Häufigkeitsverteilung von $dev$ über alle Auswertepunkte.	69
Abbildung 6-1	Ablauf des Softwaredemonstrators	72
Abbildung 6-2	Demonstrator: Benutzeroberfläche	73

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 3-1	Beispielhafter Placket-Burman Versuchsplan mit zwölf Versuchen und 11 (A-K) Faktoren. Quelle: [Sie-2017]	21
Tabelle 4-1	Konstruktive Eigenschaften 1	32
Tabelle 4-2	Konstruktive Eigenschaften 2	33
Tabelle 4-3	Bewegungsparameter	34
Tabelle 4-4	Lagerparameter	34
Tabelle 4-5	Versuch Zeitschritt: angefahrene Positionen in x-Richtung	39
Tabelle 4-6	Versuch Zeitschritt: Werte der relevanten Eingangsgrößen	39
Tabelle 4-7	Versuch Zeitschritt Ergebnis	39
Tabelle 4-8	Berechnung der Gesamtmassen und Schwerpunkte der Hauptbaugruppen	41
Tabelle 4-9	Verbindungselemente in der MKS	44
Tabelle 4-10	Modellvergleich: Bewegungsparameter	47
Tabelle 4-11	Modellierungsvergleich: RBG- und Lagerparameter	48
Tabelle 4-12	CPU- und RAM-Daten des verwendeten Laptops	50
Tabelle 5-1	Quantile der Häufigkeitsverteilung über die Abweichungen über alle 9.000 Datenpunkte (drei Auswertepunkte, zwei Räder und die Schiene, für 3.000 RBG-Konfigurationen	56
Tabelle 5-2	Morris-Screening Parameter	58
Tabelle 5-3	Parameter zur Erstellung von Vorhersagemodellen für $k_c$	59
Tabelle 5-4	Parameter Optimierung LHD	60
Tabelle 5-5	Abweichungen Vorhersage Gauß-Prozesse und Basismodell	65
Tabelle 5-6	Eingangsgrößen $i_{tot}$	67
Tabelle 5-7	Versuch Zeitschritt Parameter	68
Tabelle 7-1	Untersuchten RBG-Konfigurationen	76

Tabelle 7-2	Materialparameter der Räder und der Schiene. Radmaterial: 42CrMo4 Schienenmaterial: R260Mn	76
Tabelle 7-3	Parameter der Schienengeometrie. Verwendete Schiene: S41-R10	77
Tabelle 7-4	Angenommenen Auslegungsparameter der drei Methoden	78
Tabelle 7-5	Ermittelte Raddurchmesser der drei verglichenen Methoden in mm	79
Tabelle 9-1	Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	87
Tabelle 9-2	Geplante Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	88

# A Anhang A - Anhänge der DIN 15070, FEM 1.001 und DIN EN 13001-3-3

Tabelle A-1: Betriebsdauerbeiwert der DIN 15070  $c_{3,DIN}$ . Quelle: [DIN-15070]

Betriebsdauer des Fahrtriebs (bezogen auf 1 Stunde)	$c_{3,DIN}$
bis 16 %	1,25
über 25 % bis 40 %	1,12
über 40 % bis 63 %	1
über 63 %	0,9

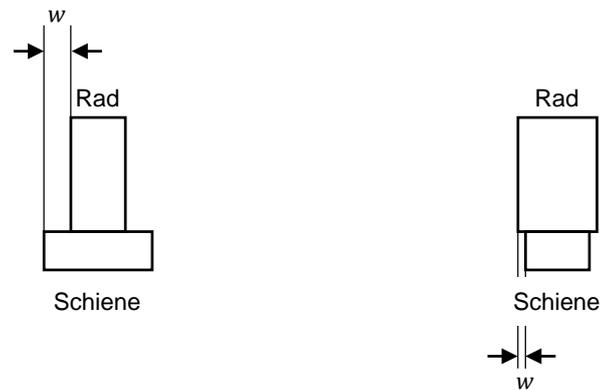


Abbildung A-1: Bestimmung der vorstehenden Nichtkontaktfläche  $w$ . Nach [DIN-EN-13001-3-3]

Tabelle A-2: Drehzahlbeiwert der DIN 15070  $c_{2,DIN}$  und FEM 1.001  $c_{1,FEM}$ . Quellen: [DIN-15070], [FEM-1001]

Drehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	$c_{2,DIN}$ bzw. $c_{1,FEM}$
200	0,66
160	0,72
125	0,77
112	0,79
100	0,82
90	0,84
80	0,87
71	0,89
63	0,91
56	0,92
50	0,94
45	0,96
40	0,97
35,5	0,99
31,5	1
28	1,02
25	1,03
22,4	1,04
20	1,06
18	1,07
16	1,09
14	1,1
12,5	1,11
11,2	1,12
10	1,13
8	1,14
6,3	1,15
5,6	1,16
5	1,17

Tabelle A-3: Zulässige Flächenpressung der DIN 15070, Quelle: [DIN-15070]

Zugfestigkeit des Schienenwerkstoffs	Zugfestigkeit des Radwerkstoffs	$P_L$ [ $\frac{N}{mm^2}$ ]
$\geq 500 \frac{N}{mm^2}$	$\leq 320 \frac{N}{mm^2}$	2,8
	$\geq 410 \frac{N}{mm^2}$	3,6
	$\geq 490 \frac{N}{mm^2}$	4,5
	$\geq 590 \frac{N}{mm^2}$	5,6
$\geq 690 \frac{N}{mm^2}$	$\geq 740 \frac{N}{mm^2}$	7,0

Tabelle A-4: Zulässige Flächenpressung der FEM 1.001. Quelle: [FEM-1001]

Zugfestigkeit des Radwerkstoffs	$P_L$ [ $\frac{N}{mm^2}$ ]
$> 500 \frac{N}{mm^2}$	5
$> 600 \frac{N}{mm^2}$	5,6
$> 700 \frac{N}{mm^2}$	6,5
$> 800 \frac{N}{mm^2}$	7,2

Tabelle A-5: Beiwert in Abhängigkeit der Triebwerksgruppe der FEM 1.001  $c_{2,FEM}$ . Quelle: [FEM-1001]

Triebwerksgruppe	$c_{2,FEM}$
M1 bis M4	1,12
M5	1
M6	0,9
M7 bis M8	0,8

Tabelle A-6: Auswahl des Faktors  $f_1$  der DIN EN 13001-3-3 für Linienkontaktfälle. Für Punktkontaktfällen gilt:  $f_1 = 1$ . Dabei ist:

$w$ : Breite der vorstehenden nicht Kontaktfläche (vgl. Abbildung A-1)

$r_3$ : Schiene: Radius der Schienenkante; Rad: Radius der Radkante

Quelle: [DIN-EN-13001-3-3]

$r_3/w$	$f_1$
$r_3/w \leq 0,1$	0,85
$0,1 < r_3/w \leq 0,8$	$[0,58 + 0,15 \cdot r_3/w]/0,7$
$r_3/w \geq 0,8$	1

Tabelle A-7: Auswahl des Faktors  $f_{f3}$  der DIN EN 13001-3-3. Quelle: [DIN-EN-13001-3-3]

Schräglaufwinkel $\alpha_{en}$	$f_{f3}$
$\alpha_{en} \leq 0,005$ rad	1
$\alpha_{en} > 0,005$ rad	$\sqrt[3]{\frac{0,005}{\alpha_{en}}}$

Tabelle A-8: Auswahl des Faktors  $f_{f3}$  der DIN EN 13001-3-3. Quelle: [DIN-EN-13001-3-3]

Umgebung der Antriebsräder	$f_{f4}$
mit Abrasivkorn	0,95
ohne Abrasivkorn	1

Tabelle A-9: Faktor  $f_2$  der DIN EN 13001-3-3 für ungleichmäßige Flächenpressung bei Linienkontakt. In Abhängigkeit der Toleranzklassen (TK) nach ISO 12488-1. Für Punktkontaktfällen gilt:  $f_2 = 1$ . Quelle: [DIN-EN-13001-3-3]

	TK 1	TK 2	TK 3	TK 4
Räder mit selbstausrichtender Aufhängung	1	1	0,95	0,9
Nicht selbstausrichtende Aufhängung der Räder, Schiene montiert auf einer elastischen Unterlage	0,9	0,85	0,8	0,7
Nicht selbstausrichtende Aufhängung der Räder, Schiene montiert auf einer starren Unterlage	0,8	0,75	0,7	0,6

## **B Anhang B - Ergebnisse des Morris Screenings**

---

Tabelle B-1: Morris Screening: Ergebnisse 1-Mast RBG

Parameter	Vorderrad		Hinterrad		Schiene	
	$\mu^*$	$\sigma$	$\mu^*$	$\sigma$	$\mu^*$	$\sigma$
$h_{SC}$	0,226451	0,147005	0,239354	0,149181	0,164739	0,111084
$cg_{SC,y}$	0,058873	0,03397	0,057913	0,031794	0,042559	0,02953
$m_{M,h}$	0,02269	0,020297	0,01969	0,016075	0,025339	0,033541
$cg_{M,x}$	0,085171	0,094519	0,091539	0,09843	0,078546	0,12368
$m_{M,a}$	0,021375	0,021661	0,0238	0,022837	0,018545	0,017597
$l_T$	0,193122	0,121369	0,177166	0,097052	0,163913	0,156472
$cg_{T,x}$	0,017954	0,021859	0,016497	0,019881	0,020457	0,038086
$m_{T,l}$	0,010172	0,00864	0,009413	0,009397	0,012941	0,026995
$m_{T,a}$	0,007587	0,007111	0,00929	0,008328	0,012688	0,017416
$D_W$	0,003417	0,002678	0,003239	0,002733	0,003113	0,003819
$m_W$	0,005056	0,004899	0,0056	0,006755	0,005373	0,00803
$a_{max,x}$	0,452097	0,219171	0,430284	0,23165	0,306248	0,140492
$t_{slip,x}$	0,009515	0,012821	0,007142	0,011491	0,012868	0,03176
$v_{max,x}$	0,032113	0,02484	0,026599	0,029305	0,040144	0,06861
$cg_{L,x}$	0,038335	0,066915	0,035315	0,057616	0,045415	0,07208
$m_L$	0,0784	0,060761	0,070725	0,056575	0,097863	0,132611
$m_{LD}$	0,022012	0,022993	0,020811	0,017112	0,023168	0,026915
$a_{max,y}$	0,021065	0,026023	0,028367	0,04466	0,01977	0,025591
$t_{slip,y}$	0,000191	0,000292	0,000147	0,000221	0,000311	0,000483
$v_{max,y}$	0,002062	0,003275	0,002019	0,00314	0,002692	0,007777
$cg_{L,y}$	0,00427	0,004731	0,004348	0,004868	0,003251	0,003976
$l_R$	0,031323	0,046521	0,025224	0,042586	0,015561	0,028878
$d_R$	0,0000882	0,000148	0,0000658	0,00011	0,000276	0,000426
$h_{CELL}$	0,000352	0,000506	0,000199	0,000309	0,000867	0,003469
$so_R$	0,0000706	0,000115	0,0000428	0,0000779	0,000268	0,000397
$cap_L$	0,001542	0,001719	0,002858	0,003083	0,003675	0,005552
$cm$	0,0000905	0,000148	0,000068	0,000117	0,000369	0,000507
$md_{SC}$	0,076149	0,079894	0,076166	0,080474	0,017402	0,03723

Tabelle B-2: Morris Screening: Ergebnisse 2-Mast RBG

Parameter	Vorderrad		Hinterrad		Schiene	
	$\mu^*$	$\sigma$	$\mu^*$	$\sigma$	$\mu^*$	$\sigma$
$h_{SC}$	0,284473	0,125574	0,280096	0,111209	0,204311	0,110318
$cg_{SC,y}$	0,078867	0,040499	0,074063	0,041153	0,057563	0,043417
$m_{M,h}$	0,039916	0,037104	0,043902	0,034447	0,029113	0,038229
$cg_{M,x}$	0,116605	0,040968	0,124709	0,055787	0,112796	0,172701
$m_{M,a}$	0,029875	0,025011	0,030846	0,027645	0,029002	0,039686
$l_T$	0,253789	0,087043	0,256958	0,080983	0,178318	0,091757
$cg_{T,x}$	0,042128	0,021496	0,046478	0,027059	0,052648	0,084436
$m_{T,l}$	0,018234	0,016022	0,013848	0,017428	0,017412	0,023644
$m_{T,a}$	0,015392	0,015419	0,012967	0,012721	0,015191	0,022254
$D_W$	0,004643	0,003568	0,004831	0,003459	0,004534	0,006803
$m_W$	0,00415	0,004369	0,004861	0,004843	0,004735	0,007468
$a_{max,x}$	0,482624	0,224373	0,474521	0,222015	0,363288	0,159476
$t_{slip,x}$	0,005444	0,007295	0,004919	0,007284	0,006188	0,010231
$v_{max,x}$	0,045812	0,03416	0,034843	0,029908	0,046327	0,07221
$cg_{L,x}$	0,01015	0,008589	0,009963	0,007745	0,028721	0,046447
$m_L$	0,037633	0,02148	0,042283	0,022639	0,025058	0,018991
$m_{LD}$	0,047458	0,024556	0,04943	0,023106	0,033296	0,023213
$a_{max,y}$	0,029022	0,027164	0,028791	0,028032	0,020179	0,020712
$t_{slip,y}$	0,000169	0,000238	0,00013	0,000162	0,000351	0,000493
$v_{max,y}$	0,001579	0,002038	0,001959	0,002983	0,002471	0,005734
$cg_{L,y}$	0,004136	0,003477	0,00392	0,003139	0,002982	0,003109
$l_R$	0,026052	0,026253	0,022287	0,027139	0,018614	0,025213
$d_R$	0,0000606	0,0000959	0,0000734	0,000119	0,000389	0,000662
$h_{CELL}$	0,000703	0,001526	0,000373	0,000812	0,000575	0,001193
$so_R$	0,0000766	0,000117	0,0000719	0,000121	0,000736	0,0024
$cap_L$	0,003553	0,004906	0,005482	0,004783	0,019085	0,021866
$cm$	0,0000914	0,000144	0,000064	0,000115	0,00032	0,000492
$md_{SC}$	–	–	–	–	–	–



## **C Anhang C - Eingabedaten des Softwaredemonstrators**

---

Tabelle C-1: Eingabeparameter DIN EN 13001-3-3

Parameter	Einheit	Anmerkungen
Radgeometrie	[-]	Definiert unter Blatt Radgeometrie
Schienenengeometrie	[-]	Definiert unter Blatt Schienenengeometrie
Radmaterial	[-]	Definiert unter Blatt Radmaterial
Schienenmaterial	[-]	Definiert unter Blatt Schienenmaterial
Minderungsfaktor für ungleichmäßige Flächenpressung $f_2$	[1]	Berücksichtigt ungleiche Flächenpressung im Linienkontaktfall
Mechanischer Abriebsfaktor $f_{f4}$	[1]	Berücksichtigt Abrieb durch unsaubere Umgebung
Breite der vorstehenden Nichtkontaktfläche $w$	[mm]	Entsteht durch unterschiedliche Breiten der Räder und der Schiene. Gibt die Länge des größeren Überstands an.
Schräglaufwinkel $\alpha_{en}$	[rad]	Schräglaufwinkel der Räder
Bemessungskontaktkraft für Ermüdung Rad $F_{Sd,f,w}$	[kN]	Bei Eingabe von 0 erfolgt Berechnung durch Demonstrator entsprechend der Berechnung innerhalb der Simulation in Kapitel 4. Hat keinen Einfluss auf Ergebnis des Ermüdungsfestigkeitsnachweises
Bemessungskontaktkraft für Ermüdung Schiene $F_{Sd,f,r}$	[kN]	Bei Eingabe von 0 erfolgt Berechnung durch Demonstrator entsprechend der Berechnung innerhalb der Simulation in Kapitel 4. Hat keinen Einfluss auf Ergebnis des Ermüdungsfestigkeitsnachweises
Bemessungskontaktkraft für statische Festigkeit Rad $F_{Sd,s,w}$	[kN]	Zur Durchführung des statischen Festigkeitsnachweises. Berechnung gemäß DIN EN 13001-3-3 erfolgt durch den Anwender/die Anwenderin.
Bemessungskontaktkraft für statische Festigkeit Schiene $F_{Sd,s,r}$	[kN]	Bei Eingabe von 0 erfolgt Berechnung durch Demonstrator entsprechend der Berechnung innerhalb der Simulation in Kapitel 4. Hat keinen Einfluss auf Ergebnis des Ermüdungsfestigkeitsnachweises
Relative Anzahl der Rollkontakte Rad $v_c$	[1]	Kann eingegeben werden, wenn eine Berechnung durch den Demonstrator nicht erwünscht ist
Relative Anzahl der Rollkontakte Schiene $v_c$	[1]	Kann eingegeben werden, wenn eine Berechnung durch den Demonstrator nicht erwünscht ist
Dynamikbeiwert für $k_c$	[1]	Berücksichtigt Mastschwingungen bei Berechnung von $k_c$ . Es wird ein Wert im Bereich [1; 1,1] (vgl. Abschnitt 4.4.4) vorgeschlagen.

Tabelle C-2: Eingabeparameter zur Berechnung von  $k_c$  und  $i_{tot}$

Parameter	Einheit	Anmerkungen
RBG- und Lagerhöhe	[m]	
Gesamt-RBG: Schwerpunkt in y-Richtung (ohne Hubwagen)	[%]	% der RBG-Höhe
Mast: Masse pro Höhe	$[\frac{kg}{m}]$	
Mast: Schwerpunkt in x-Richtung	[%]	% des Radstands
Mast: Gesamtmasse	[kg]	Aus der Masse pro Höhe des Masts und der Gesamtmasse werden seine Zusatzmassen berechnet
Radstand / Traverse: Länge	[m]	
Traverse: Masse pro Länge	$[\frac{kg}{m}]$	
Traverse: Gesamtmasse	[kg]	Aus der Masse pro Länge der Traverse und der Gesamtmasse werden ihre Zusatzmassen berechnet
Traverse: Schwerpunkt in x-Richtung	[%]	
Hubwagen: Leermasse	[kg]	
Zuladung: durchschnittliche Masse	[kg]	
Hubwagen: Schwerpunkt in x-Richtung	[% , m]	1-Mast: Abstand zum Mastschwerpunkt 2-Mast: % des Radstands
Lagerlänge	[m]	
Maximale Geschwindigkeit in x-Richtung	$[\frac{m}{s}]$	
Maximale Beschleunigung in x-Richtung	$[\frac{m}{s^2}]$	
Maximale Beschleunigung in y-Richtung	$[\frac{m}{s^2}]$	
Verschleißzeit in x-Richtung	[s]	
Geplante Anzahl der Arbeitsspiele für die Räder oder die Schiene	[-]	
Geplante Anzahl der Arbeitsspiele für die Räder oder die Schiene	[-]	
Lagerbetriebsstrategie	[-]	

Tabelle C-3: Materialparameter

Parameter	Einheit	Anmerkungen
Elastizitätsmodul $E$	$[\frac{N}{mm^2}]$	
Gehärtete Oberfläche	$[-]$	Ja (1) oder nein (0)
Streckgrenze des Materials unterhalb der gehärteten Oberfläche $f_y$	$[\frac{N}{mm^2}]$	Wenn gehärtet, dann vor der Härtung
Tiefe der gehärteten Schicht $z$	[mm]	Nur wenn gehärtet
Einheitenkonforme Härte $HB$	$[\frac{N}{mm^2}]$	
Querkontraktionszahl $\nu_P$	$[-]$	

Tabelle C-4: Geometrieparameter

Parameter	Einheit	Anmerkungen
Lasttragende Breite $b_W$ bzw. $b_R$	[mm]	
Schiene: Radius des gewölbten Schienenkopfes; Rad: zweiter Radradius $r_k$	[mm]	
Schiene: Radius der Schienenkante; Rad: Radius der Radkante $r_3$	[mm]	
Raddurchmesser $D_W$	[mm]	Nur für Räder