

Stochastische Optimierung von Eisenbahn-Radprofilen

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Ing. Stefan Hartmann

Tag der mündlichen Prüfung:	11. November 2019
Referent:	Prof. Dr. Peter Gratzfeld
Korreferent:	Prof. Dr. Corinna Salander

Kurzfassung

Die Gestalt von Rad- und Schienenprofilen hat einen entscheidenden Einfluss auf das Verschleißverhalten und damit auf die Lebensdauer und die Instandhaltungskosten von Rädern und Schienen. Die Suche nach verschleiß-optimalen Radprofilen beschäftigt Wissenschaft und Bahnbetreiber daher bereits seit vielen Jahrzehnten. Die Entwicklung der Computertechnologie eröffnet hierbei stetig neue Möglichkeiten und führt zu einer fortlaufenden Verbesserung von Auslegungs- und Gestaltungsmethoden. In dieser Arbeit wird eine Gestaltungsmethode vorgestellt, die es ermöglicht, das Radprofil eines Fahrzeugs für den Einsatz auf einem gegebenen Streckennetz maßzuschneidern. Hierzu werden Fahrdynamiksimulationen und Verschleißberechnungen mit zwei Methoden der stochastischen Optimierung verknüpft: dem *Genetischen Algorithmus (GA)* und dem *Simulated Annealing (SA)*. Zunächst wird hierzu ein Verfahren entwickelt, das die Verlaufs- und Gleis-lagecharakteristik eines ganzen Streckennetzes zu einem kurzen, 4-6 km langen Streckenkollektiv zusammenführt und so den Einsatz von Fahrdynamiksimulationen in iterativen Optimierungsprozessen erleichtert. Am Beispiel einer Niederflurstraßenbahn wird anschließend mit beiden stochastischen Optimierungsansätzen je ein neues, optimiertes Radprofil berechnet und dessen Verschleißverhalten mit dem des Referenzprofils des Fahrzeugbetreibers verglichen. Das Simulated-Annealing-Verfahren wird zudem zur Optimierung des Radprofils eines Eurofima-Reisezugwagens verwendet. Das Verschleißverhalten des optimierten Reisezugwagen-Radprofils wird dem des S1002-Standardprofils gegenübergestellt. Zuletzt werden die Vor- und Nachteile beider Optimierungsansätze herausgearbeitet. Die Ergebnis-

se zeigen, dass beide Optimierungsansätze prinzipiell zur Optimierung von Radprofilen geeignet sind. Die Eignung variiert jedoch je nach Art der vorhandenen Rechnerinfrastruktur. Während Simulated Annealing auf Systemen mit wenigen Prozessorkernen sehr effizient eingesetzt werden kann, ist der Genetische Algorithmus in der Zahl der nutzbaren Prozessorkerne unbeschränkt und erzielt bei Einsatz entsprechender Hardware daher potenziell bessere Leistungen. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass dem Verfahren zur Bildung von Streckenkollektiven eine große Bedeutung zukommt und auf diesem Gebiet weitere Forschungsarbeiten notwendig sind.

Abstract

The shape of wheel and rail profiles is of crucial importance for the wear performance of railway wheels and rails and has a major impact on the maintenance costs of railway systems. Since the beginning of the railway-era, a lot of research has therefore been done to find the optimal shape for wheel and rail profiles. During the last few decades, the ongoing development of IT kept widening the possibilities of researchers, as it allowed for the engagement of more and more complex contact and wear models in the design process of wheels and rails. The work at hand develops a methodology that allows to find the optimal wheel profile for any given combination of vehicle and track. To achieve this, a vehicle dynamics (MBS) and wear simulation is coupled with two different optimization techniques: *Simulated Annealing (SA)* and *Evolutionary Algorithm (EA)*. Even with current IT, keeping the total runtime of iterative design-processes in combination with MBS simulations at an acceptable level is a challenging task. Therefore, as a first step, a technique is described that allows to map the characteristics of a track, including its irregularities, to a short load collective with a length of 4-6 km. Two different vehicles, a tram and a Eurofima-Coach, are then used as an example to find optimal wheel profiles for a given track, using SA and EA optimization techniques. The performance of the resulting wheel profiles is compared to the original wheel profiles of these vehicles, and the strengths and weaknesses of both optimization techniques are worked out. The results show that both optimization techniques are suitable for the optimization of wheel profiles. Which methodology works best, heavily depends on the design of the available IT-infrastructure and the available software licenses.

While SA is very efficient on systems with few CPU cores, EA naturally utilizes as many cores and MBS instances as the user desires and can therefore be scaled without limits. The results also show both, the importance of a good load collective design, and the need for further research in this topic.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als akademischer Mitarbeiter am Teilinstitut Bahnsystemtechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Peter Gratzfeld, dem Inhaber des Lehrstuhls Bahnsystemtechnik, für die Übernahme des Hauptreferats, die kritische wissenschaftliche Begleitung meiner Arbeit und das ungewöhnlich große entgegengebrachte Vertrauen. Mein Dank gilt zudem Frau Prof. Dr. Corinna Salander vom Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart für die Übernahme des Korreferats sowie dem Inhaber des Lehrstuhls für Gerätekonstruktion und Maschinenelemente, Herrn Prof. Dr. Sven Matthiesen, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Bedanken möchte ich mich auch bei allen Kollegen des Teilinstituts Bahnsystemtechnik für die kollegiale Arbeitsatmosphäre und die zahlreichen Denkanstöße. Ein besonderer Dank gebührt hierbei meinem langjährigen Bürogenossen Herrn Stefan Haag und meinem Kurzzeit-Kollegen Herrn Felix Haupt, die beide stets bereit waren, sich die auftretenden fachlichen Schwierigkeiten anzuhören und Lösungsansätze zu diskutieren.

Außerhalb des KIT bedanke ich mich bei Herrn Martin Schwickert und Herrn Dr. Alois Starlinger der Stadler Rail AG für die freundliche Bereitstellung eines Fahrzeugmodells des Stadler GTW, auch wenn das Modell in der Arbeit letztendlich nicht zur Anwendung kam. Des Weiteren danke ich Herrn Dirk Nicklisch und Herrn Dr. Manfred Zacher von der DB Netz AG für die freundliche Bereitstellung von Gleislagemessschrieben.

Schließlich bedanke ich mich bei alljenen, die diese Arbeit überhaupt erst möglich gemacht haben. Hier sind insbesondere meine ehemaligen Haupt-

und Werkrealschullehrer Herr Dieter Riehm und Frau Heidingsfelder-Munser zu nennen, die mir durch ihren guten Unterricht und ihre fantastische Sozialkompetenz den Spaß am Lernen zurückgebracht haben, sowie meine Eltern, die mich immer unterstützt und mir das Studium am KIT ermöglicht haben.

Zuletzt danke ich der besten Frau der Welt, Verena Schwarz, für ihre unendliche Geduld und die großartige Unterstützung sowohl während meiner Zeit am KIT als auch während der nebenberuflichen Fertigstellung der vorliegenden Arbeit.

Karlsruhe, im Juli 2019

Stefan Hartmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Gleislagefehler	5
2.1.1	Definition, Normung und Entstehungsursachen	5
2.1.2	Beschreibung stochastischer Gleislagefehler zur Verwendung in Simulationen	7
2.2	Einfluss von Rad- und Schienenprofil auf die Kinematik der Rad-Schiene-Interaktion	10
2.3	Rad-Schiene-Kontakt	13
2.3.1	Relativbewegungen im Kontaktgebiet	14
2.3.2	Kontaktmodelle	16
2.4	Verschleiß	20
2.4.1	Verschleißmechanismen	21
2.4.2	Verschleißregime und Verschleißarten	23
2.4.3	Verschleißmodelle	26
2.5	Rollkontaktermüdung (RCF)	29
2.5.1	Arten der Rollkontaktermüdung	29
2.5.2	RCF-Modelle	30
2.6	Radprofilgestaltung	31
2.7	Metaheuristische Optimierung	36

2.7.1	Optimierungsproblem	37
2.7.2	Evolutionäre Optimierung (EA/GA)	38
2.7.3	Simulated Annealing (SA)	43
3	Optimierungsprozess	49
3.1	Wahl der Optimierungsmethode	52
3.2	Designziel und Zielfunktion	53
3.2.1	Einrichtungsfahrzeug	55
3.2.2	Zweirichtungsfahrzeug	57
3.3	Modell des Radprofils	61
3.4	Wahl der Randbedingungen	62
3.5	Solver-Settings der MKS-Simulation	63
3.6	Konfiguration der Optimierungsalgorithmen	64
4	Fahrzeugmodelle	67
4.1	Niederflurstraßenbahn	67
4.2	Eurofima-Reisezugwagen	70
5	Gleismodell	75
6	Bildung von Streckenkollektiven	77
6.1	Methode	78
6.2	Kollektiv des Streckenverlaufs	79
6.2.1	Erstellen fiktiver Streckennetze	80
6.2.2	Streckennetz A	81
6.2.3	Streckennetz B	84
6.2.4	Bewertung	85
6.3	Erweitern des Kollektivs um Gleislagefehler	89
6.3.1	Vorgehen	90
6.3.2	Ergebnis	92

7 Optimierungsszenario	99
7.1 Niederflurstraßenbahn	99
7.2 Eurofima-Reisezugwagen	100
8 Ergebnisse	101
8.1 Niederflurstraßenbahn	101
8.1.1 Simulated Annealing (SA)	102
8.1.2 Genetischer Algorithmus (GA)	105
8.2 Eurofima-Reisezugwagen	107
8.2.1 Simulated Annealing (SA)	109
9 Fazit	113
9.1 Eignung des iterativen Designverfahrens	113
9.2 Eignung von Simulated Annealing und Genetischem Algorithmus im Designverfahren	114
10 Zusammenfassung	117
11 Ausblick	119
A Anhang	125
A.1 Anhang 1	125
A.2 Anhang 2	128
Abbildungsverzeichnis	131
Tabellenverzeichnis	133

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Formelzeichen

δR	Rollradiendifferenz	mm
Δs	Gleitdistanz	m
A	Kontaktfläche	mm ²
a	Größere Halbachse der Kontaktellipse	m
b	Kleinere Halbachse der Kontaktellipse	m
$C_1..C_8$	Clusterblock	–
F	Kraft	N
$f(\cdot), F(\cdot)$	Funktion, Zielfunktion	–
FI	Ermüdungsindex (Fatigue Index)	–
G	Penaltyfaktor	–
g	Spurweite	mm
$g(\cdot)$	Akzeptanzfunktion	–
G_C	Gleislagefehler eines Clusters	–
H	Härte	Pa
I	Iteration	–
i	Variable	–
j	Zeitschritt	–
k	Proportionalitätskonstante	–
k	Werkstoffparameter	Pa
k_p	Zahl der Kontaktpunkte	–
N	Normalkraft	N
N	Zahl der Parameter einer Zielfunktion	–
N	Zeitschritte im Betrachtungszeitraum	–

n	Bei Berechnung v. Gleislagekollektiven: Streckenabschnitt der Länge 100 m	–
n	Zeitschritt	–
n	Zählvariable	–
P	Iterationsphase (SA)	–
p	Druck / Kontaktdruck	Pa
Q	Radaufstandskraft	N
R	Ortsfrequenz	1/m
r	Radius	m
s	Schlupf	–
s	Strecke	m
T	Tangentialkraft / Traktionskraft	N
T	Temperatur (SA)	K
T	Zeitraum/Gesamtzeit	s
t	Zeit	s
U	Zufallszahl	–
u	Überhöhung	mm
v	Geschwindigkeit	m/s
V_m	Volumetrischer Materialabtrag	m ³
v_s	Gleitgeschwindigkeit	m/s
w	Umfangsgeschwindigkeit	m/s
w_z	Verschleiß in Normalenrichtung	mm
X	Lösungsraum	–
Y	Führungskraft	N
x	Längsrichtung im kartesischen Koordinatensystem	mm
y	Querrichtung im kartesischen Koordinatensystem	mm
z	Hochachse im kartesischen Koordinatensystem	mm
$\Delta\varphi$	Überhöhungswinkel	mrad
γ	Schlupf	%
λ	Wellenlänge	m

μ	Reibkoeffizient	–
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s
σ	Standardabweichung	–
τ	Traktionskoeffizient	–
$\vec{\epsilon}$	Parametervektor der Zielfunktion	–

Indizes

1, 2, 3, 4, 5, 6	Radsatznummer
100m	auf 100 m langen Streckenabschnitt bezogen
akt. / aktuell	aktueller Wert
l	links
max	maximal
n	Zählvariable
R	lokale Koordinate des Radprofils
r	rechts
s	Schlupf
Start	Startwert
surf	Surface / Oberfläche
tan	tangential
x	Komponente in x-Richtung
y	Komponente in y-Richtung
z	Komponente in z-Richtung

Abkürzungen

AL	Aufmerksamkeitsschwelle
DB	Deutsche Bahn AG
DoF	Freiheitsgrad (Degree of Freedom)
EA	Evolutionärer Algorithmus
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung

ERRI	European Rail Research Institute (Nachfolger des ORE)
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	Schnelle Fourier-Transformation (Fast Fourier Transform)
FHG	Freiheitsgrad
FI_{surf}	Oberflächenermüdungsindex (Surface Fatigue Index)
GA	Genetischer Algorithmus
IAL	Soforteingriffsschwelle
IL	Eingriffsschwelle
KCR	Kowloon-Canton Railway
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
MBS	Multi Body Simulation (Mehrkörpersimulation)
MKS	Mehrkörpersimulation
ORE	Forschungs- und Versuchsamt des UIC
RAILab	Rollendes Analyse- und Inspektions-Labor
RCF	Rollkontaktermüdung (Rolling Contact Fatigue)
RET	Rotterdamse Elektrische Tram N.V.
RiL	Richtlinie
RRD	Rollradiendifferenz
RS	Radsatz
SA	Simulated Annealing
SAS	Stochastic Adaptive Search
UB	Übergangsbogen
UIC	Internationaler Eisenbahnverband
VBK	Verkehrsbetriebe Karlsruhe

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die Profilgeometrie von Eisenbahnrädern und Schienen hat einen entscheidenden Einfluss auf den Verschleiß und das Ermüdungsverhalten des Rad-Schiene-Systems und damit auf die Kosten, die für Instandhaltung und Instandsetzung von Rädern und Schienen entstehen. Das S1002-Standard-Radprofil, das sich heute europaweit im Einsatz befindet, hat seinen Ursprung in den frühen 1970er Jahren und orientiert sich an den Verschleißprofilen der damaligen Zeit. Durch gestiegene Achslasten, höhere Fahrgeschwindigkeiten, bessere Traktionsausnutzung und veränderte Fahrzeugkonzepte auf der einen Seite sowie veränderte Trassierungsbedingungen und Instandhaltungsstrategien auf der anderen, haben sich die Anforderungen an das Rad-Schiene-System über die Jahre jedoch erheblich verändert, sodass die ehemals gute Formstabilität des S1002-Profiles bei Verschleiß im heutigen Betrieb häufig nicht mehr gegeben ist. Zugleich hat die Entwicklung der IT völlig neue Möglichkeiten für die Gestaltoptimierung von Radprofilen eröffnet. Während in der Vergangenheit teure und zeitaufwändige Fahr- oder Prüfstandsversuche für die Evaluierung des Verschleiß- und Ermüdungsverhaltens eines neuen Profilentwurfs bereits in einem frühen Entwicklungsstadium unumgänglich waren, ermöglichen Computersimulationen heute eine schnelle, effiziente und Einsatzszenarien-individuelle Bewertung dieser Qualitäten. Hierdurch wurde die Voraussetzung für die Anwendung hochiterativer Gestaltungs- und Optimierungsverfahren geschaffen, die prinzipiell eine gezielte Anpassung des Radprofils an gegebene Betriebsbedingungen

ermöglichen. Ein solches hochiteratives Gestaltungsverfahren wird in der vorliegenden Arbeit vorgestellt.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Verschleißoptimierung von Eisenbahn-Radprofilen. Die Methode soll ermöglichen, das Radprofil eines Schienenfahrzeugs für den Einsatz auf einem gegebenen Streckennetz, das durch Schienenprofil, Streckenführung und Gleislage charakterisiert wird, maßzuschneidern. Die Bewertung des Verschleißverhaltens soll sich nicht auf einen global angewandten Verschleißindex stützen, sondern das Verschleißbild, das sich am Radprofil einstellt, auf lokaler Ebene auswerten. Zudem soll die Methode die Berücksichtigung mehrerer Designziele und Randbedingungen ermöglichen, wie es für Optimierungen im komplexen System Bahn notwendig ist. Das primäre Designziel der Methode ist die Homogenisierung des Verschleißbildes des Rades, d. h. die Minimierung von Verschleißspitzen entlang der Radprofilbreite. Als sekundäres Designziel wird u. a. die Minimierung eines Ermüdungsindex gewählt, um im Zuge der Optimierung eine bloße Verschiebung des Ermüdungs-Verschleiß-Verhältnisses zuungunsten des Ermüdungsverhaltens zu vermeiden. Zum Erreichen dieser Ziele wird zunächst ein Verfahren zur Bildung von Streckenkollektiven entwickelt. Das Verfahren erlaubt die Zusammenfassung eines Streckennetzes beliebiger Länge zu einem 4–6 km langen Streckenkollektiv. Das Kollektiv wird hierbei so gestaltet, dass die Verschleißbilder, die beim Befahren des Netzes und des Kollektivs entstehen, sich lediglich um einen Skalierungsfaktor voneinander unterscheiden. Anschließend wird eine Mehrkörper-Fahrdynamik- und Verschleißsimulation nacheinander mit den stochastischen Optimierungsverfahren *Genetische Optimierung* (GA) und *Simulated Annealing* (SA) zu einer iterativen Optimierungsschleife verknüpft. Die Optimierungsverfahren werden zur Optimierung von Radprofilen einer Niederflurstraßenbahn sowie eines

Reisezugwagens verwendet. Die Ergebnisse der Optimierungsläufe werden ausgewertet, die Eignung der beiden Verfahren zur Optimierung von Radprofilen bewertet und ihre jeweiligen Vor- und Nachteile dargelegt. Die Fahrdynamik- und Verschleißsimulationen dieser Arbeit erfolgen in der Software *SimPack*, unter Verwendung eines Kontaktmodells, das auf der *STRIPES*-Methode basiert. Der Verschleiß wird mit *Archards Wear Law* berechnet. Die Ablaufsteuerung der Optimierung, die Gütebewertung der Radprofile sowie der Ablauf der Optimierungsalgorithmen GA und SA selbst erfolgen im Softwarepaket MATLAB.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit einer umfangreichen Recherche der technischen Grundlagen des Rad-Schiene-Systems sowie des Standes der Forschung zu den Themenbereichen Verschleißsimulation und Radprofiloptimierung. Die Ergebnisse sind in Kapitel 2 zusammengefasst. In Kapitel 3 werden die Designziele der Profilloptimierung definiert und Randbedingungen festgelegt. Der Optimierungsprozess wird vorgestellt, notwendige Schnittstellen von Simulation und Optimierungsalgorithmen geschaffen und die Optimierungsalgorithmen SA und GA für die MKS-gestützte Optimierung von Radprofilen konfiguriert. Der Optimierungsprozess wird im Laufe der Arbeit auf zwei Beispielfahrzeuge mit stark unterschiedlicher Laufcharakteristik angewendet: eine Straßenbahn der Verkehrsbetriebe Karlsruhe, deren MKS-Modell am Institut für Fahrzeugsystemtechnik bereits durch Heck [52] entwickelt wurde, sowie ein Eurofima-Reisezugwagen der Deutschen Bahn, dessen MKS-Modell, aufbauend auf Dokumenten des Internationalen Eisenbahnverbands UIC, für diese Arbeit entstand. Beide Fahrzeugmodelle werden in Kapitel 4 ausführlich vorgestellt. Aufgrund des iterativen Charakters des Optimierungsverfahrens muss die rechenintensive Mehrkörper- und Verschleißsimulation während der Optimierung sehr oft durchlaufen werden. Um den Zeitbedarf hierfür gering zu halten, wird in Kapitel 6 zunächst

ein Verfahren entwickelt, das erlauben soll, die Charakteristik ausgedehnter Streckennetze in einem kurzen, 4 km langen *Streckenkollektiv* nachzubilden. Die Entwicklung dieses Kollektivbildungsverfahrens erfolgt in zwei Stufen. Zunächst wird in Abschnitt 6.2 nur der *Streckenverlauf* eines Streckennetzes zu einem Streckenverlaufskollektiv zusammengefasst und das Verfahren an fiktiven Strecken unterschiedlicher Verlaufscharakteristik verifiziert. Aufbauend darauf wird im zweiten Schritt in Abschnitt 6.3 eine Methode zur Ergänzung des Verlaufskollektivs um ein Gleislagekollektiv vorgestellt, sodass auch Streckennetze mit inhomogener Gleislagequalität zu einem Kollektiv zusammengefasst werden können. Diese Methode wird mit Hilfe von Verlaufsdaten und Gleislagemessungen einer realen Bahnstrecke simulativ erprobt. In Kapitel 7 werden anschließend die Optimierungsszenarien vorgestellt, bevor in Kapitel 8 die Ergebnisse der Optimierungsläufe der SA- und der GA-Optimierung ausgewertet werden. Kapitel 9 beleuchtet die Stärken und Schwächen der Optimierungsverfahren *Simulated Annealing* und *Genetische Optimierung* und gibt Empfehlungen zu deren Einsatz bei der Optimierung von Radprofilen. In Kapitel 10 wird die Arbeit schließlich zusammengefasst und in Kapitel 11 ein umfassender Ausblick über notwendige sowie über sinnvolle weitere Schritte auf dem Weg zur anwendungsorientierten, einsatzindividuellen Radprofiloptimierung gegeben.

2 Grundlagen

2.1 Gleislagefehler

2.1.1 Definition, Normung und Entstehungsursachen

Nach DIN EN 13848-1 ist die *Qualität der Gleisgeometrie* der „Grad der Abweichungen der festgelegten Parameter, welche den Fahrkomfort beeinflussen oder die Sicherheit beeinträchtigen, von den mittleren oder geplanten Werten in vertikaler und horizontaler Richtung“ [5]. In dieser Arbeit werden Abweichungen der tatsächlichen Gleislage von der Soll-Gleislage als *Gleislagefehler* bezeichnet. Gleislagefehler können alle Parameter betreffen, die für die Gleisgeometrie maßgebend sind. Nach DIN EN 13848-1 [5] sind dies:

- Spurweite
- Längshöhe
- Überhöhung
- Richtung
- Verwindung

Spurweite, Überhöhung und Verwindung sind Größen, die sich aus der Lage *beider* Schienen eines Gleises ergeben. Fehler in Längshöhe und Richtung werden in der Norm je Schiene betrachtet. Abbildung 2.1 zeigt Gleislagefehler in Spurweite, Längshöhe, Überhöhung und Richtung. Fehler dieser Art werden in *mm* gemessen. Die Verwindung ist die „algebraische Differenz zwischen zwei Überhöhungsmessungen, die in einer festgelegten Ent-

fernung zueinander vorgenommen wurden [...]“ [5]. Verwindungsfehler tragen die Einheit mm/m oder ‰.

Die zulässige Stärke von Gleislagefehlern ist in den Normen DIN EN 13848-5 [6] und DIN EN 13231-1 [1] geregelt. Hierin sind drei Grenzwerte festgelegt:

- „Soforteingriffsschwelle (IAL): bezieht sich auf den Wert, der, wenn er überschritten wird, Maßnahmen erfordert, die zur Reduzierung des Entgleisungsrisikos auf ein akzeptables Niveau führen. Dies kann entweder durch Sperren des Gleises, durch Reduzierung der Geschwindigkeit oder durch Korrektur der Gleisgeometrie erfolgen;“ [6]
- „Eingriffsschwelle (IL): bezieht sich auf den Wert, der, wenn er überschritten wird, korrigierende Instandhaltungsmaßnahmen erfordert, damit die Soforteingriffsschwelle nicht vor der nächsten Inspektion erreicht werden kann.“ [6]
- „Aufmerksamkeitsschwelle (AL): bezieht sich auf den Wert, der, falls er überschritten wird, eine Analyse des geometrischen Gleiszustands erfordert, und dass dieser in den regulär geplanten Instandhaltungsarbeiten berücksichtigt wird.“ [6]

Die Grenzwerte gelten jeweils für definierte Geschwindigkeitsfenster sowie definierte Wellenlängenbereiche der Fehler und werden für zunehmende Streckenhöchstgeschwindigkeiten strenger. Strecken, deren Gleislage die Grenzwerte für einen Geschwindigkeitsbereich verletzen, können die Grenzwerte für einen niedrigeren Geschwindigkeitsbereich ggf. noch einhalten. Für den Radverschleiß ist der Richtungslagefehler von besonderer Bedeutung. In den genannten Normen wird die Stärke dieses Fehlers durch die Größe der Abweichung von Mittelwert zu Spitzenwert definiert, wobei der Mittelwert zu Null angenommen werden darf. Für Streckenhöchstgeschwindigkeiten von $\leq 250 \text{ km/h}$ werden die Wellenlängenbereiche $D1$ ($3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$) und $D2$ ($25 \text{ m} < \lambda \leq 70 \text{ m}$) unterschieden.

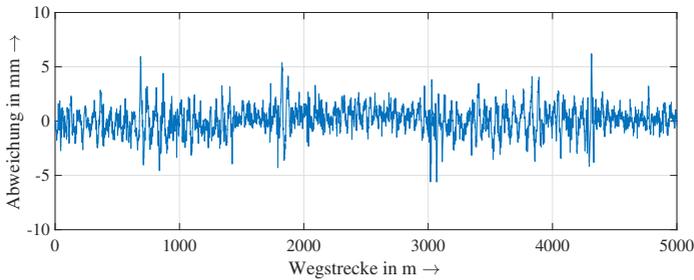


Abbildung 2.2: Richtungslagefehler einer deutschen Vollbahnstrecke (Ausschnitt).

ren. Gleislagefehler können durch ihre Standardabweichung und ihr Leistungsspektrum im Wegbereich beschrieben werden [7] [75]. Der quadratische Mittelwert ist hierbei ein Maß für die Amplitude des Fehlers. Das Leistungsspektrum ergänzt dieses Maß um „den Beitrag der verschiedenen [Orts-, d. Verf.] Frequenzen zum quadratischen Mittelwert“ [75].

Leistungsdichtespektren können durch Spektralanalysen gewonnen werden. Ziel der Spektralanalyse ist die Zerlegung des Eingangssignals (des Gleislagefehlers) in eine Summe aus gewichteten Sinuswellen. Für deterministische Signale ist hierfür eine einfache Fourier-Transformation ausreichend. Für rauschbehaftete Signale muss das Leistungsdichtespektrum methodisch geschätzt werden. [75] Hierzu gibt es eine Vielzahl ähnlicher Methoden, die sich in Details unterscheiden. Das prinzipielle Vorgehen erfolgt äquivalent zu den folgenden Schritten: [117]

1. Das Signal wird auf eine Vielzahl schmalbandiger Bandpassfilter gegeben, die sich in ihrer Mittenfrequenz unterscheiden und die in ihrer Gesamtheit das zu untersuchende Frequenzspektrum abdecken.
2. Aus den Ausgangssignalen der Filter wird ihre jeweilige Standardabweichung berechnet und diese durch die Bandbreite des jeweiligen Filters geteilt.

- Die einzelnen Filterergebnisse werden dann über ihre jeweilige Mittenfrequenz aufgetragen und bilden gemeinsam ein Leistungsdichtespektrum. [117]

Bei digital vorliegenden Signalen können Diskrete Fourier-Transformationen, approximiert durch die Schnelle Fourier-Transformation (Fast Fourier Transformation, „FFT“), die Aufgabe der Bandpassfilter übernehmen. In der vorliegenden Arbeit wird die Methode nach Welch [126] verwendet. Eine ausführliche Erklärung der Methode kann [117] entnommen werden. Ein mit dieser Methode erstelltes Leistungsdichtespektrum eines Streckenabschnitts einer deutschen Vollbahnstrecke ist in Bild 2.3 dargestellt.

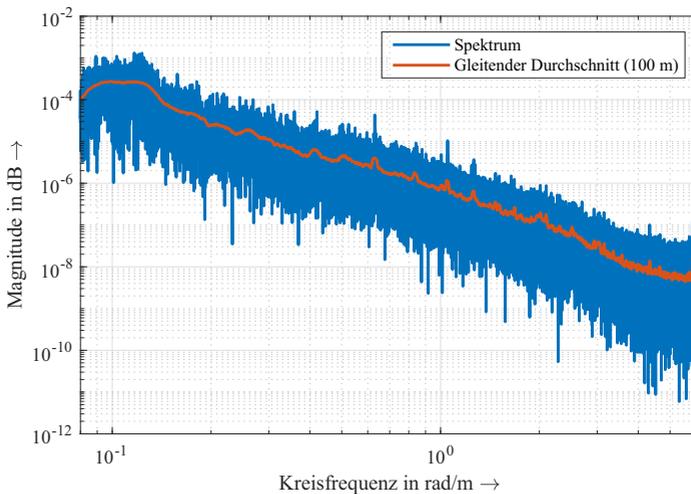


Abbildung 2.3: Spektrum des Richtungslagefehlers einer deutschen Vollbahnstrecke.

Durch Rücktransformation kann aus Leistungsdichtespektren auch wieder ein Gleislagefehler berechnet werden. Da die Leistungsdichtespektren keine Information über die Phasenlage der Ortsfrequenzanteile der Störung enthalten, muss diese hierbei durch einen Zufallsgenerator für jede Ortsfrequenz festgelegt werden. Der so aus einem Leistungsdichtespektrum synthe-

tisierte Gleislagefehler hat gleiche statistische Eigenschaften wie der Gleislagefehler, aus welchem das Spektrum berechnet wurde, er ist jedoch nicht mit diesem identisch, da sich die Phasenlage der einzelnen Ortsfrequenzen unterscheidet.

Leistungsdichtespektren können also einerseits zur Charakterisierung der Gleislage verwendet werden, andererseits aber auch dazu, aus einer Charakterisierung von Gleislagefehlern konkrete, synthetische Gleislagefehler mit bestimmten Eigenschaften zu generieren. Die beschriebene Methode kann für alle in Abschnitt 2.1.1 genannten Arten von Gleislagefehlern verwendet werden. Jede Fehlerart kann also durch ein eigenes Leistungsdichtespektrum charakterisiert werden. Das anschließende Zusammenführen der unterschiedlichen Gleislagefehlerarten zu einer gemeinsamen Gleislage wird dadurch erleichtert, dass die Gleislagefehler in horizontaler und vertikaler Richtung nicht miteinander korrelieren [45] [89].

2.2 Einfluss von Rad- und Schienenprofil auf die Kinematik der Rad-Schiene-Interaktion

Die Laufwerke von Vollbahnfahrzeugen sind i. d. R. mit Radsätzen ausgeführt. Die Räder einer Achse sind also starr miteinander gekoppelt und haben somit stets die gleiche Drehgeschwindigkeit bzw. Drehzahl. Die Räder selbst haben im Bereich ihrer Lauffläche auf ihrer fahrzeugabgewandten Seite einen kleineren Durchmesser als auf ihrer dem Fahrzeug zugewandten Seite. Sie weisen also ein Profil mit konischen Eigenschaften auf. Durch eine Querverschiebung des Radsatzes aus seiner zentrischen Lage im Gleis kommt es daher zu unterschiedlichen Abrollradien der beiden Räder eines Radsatzes. Die Drehzahlkopplung der Räder bewirkt in der Folge unterschiedliche Longitudinalgeschwindigkeiten der Räder. Hierdurch findet eine Lenkbewegung statt, die das Verhältnis der Rollradien zueinander wiederum verändert bzw. umkehrt. In der Folge kann ein oszillierender, näherungsweise sinusförmiger Bewegungsverlauf des Radsatzes beobachtet werden (siehe

Abbildung 2.4). Dieser wird als *Sinuslauf* bezeichnet [75]. Die Ausprägung

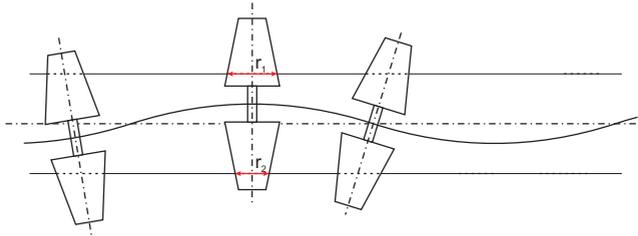


Abbildung 2.4: Sinuslauf nach Klingel [73].

des Sinuslaufes ist vom Ausmaß der Konizität [73] und damit von der Gestaltung des Radprofils abhängig. Reale Radprofile sind häufig nicht einfach kegelförmig, sondern weisen eine über ihre Breite veränderliche Steigung auf (siehe Abbildung 2.5). Die Differenz der Rollradien der beiden Räder verändert sich daher bei einer Querverschiebung des Radsatzes im Gleis im Allgemeinen nichtlinear. Abbildung 2.6 zeigt beispielhaft die Rollradiendifferenz einer Rad-Schiene-Kombination in Abhängigkeit von der Querverschiebung des Radsatzes im Gleis. Diese sog. *Rollradiendifferenzfunktion* (*RRD-Funktion*, auch: *δR -Funktion*) ist neben anderen Faktoren direkt von der Profilform des verwendeten Rades sowie der verwendeten Schiene abhängig und hat großen Einfluss auf das Laufverhalten des Radsatzes und damit des Fahrzeugs.

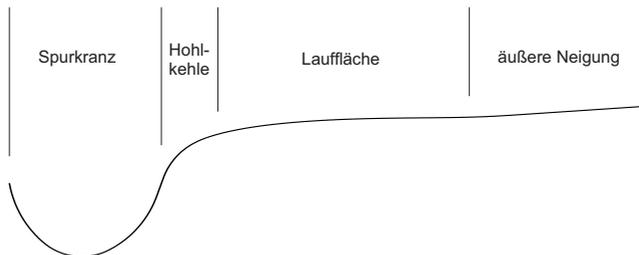


Abbildung 2.5: Bezeichnungen verschiedener Radprofilbereiche.

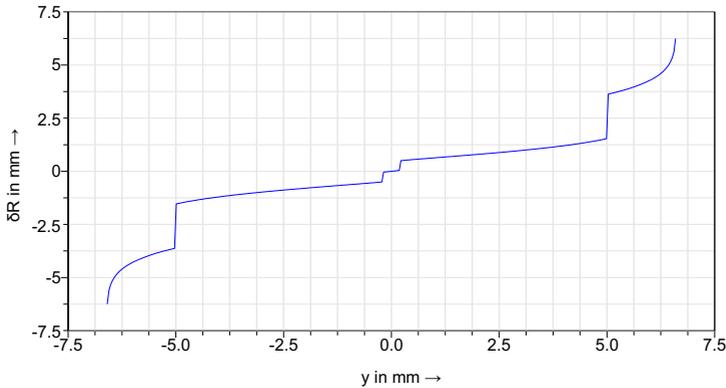


Abbildung 2.6: Rollradiendifferenz δR in Abhängigkeit von der Querverschiebung des Radsatzes im Gleis. Radprofil: S1002; Schienenprofil: UIC 60; Schienenneigung: 1:40; Gierwinkel: 0° ; Rad und Schiene wurden als starre Körper angenommen.

Die Profilgeometrie von Rädern und Schienen ist für das Laufverhalten des Fahrzeugs also entscheidend. Zudem wird durch die Wahl der Profilgeometrien maßgeblich bestimmt, *an welchen Stellen* Räder und Schienen bei einem gegebenen Lastfall miteinander in Kontakt treten und welche *Form und Größe* die Kontaktfläche dabei annimmt. Für die Größe der sich einstellenden Kontaktfläche ist, neben Faktoren wie dem Raddurchmesser, der Achslast und der Materialpaarung, der Grad der Konformität von Rad- und Schienenprofil maßgebend. Die *Position* des Kontaktgebiets in Abhängigkeit von der Querverschiebung des Radsatzes im Gleis ist für eine beispielhafte Rad-Schiene-Paarung in Abbildung 2.7 dargestellt. Günstige Kombinationen von Rad- und Schienenprofilen streuen den Kontakt über die Breite der Laufflächen und sorgen damit für einen gleichmäßigen Verschleiß von Rädern und Schienen. Ungünstige Profilkombinationen können hingegen zur Ausprägung mehrerer gleichzeitig auftretender Kontaktpunkte an einem Rad führen, was mit Nachteilen in Verschleiß, Geräuschentwicklung und Laufstabilität verbunden ist.

Neben dem Laufverhalten des Fahrzeugs beeinflusst die Gestaltung von Rad- und Schienenprofilen also auch die im Betrieb auftretende Form und Lage des Rad-Schiene-Kontaktgebiets. Die Profilgeometrie von Rad und Schiene ist daher von großer Bedeutung für die Verbesserung der Fahrzeug-Fahrweg-Interaktion.

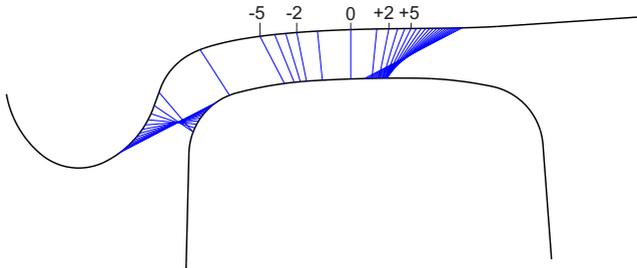


Abbildung 2.7: Position des Kontaktgebiets auf Rad und Schiene, je nach Querverschiebung des Radsatzes aus der Mittellage (in mm) bei einer Radlast von 50 kN . Radprofil: S1002; Schienenprofil: UIC 60; Schienenneigung: 1:40; Gierwinkel: 0° .

2.3 Rad-Schiene-Kontakt

Die Position, Ausdehnung und Form des Rad-Schiene-Kontaktgebiets ist während der Fahrt ständigen Änderungen unterworfen. Streckenverlauf, Fahrzeuglaufdynamik und Umgebungsbedingungen variieren die geometrischen Kontaktgrößen ebenso wie die Lastsituation, der Räder und Schienen ausgesetzt sind. Das Kontaktgebiet zwischen Rad und Schiene hat typischerweise eine Ausdehnung von etwa 1 cm^2 - $1,5\text{ cm}^2$ [38] [75]. Liegt das Kontaktgebiet auf der Lauffläche des Rades (s. Abbildung 2.5), ist es i. d. R. nahezu elliptisch. Im Bereich der Hohlkehle und des Spurkranzes können auch andere Kontaktgebietsformen beobachtet werden. Innerhalb des Kontaktgebiets können lokale Spannungen auftreten, die die ursprüngliche Streckgrenze der eingesetzten Materialien weit überschreiten [78]. Da die Lastsituation mit dem Verschleiß korreliert, muss für eine Verschleiß-

optimierung des Rad-Schiene-Systems zunächst das Kontaktgebiet selbst genauer betrachtet werden.

2.3.1 Relativbewegungen im Kontaktgebiet

Im Kontaktgebiet zweier Körper können zwei unterschiedliche Zustände vorliegen: Haften und Gleiten. Haften die Körper aneinander, so findet zwischen den sich gegenseitig kontaktierenden Oberflächen keine Relativbewegung statt. Gleiten die Körper hingegen aneinander ab, so bewegen sich ihre Oberflächen mit einer Relativgeschwindigkeit v_s zueinander. In beiden Fällen lassen sich zwischen den Kontaktflächen Tangentialkräfte übertragen, deren Höhe vom Reibkoeffizienten μ sowie von der Normalkraft zwischen den Körpern abhängt. Rollen die Körper aufeinander ab und werden hierbei Tangentialkräfte übertragen, so lässt sich beobachten, dass im Kontaktgebiet der beiden Körper beide Zustände zeitgleich auftreten [65]. In Teilen des Kontaktgebietes haften die Körper aneinander, in anderen Teilen des Kontaktgebietes gleiten sie aufeinander ab [82] [95]. Dieser Zustand wird Mikroschlupf genannt [94] [72] [58]. Bei einer gegebenen Rad-Schiene-Paarung und gleichbleibendem Reibungskoeffizient μ ist die Größe der Haft- bzw. Gleitzone abhängig vom Traktionskoeffizienten

$$\tau = \frac{T}{N} \leq \mu, \quad (2.1)$$

wobei T die Tangentialkraft und N die Normalkraft im Rad-Schiene-Kontakt beschreibt. Abbildung 2.8 zeigt exemplarisch die Verteilung der Haft- und Gleitgebiete eines zylindrischen Rades auf einer S49-Schiene [52]. Im Rad-Schiene-System werden Relativgeschwindigkeiten zwischen den sich kontaktierenden Körpern oft in ihrer normierten Schreibweise als Schlupf s ausgedrückt. Für den Schlupf in Längsrichtung gilt:

$$s = \frac{\delta v_s}{w} \quad (2.2)$$

δv_s ist die Geschwindigkeitsdifferenz der Kontaktflächen, $w = \omega r$ ist die Umfangsgeschwindigkeit des Rades.

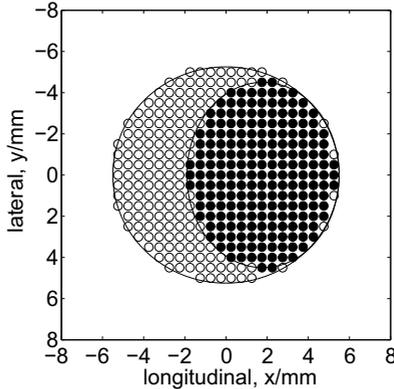


Abbildung 2.8: Aufteilung des Kontaktgebietes in Haft- und Gleitgebiete, am Beispiel eines angetriebenen zylindrischen Rades auf einer S49-Schiene ohne Einbauneigung. Knoten haftend (●); Knoten gleitend (○) [52].

Neben Schlupf in Längs- und Querrichtung, tritt im Rad-Schiene-Kontakt im Allgemeinen Bohrschlupf auf. Wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, sind Eisenbahnräder i. d. R. nicht zylindrisch, sondern haben Profile mit konischen Eigenschaften. Auch Schienenköpfe sind nicht eben, sondern haben eine definierte Profillinie. Die Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene ist daher gegenüber der Radachse im Allgemeinen geneigt. Innerhalb des Kontaktgebiets treten somit unterschiedliche Rollradien auf, die bei gegebener Raddrehzahl zu unterschiedlichen Rollgeschwindigkeiten desselben Rades führen müssten. Da dies nicht möglich ist, entstehen Spannungen im elastischen Werkstoff, die bei Erreichen des Traktionslimits durch Relativbewegungen (Bohrschlupf) ausgeglichen werden. [67]

2.3.2 Kontaktmodelle

Voraussetzung für die Berechnung von Verschleiß ist die Kenntnis der Spannungen, Deformationen und Schlüpfе der Kontaktpartner im Kontaktgebiet. Hierzu ist eine Modellierung des Rad-Schiene-Kontakts auf Mikroebene erforderlich. Das Kontaktmodell berechnet aus den makroskopischen Kontaktgrößen, die z. B. durch Mehrkörpersimulationen von Starrkörpern ermittelt werden können, die lokalen Kontaktgrößen innerhalb des Kontaktgebietes der elastischen Körper. Hierzu muss das Rad-Schiene-Kontaktproblem gelöst werden, welches aus zwei Komponenten besteht:

- **Das Normalkontaktproblem:** Die Kontaktfläche (Größe, Form, Abmessungen) und die darin auftretende Druckverteilung werden berechnet.
- **Das Tangentialkontaktproblem:** Die Tangentialspannungen und Schlüpfе innerhalb des Kontaktgebiets werden berechnet.

Die Forschung um die Lösung des Kontaktproblems gliedert sich in zwei unterschiedliche „Denkschulen“ [68]. Die erste Denkschule entwickelt Lösungen des Kontaktproblems mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM). Die zweite Denkschule löst das Kontaktproblem mit Methoden, die sich im Kern auf die *Halbraumannahme* stützen. [68] Diese besagt, dass sich die Körper nahe des Kontaktgebiets für die Berechnung des elastischen Spannungsfeldes als elastische Halbräume approximieren lassen. Die Randbedingungen des tatsächlichen Rad-Schiene-Kontakts werden also genutzt, um die unter diesen Bedingungen auftretenden Spannungen in einem elastischen Halbraum zu berechnen. Ohne weiteren Beweis wird dann angenommen, dass die Spannungen im Halbraum den Spannungen in Rad und Schiene entsprechen. Beide Denkschulen haben Stärken und Schwächen. Die Lösung von Kontaktproblemen unter Zuhilfenahme der Halbraumannahme ist nur mit geringem Rechenaufwand verbunden. Sie kann zu exakten Ergebnissen führen, jedoch nur solange die Halbraumannahme gültig ist

[68]. Die Lösung von Kontaktproblemen mittels FEM ist hingegen kaum Einschränkungen unterworfen [121] [52]. Die FEM erlaubt eine detaillierte Modellierung der Kontaktflächen von Körpern beliebiger Geometrie [58]. Ihr rechnerischer Aufwand ist jedoch erheblich höher. Aufgrund dessen ist die Nutzung der FEM in zeitschritt-basierten Fahrdynamiksimulationen mit heutiger Hardware nicht möglich. Die FE-Simulation wird daher heute nahezu ausschließlich zur Kontaktberechnung in quasistationären Lastfällen verwendet. Ein wichtiger Einsatzzweck ist die Validierung neuer Berechnungsansätze, insbesondere solcher, die der Halbraumannahme unterliegen. Da der Einsatz der FEM aus oben genanntem Grund für die Zwecke dieser Arbeit nicht praktikabel ist, beschränkt sich dieses Kapitel im Folgenden auf Methoden, die sich auf die Halbraumannahme stützen.

Unter der Annahme, dass die Tangentialspannungen keinen Einfluss auf die auftretenden Normalspannungen haben, können Normalkontaktproblem und Tangentialkontaktproblem getrennt voneinander gelöst werden [26]. Dies führt zu einer deutlichen Vereinfachung des Problems und ermöglicht somit eine schnellere Lösungsfindung. [68] Nach Kalker [67] ist diese Annahme erfüllt, wenn die beiden in Kontakt stehenden Körper quasiidentisch, d. h. die Körper in elastischer und geometrischer Hinsicht spiegelsymmetrisch zueinander sind. Unabhängig von der geometrischen Form der Körper ist die Forderung nach Quasiidentität auch dann erfüllt, wenn die Körper zu Zwecken der Elastizitätsberechnung durch Halbräume *approximiert* werden können und homogene, isotrope Elastizitätseigenschaften aufweisen [67]. Die Annahme homogener, isotroper Elastizitätseigenschaften ist bei Verwendung von Stahl als Rad- und Schienenmaterial in guter Näherung erfüllt. Die Halbraumannahme stellt jedoch eine Einschränkung dar. Die Approximation der Körper (im Kontaktgebiet) als Halbraum ist nur zulässig, wenn die Abmessungen des Kontaktgebiets klein sind im Verhältnis zu den charakteristischen Abmessungen der Körper, wie z. B. dem kleinsten Krümmungsradius der Körperoberfläche in der Nähe des Kontaktgebiets [67] [120]. Im Bereich der Lauffläche des Rades (s. Bild 2.5) ist diese An-

nahme zulässig. Im Bereich der Hohlkehle ist die Oberfläche des Rades jedoch stark gekrümmt. Die Approximation der Körper als Halbräume ist in diesem Bereich daher von geringerer Qualität. Bis heute ist kein Rad-Schiene-Kontaktmodell bekannt, das ohne Halbraumannahme auskommt und dennoch mit heutiger Computerhardware performant genug ist, um in größeren Zeitschrittsimulationen verwendet zu werden. Die genannte Einschränkung muss daher akzeptiert werden und bei der Bewertung des Radverschleißbildes Berücksichtigung finden.

Dieses Kapitel wirft im Folgenden einen Blick auf wichtige Modelle und Theorien zum Lösen des Kontaktproblems. Eine vollständige Übersicht über heute existierende Kontakttheorien und ihre Entstehungsgeschichte ist im Rahmen dieser Arbeit nicht sinnvoll. Kalker gibt in [67] eine ausführliche Rückschau über die Entwicklungen bis 1990.

Lösen des Normalkontaktproblems

Für reibungsfreie Kontakte zwischen Körpern mit glatter Oberfläche, deren Oberfläche in der Nähe des Kontaktgebiets durch Polynome zweiter Ordnung beschrieben werden kann [120], wurde das Normalkontaktproblem bereits 1882 von Hertz analytisch gelöst [58] [54]. Die Beschränkung der Theorie auf reibungsfreie Kontakte (d. h. reibungsfrei *während der Lösung des Normalkontaktproblems*) führt zu keinen nennenswerten Verfälschungen der Ergebnisse. Die Annahme, dass die beteiligten Körper nahe der Kontaktfläche durch Polynome zweiter Ordnung beschrieben werden können, beschränkt die Theorie jedoch auf elliptische Kontaktflächen. Zudem setzt die Anwendung von Hertz ein linearelastisches Materialverhalten voraus. Dies führt zu Einschränkungen in Szenarien, in denen anelastische oder plastische Verformungen von Bedeutung sind. Eine vollständige Liste der Hertz'schen Randbedingungen ist in [75] zu finden.

Die Anwendung der Hertz'schen Theorie auf den Rad-Schiene-Kontakt ist ausführlich in [64] beschrieben. Aufgrund des geringen Rechenaufwands

ist die Hertz'sche Theorie trotz der genannten Einschränkungen bis heute die am häufigsten verwendete Methode, wenn der Rad-Schiene-Kontakt in Fahr dynamiksimulationen berechnet werden soll [58].

Um die Einschränkung der Hertz'schen Theorie auf elliptische Kontaktflächen zu umgehen, können sog. Semi-Hertz- oder Multi-Hertz-Ansätze verwendet werden. Multi-Hertz-Ansätze verwenden im Kern die Theorie von Hertz, zerlegen das Kontaktgebiet zur Kontaktsuche jedoch in diskrete Abschnitte und wenden die Hertz-Theorie auf jeden dieser Abschnitte einzeln an. Hierdurch können auch Kontakte von Körpern beschrieben werden, deren Formen die Hertz'sche Annahme verletzen. Der meistverbreitete Ansatz dieser Klasse ist STRIPES, der in [18] und [104] beschrieben wird. STRIPES nutzt aus, dass Räder, egal welchen Radprofils, die Hertz'sche Krümmungsbedingung in longitudinaler Richtung immer erfüllen. Das Kontaktgebiet wird daher nur in lateraler Richtung diskretisiert, d. h. in Streifen (engl.: stripes) zerlegt. Innerhalb jedes Streifens kann dann, ohne großen Fehler, die Hertz'sche Theorie angewendet werden. In [18] und [104] konnte gezeigt werden, dass die so erzielten Ergebnisse in sehr guter Übereinstimmung mit numerischen FE-Simulationen sind. Der Rechenaufwand zur Lösung des Normalkontaktproblems steigt durch die Verwendung von Multi-Hertz-Methoden im Vergleich zur einfachen Hertz-Methode jedoch erheblich.

Nahezu zeitgleich zu Hertz haben auch Cerruti und Boussinesq [25] ein Verfahren zum Lösen des Normalkontaktproblems entwickelt, das der Hertz'schen Beschränkung auf elliptische Kontaktflächen und elastische Gleichheit der Körper nicht unterliegt [58]. Das Verfahren nutzt jedoch Integralgleichungen, die numerisch gelöst werden müssen. Wichtige Ansätze zum Lösen des Kontaktproblems wurden von Joost Kalker [67] entwickelt. Ab 1982 wurden seine Theorien in verschiedenen Computerprogrammen umgesetzt [124]. Seine *Exakte Theorie* wurde im Programm CONTACT [59] realisiert, die *Vereinfachte Theorie* im FASTSIM-Algorithmus [66]. Während FASTSIM sich auf die Lösung des Tangentialproblems konzen-

triert, löst CONTACT auch das Normalkontaktproblem. Beide Algorithmen wurden über die Jahre weiterentwickelt und stellen bis heute Referenzprogramme dar. Die Theorien stützen sich jedoch ebenfalls auf die Halbraumannahme, sodass ihre Gültigkeit im Bereich der Hohlkehle des Rades eingeschränkt ist.

Lösen des Tangentialkontaktproblems

Carter [27] entwickelte bereits im frühen 20. Jahrhundert einen Ansatz zur Lösung des Tangentialkontaktproblems. Johnson [63] gelang 1952 erstmals die Lösung eines dreidimensionalen Rollkontaktproblems [74]. Seit seiner Dissertation im Jahr 1967 [65] hat Kalker auch für die Lösung des Tangentialkontaktproblems bedeutende Arbeit geleistet. Seine *Exakte Theorie* und seine Umsetzung im Algorithmus CONTACT löst das Kontaktproblem mindestens 100-mal schneller als die FEM [68]. CONTACT führt zu exakten Lösungen in dem Sinne, dass das Kontaktproblem prinzipiell, also bei Verfügbarkeit unendlicher Rechenressourcen, beliebig genau berechnet werden kann. Kalkers Vereinfachte Theorie und seine Umsetzung im Algorithmus FASTSIM [66] hat sich in Fahrdynamiksimulationen als Quasi-standard durchgesetzt. FASTSIM ersetzt den elastischen Körper zum Lösen des Tangentialkontaktproblems durch eine Vielzahl diskreter, voneinander unabhängiger Federn. Im Fall von elliptischen Kontaktflächen rechnet FASTSIM ca. 2000-mal schneller als CONTACT [69] [68]. FASTSIM kann, z. B. bei Kombination mit einem Multi-Hertz-Ansatz, zum Lösen des Normalkontaktproblems auch auf nicht-elliptische Kontaktflächen angewendet werden. In diesem Fall sinkt der Geschwindigkeitsvorteil gegenüber CONTACT in etwa auf Faktor 5 [67].

2.4 Verschleiß

Verschleiß ist der fortlaufende Verlust oder die Umlagerung bzw. Verdrängung von Material von einer Kontaktfläche [57] [82] [94]. Verschleiß tritt

immer dann auf, wenn Oberflächen miteinander in Kontakt kommen und Relativbewegungen zwischen den Flächen stattfinden [94] [86].

2.4.1 Verschleißmechanismen

Je nach Lastsituation und Randbedingungen wird Verschleiß durch unterschiedliche Verschleißmechanismen getrieben, die zu unterschiedlichen Oberflächenveränderungen führen. Die Verschleißmechanismen sind: [129] [118] [105]

Adhäsion

Beim Zusammenpressen metallischer Werkstoffe gehen die Werkstoffe auf atomarer Ebene Bindungen ein. Brechen diese Bindungen beim Lösen des Kontakts nicht in der ursprünglichen Kontaktebene, sondern im Grundwerkstoff auf, kommt es zu Materialab- oder -übertrag und damit zu Verschleiß. [118]

Abrasion

Dringen harte Festkörperpartikel in einen weicheren, duktilen Festkörper ein und gleiten über seine Oberfläche, so kommt es zu Mikroverformungsprozessen, Mikrozerspanungsprozessen und Mikrobrechen. [118]

Oberflächenzerrüttung / (Rollkontakt-)Ermüdung (RCF)

Bei wiederholter zyklischer Beanspruchung, die mit plastischen Verformungen im Mikrobereich einhergeht, nimmt das Energieaufnahmevermögen von Metallen mit zunehmender Beanspruchungsdauer ab. In der Folge bilden sich Risse, die je nach Kontaktbedingungen entweder im oberflächennahen Inneren des Werkstoffs oder an der Oberfläche selbst entstehen und von dort aus wachsen. Dauert die zyklische Beanspruchung weiter an, können die Risse so weit wachsen, dass es zu Schädigungen der Bauteiloberfläche z. B.

durch Ausbruch keilförmiger Partikel kommt. [90] [118] Im Rad-Schiene-Kontakt wird diese Art der Oberflächenzerrüttung häufig *Rollkontaktermüdung* bzw. *Rolling Contact Fatigue (RCF)* genannt. Kapitel 2.5 gibt einen kurzen Überblick über Arten und Modellierungsmöglichkeiten von Rollkontaktermüdung.

Tribochemische Reaktion / Korrosion

Die chemische Reaktionsbereitschaft von Metallen kann durch mechanische Effekte auf vielfältige Weise erhöht werden. Die durch mechanische Reibung entstehende Wärmeenergie, der Abtrag von schützenden Oxidschichten und die Entstehung von Gitterbaufehlern durch plastische Deformation können chemische Reaktionen zwischen den metallischen Kontaktpartnern untereinander sowie zwischen Metall und seinem umgebenden Medium anregen [53] [42]. Für den Rad-Schiene-Kontakt ist insbesondere die Tribooxidation von Bedeutung. Durch die plastische Verformung der Rad- und Schienenoberfläche wird der Oxidationsprozess der Metalle mit dem umgebenden Luftsauerstoff beschleunigt, was zu dickeren Oxidschichten auf den Oberflächen der Körper führt [76]. Diese Oxidschichten beeinflussen das Verschleißverhalten auf vielfältige Weise. Zum einen bilden sie ein Zwischenmedium zwischen Rad und Schiene und vermindern somit die Adhäsionsfähigkeit der beiden ursprünglichen Kontaktpartner. Andererseits können die harten, aber spröden Oxide bei weiteren Überrollvorgängen leicht abgetragen werden und führen auf diese Weise unmittelbar zu Verschleiß. Aus den Oberflächen gelöste Oxidpartikel können jedoch auch Abrasion verursachen und so auf mittelbare Weise zu Verschleiß führen. [118] [80]

Neben dieser Kategorisierung des Verschleißes nach Verschleißmechanismen kennt die Literatur eine schwer zu überschauende Vielzahl weiterer Kategorisierungsarten. Die Unterscheidung erfolgt häufig nach Art der Relativbewegung [43], nach Ursache des Verschleißes [84] oder nach Wirkung

und Folgen des Verschleißes bzw. dessen Heftigkeit [43]. Insbesondere die Kategorisierung nach Heftigkeit ist für die Simulation des Verschleißes im Rad-Schiene-Kontakt von großer Bedeutung. Hierbei wird der Verschleiß in zumeist drei sog. *Verschleißregime* eingeteilt [24], die häufig als

- Typ I / mild
- Typ II / severe / heftig
- Typ III / catastrophic / katastrophal

bezeichnet werden. Milder Verschleiß entsteht durch den Abtrag von sich ständig neu bildenden spröden Oxidschichten an den Oberflächen [24]. Er führt zu sehr glatten, glänzenden Oberflächen, die sogar glatter sein können als im Ursprungszustand. Das abgetragene Material kann oxidisch und sehr feinkörnig sein ($\varnothing < 100\text{nm}$) oder aus relativ großen (bis zu $100\mu\text{m}$), aber sehr dünnen ($2..3\mu\text{m}$) Flocken bestehen. [128] [20] [24] Heftiger Verschleiß führt hingegen zu sehr rauen, optisch matt erscheinenden Oberflächen und metallischem Abrieb [24] [20].

2.4.2 Verschleißregime und Verschleißarten

Der Einteilung in Verschleißregime liegt die Beobachtung zugrunde, dass der Zusammenhang zwischen Reibung und Verschleiß stark nichtlinear und sprungbehaftet ist [77] [20] [127]. Eine geringe Erhöhung der Last kann zu einer geringen Erhöhung der Verschleißrate führen. Ab einem gewissen Punkt kann eine weitere geringe Erhöhung aber einen plötzlichen Sprung der Verschleißrate um ein Vielfaches bewirken. Diese Sprungstellen sind die Grenzen der genannten Verschleißregime. Bei welchen Lasten diese Sprungstellen auftreten, ist sowohl von der verwendeten Materialpaarung, als auch von Randbedingungen wie dem Vorliegen von Zwischenmedien, der Temperatur im Kontaktgebiet und der Geometrie der Kontaktpartner abhängig. Die Grenzen zwischen den Verschleißregimen können daher nicht

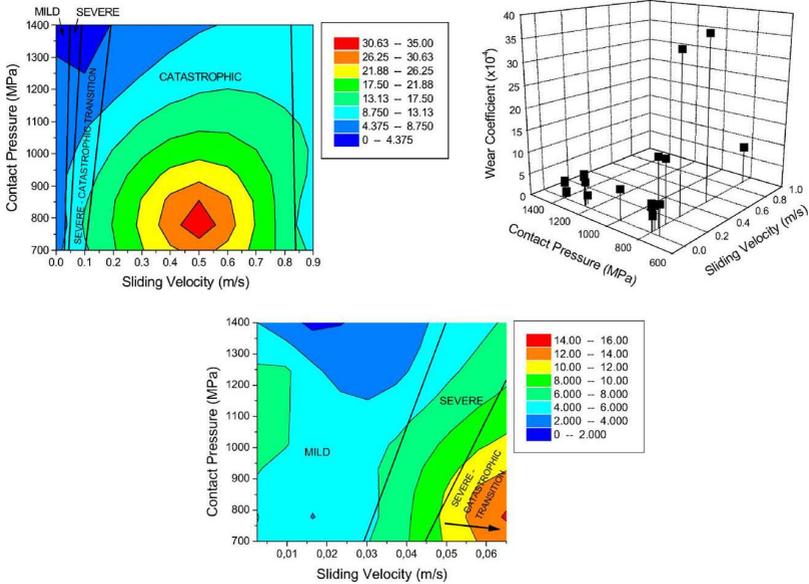


Abbildung 2.9: Verschleißkoeffizient für ein R7-Rad auf einer UIC60/900A-Schiene [81].

auf standardisierte Werte festgelegt werden. Für gegebene Materialpaarungen und Randbedingungen können die Regimegrenzen in *Verschleißkarten* (*wear maps*) dargestellt werden [17] [24] [81] [86]. Die beiden wichtigsten Arten von Verschleißkarten sind in den Abbildungen 2.9 und 2.10 dargestellt. Die Verschleißkarte in Abbildung 2.9 zeigt einen Verschleißkoeffizienten, aufgetragen über den Druck im Kontaktgebiet und die Relativgeschwindigkeit der beiden Kontaktflächen zueinander. Diese Art der Darstellung geht auf Lim und Ashby [17] [86] zurück. Die Abbildung zeigt zwei unterschiedliche Darstellungsweisen dieser Kartenart, wie sie von Lewis und Olofsson [81] verwendet wurden. In der zweidimensionalen Darstellung sind neben dem Verschleißkoeffizienten auch die Regimegrenzen eingezeichnet. Die Verschleißkarte nach Bolton und Clayton [24] in Abbildung 2.10 verknüpft die *Verschleißrate* (Materialverlust in *mg* je gefahre-

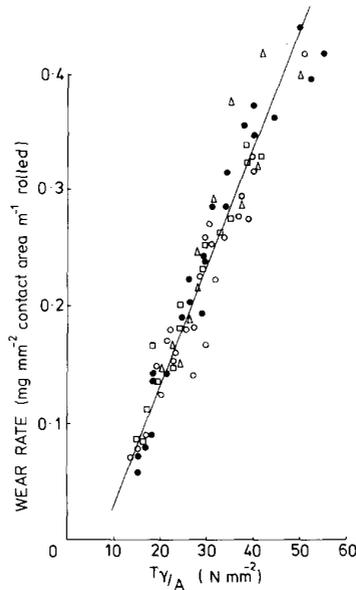


Abbildung 2.10: Verschleißkarte nach Bolton und Clayton [24]. Typ II-Verschleißraten aufgetragen über $T\gamma/A$ für Class D-Stahlräder auf verschiedenen Schienenmaterialien: ●, BS11; □, UICB; △, 1 % chrome; ○, UICA.

nem m und mm^2 Kontaktfläche) mit der für Verschleißrechnungen wichtigen Größe $T\gamma/A$. T ist hierin die *Traktionskraft* (Produkt aus Normalkraft und Reibbeiwert), γ ist der Schlupf in % und A ist die Größe der Kontaktfläche. Die Größe $T\gamma/A$ kann als Maß für die Schwere des Lastfalls betrachtet werden. Die in Bild 2.10 abgebildete Karte erstreckt sich über das Typ II-Verschleißregime und zeigt innerhalb dieses Regimes einen näherungsweise linearen Zusammenhang von Verschleißrate und $T\gamma/A$. Abbildung 2.11 zeigt in der gleichen Darstellungsart das Verschleißverhalten über mehrere Verschleißregime hinweg. Die Grafik verdeutlicht, dass die Verschleißrate über Regimegrenzen hinweg keinesfalls linearisiert werden kann. Am Beispiel des „Standard Carbon Rail“ ist insbesondere die „hef-

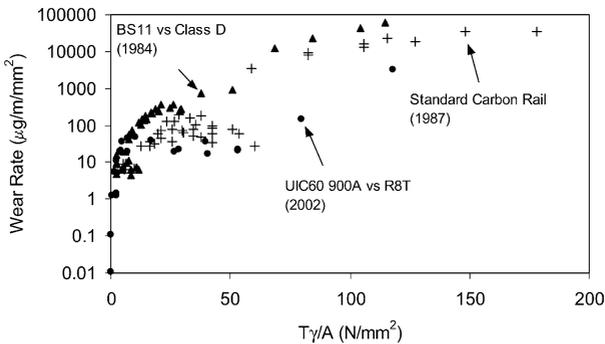


Abbildung 2.11: Verschleißkarte für verschiedene Kombinationen von Rad- und Schienenstählen über mehrere Verschleißregime. Daten BS11 vs. Class D nach [62]; Daten „Standard Carbon Rail“ nach [31]; Grafik nach [81]; Verschleißraten aufgetragen über $T\gamma/A$.

tig / katastrophal“-Regimegrenze deutlich zu erkennen. Hier ist die Verschleißrate in einem großen Lastbereich nahezu konstant und springt an der Regimegrenze bei einer moderaten Verschärfung des Lastfalls um mehrere Größenordnungen. Die Datengrundlage solcher Verschleißkarten stammen entweder aus Messungen im realen Fahrbetrieb oder aus Versuchsreihen im Labor, die entweder mit Hilfe von *Pin on Disk*- oder *Twin Disk*-Prüfständen durchgeführt werden. [95] [14]

2.4.3 Verschleißmodelle

Bis heute hat die Forschung kein umfassendes Verständnis über die genauen chemischen und physikalischen Abläufe und Wechselwirkungen während des Verschleißvorgangs entwickeln können. Die heute gebräuchlichen Verschleißmodelle sind daher empirischen Ursprungs. Es können zwei Arten von Modellen unterschieden werden [38]:

1. Das Einparametermodell nach Krause und Poll [77] bringt das Verschleißvolumen in direkten Zusammenhang mit der in der Kontakt-

fläche anfallenden Reibungsarbeit. Die unterschiedlichen Verschleißregime werden hier durch unterschiedliche Werte der Proportionalitätskonstante berücksichtigt. Die Grenzen der Verschleißregime sind ebenfalls von der entstehenden Reibleistung abhängig. [38]

2. Das Zweiparametermodell nach Archard [15] [16] betrachtet den Verschleiß als proportional zur Normalkraft, der Gleitdistanz und dem Kehrwert der Härte des Materials. Auch hier werden die unterschiedlichen Verschleißregime durch unterschiedliche Werte der Proportionalitätskonstanten berücksichtigt. Die Regimegrenzen werden jedoch nicht durch die Verlustenergie, sondern durch den Druck im Kontaktgebiet und die Gleitgeschwindigkeit definiert. [38]

Das Zweiparametermodell nach Archard wurde sowohl durch Prüfstandsversuche als auch durch Feldversuche für verschiedene Stahlkombinationen parametrisiert und validiert [81] [61] [62] [95]. Das Modell hat sich für die Verschleißberechnung mit Hilfe von Mehrkörpersimulationen als Quasistandard durchgesetzt.

Es lässt sich bei globaler Betrachtung des Kontakts formulieren als:

$$V_m = \frac{N\Delta s}{H} \cdot k \quad (2.3)$$

V_m ist hierbei der volumetrische Materialabtrag, N die Normalkraft im Kontakt, Δs die Gleitdistanz und H die Härte des weicheren der beiden Kontaktmaterialien. k ist eine Proportionalitätskonstante, deren Wert vom Druck p sowie von der Gleitgeschwindigkeit v_s im Kontakt abhängt.

In Verschleißsimulationen wird das Kontaktgebiet üblicherweise nicht global betrachtet, sondern in zahlreiche kleinere Abschnitte zerlegt. Für diese lokale Betrachtung ist die alternative Schreibweise

$$w_z = k \frac{p\Delta s}{H} \quad (2.4)$$

sinnvoller. w_z ist hierbei die lokale Verschleißtiefe senkrecht zur Kontaktfläche und p der lokale Kontaktdruck.

Die Ermittlung der Proportionalitätskonstanten k kann entweder im Labor (Pin on Disk, Twin Disk) oder bei Feldversuchen an Schienenfahrzeugen erfolgen. Die Ermittlung im Feldversuch ist sehr aufwendig und gleicht einer Kalibrierung des Verschleißmodells durch Vergleiche von realen Verschleißbildern mit ihren durch Simulation erzeugten Gegenstücken. Da die Ergebnisse von Pin on Disk- und Twin Disk-Versuchen u. a. aufgrund fehlender Versuchsstandards und mäßiger Vergleichbarkeit der beiden Verfahren häufig um mehr als eine Größenordnung streuen (vgl. [95] und [70]), erscheint eine Kalibrierung am realen Fahrzeug für die Berechnung quantitativ korrekter Verschleißwerte jedoch notwendig.

Abbildung 2.12 zeigt beispielhaft die Verschleißkoeffizienten für Schienenstahl der Sorte UIC 900A bei Raumtemperatur und trockener Reibung.

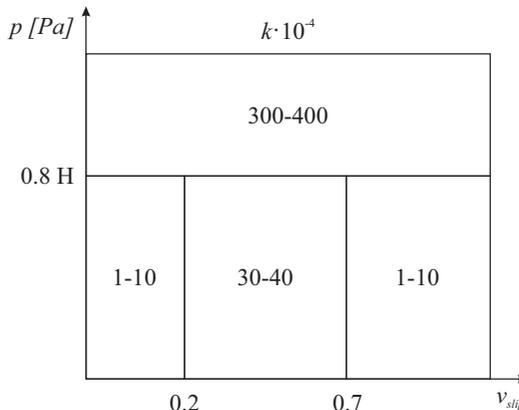


Abbildung 2.12: Proportionalitätskonstante k für verschiedene Verschleißregime von UIC 900A-Schienenstahl nach Jendel [61] mit Daten von Olofsson [95].

2.5 Rollkontaktermüdung (RCF)

Da der Schwerpunkt der Arbeit nicht auf Rollkontaktermüdung liegt, erfolgt in diesem Kapitel nur ein oberflächlicher Abriss des Themas. Als Ausgangspunkt für weitergehende Recherchen können das *Wheel-Rail Interface Handbook* [82] sowie die Paper [36], [37] und [123] herangezogen werden. Rollkontaktermüdung ist die Rissbildung und der Rissfortschritt im Rad- oder Schienenwerkstoff infolge der zyklischen Belastungen des Rad-Schiene-Kontakts. Ähnlich wie Verschleiß (vgl. Verschleißregime) ist auch Rollkontaktermüdung ein Schwellwertphänomen. Rollkontaktermüdung findet nur bei Überschreiten eines gewissen Lastkollektivschwellwertes statt.

2.5.1 Arten der Rollkontaktermüdung

RCF kann nach dem Ort der Rissentstehung in *Surface Fatigue* und *Subsurface Fatigue* eingeteilt werden [82]. Risse, deren Ursprung an der Oberfläche von Rad oder Schiene liegt (*Surface Fatigue*), entstehen infolge von plastischen Deformationen. Diese führen zu Eigenspannungen im Werkstoff sowie zu Kaltverfestigung desselben. Ist die Last auch nach der Kaltverfestigung noch zu hoch für eine rein elastische Werkstoffreaktion, führt jeder weitere Lastzyklus zu einer geringen plastischen Deformation bis hin zum Versagen des Werkstoffs. Auch thermische Belastungen und darauf folgende lokale Werkstoffumwandlungen können zur Entstehung und Fortsetzung solcher Risse beitragen [71]. An Rädern und Schienen werden die Folgen dieser Ermüdungsart auf unterschiedliche Weise, z. B. als kleine Ausbröckelungen von Material aus der Oberfläche sichtbar [37] [82]. Obwohl diese Art der Ermüdung i. d. R. keine katastrophalen Folgen hat, spielt sie bei der Instandhaltung von Schienenfahrzeugen und Schienennetzen eine wichtige Rolle. Die Beseitigung von Ermüdungsfolgen an Rädern und Schienen ist kosten- und zeitintensiv (vgl. [101]) und verkürzt die Lebensdauer von Rädern und Schienen erheblich. Bleibt die Beseitigung der Schäden aus,

können durch die veränderten Oberflächen der Kontaktpartner Folgeschäden an Fahrzeugen und Gleisen verursacht werden [37]. Wechselwirkungen bestehen zwischen Surface Fatigue und natürlichem Verschleiß. Liegt die Verschleißgeschwindigkeit in Normalenrichtung zur Bauteiloberfläche über der Risswachstumsgeschwindigkeit in dieser Richtung, so wird das rissbehaftete Material durch den Verschleiß abgetragen. Das Risswachstum wird somit praktisch verhindert und die Ermüdungserscheinungen bleiben aus, obwohl die zyklische, mechanische Überlastung fortbesteht. [87] [101] [71] Bei der zweiten Art der Rollkontaktermüdung entstehen die Risse mehrere Millimeter unterhalb der Bauteiloberfläche (*Subsurface Fatigue*) und haben ihren Ursprung häufig in kleinen Werkstoffdefekten oder Verunreinigungen. Diese Art der Ermüdung birgt im Bahnbetrieb ein großes Gefahrenpotential, da die entstehenden Defekte oft große Abmessungen haben. Auch diese Ermüdungsart unterliegt neben mechanischen und chemischen Einflüssen auch thermischen Einflüssen.

2.5.2 RCF-Modelle

Aufgrund der Komplexität der Vorgänge im Werkstoff sind nur wenige Modelle zur Vorhersage von Rollkontaktermüdung bekannt, die für eine ingenieurmäßige Anwendung geeignet sind. Ekberg schlägt in [35] ein Modell vor, das die Anwendung in Mehrkörpersimulationen ermöglicht. Das Modell ermöglicht *keine* Vorhersage von Schädigungsverläufen. Es kann jedoch prognostizieren, *ob* in einem gegebenen Szenario aus Lastfall, Kontaktgeometrie und Werkstoffkennwerten Rollkontaktermüdung auftritt. Insbesondere eignet sich das Modell für vergleichende Betrachtungen unterschiedlicher Szenarien. Das Modell definiert verschiedene Ermüdungsindizes, von denen der *Surface Fatigue Index* in dieser Arbeit verwendet wird:

$$FI_{surf} = \tau - \frac{2\pi abk}{3F_z} \quad (2.5)$$

τ ist hier der Traktionskoeffizient, der durch $\tau = F_{tan}/F_z$ definiert wird. a und b sind die Halbachsen eines Hertz'schen Kontaktgebiets, k ist die Festigkeit des Werkstoffs bei reiner Scherbeanspruchung und F_z ist die Kontaktkraft in vertikaler Richtung. Nach Ekberg tritt Rollkontaktermüdung auf, wenn gilt: $FI_{surf} > 0$. k -Werte für verschiedene Schienenwerkstoffe können z. B. [101] entnommen werden. Wird der Index zur vergleichenden Betrachtung verschiedener Szenarien bei Beibehaltung des Werkstoffs genutzt, so ist die Kenntnis des Werkstoffparameters k nicht erforderlich.

2.6 Radprofilgestaltung

Bis weit in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts hinein verwendeten Bahnverwaltungen weltweit einfache, konische Radprofile, häufig mit einer Konussteigung von 1:20. Die Profile ermöglichten bei mittleren Geschwindigkeiten brauchbare Laufeigenschaften auf geraden wie auf gebogenen Gleisen. Die rein konische Profilform führte im Bogen jedoch zu Zweipunktkontakt und infolgedessen zu starkem Verschleiß. Insbesondere während der Einlaufphase waren die Räder zudem starken verschleißbedingten Gestaltänderungen unterworfen, was zur Verschlechterung der Laufeigenschaften führte und die erzielbaren Reprofilierungsintervalle weiter reduzierte. [21] Da schon früh beobachtet werden konnte, dass bereits verschlissene Räder ihre Profilform bei weiterer Beanspruchung weitgehend erhalten, entwickelten Bahnverwaltungen Radprofile, die sich in ihrer Gestalt an verschlissenen Rädern orientierten. So erhielten bei der Deutschen Bundesbahn ab 1969 alle Güterwagen das sog. „Radprofil II“. Der Laufflächenbereich dieses Radprofils wurde aus drei Kreissegmenten mit unterschiedlichen Radien gebildet. Später wurden diese Radprofile auch an anderen Fahrzeugen, bis zu Geschwindigkeiten von 160 km/h, eingesetzt. [88] Das Europäische Institut für Eisenbahnforschung (ORE, seit 1992 ERRI) des Internationalen Eisenbahnverbands UIC legte 1973 ein standardisiertes Verschleißprofil fest, das als *S1002-Profil* bekannt wurde. Das S1002-Profil wurde in der Designpha-

se in acht Abschnitte zerlegt, die jeweils mit einem Polynom höherer Ordnung beschrieben werden können [88]. Das S1002-Profil ist bis heute ein weit verbreitetes Standardprofil, das neben den Profilen *I/40* und *EPS* in der Europäischen Norm EN 13715 [4] beschrieben wird.

Auch wenn sich seither in Europa kein neues Standardprofil mehr durchsetzen konnte, gab es zahlreiche Bemühungen, die Profile von Eisenbahnrädern weiter zu verbessern. Die Profildesignverfahren haben sich über die Jahre stark verändert und stetig weiterentwickelt, wobei die Entwicklung der Computertechnologie eine entscheidende Rolle spielte und bis heute spielt. Bis in die 1990er Jahre hinein wurden Radprofile nach einfach formulierbaren Konstruktionsvorschriften unmittelbar gestaltet bzw. konstruiert. Die Profillinien wurden häufig aus Kreisbögen und geraden Linien zusammengesetzt, die sich oft an den Kreisbögen und geraden Linien des Schienenprofils orientierten. Häufig wurden auch Verschleißprofile als Grundlage für Neuprofile verwendet. So beschrieb Palhan [96] 1982 ein Radprofil, dessen Design auf die Ausbildung optimaler Konformität zwischen Rad- und Schienenprofil setzte. Im Vergleich zu einem konischen Radprofil sollten hierdurch die Formstabilität erhöht und die Kontaktspannungen gesenkt werden. Leary et al. [79] vermaßen verschiedene verschlissene Räder, berechneten eine durchschnittliche Profillinie und verwendeten diese für ein Neuprofil. Smith und Kalousek [116] entwickelten ein Designverfahren speziell für die Anwendung bei Fahrzeugen mit gelenkten Achsen. Sie generierten das Radprofil durch Aneinanderhängen von Kreisbögen, die einen vorher festgelegten Regelsatz erfüllen sollten. Walenta und Haigermoser [125] entwickelten Radprofile für den Hochgeschwindigkeitsverkehr der Deutschen Bahn. Sie passten das Radprofil an das Schienenprofil an, indem sie die gleiche Neigung von Rad- und Schienenprofilkontur sicherstellten. Als Randbedingung wurde Zweipunktkontakt vermieden, indem die Krümmung des Schienenprofils größer als die des Radprofils gewählt wurde. In der Praxis wird bis heute auch „Versuch und Irrtum“ zum Finden geeigneter Rad-Schiene-Paarungen angewendet. Ein Beispiel hierfür ist

die Verbesserung der Rad-Schiene-Kontaktbedingungen auf der *West Rail*-Linie der *Kowloon-Canton Railway* (KCR) in Hongkong [41]. Eine Übersicht über die Zusammenhänge unterschiedlicher geometrischer Profileigenschaften, die auch als Design-Leitlinie aufgefasst werden kann, hat Polach [99] zusammengestellt. Die besonderen Design-Anforderungen an Radprofile für Straßenbahnen und Tram-Train-Fahrzeuge wurden von Theiler [122] betrachtet. Pyrgidis et al. [103] befassten sich mit den Besonderheiten von Losrädern sowie Radpaaren, die ihre Kopplung mit Hilfe eines Differentials verändern können.

Anfang der 2000er Jahre entwickelten sich die Designmethoden in eine neue Richtung. Profile wurden nun nicht mehr unmittelbar konstruiert, sondern von Algorithmen auf bestimmte Ziele hin iterativ berechnet. Nach jedem Iterationsschritt prüften die Algorithmen, wie gut ihre aktuelle Radprofiliteration die vorgegebenen Zielgrößen erfüllt. Hierdurch ergab sich ein Konflikt: Aufgrund dieser häufigen Prüfungen sollte die Evaluation der Zielgrößen möglichst wenig Rechenaufwand erfordern. Die Erhebung der von den Bahnverwaltungen eigentlich verfolgten Designziele (Reduzierung des Verschleißes, Verbessern der fahrdynamischen Eigenschaften etc.) ist jedoch mit erheblichem Rechenaufwand verbunden. Diese *eigentlichen* Designziele wurden daher während des Designprozesses durch Ziele ersetzt, deren Erhebung deutlich einfacher war und die die eigentlichen Designziele zumindest implizieren. So entwickelten Shen et al. [109] eine Methode, die für ein gegebenes Schienenprofil ein Radprofil berechnete, das eine vorher festgelegte Kontaktwinkel-Zielfunktionen erfüllt. Shevtsov et al. [111] [113] [110] sowie Jahed et al. [60] erstellten Radprofile, die eine vorgegebene Rollradiendifferenzfunktion (RRD-Funktion) erfüllen. Shevtsov et al. gelang es mit dieser Methode, die Lebensdauer von Fahrzeugrädern der Rotterdamer Metro (RET) von 25.000km auf 120.000km zu steigern [112]. Auch Dede et al. [33] stützten sich auf eine vorgegebene RRD-Funktion. Ihr genaues Designverfahren bleibt jedoch weitgehend unklar. Dellmann et al. [34] stellten ein Verfahren zur Gestaltung von Radprofilen für Losradfahr-

werke vor. Ihr Algorithmus ermöglichte die Berücksichtigung verschiedener analytischer Zielbedingungen, die z. B. eine Zweipunktberührung ausgeschlossen und die Sicherheit gegen Entgleisen gewährleisteten. Gerlici et al. [47] [48] variierten die Profillinie durch Verändern ihrer Profillinien-Radienfunktion. Ausgehend von der Messkreisebene wird die Profillinie dabei in beide Richtungen schrittweise abgetastet. Nach jedem Schritt wird der Profiltradius im aktuellen Punkt so lange iterativ verändert, bis ein vorher festgelegter Satz von geometrischen Prüfkriterien erfüllt wird. Cui et al. [29] minimierten mit ihrem Designverfahren den Rad-Schiene-Abstand rund um alle denkbaren Kontaktpunkte. Sie erreichten eine Vergrößerung der Kontaktfläche und damit eine Verringerung der Kontaktspannungen. Cui et al. stellten in [30] einen weiteren iterativen Designprozess vor, der als Algorithmus interpretiert werden kann. Die genaue Designstrategie ist hier jedoch unklar. Santamaria et al. [107] verwendeten einen genetischen Algorithmus zur Gestaltung von Radprofilen, die eine vorgegebene Äquivalenz-Konizitäts-Funktion erfüllen sollten. Das Verfahren wird auf einen Radsatz angewendet, der auf Strecken mit zwei unterschiedlichen Spurweiten verkehren kann. Polach [99] entwickelte eine Designmethode speziell für den Einsatz bei Fahrzeugen, die vorrangig gerade Strecken befahren und/oder häufig sehr hohe Antriebsmomente bereitstellen. Die Methode ermöglicht es, die Verteilung der Kontaktpunkte über die Querverschiebung des Radsatzes gezielt einzustellen und so den Verschleiß über einen größeren Teil der Lauffläche zu „verteilen“.

Die bisher genannten Designmethoden erreichen die *eigentlichen* Designziele nur mittelbar. So wird das Designziel „Verschleißminimierung“ nicht erreicht, indem auf direktem Wege Radprofile erzeugt werden, die ein besonders günstiges Verschleißverhalten aufweisen. Stattdessen werden Radprofile erzeugt, deren Gestalt einen bestimmten Regelsatz erfüllt, von dessen Einhaltung ein günstiges Verschleißverhalten *erwartet* wird. Auch wenn das Radprofil diesen a priori festgelegten Regelsatz am Ende des Designprozesses ideal erfüllt, ist das Verschleißverhalten des Rades nur so gut, wie es der

zugrundeliegende Regelsatz zulässt. Die Grenzen der genannten Methoden liegen daher in den Grenzen des Wissens um „gute“ Regelsätze.

Um diese Grenzen zu umgehen, begann Mitte der 2000er Jahre die Entwicklung von Verfahren, die es ermöglichen sollten, die eigentlichen, für den Betrieb relevanten Designziele während des Designprozesses *unmittelbar* anzustreben. Das Optimierungsziel war also nicht mehr die Erfüllung etwa einer bestimmten RRD-Funktion, sondern das Minimieren einer Mess- bzw. Rechengröße, die das Verschleißverhalten unmittelbar repräsentiert. Persson und Iwnicki [97] stellten 2004 ein Designverfahren vor, das diesem Ziel nahe kam. Sie integrierten eine Fahrdynamiksimulation in einen iterativen Genetischen Optimierungszyklus. Während der Fahrdynamiksimulation wurde die im Rad-Schiene-Kontakt dissipierte Energie berechnet. Aus dieser dissipierten Energie, sowie aus den ebenfalls berechneten Kennzahlen für Fahrkomfort, Entgleisungssicherheit und Kontaktspannung, wurde für jedes Radprofil innerhalb des iterativen Optimierungszyklus ein *Fitnesswert* berechnet, der dem Genetischen Algorithmus als Urteilsbasis und Zielfunktion diente. Erstmals war es somit gelungen, eine Größe, die mit dem Verschleiß sehr nahe verwandt ist, als *unmittelbares* Designziel zu definieren. Später wurde eine Variante des Verfahrens vorgestellt, die statt des Radprofils das Schienenprofil optimierte [98]. Novales et al. [91] [92] [93] griffen diesen Ansatz auf und wendeten das Verfahren auf die Berechnung von Radprofilen für ein Tram-Train-Szenario an. Choi et al. [28] führten eine Mehrzieloptimierung mit Hilfe eines Genetischen Algorithmus durch. Die Designziele waren die Minimierung eines *Verschleißindex* sowie die Minimierung eines *Ermüdungsindex*, die beide ebenfalls in einer Mehrkörpersimulation ermittelt wurden. Staskiewicz et al. [119] verwendeten einen Genetischen Algorithmus zur Optimierung von Straßenbahnradern. Aus den Design-Zielen *Verschleißindex*, *Entgleisungssicherheit Y/Q* und *Kontaktflächengröße A* wurden Pareto-Fronten gebildet und geeignete Radprofile identifiziert, die mit Hilfe von FE-Simulationen weiter untersucht werden sollten. 2018 wurde ein Manuskript von Shebani und Iwnicki veröffentlicht

[108]. Sie beschreiben darin die Verwendung eines Künstlichen Neuronales Netzes zur Prognose von Rad- und Schienenverschleiß. Zwar beschränken sich die Autoren auf die Betrachtung quasistationärer Lastfälle und verwenden die Methode auch nicht für Rad- oder Schienendesignprozesse. Auf lange Sicht könnten Neuronale Netze jedoch die Möglichkeit zur Entwicklung neuer Profilgestaltungsverfahren eröffnen. Diese könnten die Verwendung des Verschleißes als unmittelbare Designzielgröße auch ohne die Notwendigkeit zur Durchführung rechenaufwendiger Fahrdynamiksimulationen ermöglichen.

2.7 Metaheuristische Optimierung

Der Begriff *Metaheuristik* wird in der Literatur unterschiedlich definiert. In ihrer weitesten Definition sind Metaheuristische Optimierungsverfahren solche Suchverfahren, die Strategien enthalten, um aus lokalen Optima herauszufinden [46]. Das vorliegende Kapitel gibt eine Einführung in metaheuristische Optimierungsverfahren und gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil soll zunächst ein grundlegendes Verständnis des Themas „Optimierung“ geschaffen werden. Hierzu werden die elementaren Bestandteile eines jeden Optimierungsproblems beschrieben. Im zweiten und dritten Teil werden die metaheuristischen Optimierungsverfahren *Genetische Optimierung* und *Simulated Annealing* vorgestellt und deren Strategien zum Lösen eines Optimierungsproblems erläutert. Das Kapitel soll dem grundlegenden Verständnis dienen und beschränkt sich auf die Darstellung der für die Funktion der Algorithmen entscheidenden Wirkmechanismen und Funktionsblöcke, jeweils in einer einfachen Umsetzungsvariante. Die Literatur kennt darüber hinaus eine unüberschaubare Vielzahl von Variationen dieser Bestandteile, die einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Algorithmen haben können, die an der prinzipiellen Funktionsweise der Algorithmen jedoch wenig verändern.

2.7.1 Optimierungsproblem

Ein Optimierungsproblem umfasst die Elemente *Zielfunktion*, *Parameter* und *Randbedingungen*. Die Zielfunktion, auch Fitnessfunktion genannt, beschreibt die zu optimierende Größe in Abhängigkeit von Parametern (auch: Variablen). Randbedingungen können den Lösungsraum eingrenzen, indem sie den zulässigen Wertebereich von Parametern beschränken. Im einfachsten Fall ist die Zielfunktion ein Skalar, das seinen Wert abhängig von einer einzigen Variable annimmt. Das Optimierungsproblem kann dann formuliert werden durch:

$$\min F(\varepsilon), \varepsilon \in X \quad (2.6)$$

Oder allgemein:

$$\min f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N) \quad (2.7)$$

bzw.

$$\max f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N) \quad (2.8)$$

$f(\cdot)$ ist hierbei die Zielfunktion, deren Minimum oder Maximum gefunden werden soll, $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N$ sind ihre Parameter. X beschreibt den Lösungsraum. [49]

Die Zielfunktion von Optimierungsproblemen mit bis zu zwei unabhängigen Parametern lässt sich anschaulich in einem kartesischen Koordinatensystem als „Gebirgslandschaft“ darstellen. Das Optimum (je nach Zielstellung der höchste Berg oder das tiefste Tal) lässt sich im einfachsten Fall direkt von der Zielfunktion ablesen oder mathematisch durch Nullsetzen der (partiellen) Ableitung(en) der Zielfunktion ermitteln. Die Parameterwerte, mit denen dieses Optimum erzielt wurde, entsprechen den Achsenabschnitten der Extremstelle. Ein solch einfaches Vorgehen setzt jedoch die Kenntnis der Zielfunktion, deren geschlossen analytische Formulierung, ihre mehrfach stetige Differenzierbarkeit sowie Existenz, Kenntnis und geschlossen analytische Formulierung von Randbedingungen voraus. Sind diese Voraus-

setzungen nicht erfüllt, muss auf Optimierungsverfahren zurückgegriffen werden. Hier gibt es eine Vielzahl von Methoden, die sich in ihren Anforderungen z. B. an die Eigenschaften der Zielfunktion und der Randbedingungen sowie um das notwendige Wissen um diese Eigenschaften unterscheiden und die sich für unterschiedlich komplexe Problemstellungen bzw. unterschiedlich große Lösungsräume eignen.

Bei der Optimierung des Radverschleißes mit Hilfe von Zeitschrittsimulationen ist die Zielfunktion unbekannt und lässt sich auch nicht analytisch geschlossen formulieren. Da der Kontaktpunkt je nach Profildform beim Verschieben des Radsatzes im Gleis von einem zum anderen Ort „springen“ kann, ist davon auszugehen, dass die Zielfunktion unstetig und nichtlinear ist. Über weitere Eigenschaften ist wenig bekannt. Die Evaluierung der Zielfunktion kann nur punktweise erfolgen, wobei jeder Evaluierungsschritt aufgrund der Komplexität des Problems sehr viel Rechenzeit in Anspruch nimmt. Für die Ziele dieser Arbeit erscheint es daher sinnvoll, auf Optimierungsmethoden zurückzugreifen, die wenig oder kein Wissen über die Eigenschaften der Zielfunktion erfordern und die die Zielfunktion nur an wenigen diskreten Punkten evaluieren müssen, um gute Ergebnisse zu erzielen. Eine solche Optimierungsmethode ist die Evolutionäre Optimierung mittels Genetischer Algorithmen. Sie ist ein stochastisches, iteratives, metaheuristisches Optimierungsverfahren für kombinatorische Optimierungsprobleme, deren Vorgehensweise an die evolutionäre Entwicklung biologischer Systeme angelehnt ist. [46] [49] [32] Das Verfahren eignet sich für die Lösung von Problemen in sehr großen Lösungsräumen und kann eine große Zahl von Parametern verarbeiten. Es setzt kein Wissen über die Eigenschaften der Zielfunktion voraus.

2.7.2 Evolutionäre Optimierung (EA/GA)

Die Anfänge Genetischer Algorithmen gehen auf eine Veröffentlichung von John H. Holland (1975) zurück [55]. Holland verfolgte die Idee, adapti-

ve Prozesse, die in der Biologie beobachtet werden konnten, in ein mathematisches System zu übersetzen. Hierzu isolierte er die für biologische Adaptionsprozesse wichtigen Faktoren und entwickelte ein Konzept der Anwendung biologischer Adaptionsverfahren auf mathematische Probleme. Die Idee wurde in den folgenden Jahrzehnten stetig weiterentwickelt und mündete in der modernen Genetischen Optimierung. Der Grundgedanke der Genetischen Optimierung basiert auf einer These der Darwin'schen Evolutionstheorie, der „Natural Selection“ (später: „Survival of the Fittest“). Die Theorie besagt, dass in generationsübergreifenden Entwicklungsprozessen das am besten angepasste Individuum überlebt und die beste Fortpflanzungswahrscheinlichkeit hat. [51] [49] Hierdurch werden die Gene von Individuen, die gut an ihre Umgebung angepasst sind, überproportional oft in die folgende Generation weitervererbt, wovon die Spezies als Ganzes profitiert. Die Evolutionäre Optimierung greift diesen Gedanken auf, indem sie jedem Element biologisch evolutionärer Abläufe ein Element des mathematischen Optimierungsproblems zuordnet:

- Fitness → Ergebnis der Zielfunktion
- Gen → Parameter
- Individuum → Parametersatz (= „Lösungskandidat“)
- Generation → Menge der Lösungskandidaten einer Versuchsreihe bzw. Iterationsschleife
- Alle Generationen einer Spezies → Gesamtheit aller Lösungskandidaten aller Versuchsreihen bzw. Iterationsschleifen

Der prinzipielle Ablauf einer Genetischen Optimierung ist beispielhaft in Abbildung 2.13 dargestellt. Der Startpunkt eines Genetischen Algorithmus ist eine *Erste Generation* oder *Startgeneration*, die eine a priori festgelegte Anzahl von *Lösungskandidaten* für ein Optimierungsproblem enthält.

Ein Lösungskandidat ist ein Vektor der Parameter ε_i der Zielfunktion $f(\vec{\varepsilon})$. Lautet die Zielfunktion beispielsweise $f(\vec{\varepsilon}) = \varepsilon_1^2 + 2\varepsilon_2$, so wäre der Vektor $\vec{\varepsilon} = [2, 3]$ ein Lösungskandidat. In Analogie zu biologischen Systemen können Lösungskandidaten auch als *Individuum* und die Komponenten der Vektoren als *Gene* bezeichnet werden. Die Parameter ε_i der Individuen der Startgeneration können zufällig gewählt werden. Sind a priori bereits „gute“ Parametersätze bekannt, können auch diese in die Startgeneration integriert werden.

Im zweiten Schritt wird die Zielfunktion mit den Parametersätzen aller Lösungskandidaten ausgewertet. Für jeden Parametersatz ergibt sich hierdurch ein *Fitnesswert* (auch *Fitnessfaktor*), der den Lösungskandidaten zugeordnet wird. Bei einem Maximierungsproblem signalisiert ein hoher Fitnesswert eine „gute“ Lösung. Ausgehend von der Bewertung der Individuen der ersten Generation, wird durch die im Folgenden beschriebenen Mechanismen *Reproduktion*, *Rekombination* und *Mutation* der Parameter die nächste Generation (mit einer identischen Zahl von Lösungskandidaten) gebildet. [32]

Reproduktion Die Reproduktion findet ihr natürliches Ebenbild in der asexuellen Fortpflanzung und ist der einfachste Mechanismus zur Bildung eines Individuums einer Folgegeneration in der Genetischen Optimierung. Für die Erzeugung jedes Individuums der Folgegeneration wird stochastisch ein Elternindividuum ausgewählt, welches unverändert in die Folgegeneration übernommen wird. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Individuum zur Reproduktion ausgewählt wird, ist abhängig von seinem Fitnesswert. Fittere Individuen haben eine höhere Reproduktionswahrscheinlichkeit als weniger fitte Individuen. Individuen können mehrfach zur Reproduktion ausgewählt werden. Da die Generationsgröße unveränderlich ist, müssen in diesem Fall andere (wahrscheinlich weniger fitte) Individuen von der Reproduktion ausgeschlossen werden. Durch die ausschließliche Anwendung von Reproduktion kann eine Generation nur Individuen enthalten, die auch in der voran-

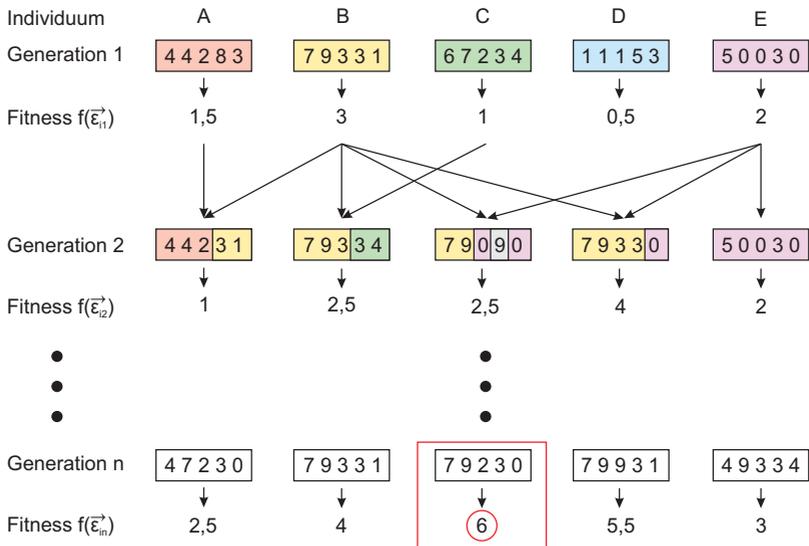


Abbildung 2.13: Ablauf einer Genetischen Optimierung (Maximierungsproblem). Die Grafik enthält Beispiele für Reproduktion (Spalte E), Reproduktion u. Rekombination (Spalte A, B) sowie Reproduktion u. Rekombination u. Mutation (Spalte C); das blaue Individuum in Spalte D hat sich nicht fortgepflanzt. Das Optimierungsergebnis, d. h. das fitteste Individuum im gesamten Optimierungsprozess, ist rot umrandet und befindet sich (in diesem Beispiel) in der letzten Generation.

gegangenen Generation enthalten waren. Beim Durchlaufen mehrerer Generationen entfallen schlechte Lösungskandidaten jedoch zugunsten besserer Lösungskandidaten, die dann mehrfach in einer Generation vorhanden sein können. Der Genetische Algorithmus konvergiert bei exklusiver Anwendung der Reproduktion also mit großer Wahrscheinlichkeit zum besten Individuum der Startgeneration. Die Reproduktion eignet sich daher nur zur Ergänzung der im Folgenden beschriebenen Fortpflanzungsmechanismen *Rekombination* und *Mutation*.

Rekombination Die Rekombination ist an die sexuelle Fortpflanzung in der Natur angelehnt. Für die Rekombination werden durch Reproduktion

zunächst jeweils zwei „Eltern“-Individuen bestimmt. Von beiden Elternteilen werden stochastisch zusammenhängende Genabschnitte ausgewählt, die in das Kind-Individuum einfließen. Das Kind-Individuum setzt sich also aus Genen beider Eltern-Individuen zusammen. Die Rekombination wird wiederholt, bis die neue Generation vollständig gefüllt ist. Im einfachsten Fall dienen die Parameter eines Individuums als Gen. Durch Rekombination ist die Entstehung von Lösungskandidaten möglich, die in der vorherigen Generation noch nicht vorhanden waren. Dennoch lässt sich durch Rekombination nur ein Teil des Lösungsraums erschließen, da der Genpool der Startgeneration im Laufe der Evolution nicht erweitert wird. Durch Rekombination können also nur Lösungskandidaten erzeugt werden, deren Gene in der Startgeneration bereits enthalten waren. Um diese Einschränkung zu umgehen, findet der dritte Evolutionsmechanismus Anwendung:

Mutation Um dem Genetischen Algorithmus den Lösungsraum vollständig zugänglich zu machen, ist es im Allgemeinen erforderlich, den durch die Startgeneration vorgegebenen Genpool im Laufe der Evolution zu erweitern. Dies geschieht durch eine stochastische Störung des Reproduktions- und des Rekombinationsmechanismus. Hierzu wird jedes Gen eines durch Reproduktion oder Rekombination erzeugten Kind-Individuums einer geringen Mutationswahrscheinlichkeit unterworfen. Durch Mutation wird das betreffende Gen stochastisch verändert und kann so Werte annehmen, die es bei keinem der Elternteile innehatte.

Eine sehr häufig eingesetzte Variante zur Erweiterung des Genpools ist die *Nachbarschaftssuche*. Hierzu werden Gene oder Gensektionen eines durch Rekombination erzeugten Individuums stochastisch ausgewählt und durch „Nachbarn“ ersetzt. Ein Nachbar des Lösungsvektors (5,9) wäre z. B. der Lösungsvektor (6,8) oder der Lösungsvektor (4,10). [49] Nachbarn sind also nahe beieinanderliegende Punkte im Lösungsraum. Nachbarschaftssuche erweitert daher nicht nur den Genpool, sie dient auch dazu, den Lösungs-

raum in der Nähe „guter“ Lösungen gezielter abzusuchen.

Ist die mit Hilfe der beschriebenen Mechanismen entstandene zweite Generation mit Lösungskandidaten gefüllt (d. h. sie enthält die gleiche Zahl von Lösungskandidaten wie die erste Generation) und wurde jeder Lösungskandidat durch Auswerten der Zielfunktion bewertet, so dient die zweite Generation als Ausgangspunkt für eine folgende Generation und die beschriebenen Schritte werden erneut durchlaufen. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt wird. Ein Abbruchkriterium kann im einfachsten Fall das Erreichen einer vorher festgelegten Zahl von Generationen sein. Häufig wird als Abbruchkriterium eine Untergrenze über die Fitnessverbesserung der letzten n Generationen verwendet (z. B.: Abbruch, wenn Fitness während der letzten 30 Generationen weniger als 1% verbessert werden konnte). Das Individuum mit dem besten Fitnesswert (dieses kann in einer beliebigen Generation vorkommen) ist dann das Ergebnis des Genetischen Optimierungsprozesses.

2.7.3 Simulated Annealing (SA)

Simulated Annealing (auch: Simulierte Abkühlung, SA) ist ein weiteres metaheuristisches Optimierungsverfahren, das der Familie der Stochastic Adaptive Search (SAS)-Methoden zugeordnet wird. SAS-Methoden sind metaheuristische Methoden, deren globale Konvergenz nachgewiesen werden konnte. Dieser Nachweis gilt jedoch nur für den Fall eines perfekt konfigurierten Algorithmus, was in der Praxis nur schwer zu erreichen ist. Dennoch erzielen SAS-Algorithmen oftmals bessere Ergebnisse als andere metaheuristische Verfahren. [49] Das Optimierungsverfahren der Simulierten Abkühlung basiert auf einer Beobachtung aus der Werkstoffkunde: Durch Erhitzen von Metallen wird die Schwingungsweite und Schwingungsfrequenz der Atome erhöht und eine größere Beweglichkeit der Atome in ihrem

Kristallgitter erzielt. Dies ermöglicht Umordnungsprozesse innerhalb des Kristallgefüges, die es dem Werkstoff erlauben, sich seinem thermodynamischen Gleichgewichtszustand anzunähern, wodurch z. B. Eigenspannungen im Werkstoff abgebaut werden können. Wird der Werkstoff anschließend ausreichend langsam abgekühlt, sodass die Atome nicht in ungünstigen Positionen „eingefroren“ werden, so ist der Werkstoff auch nach Abschluss der Wärmebehandlung seinem thermodynamischen Gleichgewicht nähergekommen. Seine freie Energie wurde also reduziert. [19] Simulated Annealing folgt der Idee, diesen Abkühlprozess als Optimierungsprozess zu begreifen (Minimieren der Spannung) und in ein mathematisches Modell zu übertragen, mit dessen Hilfe sich der Ansatz auf andere Optimierungsprobleme anwenden lässt. Simulated Annealing bildet hierzu eine Analogie zwischen der temperaturabhängigen Schwingungsweite von Metallatomen und der stochastischen Veränderung von Parametern der Lösungskandidaten eines Optimierungsproblems. Die Idee ist, die Parameter der Lösungskandidaten stochastisch „schwingen“ zu lassen und die Schwingung mit der Zeit immer weiter zu verkleinern. Als Triebkraft für die Optimierung (bei Metallen: die innere Spannung) dient nun ein stochastischer Prozess, der auf Basis der erzielten Fitness eines Lösungskandidaten sowie der aktuellen „Temperatur“ entscheidet, ob eine Optimierungslösung weiterverfolgt oder verworfen wird.

Abbildung 2.14 zeigt den Ablauf eines Simulated Annealing-Algorithmus am Beispiel eines Minimierungsproblems. Der Algorithmus startet in der ersten Phase P_1 mit einer konstanten *Anfangstemperatur* T_{Start} und einer *Anfangslösung* $\vec{\epsilon}_{aktuell}$ der *Zielfunktion* $f(\vec{\epsilon})$. Zu dieser Anfangslösung wird stochastisch ein *Nachbar* $\vec{\epsilon}_{nachbar}$ gebildet (s. Kapitel 2.7.2 Abschnitt „Mutation“). Die Größe der Nachbarschaft, aus der dieser Nachbar stammt, ist von der aktuellen Temperatur abhängig. Bei hohen Temperaturen können weiter entfernte Nachbarn gewählt werden als bei niedrigeren Temperaturen. Dies entspricht der Schwingungsweite der Atome beim Abkühlen von Metallen. Die Fitness des auf diese Art bestimmten Nachbarn $\vec{\epsilon}_{nachbar}$ wird

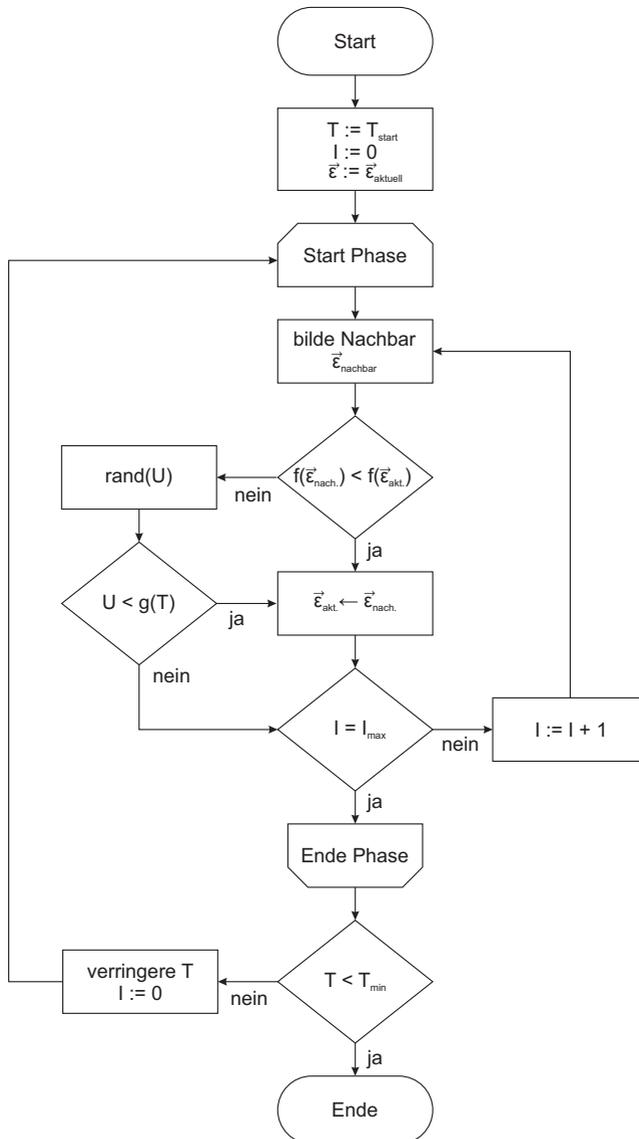


Abbildung 2.14: Simulated Annealing am Beispiel eines Minimierungsproblems.

mit der Fitness des vorherigen Lösungskandidaten $\vec{e}_{aktuell}$ verglichen. Erzielt der Nachbar einen besseren Fitnesswert als der vorherige Lösungskandidat, d. h. bei einem Minimierungsproblem:

$$f(\vec{e}_{nachbar}) < f(\vec{e}_{aktuell}) \quad (2.9)$$

so ersetzt er die Anfangslösung als neue Referenz:

$$\vec{e}_{aktuell} \leftarrow \vec{e}_{nachbar} \quad (2.10)$$

Ist er schlechter, so wird er entweder verworfen oder aber mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit trotzdem zur neuen Referenz erklärt. Diese Wahrscheinlichkeit ist wiederum von der aktuellen Temperatur T abhängig. Je höher die Temperatur, desto wahrscheinlicher ist, dass eine schlechtere Lösung $\vec{e}_{nachbar}$ eine bessere Lösung $\vec{e}_{aktuell}$ verdrängt. In beiden Fällen wird die Schleife erneut durchlaufen, bis ein Phasenabbruchkriterium erreicht wird (z. B.: Erreichen der festgelegte Maximalzahl von Iterationen I_{max}). Ist das Abbruchkriterium erreicht, wird die Temperatur T gesenkt und eine neue Phase gestartet. Auch dieser Vorgang wird wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist (z. B. eine vorher festgelegte Minimaltemperatur).

Das stochastische Akzeptieren „schlechterer“ Lösungskandidaten eröffnet dem Algorithmus den kompletten Lösungsraum und vermindert die Wahrscheinlichkeit, in ein lokales Optimum zu geraten, das nicht dem globalen Optimum entspricht. Durch die schrittweise Absenkung der Temperatur wird dennoch sichergestellt, dass der Algorithmus konvergiert und zu einem Optimum findet.

Simulated Annealing-Algorithmen existieren in einer Vielzahl von Varianten. Sie unterscheiden sich insbesondere in den Punkten:

- Strategie zur Bildung von Nachbarn
- Art des Zusammenhangs von Übernahmewahrscheinlichkeit schlechter Kandidaten und Temperatur (in Abbildung 2.14: Funktion $g(T)$)
- Temperaturentwicklung über die Phasen des Algorithmus (logarithmisch, geometrisch oder rational)

3 Optimierungsprozess

In der vorliegenden Arbeit wird ein iteratives Verfahren zur Verschleißoptimierung von Eisenbahn-Radprofilen entwickelt. Zur Bewertung der Profilhüte wird nicht nur die skalare Größe des massenmäßigen Materialabtrags betrachtet, sondern der Verschleiß lokal, d. h. über die Breite des Radprofils, analysiert. Auch Rollkontaktermüdung und Mehrpunktkontakt werden im Optimierungsprozess berücksichtigt. Der Ablauf des Optimierungsprozesses ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Für die Optimierung wird eine Fahrdynamik- und Verschleißsimulation mit stochastischen Optimierungsalgorithmen zu einer Iterationsschleife gekoppelt. In der Arbeit werden die stochastischen Optimierungsstrategien *Simulated Annealing (SA)* und *Genetische Optimierung / Genetischer Algorithmus (GA)* verwendet (s. Abschnitt 3.1). Die Optimierungsalgorithmen werden in der Software *Matlab* der Firma *MathWorks* implementiert [10]. *Matlab* ist ein umfangreiches Softwarepaket zur Durchführung iterativer Analysen und Entwicklungsprozesse [10]. *Matlab* stellt eine proprietäre Programmiersprache bereit, die für die Formulierung und Anwendung matrixbasierter Mathematik besonders geeignet ist [10]. Die Software wird in der Version *2015a* verwendet. *Matlab* enthält eine *Global Optimization Toolbox* genannte Erweiterung, die in Version 7.2 verwendet wird [9]. Die *Global Optimization Toolbox* ermöglicht die Lösung von Optimierungsproblemen mit SA- und GA-Algorithmen. Die *Toolbox* wurde für diese Arbeit um Funktionen erweitert, die beim Einsatz von SA-Algorithmen das Setzen von Randbedingungen ermöglichen, die lineare Abhängigkeiten der Variablen des Optimierungsproblems enthalten.

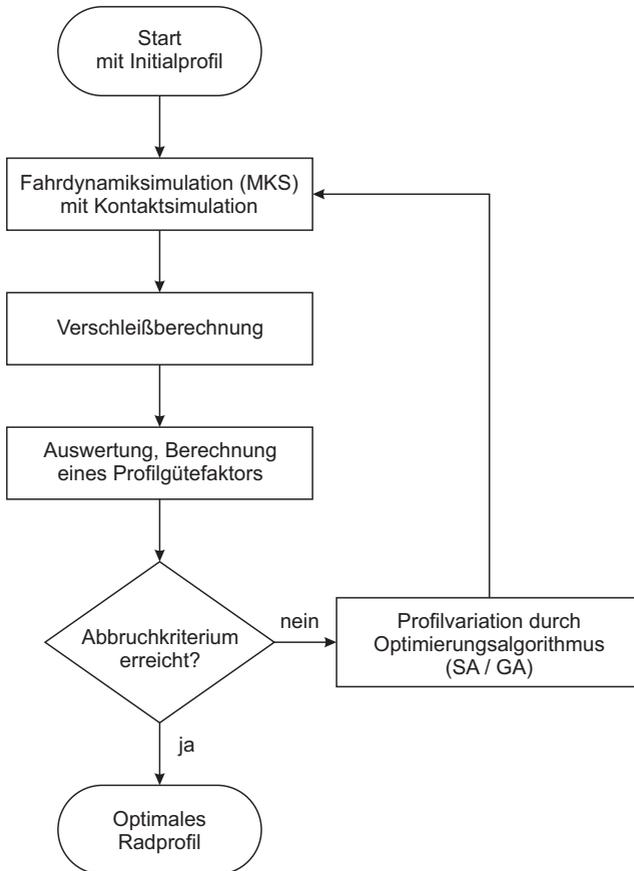


Abbildung 3.1: Ablauf des Profilloptimierungsprozesses.

Die Fahrdynamiksimulationen, die Simulation des Rad-Schiene-Kontaktgebiets und des Radverschleißes sowie die Simulation zur Ausbildung von Rollkontaktermüdung, werden in der Mehrkörpersimulationssoftware *SimPack* der *Simpack AG* von *Dassault Systèmes* durchgeführt [114]. An Fahrzeugrädern, die für die Verschleißauswertung nicht verwendet werden, wird das *Equivalent Elastic*-Kontaktmodell von *SimPack* eingesetzt. Der Kon-

takt an Rädern, deren Verschleiß bewertet wird, wird mit dem *Discrete Elastic*-Kontaktmodell berechnet. Zur Lösung des Normalkontaktproblems wird dort ein Multi-Hertz-Ansatz, basierend auf der STRIPES Methode [18] [104], genutzt, der das Kontaktgebiet in longitudinaler Richtung in elf Streifen diskretisiert und somit nicht auf elliptische Kontaktgebietsgeometrien beschränkt ist [13]. Die Lösung des Tangentialkontaktproblems basiert auf dem FASTSIM-Algorithmus, wobei die Diskretisierung des Kontaktgebiets beibehalten wird. Der Elastizitätsberechnung liegen die Materialdaten von ER9-Radstahl nach [2] zugrunde. Zur Verschleißberechnung wird *Archards Wear Model* eingesetzt, das nach [61] [95] parametrisiert wurde. Während der Optimierung wird der Verschleiß an allen vier Radsätzen, also acht Rädern, der Fahrzeuge in jedem Zeitschritt berechnet, über die Simulationsdauer kumuliert und am Ende des Simulationslaufs ausgewertet. Die einzelnen Ergebnisse der Verschleißsimulationen erheben **keinen Anspruch auf quantitative Korrektheit**. Zum Erzielen quantitativer Korrektheit ist nach Einschätzung des Autors, wie in Kapitel 2.4.3 erklärt, eine umfangreiche Kalibrierung der Kontakt- und Verschleißmodelle durch Auswertung von Verschleißbildern am realen Fahrzeug notwendig. Eine solche Kalibrierung kann in dieser Arbeit nicht geleistet werden. Die Ergebnisse der Verschleißsimulationen erlauben jedoch *vergleichende* Betrachtungen unterschiedlicher Radprofile und Lastszenarien, sodass die Aussagekraft dieser Arbeit durch die genannte Einschränkung unbeeinflusst bleibt. Während der Optimierung werden ausschließlich Kurzzeitverschleißsimulationen durchgeführt. Während der Simulationen findet also *keine* verschleißbedingte Formänderung von Rad- oder Schienenprofilen statt. Das Ergebnis der Optimierung ist daher das bestmögliche *Neuprofil* eines Rades. Die praktische Bedeutung dieser Einschränkung sinkt mit zunehmender Qualität der durch die Optimierung berechneten Radprofile, da optimale Radprofile im Sinne dieser Arbeit eine gute Formhaltigkeit aufweisen, wie in Abschnitt 3.2 detailliert erklärt wird.

3.1 Wahl der Optimierungsmethode

Wie in den Grundlagen beschrieben, beeinflusst die Gestalt der Radprofilinie den am Rad entstehenden Verschleiß auf unterschiedliche Weise sowohl direkt über Größe, Gestalt und Lage des Kontaktgebietes, als auch indirekt über das Laufverhalten des Fahrzeugs, das selbst auch Einfluss auf Größe, Gestalt und Lage des Kontaktgebiets nimmt. Bei der Optimierung des Radprofils lässt sich die Zielfunktion daher nicht geschlossen analytisch formulieren und auch über ihre Eigenschaften ist nur wenig bekannt (s. Abschnitt 2.7). Bei Verwendung von Mehrkörpersimulationen zur Berechnung des Verschleißes kann die Zielfunktion aufgrund des großen Rechenaufwandes zudem nur an wenigen, diskreten Stellen evaluiert werden. Für die Radprofiloptimierung im Sinne dieser Arbeit eignen sich daher nur solche Optimierungsmethoden, die wenig oder kein Wissen über die Eigenschaften der Zielfunktion voraussetzen und die zudem auch dann zu guten Ergebnissen führen können, wenn die Zielfunktion nur an wenigen Stellen berechnet werden kann. Zwei Methoden, die diese Kriterien erfüllen, sind die Genetische Optimierung und das Verfahren des Simulated Annealing. Die Genetische Optimierung konnte ihre prinzipielle Eignung zur Anwendung auf Radverschleißprobleme bereits in Arbeiten anderer Autoren zeigen. Die Methode wird daher auch in dieser Arbeit verwendet. Die Methode des Simulated Annealing wurde nach Kenntnis des Autors in der Radprofiloptimierung bisher nicht eingesetzt. Ihr einfaches Funktionsprinzip lässt diese Methode besonders anwenderfreundlich erscheinen. Ihr Verhalten während des Optimierungsprozesses kann durch die Konfiguration nur weniger Parameter festgelegt werden, wodurch das finden geeigneter Parametersätze und damit das Ausschöpfen der vollen Leistungsfähigkeit des Verfahrens erheblich erleichtert wird. Simulated Annealing wird daher in dieser Arbeit als weiteres Verfahren neben der Genetischen Optimierung angewendet. Aufgrund technischer Einschränkungen, die sich im Laufe dieser Arbeit ergaben, konnte das Verfahren der Genetischen Optimierung nur auf eines der

beiden in dieser Arbeit betrachteten Fahrzeuge angewendet werden. Simulated Annealing kommt hingegen bei der Optimierung beider Fahrzeuge zum Einsatz.

3.2 Designziel und Zielfunktion

Das Ziel des Designprozesses ist die geometrische Beschreibung eines verschleißoptimalen Radprofils. Um dies zu ermöglichen, muss der scheinbar eindeutige Begriff der Verschleißoptimalität zunächst definiert werden. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, ist Verschleiß „der fortlaufende Verlust oder die Umlagerung bzw. Verdrängung von Material von einer Kontaktfläche“ [57] [82] [94]. Bis heute ist kein Verschleißmodell bekannt, das die Umlagerung von Material berücksichtigt und in Fahrdynamiksimulationen eingesetzt werden kann. Diese Arbeit beschränkt sich daher auf die Betrachtung des *Verlustes* von Material. Es scheint zunächst naheliegend, dasjenige Radprofil als verschleißoptimal zu bezeichnen, das dem *geringstmöglichen* fortlaufenden Verlust von Material unterworfen ist. Also dasjenige Radprofil, das pro Kilometer den geringsten massenmäßigen Materialabtrag erfährt. Dieser globale Ansatz der Verschleißbewertung als alleiniges Optimierungskriterium geht jedoch an der betrieblichen Praxis vorbei. Die Masse des abgetragenen Materials ist für die Frage nach der Einsetzbarkeit eines Fahrzeugrades von untergeordneter Bedeutung. Die geometrische Form des Radprofils ist dagegen entscheidend. Ein Rad, das seine Profilform im Laufe des Betriebs nur langsam verändert, muss seltener abgedreht oder getauscht werden. Zudem kann es beim Abdrehvorgang mit geringerem Materialverlust in seine ursprüngliche Form gebracht werden. Neben einer Minimierung des Materialabtrags sollte das Ziel der Optimierung daher eine Minimierung der fortlaufenden Formänderung des Rades sein. Dies macht eine lokale Auswertung des Verschleißes erforderlich. Neben der Höhe des Materialabtrags muss also auch *der Ort* des Materialabtrags im lokalen Radkoordinatensystem Berücksichtigung finden. Im Laufflächenbereich des Rades

ist eine möglichst geringe Formänderung nahezu gleichbedeutend mit einer möglichst gleichmäßigen Verschleißverteilung über die Laufflächenbreite. Im Bereich des Spurkranzes bzw. der Hohlkehle hingegen bedeutet jede Art von Materialabtrag eine Reduzierung der Spurkranzdicke und damit eine Geometrieänderung des Radprofils. Der Bereich von Spurkranz und Hohlkehle sollte daher bei der Bewertung des Verschleißverhaltens gesondert betrachtet werden. Als weiteres Designziel wird die Vermeidung von Rollkontaktermüdung definiert. Angestrebt wird ein Oberflächenermüdungsindex $FI_{surf} \leq 0$ (s. Gleichung 2.5). Da der Zweipunktkontakt zu Problemen führen kann, die über einen erhöhten Verschleiß hinausgehen, sollte dessen Auftreten von der Zielfunktion zusätzlich „bestraft“ werden.

Bei der Spezifizierung des Designziels muss zudem die Fahrzeugart berücksichtigt werden. Der Verschleiß an den Rädern eines Einrichtungsfahrzeugs (z. B. einer Straßenbahn) ist anders zu bewerten als der an den Rädern eines Zweirichtungsfahrzeugs (z. B. eines Reisezugwagens). Beim Einrichtungsfahrzeug lässt sich klar zwischen führenden und nachlaufenden Radsätzen eines Drehgestells sowie zwischen einem führenden und einem nachlaufenden Drehgestell unterscheiden. Ein führender Radsatz erfährt andere Belastungen als ein nachlaufender Radsatz und wird entsprechend ein anderes Verschleißbild entwickeln. Bei der Bewertung der Güte eines Radprofils, das sowohl auf führenden als auch auf nachlaufenden Radsätzen eingesetzt werden soll, müssen daher die Verschleißbilder aller Radsätze getrennt voneinander bewertet werden. Ein „gutes“ Radprofil muss sowohl in einem führenden, als auch in einem nachlaufenden Radsatz ein „gutes“, in sich stimmiges Verschleißbild erzeugen.

Bei Zweirichtungsfahrzeugen ist die separate Betrachtung von vorlaufenden und nachlaufenden Radsätzen hingegen nicht sinnvoll. Ein vorlaufender Radsatz wird durch Fahrtrichtungsänderung zum nachlaufenden Radsatz. Hier kommt es deshalb darauf an, dass sich die Verschleißbilder (führend und nachlaufend) gut ergänzen. Vorteilhaft kann sich beispielsweise auswir-

ken, wenn die Verschleißspitze im nachlaufenden Szenario an einer anderen y -Koordinate des Radprofils liegt, als im vorlaufenden Fall.

Aus diesen Überlegungen heraus werden zwei unterschiedliche Zielfunktionen definiert: eine für ein Einrichtungsfahrzeug und eine für ein Zweirichtungsfahrzeug. Beide Zielfunktionen berücksichtigen und gewichten globale Verschleißspitzen, lokale Verschleißspitzen im Hohlkehlenbereich, einen Ermüdungsindex sowie Zweipunktkontakt. Sinnvolle Gewichtungen der einzelnen Faktoren wurden durch Simulationsreihen abgeschätzt.

3.2.1 Einrichtungsfahrzeug

Für jeden betrachteten Radsatz i wird ein Penaltyfaktor $G_i(\vec{\epsilon}, y_R)$ festgelegt, wobei $\vec{\epsilon}$ ein Parametervektor und y_R die y -Koordinate im lokalen Radprofilkoordinatensystem ist. Der Penaltyfaktor hat die Form:

$$G_i(\vec{\epsilon}, y_R) = (A + B) \cdot (2 + C) \cdot D^3 \quad (3.1)$$

A und B repräsentieren die globale Verschleißspitze sowie die Verschleißspitze im Hohlkehlenbereich des Rades. C repräsentiert einen Rollkontakt-ermüdungsindex, D steht für die durchschnittliche Zahl gleichzeitig auftretender Kontaktpunkte an einem Rad.

Im Einzelnen werden gewählt:

$$\begin{aligned}
 A &= \max_{y_R} \int_T (w_{z_l}(\vec{\epsilon}, y_R, t) + w_{z_r}(\vec{\epsilon}, y_R, t)) dt \\
 B &= \max_{y_R < -30} \int_T (w_{z_l}(\vec{\epsilon}, y_R, t) + w_{z_r}(\vec{\epsilon}, y_R, t)) dt \\
 C &= \int_T (FI_{surf_l}(\vec{\epsilon}, t) + FI_{surf_r}(\vec{\epsilon}, t)) dt \quad (3.2) \\
 &\quad \forall FI_{surf}(\vec{\epsilon}, t) : FI_{surf}(\vec{\epsilon}, t) > 0 \\
 D &= \frac{1}{2T} \cdot \int_T (k_{p_l}(\vec{\epsilon}, t) + k_{p_r}(\vec{\epsilon}, t)) dt
 \end{aligned}$$

$w_z(\vec{\epsilon}, y_R, t)$ ist hierin der Verschleiß in Normalenrichtung des Radprofils eines Rades zum Zeitpunkt t , aufgetragen über die Radprofilkoordinate y_R und in Abhängigkeit eines Variablenvektors $\vec{\epsilon}$. Die Indizes l und r stehen für das linke bzw. das rechte Rad. k_p ist die Zahl gleichzeitig auftretender Kontaktpunkte eines Rades zum Zeitpunkt t und ist ebenfalls abhängig vom Variablenvektor $\vec{\epsilon}$. FI_{surf} ist der Ermüdungsindex nach Gleichung 2.5. T ist der betrachtete Simulationszeitraum. Bei Verwendung einer Zeitschritt-simulation lässt sich auch schreiben:

$$\begin{aligned}
A &= \max_{y_R} \left(\sum_N (w_{z_l}(\vec{\epsilon}, y_R, n) + w_{z_r}(\vec{\epsilon}, y_R, n)) \right) \\
B &= \max_{y_R < -30} \left(\sum_N (w_{z_l}(\vec{\epsilon}, y_R, n) + w_{z_r}(\vec{\epsilon}, y_R, n)) \right) \\
C &= \sum_N (FI_{surf_l}(\vec{\epsilon}, n) + FI_{surf_r}(\vec{\epsilon}, n)) \\
&\quad \forall FI_{surf}(\vec{\epsilon}, n) : FI_{surf}(\vec{\epsilon}, n) > 0 \\
D &= \frac{1}{2N} \left(\sum_N k_{pl}(\vec{\epsilon}, n) + k_{pr}(\vec{\epsilon}, n) \right)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

$w_z(\vec{\epsilon}, y_R, n)$ ist hierbei der Verschleiß eines Rades des Radsatzes in Normalenrichtung des Radprofils im Zeitschritt n . k_p ist die Zahl der gleichzeitig auftretenden Kontaktpunkte eines Rades im Zeitschritt n . N ist die Zahl der Zeitschritte im betrachteten Simulationszeitraum.

Die Penaltyfaktoren für alle betrachteten Radsätze $i = 1..4$ des Fahrzeugs werden schließlich zu einer Zielfunktion

$$F = \sum_{i=1..4} G_i(\vec{\epsilon}, y_R) \tag{3.4}$$

zusammengefasst.

Der Optimierungsalgorithmus versucht die gewählte Zielfunktion durch verändern des Variablenvektors $\vec{\epsilon}$ zu minimieren:

$$\min F(\vec{\epsilon}) \tag{3.5}$$

3.2.2 Zweirichtungsfahrzeug

Bei einem vierachsigen Zweirichtungsfahrzeug mit zwei Drehgestellen bildet der vorlaufende Radsatz des vorlaufenden Drehgestells (RS1) mit dem nachlaufenden Radsatz des nachlaufenden Drehgestells (RS4) eine logische

Einheit, da diese Radsätze bei einem Fahrtrichtungswechsel den Lastszenarien des jeweils anderen Radsatzes ausgesetzt sind (der führende Radsatz des führenden Drehgestells wird zum nachlaufenden Radsatz des nachlaufenden Drehgestells und umgekehrt). Eine ebensolche logische Einheit bildet der nachlaufende Radsatz des vorlaufenden Drehgestells (RS2) mit dem vorlaufenden Radsatz des nachlaufenden Drehgestells (RS3). Für ein vierachsiges Zweirichtungsfahrzeug werden daher nur zwei Penaltyfaktoren nach Gleichung 3.1 formuliert, einer für jede logische Einheit von Radsätzen. Es sind dann:

$$A = \max_{y_R} \left(\int_T (w_{z_{1l}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, t) + w_{z_{1r}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, t)) dt \right. \\ \left. + \int_T (w_{z_{2l}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, t) + w_{z_{2r}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, t)) dt \right)$$

$$B = \max_{y_R < -30} \left(\int_T (w_{z_{1l}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, t) + w_{z_{1r}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, t)) dt \right. \\ \left. + \int_T (w_{z_{2l}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, t) + w_{z_{2r}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, t)) dt \right)$$

(3.6)

$$C = \frac{1}{2} \left(\int_T (FI_{surf_{1l}}(\vec{\mathcal{E}}, t) + FI_{surf_{1r}}(\vec{\mathcal{E}}, t)) dt \right. \\ \left. + \int_T (FI_{surf_{2l}}(\vec{\mathcal{E}}, t) + FI_{surf_{2r}}(\vec{\mathcal{E}}, t)) dt \right) \\ \forall FI_{surf}(\vec{\mathcal{E}}, t) : FI_{surf}(\vec{\mathcal{E}}, t) > 0$$

$$D = \frac{1}{4T} \cdot \left(\int_T (k_{p_{1l}}(\vec{\mathcal{E}}, t) + k_{p_{1r}}(\vec{\mathcal{E}}, t)) dt \right. \\ \left. + \int_T (k_{p_{2l}}(\vec{\mathcal{E}}, t) + k_{p_{2r}}(\vec{\mathcal{E}}, t)) dt \right)$$

Die Indizes 1 und 2 stehen für die beiden Radsätze des logischen Radsatzpaars, für das der Penaltyfaktor formuliert wird. In zeitschrittbezogener Schreibweise ergibt sich entsprechend:

$$\begin{aligned}
 A &= \max_{y_R} \left(\sum_N (w_{z_{1l}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, n) + w_{z_{1r}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, n)) \right. \\
 &\quad \left. + \sum_N (w_{z_{2l}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, n) + w_{z_{2r}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, n)) \right) \\
 B &= \max_{y_R < -30} \left(\sum_N (w_{z_{1l}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, n) + w_{z_{1r}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, n)) \right. \\
 &\quad \left. + \sum_N (w_{z_{2l}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, n) + w_{z_{2r}}(\vec{\mathcal{E}}, y_R, n)) \right) \\
 C &= \frac{1}{2} \left(\sum_N (FI_{surf_{1l}}(\vec{\mathcal{E}}, n) + FI_{surf_{1r}}(\vec{\mathcal{E}}, n)) \right. \\
 &\quad \left. + \sum_N (FI_{surf_{2l}}(\vec{\mathcal{E}}, n) + FI_{surf_{2r}}(\vec{\mathcal{E}}, n)) \right) \\
 &\quad \forall FI_{surf}(\vec{\mathcal{E}}, n) : FI_{surf}(\vec{\mathcal{E}}, n) > 0 \\
 D &= \frac{1}{4N} \cdot \left(\sum_N (k_{p_{1l}}(\vec{\mathcal{E}}, n) + k_{p_{1r}}(\vec{\mathcal{E}}, n)) \right. \\
 &\quad \left. + \sum_N (k_{p_{2l}}(\vec{\mathcal{E}}, n) + k_{p_{2r}}(\vec{\mathcal{E}}, n)) \right)
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

3.3 Modell des Radprofils

Um eine Optimierung des Radprofils mit Hilfe von Algorithmen durchzuführen, ist ein mathematisches Modell der Radprofilinie erforderlich, das die Geometrie der Profillinie in einem Parametersatz \vec{e} zusammenfasst. Wie in Kapitel 2.6 beschrieben, wurden Radprofile in der Vergangenheit häufig durch Aneinanderreihung von Geraden und Kreissegmenten konstruiert. Modernere Verschleißprofile wie das S1002- oder das EPS-Profil folgen dieser Konstruktionsvorschrift jedoch nicht mehr. DIN EN 13715 [4] beschreibt diese Profile, im für das Verschleißverhalten wichtigen Übergang von der Hohlkehle zur Lauffläche, durch Punktkoordinaten. In der vorliegenden Arbeit wird die Profillinie über ihre Steigung definiert. Der Parametersatz, der vom Optimierer erzeugt wird, definiert die erste Ableitung der Profillinie zu 21 diskreten Werten auf der Abszisse. Zwischen den so definierten Punkten wird der Ableitungsverlauf durch *Kubisch Hermetische Splines* (cSplines) interpoliert. Durch numerische Integration wird hieraus eine Profillinie berechnet. Bild 3.2 zeigt die Anordnung der variablen Punkte auf dem Radprofil. Im Bereich der Lauffläche beträgt der Abstand zwischen den Punkten ca. 4 mm. Im Übergang zur Hohlkehle nimmt der Abstand der Punkte stetig ab und erreicht auf der Seite des Spurkranzes einen kleinsten Abstand von ca. 1 mm. Wie aus dem Bild hervorgeht, beschränkt sich die Optimierung auf den Bereich *zwischen* Spurkranz und äußerer Neigung des Radprofils. Der Spurkranz selbst sowie große Teile der äußeren Neigung bleiben unverändert. Der Spurkranz ist für die Entgleisungssicherheit entscheidend. Seine Gestaltung unterliegt zahlreichen Randbedingungen, die mit Radverschleiß in keinem unmittelbaren Zusammenhang stehen. Eine automatisierte Optimierung des Spurkranzes ist daher kaum möglich. Der Bereich der äußeren Neigung kommt im normalen Betrieb mit der Schiene nur in Sondersituationen, wie z. B. bei Weichenüberfahrten in Kontakt. Eine Verschleißoptimierung dieses Bereiches erscheint im Rahmen dieser Arbeit daher nicht sinnvoll.

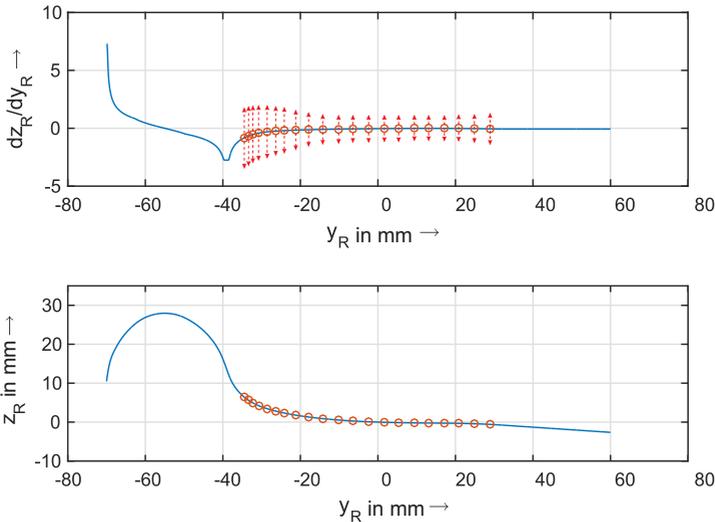


Abbildung 3.2: Parametermodell der Radprofilinie. Oben: Steigung der Radprofilinie und Lage der Parameterpunkte. Die erlaubte Variationsbreite der Optimierungsparemeter ist nicht maßstäblich. Unten: Integration zu einer Radprofilinie.

3.4 Wahl der Randbedingungen

Für die Leistung des Optimierungsalgorithmus ist die Größe des Lösungsraumes von entscheidender Bedeutung. Es ist daher unverzichtbar, den Lösungsraum durch Setzen sinnvoller Randbedingungen zu beschränken. Die Randbedingungen müssen den Lösungsraum so weit einschränken, dass die Berechnung von offensichtlich nicht sinnvollen Lösungen a priori ausgeschlossen wird. Zugleich dürfen sie den Lösungsraum jedoch nicht so weit beschränken, dass potenziell gute Lösungen schon vor ihrer Berechnung verworfen werden. Unabhängig vom verwendeten Optimierungsalgorithmus haben sich hierzu zwei Arten von Randbedingungen als sinnvoll erwiesen:

- Beschränkung der Variationsweite jedes Parameters abhängig von seiner Position (s. Abbildung 3.2)
- lineare Abhängigkeiten von benachbarten Parameterpunkten

Um die Generierung von Profilen mit Hohllauf auszuschließen, ist es zunächst sinnvoll alle Parameter auf einen negativen Wertebereich zu beschränken. Positive Steigungen (im Sinne der Abbildung 3.2) sind somit ausgeschlossen. Um Profile mit sehr großer oder sehr kleiner Konizität zu vermeiden, wird der gültige Wertebereich jedes Parameters zudem durch eine parameterindividuelle Ober- und Untergrenze beschränkt. Da im Laufflächenbereich schon kleine Änderungen der Steigung entscheidenden Einfluss auf das Laufverhalten der Fahrzeuge haben, werden die Parametergrenzen hier enger gesetzt als im Bereich des Spurkranzes und der äußeren Neigung.

Die linearen Abhängigkeiten benachbarter Parameterpunkte haben die Form

$$\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n \geq 0. \quad (3.8)$$

Sie gelten für alle Parameter ε_i im Bereich $y_R \leq 15$ mm. Sie sichern in diesem Bereich einen monotonen Steigungsverlauf der Radprofilinie und verhindern dadurch die Ausbildung welliger Radprofile, die im Betrieb nahezu zwangsläufig zu Zweipunktkontakt führen würden. Um dem Algorithmus die Möglichkeit zu geben, die Zone der äußeren Neigung zu vergrößern, gelten diese Abhängigkeiten nicht für Punkte im Bereich $y_R > 15$ mm.

3.5 Solver-Settings der MKS-Simulation

Zum Lösen der MKS wird der *SODASRT 2*-Solver von SimPack verwendet. Der Solver arbeitet mit variabler Schrittweite. Die Konfiguration erfolgte nach den Empfehlungen des SimPack-Supports. In einigen Punkten wurden die Standardeinstellungen verändert. Zudem wurde die Samplingrate

auf Basis von Sensitivitätsanalysen gewählt. Sie variiert je nach gefahrener Geschwindigkeit (80 km/h bzw. 120 km/h) und je nach Anwendungsszenario (Optimierungintern bzw. Endauswertung). Die von den Standardsettings von *SimPack 2019 Build 85* abweichenden Einstellungsparameter können Tabelle 3.1 entnommen werden.

Parameter	Absolut	Relativ
Position States (Toleranz)	$1e - 05$	$1e - 10$
Force States (Toleranz)	$1e - 05$	$1e - 10$
Constraint States (Toleranz)	$1e - 05$	$1e - 10$
Velocity States (Toleranz)	$5e - 05$	$5e - 05$
Sampling Rate bei 80 km/h (GA/SA)	25 Hz	
Sampling Rate bei 120 km/h (GA/SA)	50 Hz	
Sampling Rate (ausgewertete Simulationsläufe)	200 Hz	
MBS Formalism	Residual	

Tabelle 3.1: Einstellungsparameter für den SODASRT 2-Solver in SimPack 2019.

3.6 Konfiguration der Optimierungsalgorithmen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Konfigurationsparameter der verwendeten SA- und GA-Optimierungsalgorithmen zusammengefasst.

Genetischer Algorithmus (GA)

Aufgrund der großen Komplexität genetischer Algorithmen und des großen Simulationsaufwands der MKS-Simulation ist die iterative Ermittlung guter Einstellungs- und Parametersätze für den Genetischen Algorithmus nicht möglich. Der Algorithmus wurde daher weitgehend nach den in Matlab hinterlegten Standardwerten konfiguriert. Abweichend davon wurde die

Generationsgröße festgesetzt: Da 20 logische Prozessorkerne für den Optimierungsprozess verfügbar sind, wurde die Generationsgröße auf 20 Individuen gesetzt. Jedes Individuum einer Generation kann somit auf einem eigenen Prozessorkern berechnet und ausgewertet werden. Als *Scaling Function* wurde *Rank* gewählt. Die Fortpflanzungswahrscheinlichkeit eines Individuums ist also nicht unmittelbar von seinem Fitnesswert abhängig, sondern von seiner Position im Ranking aller Individuen der aktuellen Generation. Als *Selection Function*, also als Funktion für die zufällige Wahl von Elternindividuen, wurde *Stochastic Uniform* gewählt. Weitere Konfigurationsgrößen können Tabelle 3.2 entnommen werden. Die Bedeutung der einzelnen Einstellungen werden in [11] erklärt.

Simulated Annealing (SA)

Als Abkühlfunktion wurde *Fast Annealing* gewählt. Fast Annealing skaliert die Bewegungsfreiheit der Parameter linear mit der Temperatur. Die Temperaturführung selbst erfolgt exponentiell nach der Vorschrift

$$T = 0,95^P, \quad (3.9)$$

wobei P die aktuelle Iterationsphase ist. Die Starttemperatur wird zu

$$T_{Start} = 0,1 \quad (3.10)$$

gesetzt. Die Akzeptanzfunktion, die bestimmt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein neuer Lösungskandidat akzeptiert (oder verworfen) wird, wird auf der Matlab-StandardEinstellung belassen und ist

$$g(T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\Delta}{\max(T)}\right)}, \quad (3.11)$$

wobei Δ die Gütedifferenz des aktuellen Lösungskandidaten zum vorherigen Lösungskandidaten ausdrückt. Das *Reannealing Interval* wurde auf 80 ge-

Parameter	Wert
Population Type	Double Vector
Population Size	20
Creation Function	Feasible Population
Scaling Function	Rank
Selection Function	Stochastic Uniform
Elite Count	0,05*Population Size
Crossover Fraction	0,8
Mutation Function	Adaptive Feasible
Crossover Function	Intermediate
Migration Direction	Forward
Migration Interval	20
Nonlinear Constraint Algorithm	Augmented Lagrangian
Initial Penalty	10
Penalty Factor	100
Hybrid Function	None
Stopping Criteria	Stop erfolgt manuell
Evaluate fitness and constraint functions	Vectorized

Tabelle 3.2: Einstellungsparameter für den Genetischen Algorithmus in MATLAB.

setzt. Nach 80 akzeptierten Lösungen ohne Verbesserung des Fitnesswertes wird die Temperatur also wieder erhöht und den Parametern somit wieder eine größere Bewegungsfreiheit eingeräumt.

4 Fahrzeugmodelle

Um die Allgemeingültigkeit der in dieser Arbeit vorgestellten Optimierungsmethode sicherzustellen, wird die Methode zur Radprofiloptimierung zweier Fahrzeuge verwendet, die sich in ihren Eigenschaften stark unterscheiden. Bei den simulierten Fahrzeugen handelt es sich um eine sechsachsige Niederflurstraßenbahn der Verkehrsbetriebe Karlsruhe (VBK) sowie um einen Reisezugwagen der Eurofima-Bauart, der für Geschwindigkeiten bis 200 km/h auf Strecken der Deutschen Bahn (DB) zum Einsatz kommt.

4.1 Niederflurstraßenbahn

Der Straßenbahnwagen vom Typ *GT6-70 D/N* ist ein sechsachsiger, normalspuriger Niederflurtriebswagen mit einem Niederfluranteil von 75 %, der seit 1995 von den Verkehrsbetrieben Karlsruhe (VBK) eingesetzt wird. Das Fahrzeug hat eine Länge von 28,70 m, eine Leermasse von 38,2 t und erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h. Der Wagenkasten untergliedert sich in drei Teile. Die äußeren Triebdrehgestelle unter den Wagenkästen 1 und 3 sind mit Starrradsätzen ausgeführt. Der kurze, mittlere Wagenkasten 2 ruht auf einem nicht angetriebenen, zweiachsigen Losradfahrwerk. Die Räder des Fahrzeugs sind mit einem Radprofil der Verkehrsbetriebe Karlsruhe versehen (Abbildung 4.1). Das Radprofil kombiniert die geometrischen Eigenschaften des S1002-Profiles mit Eigenschaften, die für den Betrieb auf Rillenschienen erforderlich sind.

Das in dieser Arbeit verwendete MKS-Modell des Fahrzeugs wurde von Heck [52] nach Daten der VBK sowie der LogoMotive GmbH in SimPack

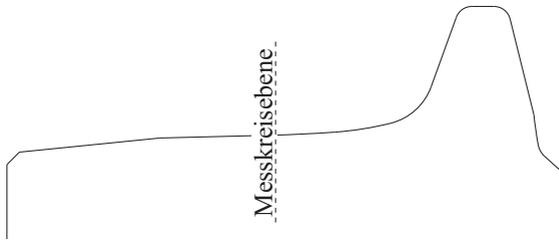


Abbildung 4.1: Radprofil der Verkehrsbetriebe Karlsruhe [52].

aufgebaut. Abbildung 4.2 zeigt die Topologieskizze des Modells. Abweichend von der Skizze werden die Radsätze des Fahrzeugs in dieser Arbeit mit RS1..RS6 bezeichnet, wobei der in Fahrtrichtung vorderste Radsatz RS1 genannt wird und die folgenden Radsätze aufsteigend nummeriert sind. Die Wagenkästen 1 und 2 sowie 2 und 3 sind mit Constraints vom Typ 25 miteinander verbunden, die alle translatorischen Freiheitsgrade unterdrücken und somit ein Kugelgelenk nachbilden.

Die primäre Federung der Triebdrehgestelle wird durch parallele Feder-Dämpfer-Elemente vom Typ 5 (Spring-Damper Parallel Cmp) mit Steifigkeiten und Dämpfungen in drei Raumrichtungen abgebildet. Die sekundäre (Luft-)Federung der Triebdrehgestelle wird durch „Shear Spring“-Komponenten (Typ 79) mit Steifigkeiten in fünf Freiheitsgraden dargestellt. Parallel dazu sind Dämpferelemente vom Typ 5 mit Dämpfungseigenschaften in drei Raumrichtungen angebracht. Zusätzliche Vertikaldämpfer sind als serielle Feder-Dämpfer-Komponenten mit Steifigkeit und Dämpfungseigenschaft entlang ihrer geometrischen Wirkachse ausgeführt (Typ 6: Spring-Damper Serial PtP). Eine Wankstütze vom Typ 13 (Spring-Damper Rot Meas Inp Cmp) wirkt der Wagenkasteneneigung entgegen. Eine zusätzliche Dämpfung der Lateralbewegungen zwischen Wagenkasten und Drehgestell erfolgt über ein zusätzliches serielles Feder-Dämpfer-Element vom Typ 6, mit Steifigkeit und Dämpfungseigenschaft entlang seiner geometrischen Wirkachse (Querdämpfer). Um die Lateralverschiebung des Drehgestells

unter dem Wagenkasten zu begrenzen, dient ein elastischer Anschlag vom Typ 5 mit nichtlinearer Steifigkeitskennlinie. Traktionskräfte werden über Traktionslenker übertragen, die durch Typ 6-Elemente dargestellt werden.

Die Losräder des mittleren Laufwerks sind in einer Portalachsen-ähnlichen Struktur gelagert. Die Primärfederung ist zwischen Portal und Drehgestell angebracht. Jedes Portal ist über vier (statt zwei) Federelemente vom Typ 5 mit dem Wagenkasten verbunden. Der übrige Aufbau des mittleren Laufwerks unterscheidet sich nur in seinen Parametern von dem der Triebdrehgestelle. Insgesamt verfügt das Modell über 71 Freiheitsgrade. Die Federungs- und Dämpfungsparameter des Modells können der Arbeit von Heck [52] entnommen werden. Das Fahrzeug ist mit dem in Abbildung 4.1 abgebildeten Radprofil ausgestattet. Das Profil ähnelt im Laufflächenbereich dem UIC S1002-Profil. Es verfügt jedoch über einen Spurkanz, der den besonderen Anforderungen für den Betrieb auf Straßenbahnschienen genügt.

4.2 Eurofima-Reisezugwagen

1993 führte das European Rail Research Institute (ERRI) der UIC eine breitangelegte Studie zur Ergebnisqualität und Zuverlässigkeit von MKS-Simulationen von Schienenfahrzeugen durch [39]. In der Studie bauten 18 Teilnehmer aus Bahnbetriebsunternehmen, Schienenfahrzeugindustrie und Wissenschaft unabhängig voneinander das MKS-Modell eines gegebenen Schienenfahrzeugs auf. Die Wahl der verwendeten MKS-Software sowie die Wahl sinnvoller Kontaktmodelle blieb den Teilnehmern überlassen. Die Teilnehmer sollten mit dem fertigen Modell eine Reihe von Simulationsszenarien durchlaufen, bestimmte Rückgabewerte aufzeichnen und dem ERRI bereitstellen. Ziel der Studie war die Gegenüberstellung der Rechenergebnisse aller Teilnehmer untereinander sowie die Gegenüberstellung der Rechenergebnisse mit Messdaten des realen Fahrzeugs, die dem ERRI vorlagen. Als Fahrzeug wurde ein 1. Klasse-Reisezugwagen (Avmz) der Deutschen Bahn (DB) mit Drehgestellen vom Typ *Fiat 0270* gewählt.

Die Entwicklung der Wagen dieses Typs geht auf ein gemeinsames Beschaffungsprojekt verschiedener westeuropäischer Eisenbahngesellschaften zurück. Ziel war die Entwicklung eines komfortablen Reisezugwagens für den internationalen Verkehr. Die Entwicklung wurde in den 1970er Jahren von der Europäischen Gesellschaft für die Finanzierung von Eisenbahnmateriale (Eurofima) vorangetrieben. Die Fahrzeuge werden daher (auch von Seiten des ERRI) als *Eurofima-Wagen* bezeichnet. Die Fahrzeuge befinden sich (zum Teil in umgebauter Form) bis heute im Einsatz, sodass sie gut als Beispielmodell für die Optimierung von Radprofilen verwendet werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das MKS-Modell eines solchen Fahrzeugs gemäß den Vorgaben aus der beschriebenen Vergleichsstudie [39] aufgebaut. Die Topologieskizze des Modells ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Das Fahrzeug besitzt Radsätze, die in Schwingarmen gelagert sind. Die Lagerung der Schwingarme am Drehgestellrahmen ist elastisch ausgeführt (Typ 43: Bushing Cmp) und besitzt Steifigkeiten in allen sechs Freiheitsgraden. Die primäre Federstufe besteht aus Federn mit Steifigkeiten in fünf Freiheitsgraden (Typ 79: Shear Spring Cmp). Parallel dazu befinden sich serielle Feder-Dämpfer-Elemente (Typ 6: Spring-Damper Serial PtP), welche die primären Vertikaldämpfer sowie die Steifigkeit von deren Lagerung repräsentieren. Die Dämpfungseigenschaften sind nichtlinear ausgeführt. Die sekundäre Federstufe besteht aus Federn in vertikaler Ausrichtung (Typ 79: Shear Spring Cmp) mit Steifigkeiten in fünf Freiheitsgraden, einer zusätzlichen, linearen Wankstütze mit Steifigkeit in einem Freiheitsgrad (Anti-Roll-Bar, Typ 13: Spring-Damp Rot Meas Inp Cmp) sowie zahlreichen Dämpferelementen und einem Gummipuffer als Wegbegrenzer. Alle Dämpferelemente sind als serielle Point-to-Point Feder-Dämpfer-Komponenten (Typ 6) ausgeführt und besitzen somit neben der nichtlinearen Dämpfungseigenschaft auch eine Steifigkeit. Neben Dämpfern in vertikaler Ausrichtung besitzt das Fahrzeug Schlingerdämpfer und Dämpfer, die lateralen Bewegungen des Wagenkastens entgegenwirken. Der Wegbegrenzer (Typ 5) besitzt

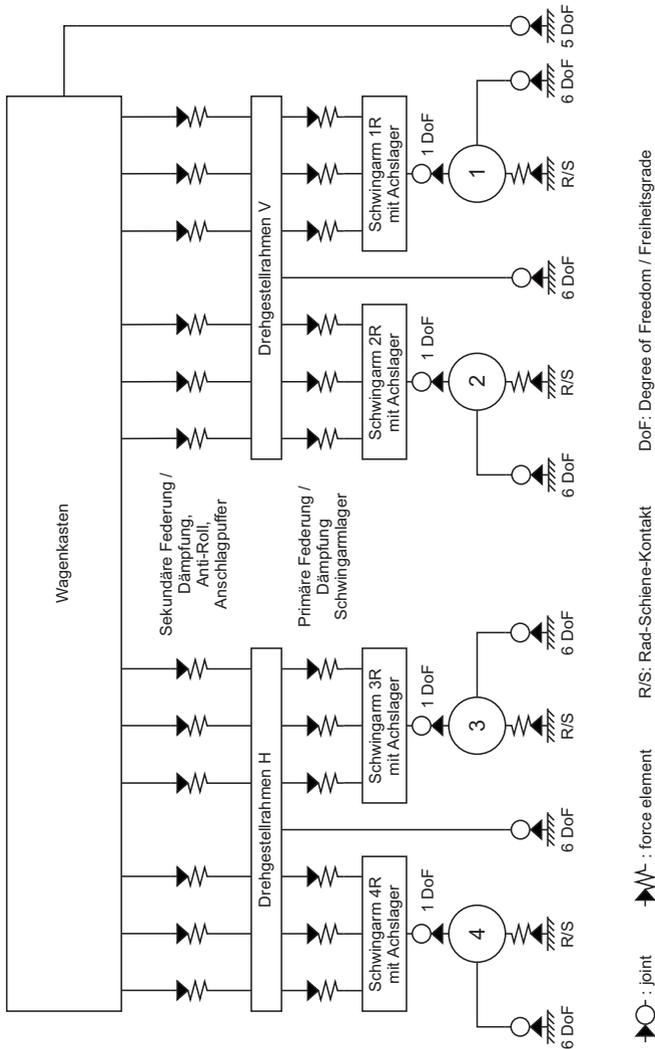


Abbildung 4.3: Topologie des Eurofima-Wagens. Zur besseren Darstellung wurden in der Topologieskizze die *force elements* der linken Wagenseite sowie die Schwingarme der linken Wagenseite und deren *joints* weggelassen. Insgesamt besitzt das Modell 49 Freiheitsgrade.

eine nichtlineare Steifigkeit in lateraler Richtung und ist so ausgeführt, dass er erst bei Lateralverschiebungen über 2,5 cm zu wirken beginnt. Insgesamt verfügt das Modell über 49 Freiheitsgrade. Alle Abmessungen, Steifigkeits- und Dämpfungsparameter sowie bemaßte Zeichnungen der Drehgestelle des Modells können [39] entnommen werden.

5 Gleismodell

Ein reales Gleis weist Elastizitäten und Dämpfungseigenschaften auf, die in der Simulation in unterschiedlichen Komplexitätsstufen modelliert werden können. Komplexe Modelle, die die Gleisreaktionen in einem großen Frequenzband abbilden sollen, bestehen aus zahlreichen Feder- und Dämpferelementen und berücksichtigen frequenzabhängige, nichtlineare Steifigkeiten und Dämpfungseigenschaften in mehreren Freiheitsgraden, von der Schiene bis in den Unterbau [57] [102] [22]. Wie alle anderen Komponenten der MKS-Simulation steht auch das Gleismodell im Spannungsfeld von Ergebnisqualität und Ressourcenverbrauch. In simulativen Untersuchungen zur Schienenfahrzeugdynamik wird häufig ein starres, unverschiebliches Gleis angenommen. Um hier aber eine Abschätzung über den Einfluss der Gleiselastizität auf das Verschleißverhalten von Rädern zu gewinnen, wurde ein einfaches, einstufiges Gleismodell mit elastisch gelagerten, mitbewegten Schwellen simuliert und die Ergebnisse mit denen des vollständig starren Gleises verglichen. Das Modell des elastischen Gleises umfasst lineare, frequenzunabhängige Feder- und Dämpfungseigenschaften in y - und in z -Richtung, sowie Drehsteifigkeiten und Dämpfungen um x . Das Modell wurde mit zwei unterschiedlichen Parametersätzen parametrisiert, wobei *Satz 1* ein mittelhartes Gleis und *Satz 2* ein weiches Gleis repräsentieren sollen. Die verwendeten Steifigkeitsparameter sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Die aufgelisteten Werte beziehen sich auf das gesamte Gleis (nicht auf eine einzelne Schiene). Die gewählten Parameterwerte für Parametersatz 1 wurden [115] entnommen. Die Parameter des Satzes 2 orientieren sich an denen des Satzes 1 und wurden auf Basis von Tabellen und Messschrieben

unterschiedlicher Literaturquellen [115] [102] [57] [83] [22] so festgelegt, dass sie ein sehr „weiches“ Gleis repräsentieren und somit als Extremfall betrachtet werden können. Die Ergebnisse (s. Abb. 5.1) zeigen zwischen den drei Gleismodellen nur geringe Unterschiede im Verschleißverhalten der Räder, sodass in allen folgenden Rechnungen das Modell eines starren Gleises verwendet wurde.

Parameter	Mittelhartes Gleis	Weiches Gleis
Steifigkeit in y	40 kN/mm	13,3 kN/mm
Steifigkeit in z	150 kN/mm	50 kN/mm
Drehsteifigkeit um x	8,4 kN/mrad	2,8 kN/mrad
Dämpfung in y	98 Ns/mm	33 Ns/mm
Dämpfung in z	188 Ns/mm	63 Ns/mm
Drehdämpfung um x	106 Nms/mrad	35 Nms/mrad

Tabelle 5.1: Steifigkeitsparameter des elastischen Gleises (Mittelhart/Weich).

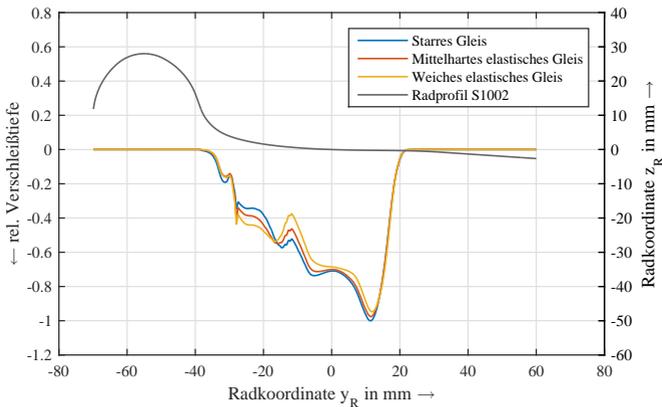


Abbildung 5.1: Verschleiß: Starres Gleis vs. Mittelhartes elastisches Gleis vs. Weiches elastisches Gleis.

6 Bildung von Streckenkollektiven

Insbesondere bei der Durchführung iterativer Optimierungsverfahren ist die effiziente Nutzung der verfügbaren Rechenressourcen von entscheidender Bedeutung. Kürzere Simulationszeiten ermöglichen schnellere Iterationen und damit eine schnellere und/oder bessere Annäherung an das theoretisch zu erreichende Optimum. Hieraus ergibt sich die Motivation einer möglichst starken Vereinfachung der verwendeten Simulations- und Rechenmodelle. Diesem Bestreben steht ein eventueller Erkenntnisverlust durch eine geringere Modelltiefe gegenüber, die das erzielte Optimierungsergebnis vom in der Realität möglichen Optimum entfernen kann. In allen für die Simulation verwendeten Modellen muss daher sorgfältig abgewogen werden, welche Vereinfachungen sinnvollerweise vorgenommen werden können.

Eine naheliegende Möglichkeit zur Reduzierung von Rechenzeit stellt die Verkürzung der zu simulierenden Strecke dar. Jahed et al. [60] verkürzt seine Simulation hierzu auf einen für die entsprechende Strecke besonders charakteristisch anmutenden Streckenabschnitt. Enblom [38] schlägt vor, einen Satz typischer Kurven zusammenzustellen und die Simulation auf diesen Satz zu beschränken. Jendel [61] verfolgt einen statistischen Ansatz. Er analysiert den Streckenverlauf und wertet die Bogenradienteile aus. Anschließend diskretisiert er die Bogenradien und simuliert dann jeden Bogenradius einzeln mit beispielhaften Streckenparametern. Der entstandene Verschleiß bei Simulation aller Bogenradien wird dann zu einem Gesamtverschleiß zusammengerechnet. Ignesti et al. [56] erweitern diesen Ansatz um die Berücksichtigung unterschiedlicher Streckengeschwindigkeiten.

In diesem Kapitel wird eine Methode zur Erstellung von Streckenkollektiven vorgestellt. Ein Streckenkollektiv ist eine verkürzte Repräsentation einer Strecke oder eines Streckennetzes. Das Kollektiv soll alle Charaktermerkmale des Streckennetzes abbilden, die für die Zielstellung der Simulation von Bedeutung sind. Bei der Verschleißsimulation verursacht das Befahren des Streckenkollektivs am Fahrzeugrad idealerweise das gleiche Verschleißbild, das auch beim Befahren des Streckennetzes entstanden wäre. Zur Bestimmung der absoluten Verschleißhöhe muss das Ergebnis der Kollektivbefahrung mit dem kollektivspezifischen Verkürzungsfaktor multipliziert werden. Die vorgestellte Methode ist an die Methode von Jendel [61] angelehnt. Die zur Durchführung notwendige Rechenzeit wird jedoch weiter verkürzt und die Methode um ein Kollektivbildungsverfahren für Gleislagefehler erweitert.

6.1 Methode

Die Methode zur Bildung von Streckenkollektiven ist in zwei Blöcke gegliedert: die Bildung von Streckenverlaufskollektiven (Abschnitt 6.2) und die Bildung von Gleislagefehlerkollektiven (Abschnitt 6.3). Im realen Anwendungsfall sind Streckenführung und Gleislagefehler stets präsen-te Eigenschaften jedes Gleises. Da diese beiden Eigenschaften in dieser Arbeit jedoch mit unterschiedlichen, separat zu verifizierenden Methoden zu einem Kollektiv zusammengefasst werden, erscheint es sinnvoll, zunächst den Streckenverlauf isoliert zu betrachten. Das bloße Weglassen von Gleislagefehlern führt jedoch zu realitätsfernen Verschleißbildern. Um die Ergebnisse der Kollektivierung von Streckenverläufen dennoch weitgehend isoliert von Gleislagefehlern betrachten zu können, werden bei der Bildung der Streckenverlaufskollektive in Kapitel 6.2 sowohl den Streckennetzen als auch den daraus erstellten Streckenkollektiven jeweils identische, weitgehend homogene und über die Streckenlänge in ihrer Charakteristik invariante Gleislagefehler aufgeprägt. In Kapitel 6.3 wird dann eine Methode vorgestellt,

mit der zusätzlich zum Streckenverlauf auch real gemessene Gleislagefehler zu einem Kollektiv zusammengefasst werden können, sodass sich ein Streckenkollektiv ergibt, das Verlauf und Gleislage gleichermaßen berücksichtigt.

6.2 Kollektiv des Streckenverlaufs

Zunächst soll nur der Streckenverlauf zu einem Kollektiv zusammengefasst werden. Die Erweiterung eines Kollektivs um Gleislagefehler wird in Kapitel 6.3 beschrieben. Die Streckenkollektivbildung erfolgt in drei Stufen (s. Bild 6.1):

1. Analyse des Streckennetzes und Zerlegen in Abschnitte konstanter Bogenradien
2. Sortieren und Aneinanderreihen der Streckenabschnitte nach ihren Bogenradien
3. Verkürzen der resultierenden Strecke

Das Vorgehen wird im Folgenden anhand mehrerer Beispiele erläutert. Hierzu werden Streckenkollektive aus fiktiven Streckennetzen erstellt, die sich in ihrer Charakteristik deutlich voneinander unterscheiden. Die Eignung der Kollektive wird dann geprüft, indem die Verschleißbilder verglichen werden, die in der Simulation beim Befahren der Kollektive und beim Befahren der Gesamtnetze entstehen.

Versuchsreihen mit unterschiedlichen Kollektivlängen haben ergeben, dass für Strecken mit Radien > 1000 m, wie sie im Folgenden betrachtet werden, eine Kollektivlänge von 4 km ausreichend ist. Eine deutliche Unterschreitung dieser Länge verschlechtert die Repräsentationsqualität des Kollektivs jedoch. Etwas längere Kollektive können die Repräsentationsqualität geringfügig steigern. Kollektive von mehr als ca. 6 km Länge erscheinen aber nur für Strecken mit einer sehr großen Bogenradienbandbreite sinn-

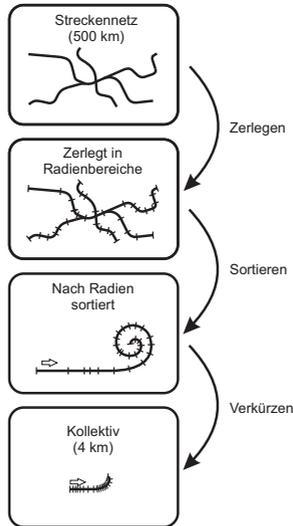


Abbildung 6.1: Ablauf der Kollektivbildung.

voll. Die Ziellänge des Kollektivs wird daher in den folgenden Beispielen auf 4 km festgelegt.

6.2.1 Erstellen fiktiver Streckennetze

Zunächst werden zwei verschiedene fiktive Streckennetze erstellt. Beide Streckennetze werden nach [44] modelliert. Übergangsbögen werden i. d. R. als Klothoiden ausgeführt. Gegenbögen werden mit Blosskurven eingeleitet. Überhöhungsrampen sind i. d. R. linear, werden aber als Blosskurven ausgeführt, wenn auch der Übergangsbogen eine Blosskurve ist. Im Hinblick auf Bogenradien, Übergangsbögen, Gleisüberhöhungen und Überhöhungsrampen werden alle Vorschriften der DB-Richtlinie RiL 800.0110 [106] eingehalten. Für Auslegungsgrößen, für welche die Richtlinie einen Ermessens- und Genehmigungsbereich vorsieht, werden die jeweiligen Regelwerte verwendet. Alle Strecken enthalten vereinzelt Korbbögen und Gegenbögen mit

unvermittelten Krümmungswechseln, deren Gestaltung jedoch ebenfalls den genannten Regelwerken entspricht. Alle Strecken sind eben, also frei von Längsneigungen („Steigungen“). Weichen werden nicht modelliert.

Alle Strecken werden mit weitgehend homogenen und über die Streckenlänge invarianten Gleislagefehlern beaufschlagt. Die Gleislagefehler werden gemäß [12], gestützt auf [40], aus Leistungsdichtespektren modelliert. Sie werden so gestaltet, dass die Strecken nach DIN EN 13848-5 [6] die Soforteingriffsschwelle (IAL) für einen Betrieb bis 300 km/h unterschreiten. Nach DIN EN 13231 [1] zur „Abnahme von Arbeiten“ wären die Strecken bis 120 km/h abnahmefähig (s. Abschnitt 2.1.1). Die Schienen selbst werden als neu, also frei von Verschleiß angenommen. Sie werden, wie in Deutschland üblich [44] [85] [75], mit einer Einbauneigung von 1:40 modelliert.

6.2.2 Streckennetz A

Streckennetz A ist ein Vollbahnnetz mit Bogenradien zwischen 1000 m und 9000 m und einem Geradenanteil von 54 %. Radien, Übergangsbögen und Gleisüberhöhungen wurden so gewählt, dass auf dem kompletten Netz eine Streckenhöchstgeschwindigkeit von mindestens 160 km/h möglich ist. Das Netz bildet verschiedene Streckencharakteristiken ab und enthält auch Abschnitte, die mit der für moderne Schnellfahrstrecken üblichen Höchstgeschwindigkeit von 300 km/h befahren werden könnten. Die Gesamtlänge des Netzes beträgt ca. 500 km. Die Schienen haben eine Einbauneigung von 1:40. Eine detaillierte Streckennetzanalyse befindet sich in Anhang A.1. Übergangsbögen wurden hierbei zur Hälfte dem größeren und zur Hälfte dem kleineren Radius zugerechnet. Der Anteil der Übergangsbögen an der gesamten Streckenlänge beträgt ca. 4 %.

Da eine solch detaillierte Streckennetzanalyse bei Bestandsstrecken nur bei sehr guter Datenlage und mit sehr großem zeitlichen Aufwand durchführbar ist, stützt sich die Kollektivbildung auf eine stark vereinfachte Streckennetzanalyse, deren Ergebnis in Tabelle 6.1 dargestellt wird. Wie die Ta-

belle zeigt, wurden die Bogenradien in der vereinfachten Analyse in fünf Radienbereiche eingeteilt. Die Gesamtlänge aller Bögen jedes Bereiches wurde ermittelt und die prozentualen Anteile der Radienbereiche am Gesamtnetz berechnet (Schritt 1).

Radienbereich	Ersatzradius / m	Länge / m	Anteil / %
1000 .. 1500 m	1250	40 472	8,1
1500 .. 2000 m	1750	29 436	5,9
2000 .. 3000 m	2500	34 481	6,9
3000 .. 9000 m	4000	124 720	24,9
> 9000 m (Gerade)	∞	272 021	54,3

Tabelle 6.1: Streckenanalyse Netz A.

Im zweiten Schritt werden die fünf Radienbereiche (Tabelle 6.1) zunächst durch einen gemittelten Radius ersetzt. Der Bereich 1000..1500m wird also durch einen einzigen Bogen mit Radius 1250m angenähert. Der Radienbereich 3000..9000m wird zu 4000m angenommen, da auf Strecke A kleinere Radien (nahe 3000m) in diesem Bereich deutlich stärker vertreten sind als größere Radien (nahe 9000m). Von der Geraden ausgehend werden die Ersatzradien so aneinandergehängt, dass ein zunehmend enger werdender Bogen entsteht.

Die so entstandene Strecke wird im dritten Schritt auf die gewählte Ziellänge von 4 km komprimiert, d. h. alle Abschnitte werden um den gleichen Faktor verkürzt, sodass eine Strecke mit der gewünschten Ziellänge entsteht. Zwischen den einzelnen Ersatzradien werden Übergangsbögen gemäß RiL 800.0110 [106] angeordnet. Die Länge der Übergangsbögen wird den Längen der Ersatzradienbögen abgezogen. In den Bögen wird das Gleis gemäß RiL [106] überhöht. Der Streckenverlauf des fertigen Kollektivs ist in Bild 6.2 sowie in Tabelle 6.2 dargestellt. Wie auf dem Bild zu sehen, enthält das



Abbildung 6.2: Streckenverlauf 4 km-Kollektiv.

Radienbereich	Länge / m
∞ (Gerade)	2135,2
UB	72
4000 m	939,5
UB	40
2500 m	231,2
UB	48
1750 m	183,0
UB	56
1250 m	295,1
Σ	4000

Tabelle 6.2: Streckenverlauf Kollektiv A. UB: Übergangsbogen.

Kollektiv ausschließlich Rechtsbögen. Dies ist ausreichend, da für die Beurteilung des Radverschleißes beide Räder eines Radsatzes gleichermaßen von Bedeutung sind. Bei der Auswertung von Verschleißbildern wird daher i. d. R. ein Mittelwert aus dem Verschleiß beider Räder gebildet, sodass die Richtung von Bögen für das Ergebnis keine Bedeutung mehr hat.

Streckennetz A wird in den nachfolgend beschriebenen Ausführungen A1 und A2 modelliert.

Streckennetz A1

Das verwendete Schienenprofil ist vom Typ 60E1 (ehem. UIC60) [3], die Einbauneigung beträgt 1:40. Bei Verschleißsimulationen auf diesem Streckennetz wird das Radprofil vom Typ S1002 verwendet.

Streckennetz A2

Das verwendete Schienenprofil ist vom Typ 49E1 (ehem. DIN S49) [3], die Einbauneigung beträgt 1:40. Bei Verschleißsimulationen auf diesem Streckennetz wird das Radprofil der Verkehrsbetriebe Karlsruhe verwendet.

6.2.3 Streckennetz B

Streckennetz B enthält Bogenradien zwischen 1000 m und 1500 m und hat einen Geradenanteil von 16 %. Damit unterscheidet es sich erheblich vom deutlich weitläufigeren Netz A. Das Netz hat eine Länge von 100 km und wurde auf eine Streckenhöchstgeschwindigkeit von 160 km/h ausgelegt. Die Kurzanalyse des Netzes ist in Tabelle 6.3 dargestellt. Der Verlauf des Kollektivs ist Tabelle 6.4 zu entnehmen.

Radienbereich	Ersatzradius / m	Länge / m	Anteil / %
1000 .. 1250 m	1125	1132,18	28
1250 .. 1500 m	1375	2245,14	56
∞ (Gerade)	∞	622,69	16

Tabelle 6.3: Streckenanalyse Netz B.

Radienbereich	Länge / m
∞ (Gerade)	523
UB	200
1375 m	2145
1125 m	1132
Σ	4000

Tabelle 6.4: Streckenverlauf Kollektiv B. UB: Übergangsbogen.

Streckennetz B1

Das verwendete Schienenprofil ist vom Typ 60E1 (ehem. UIC60) [3], die Einbauneigung beträgt 1:40. Bei Verschleißsimulationen auf diesem Streckennetz wird das Radprofil vom Typ S1002 verwendet.

Streckennetz B2

Das verwendete Schienenprofil ist vom Typ 49E1 (ehem. DIN S49) [3], die Einbauneigung beträgt 1:40. Bei Verschleißsimulationen auf diesem Streckennetz wird das Radprofil der Verkehrsbetriebe Karlsruhe verwendet.

6.2.4 Bewertung

Um die Eignung des Kollektivbildungsverfahrens zu prüfen, wurde die Befahrung der Streckennetze A und B sowie der Streckenkollektive A und B simuliert und die Ergebnisse einander gegenübergestellt. Die Verschleißhöhe der Kollektivbefahrungen wurde lediglich mit dem kollektivspezifischen Verkürzungsfaktor multipliziert. Die Diagramme der Abbildungen 6.3 bis 6.6 zeigen die Gegenüberstellungen. Wie aus den Diagrammen ersichtlich ist, führt die vorgestellte Methode zur Bildung von Streckenverlaufskollektiven zu sehr guten Ergebnissen. Die Verschleißbilder, die am Rad beim

Befahren der Kollektive entstehen, sind mit denen beim Befahren der Gesamtnetze nahezu identisch. In den Szenarien A1, A2 und B2 beträgt die maximale Abweichung (Kollektiv zu Gesamtnetz) bezogen auf den jeweiligen Verschleißpeak $\leq 2,1\%$. Die empirische Standardabweichung beträgt in allen Szenarien $\leq 0,9\%$ des Verschleißpeaks. Die maximale Abweichung in Szenario B1 fällt mit ca. 6% relativ groß aus. Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, liegt der dazugehörige Abweichungspeak jedoch im Übergangsbereich zum Spurkranz, wo die Aussagekraft der Ergebnisse aufgrund der dem Kontaktmodell zugrundeliegenden Modellannahmen ohnehin fraglich ist. Wird der Übergangsbereich bei der Berechnung nicht berücksichtigt, schneidet dieses Szenario sogar deutlich besser ab, als die übrigen drei genannten.

Die Ergebnisse zeigen, dass das vorgestellte Kollektivbildungsverfahren mit Strecken verschiedenster Charakteristik sowie unterschiedlicher Schienen-/Radprofilkombinationen funktioniert und somit für die Optimierung von Radprofilen geeignet ist. Der durch die Verwendung von Kollektiven erzielbare Rechenzeitgewinn ist abhängig von der Netzlänge und der gewählten Kollektivlänge. Je länger das betrachtete Streckennetz ist, desto größer ist der durch Kollektivbildung erzielbare Rechenzeitgewinn. Bei Verwendung des 500 km langen Beispielnetzes B und einer gewählten Kollektivlänge von 4 km, verkürzt sich die Rechenzeit um Faktor 125.

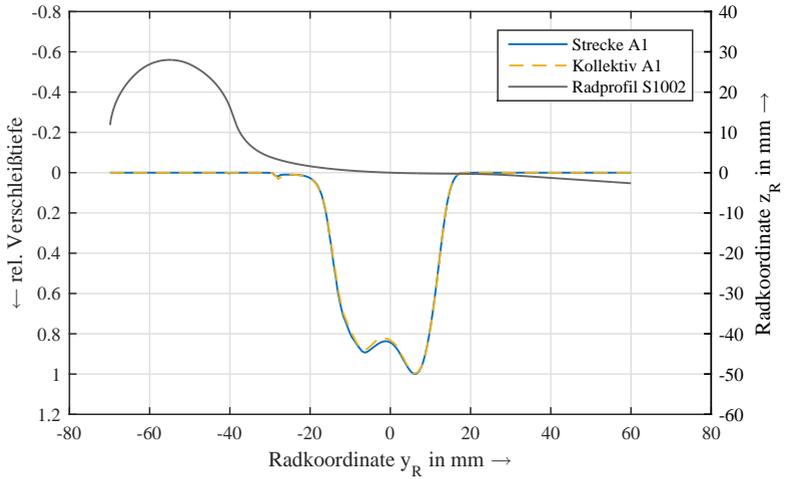


Abbildung 6.3: Vergleich des Verschleißes am führenden Radsatz nach dem Befahren von Streckennetz A1 und Kollektiv A1. Materialabtrag senkrecht zur Profillinie.

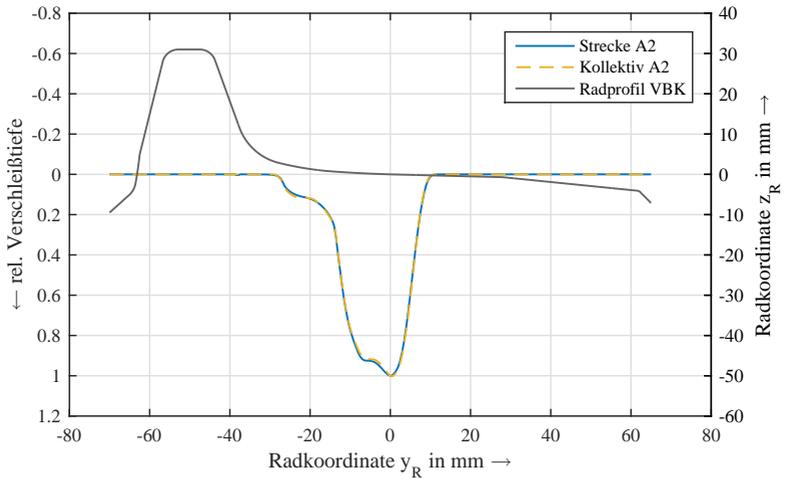


Abbildung 6.4: Vergleich des Verschleißes am führenden Radsatz nach dem Befahren von Streckennetz A2 und Kollektiv A2. Materialabtrag senkrecht zur Profillinie.

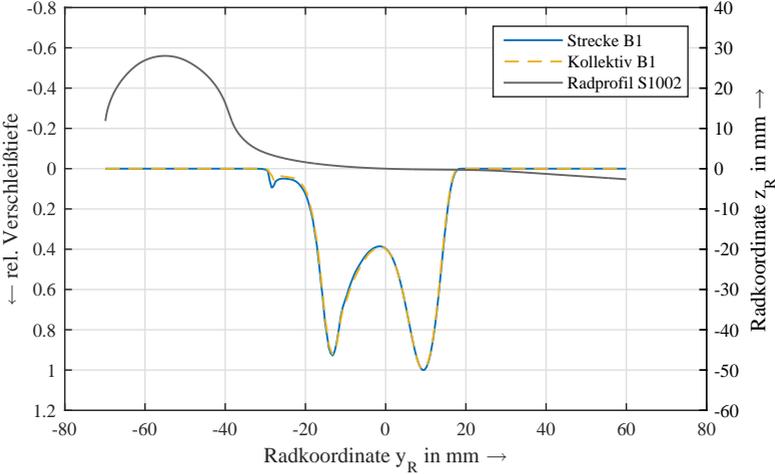


Abbildung 6.5: Vergleich des Verschleißes am führenden Radsatz nach dem Befahren von Streckennetz B1 und Kollektiv B1. Materialabtrag senkrecht zur Profillinie.

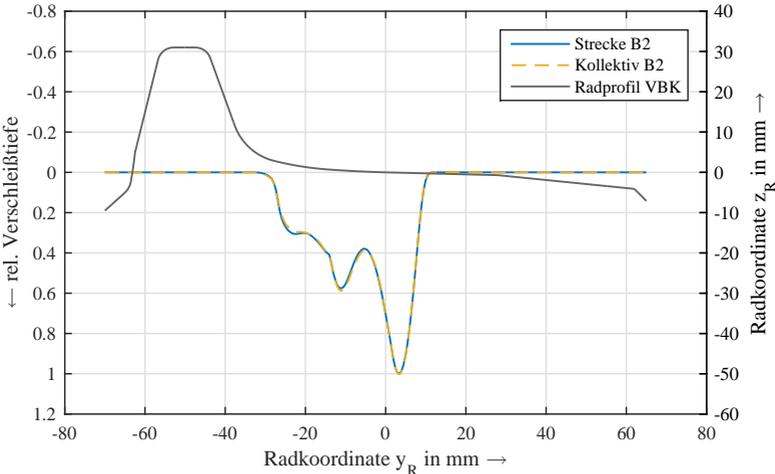


Abbildung 6.6: Vergleich des Verschleißes am führenden Radsatz nach dem Befahren von Streckennetz B2 und Kollektiv B2. Materialabtrag senkrecht zur Profillinie.

6.3 Erweitern des Kollektivs um Gleislagefehler

Im vorangegangenen Abschnitt konnte gezeigt werden, dass durch die Bildung von Streckenverlaufskollektiven die Simulationszeit von Streckennetzen stark verkürzt werden kann, ohne den errechneten Radverschleiß entscheidend zu verändern. In den vorangegangenen Beispielen wurden jedoch nur fiktive Streckennetze betrachtet. Diese wurden im Hinblick auf ihre Streckenführung realitätsnah gestaltet. Die Beaufschlagung mit Gleislagefehlern war jedoch wenig differenziert. Die Charakteristik und die Stärke der Gleislagefehler wurde über das komplette Streckennetz als homogen angenommen. Bei der Bildung des Streckenverlaufskollektivs konnte der gleiche, homogene Gleislagefehler daher unverändert übernommen werden. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um für die Beurteilung des Kollektivbildungsverfahrens den Aspekt der Streckenführung isoliert betrachten zu können. Im realen Anwendungsfall ist diese einfache Betrachtung nicht ausreichend. Reale Streckennetze können eine große Bandbreite unterschiedlicher Gleislagequalitäten enthalten. Gleislagefehler können also innerhalb eines Netzes in Charakteristik und Ausprägung variieren.

In diesem Abschnitt soll die in Kapitel 6.2 vorgestellte Methode um eine Methode zur Kollektivierung von Gleislagefehlern erweitert werden. Hierzu wird die DB-Strecke *Magdeburg – Halle (Saale) – Leipzig* betrachtet. Die Strecke hat, auf einer Länge von 118 km, Abschnitte unterschiedlicher Gleislagequalitäten. Sie hat eine zulässige Streckenhöchstgeschwindigkeit von 160 km/h (Magdeburg – Halle) bzw. 120 km/h (Halle - Leipzig). Die Strecke wurde im Hinblick auf Streckenverlauf und Gleislage mit Hilfe des „Rollenden Analyse- und Inspektionslabors (RAILab)“ [23] der Deutschen Bahn vermessen. Das Messfahrzeug arbeitet nach dem Inertialmessprinzip. Es errechnet die Gleislage mit Hilfe von Beschleunigungssensoren, optischen Abstandsmesssystemen und Gyroskopen bei Geschwindigkeiten bis 200 km/h. Die Messdaten werden in der vorliegenden Arbeit verwendet. Eine besondere Herausforderung bei Gleislagemessungen ist die Tren-

nung von Lagefehlern und Streckenverlauf. Insbesondere bei engen Radien und kurzen Verlaufsänderungen, wie sie z. B. bei Weichenverbindungen vorkommen, ist diese Unterscheidung kaum möglich. Auch der Sprung des Kontaktpunkts beim Überrollen von Weichenherzstücken ist von kurzweiligen Lagefehlern nur schwer zu unterscheiden. Die Gleislageaufzeichnungen sind daher in einigen Streckenbereichen nicht plausibel. Aus diesem Grund werden für die folgenden Betrachtungen die Bahnhöfe der Städte Magdeburg, Halle, Leipzig und Köthen, sowie deren Ein- und Ausfahrbereiche aus dem Messschrieb herausgeschnitten. Auch die Ein- und Ausfahrbereiche des ehemaligen Bahnbetriebswerks Leipzig-Wahren werden nicht betrachtet. Die Streckenlänge verkürzt sich durch diesen Eingriff auf ca. 102 km. Der Streckenverlauf der Strecke wurde zunächst nach dem im Abschnitt 6.2 vorgestellten Verfahren zu einem Streckenverlaufskollektiv mit einer Länge von 4 km zusammengefasst. Dieses Streckenverlaufskollektiv soll im Folgenden um Gleislagefehler erweitert werden, welche die real gemessenen Gleislagefehler der Strecke repräsentieren.

6.3.1 Vorgehen

Simulationsrechnungen haben ergeben, dass der Richtungsfehler (s. Abschnitt 2.1) für den am Rad entstehenden Verschleiß von größter Bedeutung ist. Auch der Spurweitenfehler hat einen deutlich sichtbaren Einfluss auf das am Rad entstehende Verschleißbild. Lagefehler in Höhe und Neigung spielen hingegen eine untergeordnete Rolle. Die Betrachtung der Gleislagefehler beschränkt sich daher auf die Fehlerarten *Richtungsfehler* und *Spurweitenfehler*. Fehler in Längshöhe und Überhöhung werden weiterhin als homogen angenommen und nach [40] modelliert. Richtungsfehler und Spurweitenfehler werden nachfolgend getrennt betrachtet.

Richtungsfehler

Das Vorgehen zur Erstellung eines Gleislagefehlerkollektivs aus einem Gleislagemessschrieb einer realen Strecke ist in Bild 6.7 dargestellt. Zunächst wird der Messschrieb in nicht-überlappende Abschnitte der Länge $l = 100\text{m}$ zerlegt. Für jeden der 100m-Abschnitte wird die Standardabweichung σ des Richtungs-lagefehlers berechnet. Anschließend werden die Abschnitte nach ihrer Standardabweichung in acht Cluster eingruppiert.

Parallel dazu wird mit Hilfe einer Ortsfrequenzanalyse des Messschriebs des realen Fehlers ein Leistungsdichtespektrum des Fehlers im Wegbereich errechnet. In dieser Arbeit wird hierfür die Methode nach Welch [126] verwendet. Durch inverse Fourier-Transformation kann aus dem Leistungsdichtespektrum und der Standardabweichung der Cluster ein repräsentativer, generischer Gleislagefehler für jeden Cluster errechnet werden.

Für das weitere Vorgehen werden zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen, die sich in ihrem Rechenaufwand unterscheiden:

1. *4 km-Kollektiv*: Entlang des 4 km langen Streckenverlaufskollektivs werden die generischen Gleislagefehler der Cluster C_1 bis C_8 hintereinander angeordnet. Der Anteil jedes Fehlerclusters an der 4 km-Kollektivstrecke entspricht dem Anteil des jeweiligen Clusters an der tatsächlich vermessenen Strecke. Für die Ermittlung des Verschleißes fährt das Fahrzeug das Streckenkollektiv in der Simulation genau einmal ab und erfährt dabei nacheinander die Gleislagequalitäten aller Clusterblöcke (s. Bild 6.7). Da das Verlaufskollektiv mit einer geraden Strecke beginnt und in einem zunehmend enger werdenden Bogen mündet, hat die Reihenfolge, in der die Gleislagefehler-Cluster entlang des Kollektivs angeordnet werden, einen Einfluss auf das am Rad entstehende Verschleißbild und damit auf die Repräsentationsqualität des Kollektivs. Die geeignetste Anordnung kann in einer Simulationsreihe ermittelt werden.

2. *8 x 4 km-Kollektiv*: Das nach Kapitel 6.2 erzeugte Streckenverlaufskollektiv wird mit dem generischen Gleislagefehler eines Clusters beaufschlagt. Das Fahrzeug befährt das Kollektiv in der MKS-Simulation und der Verschleiß am Fahrzeugrad wird berechnet. Dies geschieht nacheinander für jeden der Cluster C_1 bis C_8 , sodass das Fahrzeug das Streckenverlaufskollektiv insgesamt achtmal abfährt, wobei die Gleislagequalität nach jedem Durchlauf an den aktuell zu simulierenden Cluster C_i angepasst wird. Da die Clustergröße uneinheitlich ist, werden die Ergebnisse jedes Clusters entsprechend der jeweiligen Clustergröße (Anteil der 100 m-Abschnitte des Clusters an der gesamten Streckenlänge des Messschriebs) gewichtet und der so gewichtete Verschleiß aller Simulationsläufe summiert.

In Abschnitt 6.3.2 werden die Ergebnisse beider Vorgehensweisen miteinander verglichen.

Spurweitenfehler

Die Betrachtung des Spurweitenfehlers erfolgt analog zu der des Richtungsfehlers. Der Messschrieb der Schienenlage wird erneut ausgewertet. Für jeden der im vorangegangenen Abschnitt ermittelten Clusterblöcke $C_1..C_8$ wird die Standardabweichung des Spurweitenfehlers ermittelt. Hieraus sowie auf Grundlage des Leistungsdichtespektrums nach [12] wird für jeden Clusterblock ein repräsentativer Spurweitenfehler errechnet.

6.3.2 Ergebnis

Das Leistungsdichtespektrum des Richtungsfehlers, das aus den Messdaten errechnet wurde, ist in Bild 6.8 dargestellt. Optisch sticht der Ortsfrequenzbereich $R = 0.014..1 \text{ m}^{-1}$ hervor. Dieser entspricht dem Wellenlängenbereich $\lambda = 1..70 \text{ m}$. Der Messschrieb wurde in diesem Bereich seitens der Deutschen Bahn durch einen Bandpassfilter gefiltert. Für die Bestimmung der Gleislagequalität ist die alleinige Erfassung dieses Wellenlängen-

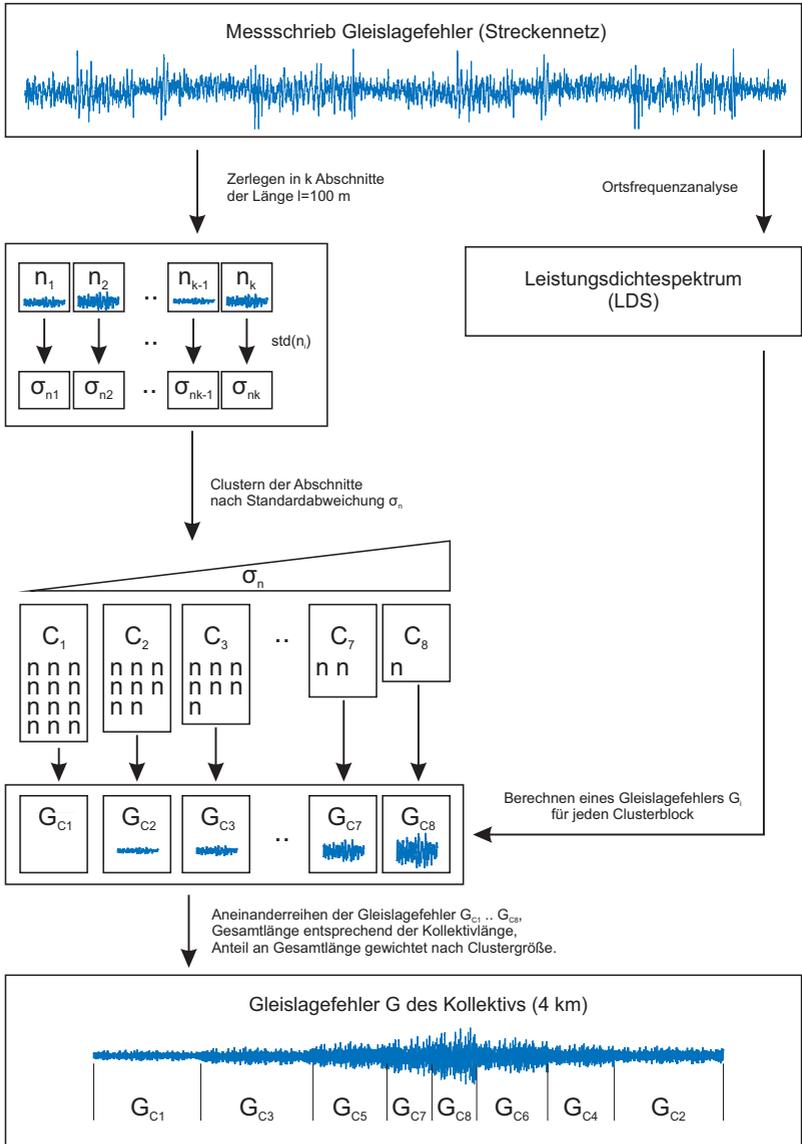


Abbildung 6.7: Bildung eines Gleislagekollektivs.

bereichs laut Norm [5] ausreichend, sofern die Strecke mit Geschwindigkeiten ≤ 250 km/h befahren wird. Die Auswertung des Spektrums beschränkt sich daher auch in dieser Arbeit auf diesen Ortsfrequenzbereich.

Bild 6.9 zeigt die Messschriebe des Richtungslagefehlers beider Schienen. Unterschiede in der Richtungslage der beiden Schienen würden einen Spurweitenfehler des Gleises anzeigen. In der Regel bewegt sich der Richtungslagefehler der Schienen im Bereich von ± 5 mm mit Ausreißern in den Bereich ± 10 mm.

Tabelle 6.5 zeigt die Clusterung der 100m-Abschnitte nach ihrer Standardabweichung in die Cluster $C_1..C_8$. Fast 95 % der betrachteten Streckenabschnitte fallen in die Cluster $C_1..C_5$ und weisen damit eine Standardabweichung von $\leq 2,5$ mm auf. Streckenabschnitte dieser Cluster bestimmen die Grundform der Verschleißlinie im Laufflächenbereich. Trotz des prozentual geringen Anteils der Cluster $C_6..C_8$ sind die Streckenabschnitte dieser Cluster nicht zu vernachlässigen, da in diesen Bereichen mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit heftiger Verschleiß auftritt, der größere Verschleißspitzen verursachen kann.

Bild 6.10 zeigt eine Gegenüberstellung des Verschleißes, der am Fahrzeugrad beim Befahren der vermessenen Strecke (Referenz) sowie beim Befahren verschiedener Kollektivlösungen entsteht. Als Kollektivlösungen wurden die in Abschnitt 6.3.1 vorgestellten Kollektive (4 km-Kollektiv und 8 x 4 km-Kollektiv) ebenso betrachtet, wie ein Kollektiv, das mit Gleislagefehlern nach UIC [40] beaufschlagt wurde und somit den bisher gängigen Umgang mit Gleislagefehlern widerspiegelt. Beide in diesem Kapitel vorgestellten Gleislagekollektive treffen die Referenzlinie besser als das Kollektiv mit Gleislage nach UIC/ERRI.

4 km-UIC-Kollektiv

Das Kollektiv mit Gleislagefehlern nach UIC [40] überschätzt den Verschleiß im Laufflächenbereich deutlich. Die Verschleißspitze fällt hier um

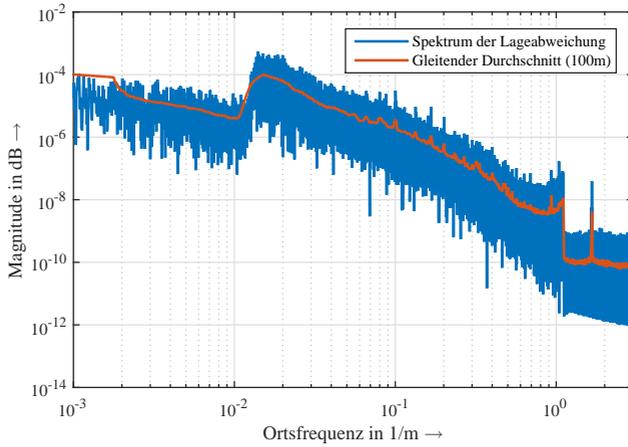


Abbildung 6.8: Leistungsdichtespektrum des Richtungsfehlers.

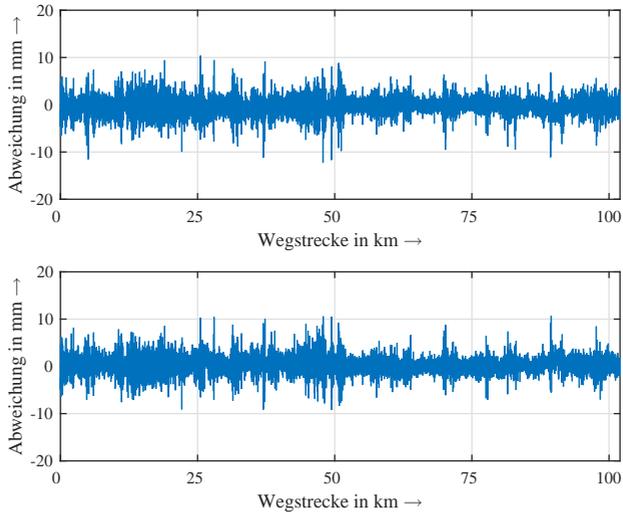


Abbildung 6.9: Messschrieb Richtungsfehler der linken Schiene (oben) und der rechten Schiene (unten).

Cluster	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
σ_{100m}/mm	0..0,75	0,75..1,0	1,0..1,25	1,25..1,75
σ_{C_i}/mm	0,625	0,875	1,125	1,5
Anteil in %	24,9	22,5	17,0	19,0

Cluster	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
σ_{100m}/mm	1,75..2,5	2,5..3,25	3,25..4	4..∞
σ_{C_i}/mm	2,125	2,875	3,625	5,0
Anteil in %	11,1	3,9	0,9	0,8

Tabelle 6.5: Clustering der 100m-Abschnitte der Richtungslagefehler. Die Cluster C_i beinhalten 100m-Abschnitte der Standardabweichungen σ_{100m} . Sie werden durch die ihnen zugeordnete Standardabweichung σ_{C_i} charakterisiert.

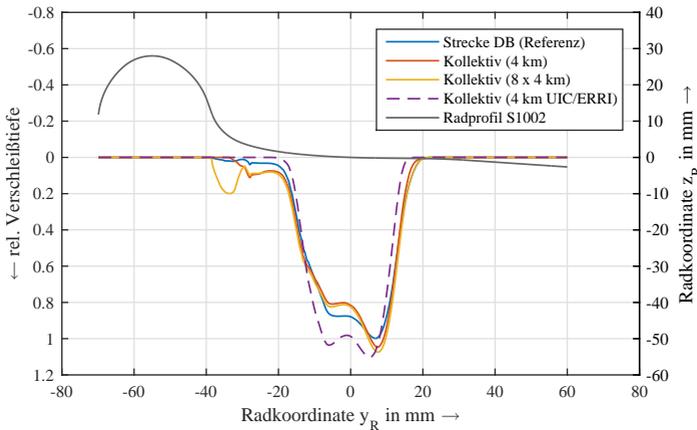


Abbildung 6.10: Vergleich: Radverschleiß nach Befahren der Strecke Magdeburg – Halle – Leipzig vs. Verschleiß nach Befahren der Streckenkollektive inkl. Gleislagefehler; Darstellung normiert auf den Verschleißspitzenwert der Gesamtstrecke *Strecke DB*.

ca. 10 % zu hoch aus. Im Bereich der Hohlkehle scheint hingegen praktisch kein Kontakt stattgefunden zu haben, sodass der Verschleiß hier unterschätzt wird. Das Verschleißbild ist ca. 22 mm schmaler als das Referenzbild. Große Teile des Radprofils, die beim Befahren der Gesamtstrecke Verschleiß erfahren, bleiben bei Verwendung des UIC-Kollektivs also unbelastet. Die empirische Standardabweichung von der Referenzlinie beträgt 7,0 %.

8 x 4 km-Kollektiv

Das 8 x 4 km-Kollektiv trifft die Referenzlinie im Bereich der Lauffläche besser. Die Verschleißspitze im Laufflächenbereich fällt um 7,4 % zu hoch aus. Im Bereich der Hohlkehle und insbesondere im Übergang zum Spurranz ($y_R < -30\text{ mm}$) wird der Verschleiß deutlich überschätzt. Die stark ausgeprägte Verschleißspitze deutet darauf hin, dass für diesen Bereich kurzzeitig ein Wechsel ins katastrophale Verschleißregime berechnet wurde. Die Breite des Verschleißbildes stimmt mit dem Referenzbild nahezu exakt überein. Die Standardabweichung von der Referenzlinie beträgt 4,5 %.

4 km-Kollektiv

Die Verschleißlinie des 4 km-Kollektivs ist im Bereich der Lauffläche ähnlich der des 8 x 4 km-Kollektivs. Die Verschleißspitze im Laufflächenbereich fällt um 4,6 % zu hoch aus. Im Bereich der Hohlkehle wird der Verschleiß jedoch weniger stark überschätzt. Das Verschleißbild ist insgesamt 4 mm schmaler als das Referenzbild. Die Standardabweichung beträgt insgesamt 2,7 %.

Von allen berechneten Kollektiven erzielte das 4 km-Kollektiv mit geclusterten Gleislagefehlern die besten Ergebnisse. Die Standardabweichung konnte hiermit von ursprünglich 7,0 % (Kollektiv mit UIC-Fehler) auf 2,7 % gesenkt werden. Dieses Kollektiv wird deshalb im Folgenden für die Optimierung der Radprofile verwendet.

7 Optimierungsszenario

Um die Universalität des Optimierungsprozesses zu verdeutlichen, werden in dieser Arbeit zwei Optimierungsszenarien betrachtet, die sich in ihrer Charakteristik stark voneinander unterscheiden. Im ersten Szenario wird das Radprofil der in Kapitel 4.1 beschriebenen Niederflurstraßenbahn sowohl mit dem Genetischen Algorithmus als auch mit dem Verfahren des Simulated Annealing optimiert. Dies ermöglicht im Anschluss die Gegenüberstellung von Ergebnisqualität und Konvergenzgeschwindigkeit der beiden Lösungsansätze. Im zweiten Szenario wird der geeigneteren der beiden Lösungsansätze (Simulated Annealing) für die Optimierung des Radprofils des in Kapitel 4.2 beschriebenen Eurofima-Reisezugwagens verwendet.

7.1 Niederflurstraßenbahn

Das Straßenbahnfahrzeug befährt das Kollektiv der in Abschnitt 6.2.3 beschriebenen kurvigen Strecke B2, die mit dem Schienenprofil vom Typ 49E1 ausgestattet ist. Das Fahrzeug fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 80 km/h, was seiner Höchstgeschwindigkeit entspricht und durch die Trassierung der Strecke an allen Stellen ermöglicht wird. Zu Beginn des Optimierungsprozesses verfügt das Fahrzeug über das in Bild 4.1 gezeigte Radprofil der Verkehrsbetriebe Karlsruhe. Die Zielfunktion des Optimierungsalgorithmus berücksichtigt alle Räder der (Starr-)Radsätze RS1, RS2, RS5 und RS6. An den Rädern dieser Radsätze wird das rechenintensive Discrete Elastic-Kontaktmodell verwendet. Da sich die Anforderungen an die Radprofile der Losradsätze RS3 und RS4 des mittleren Drehgestells von

denen der Starrradsätze unterscheiden, erscheint die Entwicklung eines gemeinsamen Radprofils für alle Räder nicht zwingend. Vielmehr ist eine gesonderte Optimierung dieser Räder denkbar. Der Verschleiß an den Losrädern der Radsätze RS3 und RS4 wird daher während der Optimierung nicht ausgewertet. Dies ermöglicht die Verwendung des einfacheren Equivalent Elastic-Kontaktmodells an diesen Rädern, was die Laufzeit der Optimierung etwas verkürzt.

7.2 Eurofima-Reisezugwagen

Der in Kapitel 4.2 beschriebene Reisezugwagen befährt das in Kapitel 6.3 beschriebene 4 km lange Kollektiv der DB-Strecke Magdeburg – Halle – Leipzig. Die Strecke ist mit Schienen vom Typ 60E1 (ehem. UIC60) ausgestattet, da das S1002-Radprofil für den Einsatz auf diesem Schienenprofil entwickelt wurde. Das Fahrzeug fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 120 km/h, was der Streckenhöchstgeschwindigkeit auf dem Teilstück Halle – Leipzig entspricht. Zu Beginn des Optimierungsprozesses verfügt das Fahrzeug über Radprofile vom Typ S1002, die dann vom Optimierungsalgorithmus Schritt für Schritt variiert werden. Die Zielfunktion des Optimierungsalgorithmus bezieht alle Räder des Fahrzeugs ein. Während der Optimierung wird daher an allen Rädern das rechenintensive Discrete Elastic-Kontaktmodell verwendet.

8 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden für beide betrachteten Fahrzeuge zunächst die Simulationsergebnisse der Referenzbefahrungen bei Verwendung der Urprofile (VBK bzw. S1002) beschrieben. Anschließend werden die Optimierungsläufe ausgewertet, das Konvergenzverhalten der Algorithmen während der Optimierung dargestellt und die durch Optimierung berechneten Radprofile im Hinblick auf Verschleiß, Rollkontaktermüdung und Kontaktpunktzahl mit ihren jeweiligen Urprofilen zu Beginn der Optimierung verglichen.

8.1 Niederflurstraßenbahn

Das Diagramm in Abbildung 8.1 zeigt den auf seinen Spitzenwert normierten Verschleiß, der beim Befahren des Netzes B2 bei Verwendung des Originalradprofils der Verkehrsbetriebe Karlsruhe errechnet wird. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Niederflurfahrzeug nicht für den Betrieb auf Vollbahnstrecken ausgelegt ist. Bei den in ihrem Drehgestell jeweils führenden Radsätzen RS1 und RS5 befindet sich im Laufflächenbereich eine ausgeprägte Verschleißspitze. Der Verschleiß an den Rädern dieser Radsätze ist inhomogen und verteilt sich über eine Breite von 41 mm. In ihrer Verschleißcharakteristik unterscheiden sich die beiden Radsätze RS1 und RS5 nicht. Die nachlaufenden Radsätze RS2 und RS6 verschleifen erheblich weniger. Sowohl der volumetrische Materialabtrag als auch die Höhe der Verschleißspitze fallen deutlich niedriger aus. Der Verschleiß an diesen Radsätzen ist etwas homogener und verteilt sich über eine Breite von ca. 22 mm. In ihrer Verschleißcharakteristik sind auch diese beiden Radsätze kaum vonein-

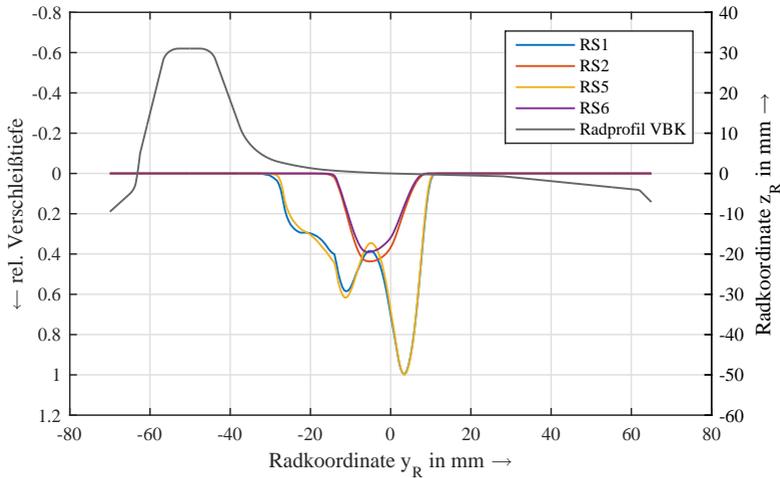


Abbildung 8.1: Radverschleiß nach dem Befahren des Streckennetzes B2 bei Verwendung des Radprofils der Verkehrsbetriebe Karlsruhe (VBK). Darstellung normiert auf den auftretenden Spitzenwert.

ander zu unterscheiden. Über alle acht ausgewertete Räder gemittelt zeigt der RCF_{surf} -Index nach Formel 2.5 für ein Rad in 126 der 112.500 Samplingsschritte ein erhöhtes Risiko zur Bildung von Rollkontaktermüdung an ($RCF_{surf} > 0$). Zu keiner Zeit kommt es zu Zweipunktkontakt.

8.1.1 Simulated Annealing (SA)

Der Ablauf des Optimierungsprozesses mittels Simulated Annealing ist in Abbildung 8.2 dargestellt. Die Zielfunktion nach Gleichung 3.1 des Ausgangsprofils (VBK) hatte einen Wert von 0,524. Die Zielfunktion wurde minimiert. Nach jeweils 80 Iterationen ohne Verbesserung der Zielfunktion wurde ein Reannealing durchgeführt, die „Temperatur“ des Algorithmus also wieder erhöht. Nach zwei Reannealingvorgängen wurde die Optimierung nach ca. 1200 Iterationen beendet. Der beste erzielte Funktionswert beträgt 0,344. Der Funktionswert konnte durch die Optimierung also um 34 % ge-

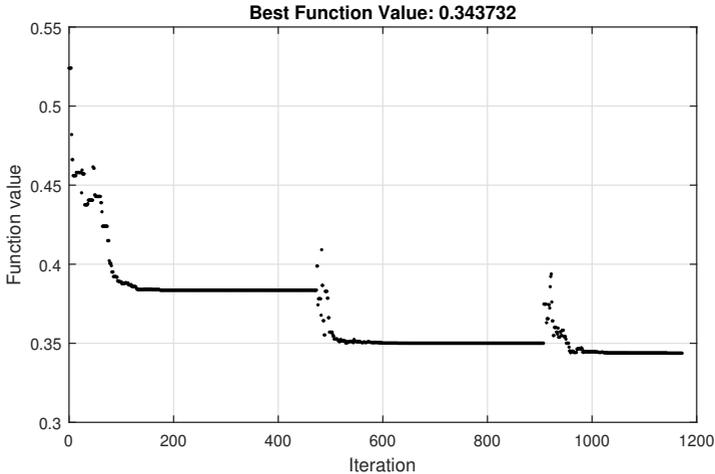


Abbildung 8.2: Verlauf der Optimierung; SA03-Profil; Simulated Annealing. Dargestellt ist der Funktionswert des zum jeweiligen Zeitpunkt vom Algorithmus übernommenen Lösungskandidaten, aufgetragen über die Zahl der Iterationen.

senkt werden. Der Algorithmus lief auf einem Prozessor vom Typ *Intel Core i7 3740QM*. Die Rechnung nutzte vier logische Prozessorkerne und dauerte ca. 16 Tage. Das resultierende Radprofil wird im Folgenden als *SA03-Profil* bezeichnet.

Das Diagramm in Abbildung 8.3 zeigt den Verschleiß, der an den Starrsätzen RS1, RS2, RS5 und RS6 bei Verwendung des optimierten Radprofils SA03 beim Befahren des Streckennetzes B2 entsteht. Wie in den Diagrammen zuvor wird jeder Radsatz durch eine Verschleißlinie repräsentiert, die den Mittelwert des Verschleißes an beiden Rädern des Radsatzes abbildet. Alle Radsätze haben ihre Verschleißspitze im Bereich der Lauffläche des Rades. Die in ihrem Drehgestell jeweils vorlaufenden Radsätze RS1 und RS5 weisen eine nahezu identische Verschleißcharakteristik auf. Sie erfahren sowohl den größten volumetrischen Materialabtrag als auch die größte Verschleißspitze aller ausgewerteten Radsätze. Der Verschleiß

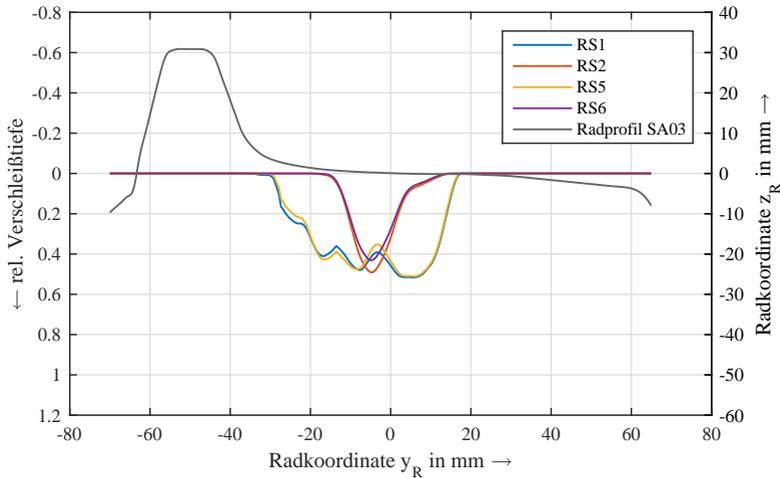


Abbildung 8.3: Radverschleiß nach dem Befahren des Streckennetzes B2 bei Verwendung des optimierten Radprofils SA03. Werte normiert auf den Spitzenwert aus Abbildung 8.1.

an diesen Radsätzen verteilt sich über eine Breite von >45 mm und reicht in die Hohlkehle der Räder hinein. Die nachlaufenden Radsätze RS2 und RS6 verschleifen in der Spitze etwas weniger und erfahren einen erheblich geringeren volumetrischen Materialabtrag. Der Verschleiß verteilt sich hier lediglich auf eine Breite von ca. 30 mm und beschränkt sich auf den Bereich der Laufflächen der Räder. In ihrer Verschleißcharakteristik unterscheiden sich auch diese beiden Radsätze kaum voneinander.

Die Auswertung des Rollkontaktermüdungsindex signalisiert ein um 72 % verringertes RCF-Risiko, verglichen mit dem VBK-Originalprofil. Der RCF_{surf} -Index eines Rades übersteigt über alle ausgewerteten Räder gemittelt in 36 der 112.500 Samplingschritten den Schwellwert von 0. Eine Betrachtung der Kontaktgebiete zeigt, dass das SA03-Profil eine leichte Tendenz zum Ausbilden zweier Kontaktpunkte hat. An einem Rad tritt durchschnittlich in 262 der 112.500 Samplingschritte Zweipunktkontakt auf. Der

zweite Kontaktpunkt liegt in der Hohlkehle des Rades bei ca. $y_R = -27 \text{ mm}$. Eine genauere Analyse zeigt, dass die beiden Kontaktpunkte in den Zweipunktkontaktsituationen sehr dicht beieinander liegen. Die Kontaktflächengröße sowie die Kontaktkräfte, die im Zweitkontakt auftreten, sind sehr gering, sodass erkennbare Auswirkungen auf Verschleiß- und Laufverhalten praktisch ausbleiben. Eine erhöhte Geräuschentwicklung kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Vor einem eventuellen praktischen Einsatz dieses Radprofils erscheint eine leichte Nachbearbeitung des Profils in diesem Bereich sinnvoll. Ein Diagramm über die Kontaktpunktverteilung des Radprofils kann Anhang A.2 entnommen werden. Beim Befahren des Streckennetzes wurde zudem der Entgleisungskoeffizient Y/Q erfasst. Der Spitzenwert des nach DIN EN 14363 [8] gefilterten Koeffizienten ist leicht erhöht im Vergleich zu dem für das originale VBK-Profil berechneten Koeffizienten. Ein tatsächlich höheres Entgleisungsrisiko kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden, da für das Entgleisungsrisiko nach DIN EN 14363 nur die Y/Q -Werte beim Durchfahren von sehr engen Bögen mit einem Radius von 150 m relevant sind. In diesen Szenarien wandert der Kontaktpunkt in den Spurkranzbereich des Radprofils, der im Zuge der Optimierung jedoch nicht verändert wurde. Eine signifikante Erhöhung des Entgleisungsrisikos nach DIN EN 14363 erscheint daher unwahrscheinlich. Eine gesonderte Untersuchung nach den Prüfscenarien der DIN EN 14363 erfolgt in dieser Arbeit nicht.

8.1.2 Genetischer Algorithmus (GA)

Das Diagramm in Abbildung 8.4 zeigt den Ablauf des Optimierungsprozesses bei Verwendung des Genetischen Algorithmus. Die Zielfunktion nach Gleichung 3.1 des Ausgangsprofils (VBK) hatte einen Wert von 0,524. Die Zielfunktion wurde minimiert. Nach 128 Generationen und 2560 berechneten Individuen brach der Optimierungslauf aus technischen Gründen ab. Der beste erzielte Funktionswert beträgt 0,348. Der Funktionswert konnte durch

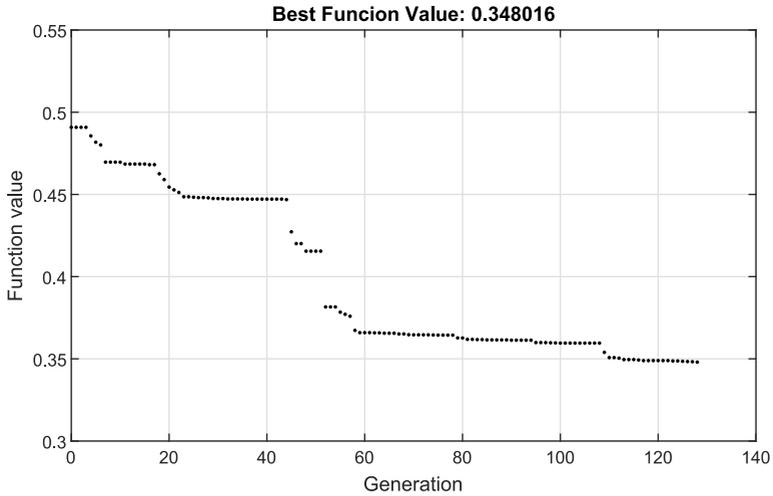


Abbildung 8.4: Verlauf der Optimierung; GA02-Profil; Genetischer Algorithmus. Dargestellt ist der Funktionswert des zum jeweiligen Zeitpunkt besten Individuums aller Generationen, aufgetragen über die Zahl der berechneten Generationen.

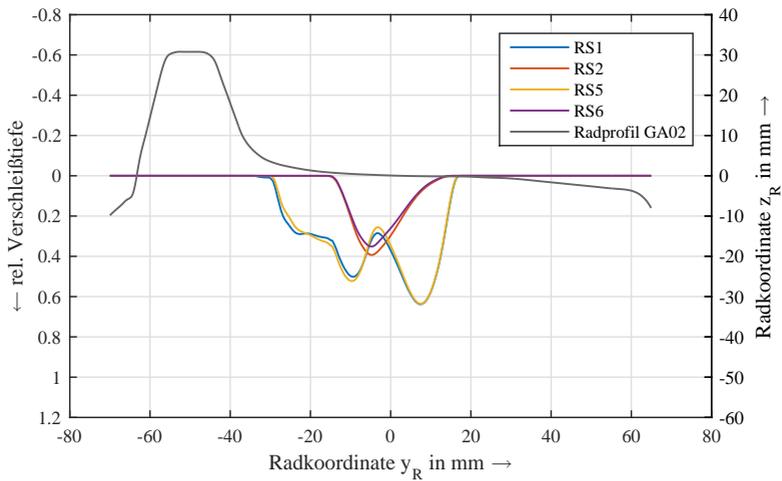


Abbildung 8.5: Radverschleiß nach dem Befahren des Streckennetzes B2 bei Verwendung des optimierten Radprofils GA02. Werte normiert auf den Spitzenwert aus Abbildung 8.1.

die Optimierung also um 34 % gesenkt werden. Die Optimierung lief auf einem Rechner mit zwei *Intel Xeon 5680* Prozessoren. Die Rechnung nutzte 20 logische Prozessorkerne und hatte eine Gesamtlaufzeit von ca. 11 Tagen. Das resultierende Radprofil wird im Folgenden als *GA02-Profil* bezeichnet. Das Diagramm in Abbildung 8.5 zeigt den Verschleiß, der an den Starrradsätzen RS1, RS2, RS5 und RS6 bei Verwendung des optimierten Radprofils GA02 beim Befahren des Netzes B2 entsteht. Die Werte sind normiert auf den größten Spitzenwert des nichtoptimierten Ursprungsprofils (VBK).

Die Genetische Optimierung konnte die Verschleißspitze der vorlaufenden Radsätze RS1 und RS5 auf ca. 64 % ihres ursprünglichen Wertes senken. Der Verschleiß an den Rädern dieser Radsätze verteilt sich auf eine Breite von ca. 50 mm. Die Verschleißspitze der nachlaufenden Radsätze RS2 und RS6 konnte nur wenig verringert werden. Der Verschleiß an den Rädern dieser Radsätze verteilt sich auf eine Breite von ca. 30 mm. Die Zahl der Samplingschritte, in denen nach Formel 2.5 ein erhöhtes Risiko zur Ausbildung von Rollkontaktermüdung prognostiziert wird, konnte im Vergleich zum originalen VBK-Profil um 92 % gesenkt werden. Im Mittel über alle ausgewerteten Räder wurde der RCF_{surf} -Schwellwert nur in 11 der 112.500 Samplingschritte überschritten. In durchschnittlich 83 der Samplingschritte tritt Zweipunktkontakt auf. Ein Diagramm über die Kontaktpunktlageverteilung des Radprofils kann Anhang A.2 entnommen werden. Der Entgleisungskoeffizient Y/Q blieb nahezu unverändert.

8.2 Eurofima-Reisezugwagen

Bild 8.6 zeigt das simulierte Verschleißverhalten des S1002-Profiles beim Befahren der Strecke Magdeburg – Halle – Leipzig. Das S1002-Profil wurde als Startprofil der Optimierungsläufe verwendet und dient somit im Folgenden als Referenz. Dargestellt ist der mittlere Verschleiß an den Radsatzpaaren *RS1/RS4* und *RS2/RS3*. Die Gründe für die gewählte Darstellungsart wurden in Kapitel 3.2.2 diskutiert. Die beiden Radsatzpaarungen verschlei-

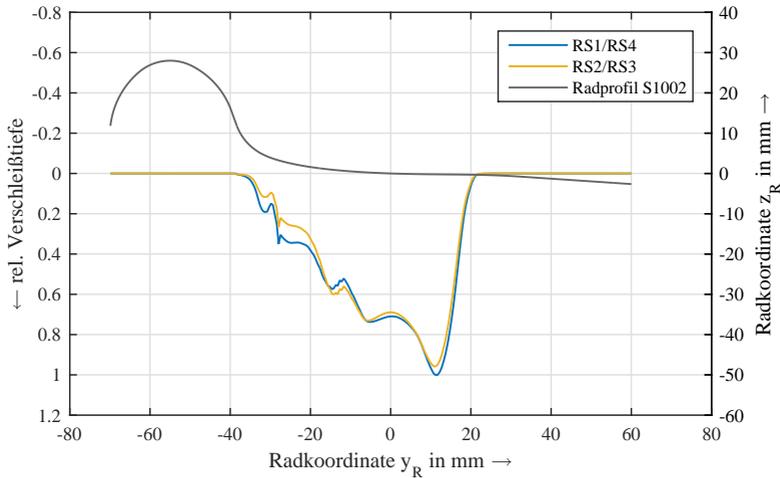


Abbildung 8.6: Radverschleiß nach dem Befahren der Strecke Magdeburg – Halle – Leipzig, bei Verwendung des S1002-Standardprofils. Mittelwerte aus den Rädern der Radsatzpaare RS1/RS4 bzw. RS2/RS3. Darstellung normiert auf den auftretenden Spitzenwert.

ßen qualitativ und quantitativ sehr ähnlich. Der Verschleiß findet auf einer Breite von ca. 60 mm statt. Auf der Feldseite des Laufflächenbereichs ist eine deutlich ausgeprägte Verschleißspitze erkennbar. Das S1002-Profil überschreitet den RCF_{surf} -Schwellwert beim Befahren der Strecke über alle Räder gemittelt in 4.863 der ca. 613.000 Samplingschritte. In durchschnittlich 2.492 Samplingschritten tritt Zweipunktkontakt auf. Ein Diagramm über die Kontaktpunktlageverteilung des Radprofils kann Anhang A.2 entnommen werden.

Bild 8.7 zeigt das simulierte Verschleißverhalten des gleichen Profils beim Befahren des Streckenkollektivs derselben Strecke. Die äußere Verschleißspitze auf der Feldseite des Laufflächenbereichs ist hier etwas stärker ausgeprägt und auch im Bereich der Hohlkehle verschleißt das Profil etwas stärker als es beim Befahren der Gesamtstrecke beobachtet werden konnte.

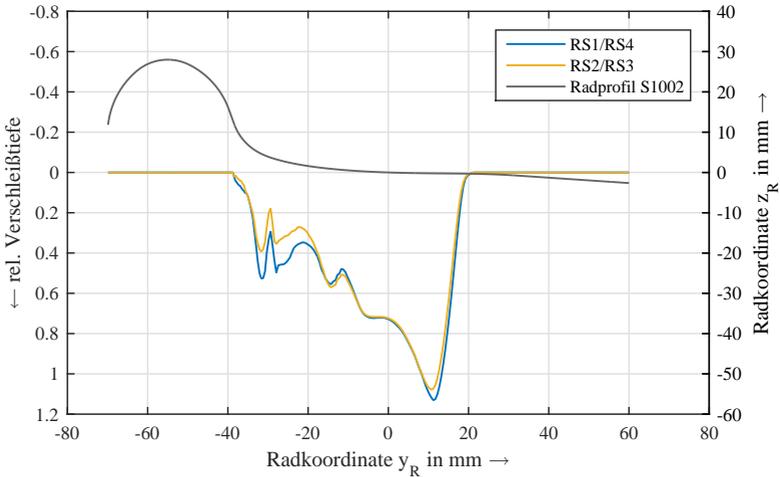


Abbildung 8.7: Radverschleiß nach dem Befahren des Streckenkollektivs der Strecke Magdeburg – Halle – Leipzig, bei Verwendung des S1002-Standardprofils. Werte normiert auf den Spitzenwert des Verschleißes aus Abb. 8.6

Das Streckenkollektiv neigt also dazu, den Verschleiß an den Rändern des Verschleißbereiches zu überschätzen. Dennoch wird die Charakteristik des Verschleißbildes, also die Lage von Spitzen und Tälern sowie ihr Verhältnis zueinander, korrekt abgebildet.

8.2.1 Simulated Annealing (SA)

Das Diagramm in Abbildung 8.8 zeigt den Ablauf des mittels SA-Algorithmus durchgeführten Optimierungsprozesses. Die Zielfunktion nach Gleichung 3.1 des Ausgangsprofils (S1002) hatte einen Wert von 0,88. Nach jeweils 80 Iterationen ohne Verbesserung der Zielfunktion wurde ein Reannealing durchgeführt, die „Temperatur“ des Algorithmus also wieder erhöht. Nach vier Reannealingvorgängen wurde die Optimierung nach ca. 1900 Iterationen beendet. Der beste erzielte Funktionswert beträgt 0,35. Der Funktionswert konnte durch die Optimierung also um 60 % gesenkt

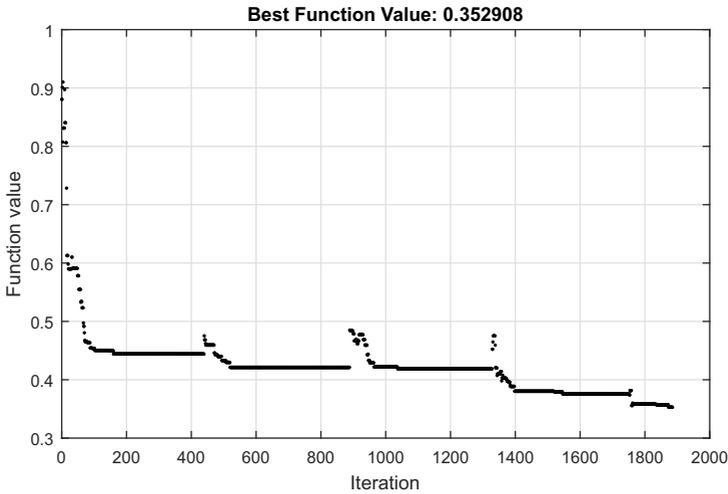


Abbildung 8.8: Verlauf der Optimierung; ESA04-Profil; Simulated Annealing. Dargestellt ist der Funktionswert des zum jeweiligen Zeitpunkt vom Algorithmus übernommenen Lösungskandidaten, aufgetragen über die Zahl der Iterationen.

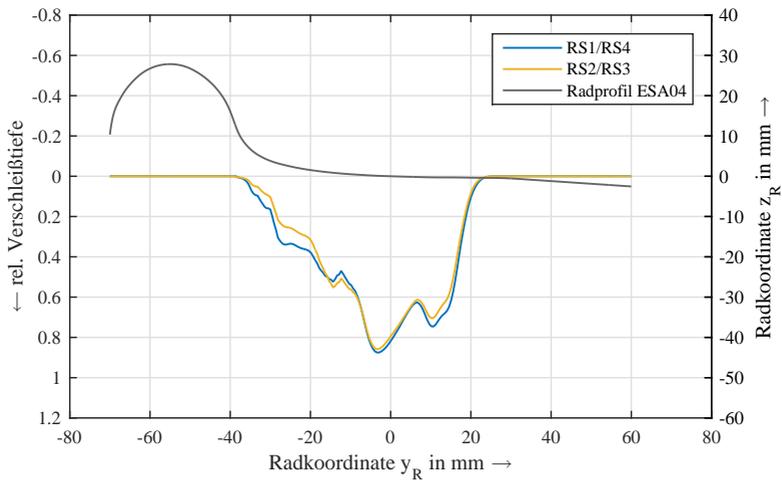


Abbildung 8.9: Radverschleiß nach dem Befahren der Strecke Magdeburg – Halle – Leipzig, bei Verwendung des optimierten ESA04-Radprofils. Werte normiert auf den Spitzenwert des Verschleißes aus Abb. 8.6.

werden. Der Algorithmus lief auf einem Prozessor vom Typ *Intel Core i7 3740QM*. Die Rechnung nutzte vier logische Prozessorkerne und dauerte ca. 30 Tage. Das resultierende Radprofil wird im Folgenden als *ESA04-Profil* bezeichnet. Abbildung 8.9 zeigt das simulierte Verschleißverhalten des *ESA04*-Profils beim Befahren der unkomprimierten Strecke Magdeburg – Halle – Leipzig. Dargestellt ist auch hier der mittlere Verschleiß an den Radsatzpaaren *RS1/RS4* und *RS2/RS3*. Die Werte wurden auf den Wert des Verschleißmaximums des Ausgangsprofils (*S1002*, Bild 8.6) normiert, sodass eine schnelle Vergleichbarkeit gewährleistet ist. Wie bei Verwendung des *S1002*-Ausgangsprofils verschleifen auch bei Verwendung des *ESA04*-Profils beide Radsatzpaarungen sehr ähnlich. Der Verschleiß verteilt sich auf eine Breite von ca. 64 mm. Die Verschleißspitze ist etwas weniger stark ausgeprägt als bei Verwendung des *S1002*-Profils. Die Höhe des Verschleißmaximums konnte auf ca. 87 % ihres Ursprungswertes reduziert werden. Auch die ursprünglich geringe Neigung zur Ausbildung von Rollkontaktermüdung konnte weiter reduziert werden. Über alle Räder gemittelt wurde der RCF_{surf} -Schwellwert in 2.566 der ca. 613.000 Samplingschritten überschritten. Die Zahl der Zeitschritte, in denen eine Schwellwertüberschreitung stattfindet, konnte also um 47 % gesenkt werden. Auch die Neigung zur Bildung von Zweipunktkontakt wurde reduziert. In 903 Zeitschritten findet (an einem der acht Räder) Zweipunktkontakt statt. Dies ist eine Reduzierung um 64 %. Für die Einsetzbarkeit des Radprofils ist zudem die kritische Geschwindigkeit von Bedeutung. Dies ist die Geschwindigkeit, bis zu der ein stabiler Sinuslauf vorherrscht. Die kritische Geschwindigkeit wurde entsprechend [100] nach einer nichtlinearen Methode ermittelt. Die Radsätze des Fahrzeugs wurden hierzu auf gerader, fehlerfreier Strecke bei hoher Geschwindigkeit einer einzelnen seitlichen Anregung ausgesetzt. Diese führt zu einer überkritischen Schwingung („Hunting Oscillation“) der Radsätze. Das Fahrzeug wurde anschließend mit einer Beschleunigung von 0,5 m/s abgebremst. Die kritische Geschwindigkeit ist erreicht, wenn die überkritische Schwingung abgeklungen ist. Abbildung 8.10 dokumentiert das Ergebnis

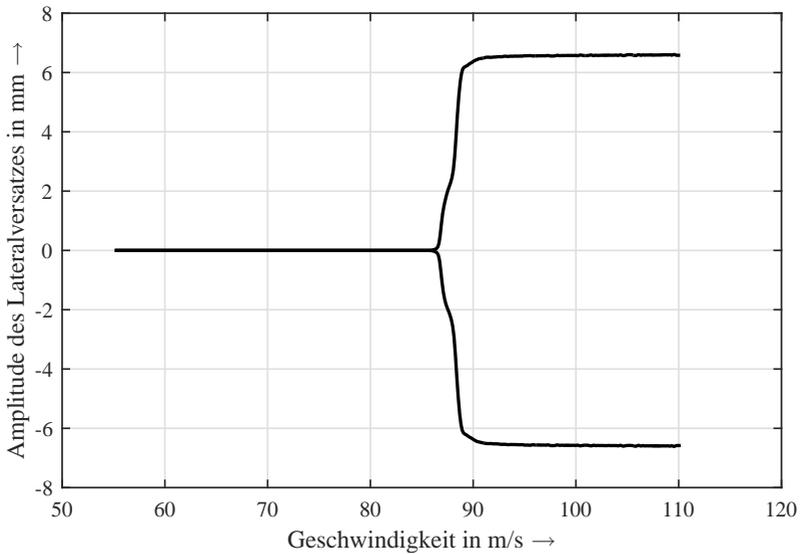


Abbildung 8.10: Kritische Geschwindigkeit; ESA04-Profil. Das Diagramm zeigt die Hüllkurve der Sinusschwingung von RS3, dem Radsatz mit der geringsten kritischen Geschwindigkeit.

dieses Versuchs. Aufgetragen ist die Lateralbewegung des kritischsten Radsatzes (hier: RS3) über die Fahrzeuggeschwindigkeit in m/s . Die kritische Geschwindigkeit liegt hier bei ca. 87 m/s bzw. ca. 313 km/h. Dies ist eine Verbesserung um ca. 5 %, verglichen mit dem S1002-Standardprofil (ca. 83 m/s bzw. 297 km/h).

9 Fazit

9.1 Eignung des iterativen Designverfahrens

Die Ergebnisse zeigen, dass das iterative Designverfahren aus Fahrdynamik- und Verschleißsimulation mit lokaler Verschleißauswertung in Kombination mit stochastischen Optimierungsalgorithmen in der Lage ist, für unterschiedlichste Fahrzeug/Fahrbahn-Kombinationen geeignete Radprofile zu gestalten. Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens ist vom verwendeten Optimierungsalgorithmus, dessen Konfiguration sowie von der Vorgabe sinnvoller Randbedingungen abhängig. Während der Entwicklung des Optimierungsprozesses hat sich zudem gezeigt, dass das Potenzial der Optimierung entscheidend durch die Qualität der Streckenkollektive bestimmt wird. Gute Streckenkollektive sind Voraussetzung für die Übertragbarkeit der Optimierungsergebnisse auf das tatsächliche Anwendungsszenario der Fahrzeuge. Ein Radprofil, das mit großem Aufwand auf ein Streckenkollektiv hin optimiert wurde, wird in der Praxis nur schlecht funktionieren, wenn das Streckenkollektiv das Einsatzszenario unzureichend repräsentiert. Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Verfahren zur Kollektivierung des Streckenverlaufs führte in allen Beispielen zu sehr guten Ergebnissen. Der Profilverschleiß der Räder unterscheidet sich zwischen Kollektiv und Gesamtstrecke im Wesentlichen nur um einen Skalierungsfaktor. Das Verfahren zur Ergänzung des Verlaufskollektivs um Gleislagefehler führt hingegen noch zu erkennbaren Unterschieden in den Verschleißbildern. Am Beispiel des Eurofima-Reisezugwagens konnte gezeigt werden, dass trotz dieser Unterschiede Profile generiert werden können, deren Verschleiß- und Ermü-

dungsverhalten das der Standardprofilkombination S1002/UIC60 deutlich übertrifft. Dennoch ist zu erwarten, dass erst nach weiteren Verbesserungen der Gleislagekollektive das volle Potenzial des Optimierungsverfahrens ausgeschöpft werden kann.

9.2 Eignung von Simulated Annealing und Genetischem Algorithmus im Designverfahren

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verfahren *Simulated Annealing* und *Genetischer Algorithmus* für die Optimierung von Radprofilen prinzipiell beide geeignet sind. Während der Entwicklung des Optimierungsverfahrens haben sich individuelle Stärken und Schwächen der Algorithmen herauskristallisiert.

Genetischer Algorithmus (GA)

Der Genetische Algorithmus eignet sich in herausragender Weise für paralleles Rechnen auf Maschinen mit vielen logischen Prozessorkernen. Die Eignung (d. h. der Fitnesswert) jedes Individuums einer Generation kann hier in einer eigenen Simulationsinstanz berechnet werden. Da die Generationsgröße des Algorithmus frei gewählt werden kann, liegt die Grenze der Parallelisierung ausschließlich in der verwendeten Hardware und der Zahl der verfügbaren Softwarelizenzen. Sind ausreichend viele Prozessorkerne und Lizenzen vorhanden, ist die zeitgleiche Berechnung hunderter Radprofile denkbar. Ein Nachteil des Genetischen Algorithmus kann in seiner größeren Komplexität gesehen werden. Diese macht sich durch eine großen Zahl von Konfigurationsparametern bemerkbar. Die Hauptmechanismen Reproduktion, Rekombination und Mutation können auf vielfältige Weise gestaltet und angepasst werden. Die theoretisch möglichen Vorteile durch eine gute Adaption des Algorithmus an das zu lösende Problem sind in der Praxis

nicht nutzbar. Bedingt durch die langwierige Simulation des Verschleißverhaltens beträgt die Gesamtlaufzeit eines Optimierungslaufes mehrere Tage bis Wochen. Entsprechend lange dauert die Erprobung jedes einzelnen Konfigurationsparametersatzes. In Anbetracht einer deutlich zweistelligen Zahl von GA-Konfigurationsparametern ist unmittelbar ersichtlich, dass eine systematische, iterative Konfiguration des Algorithmus in der Praxis nicht möglich ist. Die Folgen lassen sich am Verlauf des Zielfunktionswertes beim Ablauf der Algorithmen in dieser Arbeit ablesen: Um eine ähnliche Ergebnislösung wie die SA-Optimierung zu erreichen, muss der GA-Algorithmus eine deutlich größere Zahl von Radprofilen evaluieren. Dieser Effizienznachteil kann in Kauf genommen werden, wenn eine geeignete Infrastruktur mit vielen parallelen Recheneinheiten zur Verfügung steht. Diese könnte dann trotz Effizienznachteilen eine schnellere Optimierung ermöglichen, als dies mit dem nur schwer parallelisierbaren SA-Algorithmus realisierbar wäre. Für den in dieser Arbeit vorgestellten Optimierungsprozess eignet sich der GA-Algorithmus also besonders dann, wenn ein Computersystem mit vielen Prozessorkernen zur Verfügung steht und Softwarelizenzen für die Nutzung der Kerne vorhanden sind. Die Radprofiloptimierung mit Hilfe des GA-Algorithmus ist also wenig effizient, die Leistungsfähigkeit ist aufgrund der hervorragenden Parallelisierbarkeit bei Vorhandensein entsprechender Recheninfrastruktur jedoch sehr hoch.

Simulated Annealing (SA)

Der Simulated Annealing-Algorithmus erfordert einen sequenziellen Ablauf bei der Berechnung von Lösungskandidaten. Die Ausnutzung von Rechnerumgebungen mit vielen logischen Prozessorkernen ist damit stark eingeschränkt. Der SimPack-Solver konnte während der Simulationsläufe bis zu vier Prozessorkerne sinnvoll nutzen. Durch die Bereitstellung weiterer Prozessorkerne konnte die Simulationszeit *nicht* weiter verkürzt werden. Der SimPack-Postprocessor, der für die Ergebnisauswertung verwendet wurde,

ist sogar auf die Nutzung eines einzelnen Kerns beschränkt. Die Ergebnisauswertung stellte somit eine weitere leistungsbegrenzende Engstelle dar. Als größter Vorteil des SA-Algorithmus erwies sich seine einfache Konfigurierbarkeit und (möglicherweise als Folge dessen) seine schnelle Konvergenz. Mit der Anfangstemperatur existiert ein einzelner, sehr mächtiger Konfigurationsparameter, für den nach wenigen Versuchen sinnvolle Werte gefunden werden können. Alle weiteren Konfigurationsoptionen erwiesen sich als weniger einflussreich, sodass deren Wahl von eher untergeordneter Bedeutung ist. Im Vergleich zum GA-Algorithmus musste der SA-Algorithmus zum Erzielen ähnlich guter Lösungen eine deutlich kleinere Zahl von Lösungskandidaten berechnen. Für den in dieser Arbeit vorgestellten Optimierungsprozess eignet sich der SA-Algorithmus insbesondere dann, wenn nur wenige Prozessorkerne zur Verfügung stehen oder die Softwarelizenzen die Nutzung vieler Kerne nicht zulassen. Die Profiloptimierung mit Hilfe des SA-Algorithmus ist also effizient, in ihrer maximalen Leistungsfähigkeit jedoch beschränkt.

10 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode zur iterativen Verschleißoptimierung von Radprofilen entwickelt, die es erlaubt, Radprofile für eine gegebene Kombination aus Fahrzeug und Streckennetz maßzuschneidern. Der Radverschleiß wurde nicht nur als global angewendeter Verschleißindex betrachtet, sondern die Verschleißtiefe über die Radprofilbreite ausgewertet. Optimierungsziele waren die Minimierung der Verschleißmaxima im Laufflächen- sowie im Hohlkehlenbereich. Neben dem Radverschleiß wurde auch ein Rollkontaktermüdungsindex sowie die Neigung zur Bildung von Zweipunktkontakten in der Zielfunktion der Optimierung berücksichtigt. Bei der Wahl der Zielfunktion wurde zudem eine Unterscheidung zwischen Ein- und Zweirichtungsfahrzeugen vorgenommen. Für die Optimierung wurde eine Iterationsschleife aus Optimierungsalgorithmus (Software: MATLAB) und Mehrkörper- und Verschleißsimulation (Software: SimPack) unter Verwendung des *Discrete Elastic*-Kontaktmodells sowie *Archards Wear Law* aufgebaut. Als Optimierungsmethoden wurden die beiden stochastischen Verfahren *Simulated Annealing* und *Genetische Optimierung* eingesetzt. Um einen sinnvollen Einsatz der rechenintensiven, MKS-gestützten Verschleißsimulation in einer Iterationsschleife zu ermöglichen, wurde eine Methode zur Bildung von Streckenverlaufskollektiven vorgestellt. Die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Kollektivbildungsmethode wurde durch Vergleichsrechnungen verschiedener Strecken/Kollektivkombinationen nachgewiesen. Hierzu wurde das Modell eines Straßenbahnfahrzeugs der Verkehrsbetriebe Karlsruhe verwendet. Eine Erweiterungsmöglichkeit des Streckenverlaufskollektivs um die Berücksichtigung

real gemessener Gleislagefehler wurde entwickelt und in Simulationsrechnungen mit dem MKS-Modell eines Eurofima-Reisezugwagens der Deutschen Bahn erprobt. Zuletzt wurden für zwei verschiedene Fahrzeug/Strecken-Kombinationen, unter Einsatz der beschriebenen Iterationsschleife, der beiden Optimierungsverfahren Simulated Annealing und Genetische Optimierung sowie der zuvor erstellten Streckenkollektive, insgesamt drei optimierte Radprofile berechnet. Simulated Annealing stellte sich hierbei als besonders effizientes Verfahren heraus, das nur geringe Anforderungen an Rechenleistung und Softwarelizenzen stellt. Der Genetische Algorithmus erwies sich als sehr leistungsfähig, jedoch weniger effizient. Er erfordert einen relativ hohen Konfigurationsaufwand und stellt hohe Anforderungen an Hardware und verfügbare Softwarelizenzen. Sowohl Simulated Annealing als auch der Genetische Algorithmus erwiesen ihre Eignung für die iterative Optimierung von Radprofilen.

11 Ausblick

Die vorliegende Arbeit bietet zahlreiche Anknüpfungspunkte für mögliche weitere Forschungsarbeiten, sowohl zu Fragestellungen im unmittelbaren Themenbereich der stochastischen Radprofiloptimierung als auch zu Fragestellungen an den Schnittstellen der simulativen, stochastischen Optimierung zum tatsächlichen, physischen System Bahn. Einige dieser Anknüpfungspunkte werden im Folgenden kurz erläutert.

Berücksichtigung von Langzeitverschleiß an Rädern

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Optimierung von Radprofilen beschränkt sich auf die Entwicklung von verschleißoptimalen *Neuprofilen*. In der vorgestellten Form werden die Auswirkungen einer späteren, verschleißbedingten Änderung dieser Neuprofile nicht berücksichtigt. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass ein mit dieser Methode verschleißoptimiertes Rad sein Verschleißverhalten in der Praxis nach einigen tausend Kilometern so stark verschlechtert hat, dass ein im Neuzustand eigentlich „schlechteres“ Rad tatsächlich eine bessere Lösung darstellt. Um dies zu verhindern, kann die Optimierungsmethode durch eine Langzeitverschleißberechnung ergänzt werden. Der Optimierer könnte zur Bewertung der Profilqualität dann neben dem Verschleißbild, das sich im (quasi-) Neuzustand ergibt, auch Verschleißbilder von späteren Radzuständen in die Bewertung einfließen lassen. Die Integration einer solchen Langzeitverschleißberechnung ist technisch unkompliziert. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Rechenzeit hierdurch erheblich steigt.

Verschleißprofile an Schienen

Die Verwendung von unverschlissenen Schienenprofilen war ausreichend, um die Funktionsweise sowie die Leistungsfähigkeit des Optimierungsverfahrens zu demonstrieren und vereinfachte zudem die Validierung der Streckenkollektive erheblich, weil keine aufwendigen Schienenprofilmessungen der ausgewählten Strecke durchgeführt werden mussten. Das vorgestellte Optimierungsverfahren lässt die Verwendung von verschlissenen Schienenprofilen jedoch prinzipiell zu. In realen Netzen ist der Verschleiß von Schienen in hohem Maße vom Ort ihrer Verwendung abhängig. Die Außenschiene eines 800 m-Bogens wird nach einigen Jahren Liegedauer ein fundamental anderes Verschleißbild aufweisen, als eine Schiene auf gerader Strecke. SimPack ermöglicht die Abbildung dieses Sachverhalts durch eine positionsabhängige Modellierung des Schienenprofils, die auch zwischen linker und rechter Schiene unterscheiden kann. Auch die Machart der in dieser Arbeit verwendeten Streckenkollektive scheint für eine solche Modellierung geeignet. So ist es z. B. denkbar, für jeden Bogenradius ein oder sogar mehrere charakteristische Verschleißprofile sowohl für die Innen-, als auch für die Außenschiene zu hinterlegen. Eine signifikante Steigerung der Simulationszeit ist durch diese Maßnahme nicht zu erwarten, sodass die Verfügbarkeit entsprechender Schienenprofilmessdaten die größte Hürde darstellt.

Elastisches Gleis

Alle Simulationsläufe in dieser Arbeit fanden auf einem als starr angenommenen Gleis statt. Reale Gleise haben jedoch Feder- und Dämpfungseigenschaften. Die Schiene selbst verformt sich zwischen ihren Auflagepunkten elastisch, die Zwischenlagen zwischen Schiene und Schwelle werden deformiert und auch der Unterbau verhält sich nicht starr. SimPack erlaubt prinzipiell eine detaillierte Modellierung dieser Elastizitäten. Die Schwierigkeit liegt in ihrer Parametrierung, da sich die Steifigkeiten und Dämpfungseigenschaften unterschiedlicher Gleise unterscheiden. Die elastische Model-

lierung von Gleisen zum Zwecke der Verschleißberechnung ist in der Forschung noch relativ neu und erscheint nicht zwingend. Sie ist an dieser Stelle dennoch erwähnt, da sich bei undokumentierten Versuchsrechnungen während der Entstehung dieser Arbeit mögliche Komplikationen mit den vorgestellten Verfahren zur Bildung von Streckenkollektiven andeuteten, wenn nicht nur globale Gleiselastizitäten betrachtet werden, sondern die Schienen als voneinander unabhängig bewegliche Körper modelliert werden. Hierzu erscheinen weitere Untersuchungen sinnvoll.

Geschwindigkeitsprofile

In allen betrachteten Szenarien bewegten sich die Fahrzeuge mit einer konstanten Geschwindigkeit, deren Höhe der minimal zulässigen Höchstgeschwindigkeit der abgebildeten Strecke entspricht. Das Abbilden vorbildnaher Geschwindigkeitsprofile auf einem Streckenkollektiv mit nur 4 km Länge erscheint weder möglich noch sinnvoll. Es wäre jedoch denkbar, Geschwindigkeitsprofile vorzugeben, die die Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Bogenradius einstellen. Bei Verwendung der 8 x 4 km-Kollektive (s. Kapitel 6.3) könnte auch die Gleislagequalität im Geschwindigkeitsprofil berücksichtigt werden.

Antriebs- und Bremskräfte

Antriebs- und Bremskräfte haben, insbesondere bei Lokomotiven, aber auch bei Fahrzeugen, die häufigen Anfahr- und Bremsvorgängen unterworfen sind, einen entscheidenden Einfluss auf den am Rad entstehenden Verschleiß. Das Abfahren eines realistischen Fahrspiels auf einem Streckenkollektiv ist aufgrund seiner eng begrenzten Länge weder möglich noch sinnvoll. In weiterführenden Arbeiten könnte jedoch untersucht werden, inwiefern durch das Einbringen von (z. B. gegeneinander wirkenden) antreibenden und bremsenden Momenten und Kräften beim Befahren des Kollektivs ein vorbildnahes Fahrspiel simuliert werden kann.

Simulation eines Zugverbands

Der in Kapitel 4.2 vorgestellte Reisezugwagen wurde für die Verschleißberechnungen stets als alleine rollendes Fahrzeug betrachtet. In der Praxis werden diese Fahrzeuge jedoch in einem Zugverband bewegt. Es stellt sich hier die Frage, wie groß die Einflüsse der vor- und nachlaufenden Fahrzeuge auf die Laufdynamik des betrachteten Wagens sind und ob das Verschleißbild, das sich an den Rädern des betrachteten Wagens einstellt, durch die Wechselwirkungen mit den angrenzenden Fahrzeugen entscheidend verändert wird. Ist diese Frage zu bejahen, so ist für weitere Radprofiloptimierungen auch die Frage von Bedeutung, wie groß der Einfluss der Position des Fahrzeugs im Zugverband auf das resultierende Verschleißbild ist.

Radsatzindividuelle Profilloptimierung bei Einrichtungsfahrzeugen

Die Ergebnisauswertung in Kapitel 8.1 hat gezeigt, dass sich bei Einrichtungsfahrzeugen die Verschleißbilder an vor- und nachlaufenden Radsätzen eines Drehgestells stark voneinander unterscheiden. Dies legt die Vermutung nahe, dass das volle Optimierungspotenzial bei diesen Fahrzeugen nur durch eine radsatzindividuelle Radprofiloptimierung ausgeschöpft werden kann, die zwischen vorlaufenden und nachlaufenden Radsätzen differenziert. Hierzu wäre zu untersuchen, ob vor- und nachlaufende Radsätze tatsächlich unabhängig voneinander optimiert werden können, oder ob die Zwangsbedingungen, die sich aus der Führung der Radsätze in einem gemeinsamen Drehgestell ergeben, eine aufwendigere Optimierung des Gesamtlaufwerks notwendig macht.

Streckenkollektive

Eine hohe Qualität der Streckenkollektive hat sich im Laufe der Arbeit als essenziell wichtig für die Erzielung guter Optimierungsergebnisse erwiesen. Während das Verfahren zur Kollektivierung des Streckenverlaufs als ausgereift betrachtet werden kann, kommt es bei der Kollektivierung von Gleisla-

gefehlern noch immer zu größeren Unterschieden in den Verschleißbildern, sodass sich dieses Gebiet in besonderem Maße für weitere Forschungsarbeiten eignet.

Zielfunktion

Die automatisierte Auswertung der Simulationsrechnungen im SimPack-Postprocessor hatte einen erheblichen Anteil an der Gesamtlaufzeit der durchgeführten Optimierungsläufe. Auch um diesen Auswertungsaufwand gering zu halten, wurde die Zielfunktion verhältnismäßig einfach gehalten. So wurde die Neigung zur Ausbildung von Subsurface-Fatigue ebensowenig berücksichtigt, wie der mit dem Radprofil erzielbare Fahrkomfort. Auch die für den Betrieb wichtige kritische Geschwindigkeit des Fahrzeugs wurde erst nach Abschluss des Optimierungsprozesses geprüft. Für die akademische Demonstration der Leistungsfähigkeit des Optimierungsverfahrens erscheint dies zwar ausreichend, bei einer Anwendung des Verfahrens auf ein reales Problem sollte eine Erweiterung der Zielfunktion jedoch zumindest geprüft werden. Um den Auswertungs-Aufwand zu verringern, wäre es denkbar und sinnvoll, den SimPack-Postprocessor vollständig zu umgehen. SimPack erlaubt bereits seit einiger Zeit einen Export der Messdaten in ein .mat-File, das in Matlab direkt eingelesen werden kann. Hierdurch entfällt der zusätzliche Schritt des Datenexports aus dem SimPack-Postprocessor, der sich als besonders zeitaufwendig herausgestellt hat. Durch Nutzung dieser Option sollte es daher möglich sein, die Zielfunktion um weitere Optimierungsziele zu erweitern und zugleich die Optimierungszeit erheblich zu reduzieren.

A Anhang

A.1 Anhang 1

Übergangsbögen wurden zur Hälfte dem größeren und zur Hälfte dem kleineren Radius zugerechnet. Der Anteil der Übergangsbögen an der gesamten Streckenlänge beträgt ca. 4 %.

Radienbereich	Länge [m]	Anteil [%]
1000 m	786	0,16
1050 m	3834	0,77
1100 m	3432	0,68
1150 m	366	0,073
1200 m	6909	1,38
1250 m	2320	0,46
1300 m	4376	0,87
1350 m	8275	1,65
1400 m	4210	0,84
1450 m	5965	1,19
1500 m	1226	0,24
1550 m	795	0,16

Fortsetzung auf Folgeseite

Radienbereich	Länge [m]	Anteil [%]
1600 m	5835	1,16
1650 m	4254	0,85
1700 m	6490	1,30
1750 m	465	0,093
1800 m	3097	0,62
1850 m	4319	0,86
1900 m	994	0,20
1950 m	1961	0,39
2000 m	4048	0,81
2100 m	818	0,16
2200 m	5815	1,16
2300 m	1460	0,29
2400 m	4184	0,83
2500 m	7444	1,15
2600 m	1321	0,26
2700 m	4279	0,85
2800 m	0	0
2900 m	3496	0,70
3000 m	1616	0,32
3100 m	4788	0,96

Fortsetzung auf Folgeseite

Radienbereich	Länge [m]	Anteil [%]
3200 m	4410	0,88
3300 m	6515	0,13
3400 m	4240	0,84
3500 m	0	0
3600 m	3000	0,60
3700 m	426	0,085
3800 m	8712	1,74
3900 m	2852	0,57
4000 m	726	0,15
4100 m	3562	0,71
4200 m	0	0
4300 m	6264	1,25
4400 m	8398	1,68
4500 m	1200	0,24
4600 m	6852	1,37
4700 m	3814	0,76
4800 m	3776	0,75
4900 m	4206	0,84
5000 m	7316	1,46
5500 m	7212	1,44

Fortsetzung auf Folgeseite

Radienbereich	Länge [m]	Anteil [%]
6000 m	0	0
6500 m	9796	1,95
7000 m	5560	1,11
7500 m	13820	2,76
8000 m	0	0
8500 m	1240	0,25
9000 m	6036	1,20
∞ (Gerade)	272.021	54,3

Tabelle A.1: Detaillierte Streckenanalyse Netz A.

A.2 Anhang 2

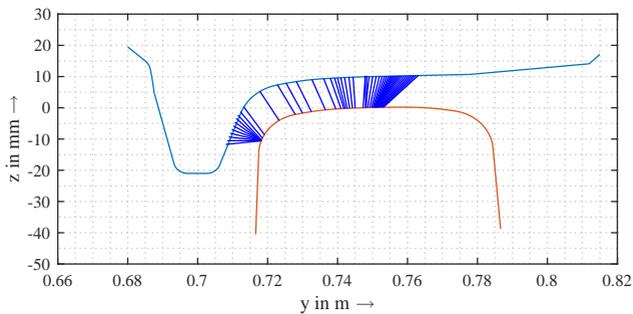


Abbildung A.1: Kontaktpunktverteilung VBK/49E1.

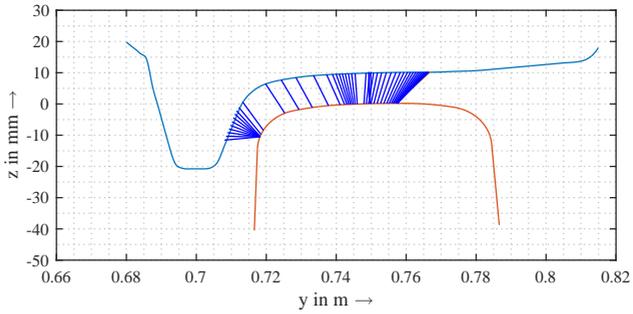


Abbildung A.2: Kontaktpunktverteilung GA02/49E1.

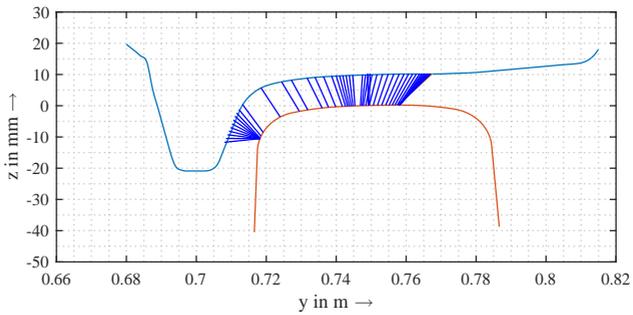


Abbildung A.3: Kontaktpunktverteilung SA03/49E1.

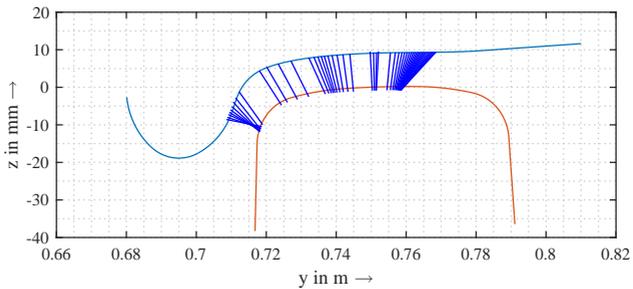


Abbildung A.4: Kontaktpunktverteilung S1002/UIC60.

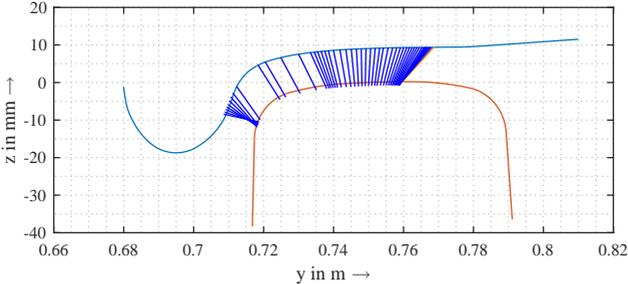


Abbildung A.5: Kontaktpunktverteilung ESA04/UIC60.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Gleislagefehler	7
2.2	Richtungslagefehler einer DB-Strecke	8
2.3	Spektrum des Richtungslagefehlers einer DB-Strecke	9
2.4	Sinuslauf nach Klingel	11
2.5	Bezeichnungen verschiedener Radprofilbereiche	11
2.6	Rollradiendifferenz δR	12
2.7	Kontaktposition auf Rad und Schiene	13
2.8	Aufteilung des Kontaktgebietes in Haft- und Gleitgebiete	15
2.9	Verschleißkoeffizient für ein R7-Rad auf einer 900A-Schiene	24
2.10	Verschleißkarte nach Bolton und Clayton	25
2.11	Verschleißkarte für verschiedene Stahlkombinationen	26
2.12	Proportionalitätskonstante k für verschiedene Verschleißregime	28
2.13	Ablauf der Genetischen Optimierung	41
2.14	Simulated Annealing am Beispiel eines Minimierungsproblems.	45
3.1	Ablauf des Profilloptimierungsprozesses.	50
3.2	Parametermodell der Radprofilinie	62
4.1	Radprofil der Verkehrsbetriebe Karlsruhe	68
4.2	Topologie der Niederflurstraßenbahn	69
4.3	Topologie des Eurofima-Wagens	72
5.1	Radverschleiß: Starres Gleis vs. Elastisches Gleis	76
6.1	Ablauf der Kollektivbildung	80
6.2	Streckenverlauf 4 km-Kollektiv	83

6.3	Verschleiß nach Befahren von Netz A1 sowie Kollektiv A1	87
6.4	Verschleiß nach Befahren von Netz A2 sowie Kollektiv A2	87
6.5	Verschleiß nach Befahren von Netz B1 sowie Kollektiv B1	88
6.6	Verschleiß nach Befahren von Netz B2 sowie Kollektiv B2	88
6.7	Bildung eines Gleislagekollektivs	93
6.8	Leistungsdichtespektrum des Richtungsfehlers.	95
6.9	Messschrieb des Richtungsfehlers	95
6.10	Verschleiß nach Befahren von Kollektiv sowie Strecke der DB . .	96
8.1	Radverschleiß - Strecke B2 mit VBK-Radprofil	102
8.2	Verlauf der Optimierung - Simulated Annealing	103
8.3	Radverschleiß - Strecke B2 mit SA03-Radprofil	104
8.4	Verlauf der Optimierung - Genetischer Algorithmus	106
8.5	Radverschleiß - Strecke B2 mit GA02-Radprofil	106
8.6	Radverschleiß - DB-Strecke mit S1002-Radprofil	108
8.7	Radverschleiß - DB-Kollektiv mit S1002-Radprofil	109
8.8	Verlauf der Optimierung - Simulated Annealing	110
8.9	Radverschleiß - DB-Strecke mit ESA04-Radprofil	110
8.10	Kritische Geschwindigkeit - ESA04-Profil	112
A.1	Kontaktpunktverteilung VBK/49E1	128
A.2	Kontaktpunktverteilung GA02/49E1	129
A.3	Kontaktpunktverteilung SA03/49E1	129
A.4	Kontaktpunktverteilung ESA04/UIC60	129
A.5	Kontaktpunktverteilung ESA04/UIC60	130

Tabellenverzeichnis

3.1	Einstellung des SODASRT 2-Solvers	64
3.2	Einstellung des Genetischen Algorithmus	66
5.1	Parameter des elastischen Gleises	76
6.1	Streckenanalyse Netz A	82
6.2	Streckenverlauf Kollektiv A	83
6.3	Streckenanalyse Netz B.	84
6.4	Streckenverlauf Kollektiv B	85
6.5	Clusterung des Richtungslagefehlers	96
A.1	Detaillierte Streckenanalyse Netz A.	128

Literaturverzeichnis

- [1] *DIN EN 13231-1:2013, Bahnanwendungen - Oberbau - Abnahme von Arbeiten - Teil 1: Arbeiten im Schotteroberbau - Gleise, Weichen und Kreuzungen; Deutsche Fassung EN13231-1:2013*
- [2] *DIN EN 13262:2011, Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Räder - Produktanforderungen*
- [3] *DIN EN 13674-1:2011, Bahnanwendungen - Oberbau - Schienen - Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m*
- [4] *DIN EN 13715:2015, Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Räder - Radprofile*
- [5] *DIN EN 13848-1:2008, Bahnanwendungen - Oberbau - Gleislagequalität - Teil 1: Beschreibung der Gleisgeometrie*
- [6] *DIN EN 13848-5:2017, Bahnanwendungen - Oberbau - Qualität der Gleisgeometrie - Teil 5: Geometrische Qualitätsstufen - Gleise; Deutsche Fassung EN 13848-5:2008+A1:2010*
- [7] *DIN EN 13848-6:2014 Bahnanwendungen - Oberbau - Qualität der Gleisgeometrie - Teil 6: Charakterisierung der geometrischen Gleislagequalität*
- [8] *DIN EN 14363:2016, Bahnanwendungen - Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen - Fahrverhalten und stationäre Versuche*

- [9] MATHWORKS INC. (Hrsg.): *Global Optimization Toolbox*. <https://de.mathworks.com/products/global-optimization.html>. – Abgerufen am 18.06.2018
- [10] MATHWORKS INC. (Hrsg.): *Matlab*. <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>. – Abgerufen am 05.02.2019
- [11] MATHWORKS INC. (Hrsg.): *MATLAB Documentation: Genetic Algorithm*. <https://de.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm.html>. – Abgerufen am 17.10.2018
- [12] DASSAULT SYSTEMES SIMULIA CORP. (Hrsg.): *Simpack Documentation*. 2016
- [13] DASSAULT SYSTEMES SIMULIA CORP. (Hrsg.): *Simpack Documentation*. 2018
- [14] ANDERSSON, S.: Friction and wear simulation of the wheel-rail interface. Version: 2009. <http://dx.doi.org/10.1533/9781845696788.1.94>. In: *Wheel-Rail Interface Handbook*. 2009. – DOI 10.1533/9781845696788.1.94. – ISBN 978–184569412–8, S. 93–124
- [15] ARCHARD, J. F.: Contact and rubbing of flat surfaces. In: *Journal of Applied Physics* 24 (1953), Nr. 8, S. 981–988
- [16] ARCHARD, J. F.: Wear theory and mechanisms. In: *Wear Control Handbook*. New York : ASME, 1980. – ISBN 9780317336405, S. 35–80
- [17] ASHBY, M. F. ; LIM, S. C.: Wear-mechanism maps. In: *Scripta Metallurgica et Materialia* 24 (1990), Nr. 5, 805–810. [http://dx.doi.org/10.1016/0956-716X\(90\)90116-X](http://dx.doi.org/10.1016/0956-716X(90)90116-X). – DOI 10.1016/0956-716X(90)90116-X. – ISSN 0956-716X

- [18] AYASSE, J. B. ; CHOLLET, H.: Determination of the wheel rail contact patch in semi-Hertzian conditions. In: *Vehicle System Dynamics* 43 (2005), Nr. 3, S. 161–172. <http://dx.doi.org/10.1080/00423110412331327193>. – DOI 10.1080/00423110412331327193
- [19] BARGEL, H.-J. ; SCHULZE, G.: *Werkstoffkunde*. 12., bearb. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2018 (SpringerLink : Bücher). – ISBN 978–3–662–48629–0
- [20] BEAGLEY, T. M.: Severe wear of rolling/sliding contacts. In: *Wear* 36 (1976), Nr. 3, 317–335. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(76\)90110-1](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(76)90110-1). – DOI 10.1016/0043–1648(76)90110–1
- [21] BERGANDER, B. ; DENDL, G. ; NEFZGER, A. ; NICKLISCH, D.: Die Entwicklung von Rad- und Schienenprofilen. In: *ZEV Rail Glasers Annalen* 127 (2003), Nr. 10, S. 482–493
- [22] BERGGREN, E.: *Railway Track Stiffness: Dynamic Measurements and Evaluation of Efficient Maintenance*. Royal Institute of Technology, Stockholm, Diss., 2009. – ISBN 978–91–7415–293–7
- [23] BOLDT, A.: *Fahrwegmessung*. Gülzow : Lokrundschau Verlag, 2003. – ISBN 978–3931647155
- [24] BOLTON, P. J. ; CLAYTON, P.: Rolling-sliding wear damage in rail and tyre steels. In: *Wear* (1984), Nr. 93, S. 145–165
- [25] BOUSSINESQ, J.: *Application des potentials à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques*. Paris : Gauthier-Villars, 1885
- [26] BRAGHIN, F. ; BRUNI, S. ; LEWIS, R.: Railway wheel wear. In: *Wheel-rail interface handbook*. Boca Raton, FL and Oxford : CRC Press and Woodhead Pub., 2009. – ISBN 978–184569412–8, S. 172–210
- [27] CARTER, F. W.: On the action of a locomotive driving wheel. In: *Proceedings of the Royal Society A* 112 (1926), Nr. 760, S.

151. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1926.0100>. – DOI 10.1098/rspa.1926.0100
- [28] CHOI, H.-Y. ; LEE, D.-H. ; LEE, J.: Optimization of a railway wheel profile to minimize flange wear and surface fatigue. In: *Wear* 300 (2013), Nr. 1-2, S. 225–233
- [29] CUI, D. ; LI, L. ; JIN, X. ; LI, X.: Optimal design of wheel profiles based on weighed wheel/rail gap. In: *Wear* 271 (2011), Nr. 1-2, S. 218–226
- [30] CUI, D. ; WANG, H. ; LI, L. ; JIN, X.: Optimal design of wheel profiles for high-speed trains. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 229 (2013), Nr. 3, 248–261. <http://dx.doi.org/10.1177/0954409713509979>. – DOI 10.1177/0954409713509979
- [31] DANKS, D. ; CLAYTON, P.: Comparison of the wear process for eutectoid rail steels: Field and laboratory tests. In: *Wear* 120 (1987), Nr. 2, 233–250. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(87\)90069-X](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(87)90069-X). – DOI 10.1016/0043-1648(87)90069-X
- [32] DAVIS, T. E.: *Toward an Extrapolation of the Simulated Annealing Convergence Theory onto the simple Genetic Algorithm*. Florida, University of Florida, Diss., 1991
- [33] DEDE, J. ; REIMANN, U.: Entwicklung eines kundenspezifisch optimierten Radprofils - eine Studie zum Rad/Schiene-System. In: *ZEV Rail Glasers Annalen* 138 (2014), Nr. 6-7
- [34] DELLMANN, T. ; FRANK, M.: Radprofilgestaltung für Losradfahrzeuge. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 55 (2006), Nr. 11, S. 788–797. – ISSN 0013–2845
- [35] EKBERG, A. ; KABO, E. ; ANDERSSON, H.: An engineering model for prediction of rolling contact fatigue of railway wheels. In: *Fatigue*

- and Fracture of Engineering Materials and Structures* 25 (2002), Nr. 10, S. 899–909
- [36] EKBERG, A. ; MARAIS, J.: Effects of imperfections on fatigue initiation in railway wheels. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 214 (2000), Nr. 1, S. 45–54. <http://dx.doi.org/10.1243/0954409001531234>. – DOI 10.1243/0954409001531234
- [37] EKBERG, A. ; SOTKOVSKI, P.: Anisotropy and rolling contact fatigue of railway wheels. In: *International Journal of Fatigue* 23 (2001), Nr. 1, S. 29–43
- [38] ENBLUM, R.: *On Simulation of Uniform Wear and Profile Evolution in the Wheel-Rail Contact*, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Dissertation, 2006
- [39] EUROPEAN RAIL RESEARCH INSTITUTE (ERRI) ; UIC (Hrsg.): *B 176 Document DT290, B176/3 Benchmark problem Results and assessment*. Utrecht, 1993
- [40] EUROPEAN RAIL RESEARCH INSTITUTE (ERRI) ; UIC (Hrsg.): *Frage B176: Drehgestelle mit radial einstellbaren Radsätzen*. Utrecht, 1993
- [41] EVANS, J. R. ; LEE, T. K. Y. ; HON, C. C.: Optimising the wheel/rail interface on a modern urban rail system. In: *Vehicle System Dynamics* 46 (2008), S. 119–127
- [42] FINK, M.: *VDI-Zeitschrift : Fortschritt-Berichte. Reihe 5, Grund- und Werkstoffe / Verein Deutscher Ingenieure. Bd. 3: Chemische Aktivierung, nicht durch Temperatur, sondern durch plastische Verformung, als Ursache reibchemischer Reaktionen bei Metallen = Chemical activation not by temperature but by plastic-deformation as the cause of friction-chemical reactions on metals*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1967

- [43] FLEISCHER, G. ; GRÖGER, H. ; THUM, H.: *Verschleiß und Zuverlässigkeit*. Berlin : VEB Verlag Technik, 1980
- [44] FREYSTEIN, H. ; MUNCKE, M. ; SCHOLLMEIER P.: *Entwerfen von Bahnanlagen: Handbuch*. 1. Auflage. Hamburg : Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. KG, 2005. – ISBN 3-7771-0333-0
- [45] GARIVALTIS, D. S. ; GARG, V. K. ; D'SOUZA, A. F.: Dynamic Response of a Six-axle Locomotive to Random Track Inputs. In: *Vehicle System Dynamics* 9 (1980), Nr. 3, 117–147. <http://dx.doi.org/10.1080/00423118008968620>. – DOI 10.1080/00423118008968620
- [46] GENDREAU, M. (Hrsg.) ; POTVIN, J-Y (Hrsg.): *International Series in Operations Research & Management Science*. Bd. 146: *Handbook of Metaheuristics*. Second Edition. New York : Springer Science+Business Media, 2010. – ISBN 978-1-4419-1663-1
- [47] GERLICI, J. ; LACK, T.: Profiles synthesis through radii variation of arcs profile. In: *Archives of Transport* 18 (2006), Nr. 3, S. 37–56
- [48] GERLICI, J. ; LACK, T.: Railway wheel and rail head profiles development based on the geometric characteristics shapes. In: *Wear* 271 (2011), Nr. 1-2, S. 246–258
- [49] GOSAVI, A.: *Simulation-Based Optimization: Parametric Optimization Techniques and Reinforced Learning*. Bd. 55. Second Edition. Boston : Springer, 2015. – ISBN 978-1-4899-7491-4
- [50] HAIGERMOSER, A. ; LUBER, B. ; RAUH, J. ; GRÄFE, G.: Road and track irregularities: measurement, assessment and simulation. In: *Vehicle System Dynamics* 53 (2015), Nr. 7, S. 878–957
- [51] HEAMS, T. ; HUNEMAN, P. ; LECOINTRE, G. ; SILBERSTEIN, M.: *Handbook of Evolutionary Thinking in the Sciences*. Dordrecht and Heidelberg and New York and London : Springer, 2015. – ISBN 978-94-017-9013-0

- [52] HECK, J.: *Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik / Institut für Fahrzeugsystemtechnik*. Bd. 44: *Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen*. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2016. – ISBN 978–3–7315–0443–6
- [53] HEIDEMEYER, J.: Influence of the plastic deformation of metals during mixed friction on their chemical reaction rate. In: *Wear* 66 (1981), Nr. 3, 379–387. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90130-7](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(81)90130-7). – DOI 10.1016/0043–1648(81)90130–7
- [54] HERTZ, H.: Ueber die Berührung fester elastischer Körper. In: *Journal für die reine und angewandte Mathematik* (1882), Nr. 92, 156–171. <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?GDZPPN002158264>. – ISSN 0075–4102. – Abgerufen am 04.08.2019
- [55] HOLLAND, J. H.: *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor : University of Michigan Press, op. 1975. – ISBN 0472084607
- [56] IGNESTI, M. ; INNOCENTI, A. ; MARINI, L. ; MELI, E. ; RINDI, A.: Development of a wear model for the wheel profile optimisation on railway vehicles. In: *Vehicle System Dynamics* 51 (2013), Nr. 9, S. 1363–1402
- [57] IWNICKI, S. (Hrsg.): *Handbook of railway vehicle dynamics*. Boca Raton, USA : CRC, Taylor & Francis, 2006. – ISBN 978–0–8493–3321–7
- [58] IWNICKI, S. ; BJÖRKLUND, S. ; ENBLÖM, R.: Wheel-rail contact mechanics. In: *Wheel-rail interface handbook*. 2009. – ISBN 978–184569412–8, S. 58–92
- [59] JACOBSON, B. (Hrsg.): *Courses and lectures / International Centre for Mechanical Sciences*. Bd. 411: *Rolling contact phenomena*. Wien

- [u.a.] : Springer, 2000 <http://media.obvsg.at/AC03162073-1002>;<http://swbplus.bsz-bw.de/bsz090541197cov.htm>. – ISBN 3–211–83332–3
- [60] JAHED, H. ; FARSHI, B. ; ESHRAGHI, M. A. ; NASR, A.: A numerical optimization technique for design of wheel profiles. In: *Wear* 264 (2008), Nr. 1-2, S. 1–10
- [61] JENDEL, T.: Prediction of wheel profile wear - Comparisons with field measurements. In: *Wear* (2002), Nr. 253, S. 89–99
- [62] JENDEL, T. ; BERG, M.: Prediction of Wheel wear for rail vehicles - methodology and verification. In: CONTACT MECHANICS INTERNATIONAL SYMPOSIUM, MARTINS, J. A. C. , MARQUES, MANUEL D. P. MONTEIRO (Hrsg.): *Contact mechanics*. Dordrecht and Boston : Kluwer Academic, 2002. – ISBN 1402008112, S. 229–236
- [63] JOHNSON, K. L.: The effect of spin upon the rolling motion of an elastic sphere on a plane. In: *Journal of Applied Mechanics* (1958), Nr. 80, S. 332–338
- [64] JOHNSON, K. L.: *Contact mechanics*. Repr. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 1994. – ISBN 0–521–34796–3
- [65] KALKER, J. J.: *On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction*. Leiden, TU Delft, Diss., 1967
- [66] KALKER, J. J.: A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact. In: *Vehicle System Dynamics* 11 (1982), Nr. 1, 1–13. <http://dx.doi.org/10.1080/00423118208968684>. – DOI 10.1080/00423118208968684
- [67] KALKER, J. J.: *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact*. Springer Netherlands, 1990. – ISBN 978–94–015–7889–9
- [68] KALKER, J. J.: *Wheel-rail contact Theory, Algorithms, Applications*. <http://ewi.home.tudelft.nl/fileadmin/Faculiteit/EWI/>

- Over_de_faculteit/Afdelingen/Applied_Mathematics/
Mathematische_Fysica/Personeel/Emeritus/papers/doc/
1998-247_Wheel-rail_contact_Theory_algorithms_ap
plications.pdf. Version: 1998. – Abgerufen am 04.08.2019
- [69] KALKER, J. J.: Rolling Contact Phenomena: Linear Elasticity. In: JACOBSON, Bo (Hrsg.): *Rolling contact phenomena* Bd. 411. Wien [u.a.] : Springer, 2000. – ISBN 3–211–83332–3, S. 1–84
- [70] KÄMPFER, B.: Vereinfachte Methode zur Radprofilverschleißvorhersage. In: *Eisenbahningenieur* (2007), Nr. 3, S. 29–35
- [71] KÄMPFER, B. ; SEMRAD, F. ; SIX, K. ; FRIEDL, N.: Verschleiß- und Schädigungserscheinungen an Schienenfahrzeigrädern: Wear and damage mechanisms on railway wheels. In: *ZEV Rail Glasers Annalen* 132 (2008), Nr. März 2008, S. 78–101
- [72] KIMURA, Y. ; SEKIZAWA, M. ; NITANAI, A.: Wear and fatigue in rolling contact. In: *Wear* 253 (2002), Nr. 1, 9–16. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00077-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00077-7). – DOI 10.1016/S0043-1648(02)00077-7
- [73] KLINGEL, J.: Ueber den Lauf der Eisenbahnwagen auf gerader Bahn. In: *Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung* 38 (1883), Nr. 4, S. 113–123
- [74] KNOTHE, K.: History of wheel/rail contact mechanics: from Redtenbacher to Kalker. In: *Vehicle System Dynamics* 46 (2008), Nr. 1-2, 9–26. <http://dx.doi.org/10.1080/00423110701586469>. – DOI 10.1080/00423110701586469
- [75] KNOTHE, K. ; STICHEL, S.: *Schienenfahrzeugdynamik*. Berlin : Springer, 2003. – ISBN 3–540–43429–1
- [76] KRAUSE, H.: *Mechanisch-chemische Reaktionen bei der Abnutzung von St 60, V2A und Manganhartstahl*. Aachen, RWTH Aachen, Diss., 1966

- [77] KRAUSE, H. ; POLL, G.: Verschleiß bei gleitender und wälzender Relativbewegung - Vorschlag zur Berechnung und Versuch einer Synthese des energetischen Ansatzes und der Grenzflächentemperaturhypothese. In: *Tribologie und Schmierungstechnik* (1984), Nr. 4/5, S. 209–214, 254–263, 285–289
- [78] KUMAR, S. ; RAJKUMAR, B. R.: Laboratory investigation of wheel rail contact stresses for U.S. Freight cars. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME* 103 (1981), Nr. 2, S. 246–255. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3184484>. – DOI 10.1115/1.3184484. – ISSN 10871357
- [79] LEARY, J. F. ; HANDAL, S. N. ; RAJKUMAR, B.: Development of freight car wheel profiles - a case study. In: *Wear* 144 (1991), Nr. 1-2, S. 353–362
- [80] LEWIS, R. ; DWYER-JOYCE, R. S.: Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 218 (2004), Nr. 6, 467–478. <http://dx.doi.org/10.1243/1350650042794815>. – DOI 10.1243/1350650042794815
- [81] LEWIS, R. ; OLOFSSON, U.: Mapping rail wear regimes and transitions. In: *Wear* 257 (2004), Nr. 7-8, S. 721–729
- [82] LEWIS, R. ; OLOFSSON, U.: *Wheel-rail interface handbook*. Boca Raton, FL and Oxford : CRC Press and Woodhead Pub., 2009. – ISBN 978–1–4398–0146–8
- [83] LI, M. X. D. ; BERGGREN, E.: A study of the effect of global track stiffness and its variations on track performance: simulation and measurement. In: *Journal for Rail and Rapid Transit* 224 (2010), S. 375–382. <http://dx.doi.org/10.1243/09544097JRRT361>. – DOI 10.1243/09544097JRRT361

- [84] LI, Z.: *Wheel-Rail Rolling Contact and its Application to Wear Simulation*. Delft : DUP Science, 2002. – ISBN 90–407–2281–1
- [85] LICHTBERGER, B.: *Handbuch Gleis: Unterbau - Oberbau - Instandhaltung - Wirtschaftlichkeit*. 3. Auflage. Hamburg : DVV Media Group GmbH | EurailPress, 2010. – ISBN 978–3–7771–0400–3
- [86] LIM, S. C.: Recent developments in wear-mechanism maps. In: *Tribology International* 31 (1998), Nr. 1, 87–97. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00011-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00011-5). – DOI 10.1016/S0301-679X(98)00011-5
- [87] MAGEL, E. ; KALOUSEK, J. ; SROBA, P.: Chasing the magic wear rate. In: *Proceedings of the second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance* Bd. 104. Stirlingshire, UK, 2014
- [88] NEFZGER, A.: Geometrie der Berührung zwischen Radsatz und Gleis. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* (1974), Nr. 3, S. 113–122. – ISSN 0013–2845
- [89] NICOLIN, J.: *Über den Einfluss von torsionselastischen Radsatzwellen auf das Laufverhalten eines Schienenfahrzeugs*. Aachen, RWTH Aachen, Diss., 1983
- [90] NIELSEN, J.: Out-of-round railway wheels. In: *Wheel-Rail Interface Handbook*. Cambridge, UK : Woodhead Publishing Ltd., 2009. – ISBN 978–184569412–8, S. 245–279
- [91] NOVALES, M. ; ORRO, A. ; BUGARÍN, M. R.: Development of a new wheel profile adapted to combined operation (railroad and light rail tracks). In: *84th Transportation Research Board Annual Meeting at Washington DC*, 2004
- [92] NOVALES, M. ; ORRO, A. ; BUGARÍN, M. R.: A New Approach for the design of wheel profile geometries. In: *Proceedings of 7th World Congress on Railway Research*. Montreal, Kanada, 2006

- [93] NOVALES, M. ; ORRO, A. ; BUGARÍN, M. R.: Use of a genetic algorithm to optimize wheel profile geometry. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 221 (2007), Nr. 4, S. 467–476
- [94] OECD: *Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrication : tribology*. Paris : Organisation for Economic Co-Operation and Development, 1969. – Umschlagtitel: Friction, wear and lubrication
- [95] OLOFSSON, U. ; TELLISKIVI, T.: Wear, plastic deformation and friction of two rail steels - a full-scale test and a laboratory study. In: *Wear* 254 (2003), Nr. 1, 80–93. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00291-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00291-0). – DOI 10.1016/S0043-1648(02)00291-0
- [96] PALHAN, R. K.: Design considerations for minimizing wear in railway operation. In: *Wear* 80 (1982), Nr. 2, S. 133–148
- [97] PERSSON, I. ; IWNICKI, S. D.: Optimisation of railway wheel profiles using a genetic algorithm. In: *Vehicle System Dynamics* 41 (2004), S. 517–526
- [98] PERSSON, I. ; NILSSON, R. ; BIK, U. ; LUNDGREN, M. ; IWNICKI, S.: Use of a genetic algorithm to improve the rail profile on stockholm underground. In: *Vehicle System Dynamics* (2010), Nr. 48, S. 89–104
- [99] POLACH, O.: Wheel profile design for the targeted conicity and a wide contact spreading. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009)*. Firenze, Italien, 2009, S. 809–816
- [100] POLACH, O.: On non-linear methods of bogie stability assessment using computer simulations. In: *Proceedings of the Institution of*

- Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 220 (2006), Nr. 1, S. 13–27. <http://dx.doi.org/10.1243/095440905X33251>. – DOI 10.1243/095440905X33251
- [101] POPP, K.: *System Dynamics and Long-Term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade*. Berlin : Springer, op. 2003. – ISBN 978–3–540–43892–2
- [102] POWRIE, W. ; LE PEN, L.: *A Guide to Track Stiffness*. https://www.thepwi.org/technical_hub/technical_hub_files/a_guide_to_track_stiffness_final_reviewr11. Version: 2016. – Abgerufen am 20.05.2019
- [103] PYRGIDIS, C. ; PANAGIOTOPOULOS, A.: An Optimization Process of the Wheel Profile of Tramway Vehicles. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 48 (2012), S. 1130–1142. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1089>. – DOI 10.1016/j.sbspro.2012.06.1089. – ISSN 18770428
- [104] QUOST, X. ; SEBES, M. ; EDDHAHAK, A. ; AYASSE, J. B. ; CHOLLET, H. ; GAUTIER, P. E. ; THOUVEREZ, F.: Assessment of a semi-Hertzian method for determination of wheel-rail contact patch. In: *Vehicle System Dynamics* 44 (2006), Nr. 10, S. 789–814. <http://dx.doi.org/10.1080/00423110600677948>. – DOI 10.1080/00423110600677948
- [105] RABINOWICZ, E.: *Friction and wear of materials*. New York [u.a.] : Wiley, 1965 (Wiley Series on the science and technology of materials). – ISBN 0–471–70340–0
- [106] RAUSCH, R. ; DB NETZ AG (Hrsg.): *RiL 800.0110 - Linienführung: Bautechnik, Leit-, Signal- u. Telekommunikationstechnik*. DB Kommunikationstechnik GmbH, Berlin, 2015
- [107] SANTAMARIA, J. ; HERREROS, J. ; VADILLO, E. G. ; CORREA, N.: Design of an optimised wheel profile for rail vehicles operating on

- two-track gauges. In: *Vehicle System Dynamics* 51 (2013), Nr. 1, 54–73. <http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2012.711478>. – DOI 10.1080/00423114.2012.711478
- [108] SHEBANI, A. ; IWNICKI, S.: Prediction of wheel and rail wear under different contact conditions using artificial neural networks. In: *Wear* (2018), 173–184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2018.01.007>. – DOI 10.1016/j.wear.2018.01.007
- [109] SHEN, G. ; AYASSE, J. B. ; CHOLLET, H. ; PRATT, I.: A unique design method for wheel profiles by considering the contact angle function. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 217 (2003), Nr. 1, S. 25–30
- [110] SHEVTSOV, I. Y.: *Wheel/rail interface optimisation*, TU Delft, Dissertation, 2008
- [111] SHEVTSOV, I. Y. ; MARKINE, V. L. ; ESVELD, C.: Optimal design of wheel profile for railway vehicles. In: *Wear* 258 (2005), Nr. 7-8, S. 1022–1030
- [112] SHEVTSOV, I. Y. ; MARKINE, V. L. ; ESVELD, C. ; UIC (Hrsg.): *Shape Optimisation of Railway Wheel Profile under Uncertainties*. <https://uic.org/cdrom/2006/wcrr2006/pdf/354.pdf>. Version: 2006. – Abgerufen am 07.03.2018
- [113] SHEVTSOV, I.Y. ; MARKINE, V.L. ; ESVELD, C.: Design of railway wheel profile taking into account rolling contact fatigue and wear. In: *Wear* 265 (2008), Nr. 9, 1273 - 1282. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.018>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.018>. – ISSN 0043–1648. – Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems - CM2006
- [114] SIMPACK AG: *SimPack Rail*. <http://www.simpack.com/>. – Abgerufen am 19.06.2018

-
- [115] SIMPACK AG: *SIMPACK Rail Training for SIMPACK 9*. Gilching, 2014
- [116] SMITH, R. E. ; KALOUSEK, J.: A design methodology for wheel and rail profiles for use on steered railway vehicles. In: *Wear* 144 (1991), Nr. 1-2, S. 329–342
- [117] SOLOMON, O. M. J.: PSD Computations Using Welch’s Method. In: *Sandia Report* (1991), Nr. 1533
- [118] SOMMER, K.: *Verschleiß metallischer Werkstoffe: Erscheinungsformen sicher beurteilen*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2464-6>. – ISBN 978–383–48246–4–6
- [119] STASKIEWICZ, T. ; FIRLIK, B. ; JASKOWSKI, W. ; WITTENBECK, L. ; EUROMECH COLLOQUIUM (Hrsg.): *On Developing a Tram Wheel New Profile using Multibody Simulation Tools*. https://www.researchgate.net/publication/316240429_On_developing_a_tram_wheel_new_profile_using_multibody_simulation_tools. Version:2017. – Abgerufen am 06.03.2018
- [120] TELLISKIVI, T.: Wheel-rail wear simulation. In: *Wear* (2004), Nr. 257, S. 1145–1153
- [121] TELLISKIVI, T. ; OLOFSSON, U.: Contact mechanic analysis of measured wheel-rail profiles using the finite element method. In: *Journal of Rail and Rapid Transit* 215 (2001), Nr. 2, S. 65–72
- [122] THEILER, A.: Optimization of wheel profiles of LRV systems for tram and tram-train operations. In: BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS (Hrsg.): *8th International Conference on Railway Bogies and Running Gears*. Budapest, Ungarn, 2010

- [123] 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 (2007), Nr. 2, S. 271–289. <http://dx.doi.org/10.1243/0954409JRRT72>. – DOI 10.1243/0954409JRRT72
- [124] VOLLEBREGT, E. A. H.: Survey of programs on contact mechanics developed by J.J. Kalker. In: *Vehicle System Dynamics* 46 (2008), Nr. 1-2, S. 85–92
- [125] WALENTA, R. ; HAIGERMOSER, A.: Berührgeometrie von Rad und Schiene: Neue Methoden zur Untersuchung und Optimierung. In: *ZEV Glas. Ann.* (1997), Nr. 2/3, S. 245–254
- [126] WELCH, P. D.: The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. In: *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics* (1967), Nr. 2, S. 70–73
- [127] WELSH, N. C.: The dry wear of steels I. The general pattern of behaviour. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 257 (1965), Nr. 1077, 31–50. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.1965.0001>. – DOI 10.1098/rsta.1965.0001. – ISSN 0080–4614
- [128] WILLIAMS, J. A.: Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach. In: *Wear* 225-229 (1999), 1–17. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00060-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00060-5). – DOI 10.1016/S0043–1648(99)00060–5
- [129] ZUMGAHR, K.-H.: *Tribology series*. Bd. 10: *Microstructure and wear of materials*. Amsterdam [u.a.] : Elsevier, 1987. – ISBN 0–444–42754–6