

Entwicklung und Validierung einer praxisgerechten Methode zur Verschleißberechnung im Rad-Schiene-System von Regalbediengeräten

Development and Validation of a Practical Method for Wear Calculation in the Wheel-Rail System of Stacker Cranes

Minggong Yu
Johannes Fottner

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Der Gleitverschleiß am Rad-Schiene-System von Regalbediengeräten, insbesondere an den Laufrädern, stellt eine häufige Schadensursache dar. Starker Verschleiß kann zu einem Stillstand des Geräts führen, was wiederum zusätzliche Material- und Zeitkosten verursacht. Obwohl Rad-Schiene-Systeme gemäß der Norm DIN EN 13001-3-3 ausgelegt werden können, liefert die Norm keine spezifischen Hinweise zur Quantifizierung des Verschleißes von Laufrädern. Aus diesem Grund wird in diesem Beitrag eine Berechnungsmethode entwickelt, die auf der Co-Simulation zwischen MATLAB/Simulink und Simpack basiert und die Verschleißrate der Laufräder eines Regalbediengeräts für verschiedene Konfigurationsparameter quantitativ berechnen kann. Diese Methode ergänzt die Auslegung und Dimensionierung des Rad-Schiene-Systems des Regalbediengeräts. Die simulationsbasierte Berechnungsmethode wird durch das empirische Modell von Hesse validiert.

[Schlüsselwörter: Verschleiß, Regalbediengerät, Rad-Schiene-System, Co-Simulation, Numerische Berechnungsmethode]

Sliding wear on the wheel-rail system of stacker cranes, particularly on the running wheels, is a common cause of damage. Severe wear can lead to equipment downtime, resulting in additional material and time costs. Although wheel-rail systems can be designed according to DIN EN 13001-3-3, the standard does not provide guidelines for quantifying wheel wear. Therefore, this paper develops a co-simulation-based calculation method between MATLAB/Simulink and Simpack to quantitatively assess the wear rate of stacker crane's running wheels under various configuration parameters. This method complements the design and dimensioning of the stacker

crane's wheel-rail system. The simulation-based calculation method is validated through Hesse's empirical model.

[Keywords: Wear, Stacker crane, Wheel-rail system, Co-simulation, Numerical computing methods]

1 EINLEITUNG

Regalbediengeräte (RBG) sind ein wesentlicher Bestandteil moderner Intralogistikkonzepte. Sie ermöglichen die automatische Ein- und Auslagerung von Gütern in sowohl automatischen Palettenlagern als auch in automatischen Kleinteilelagern. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrads und der hohen Umschlagsleistungen in der Logistik ist das Rad-Schiene-System, insbesondere bei Paletten-RBG, stark belastet. Dadurch tritt erheblicher Verschleiß am Rad-Schiene-System auf, der häufig Schäden verursacht. Diese Schäden führen zu hohen Kosten für Reparatur oder Austausch beschädigter Komponenten. Zudem wirkt sich die damit verbundene Stillstandszeit negativ auf den Durchsatz und somit auf die Wirtschaftlichkeit des Lagersystems aus.

Die aktuell gültige Norm DIN EN 13001-3-3 [1] ist vorwiegend für die Auslegung des Rad-Schiene-Systems bei Kranen konzipiert. Diese Norm erlaubt jedoch keine Quantifizierung des Verschleißes an Rad-Schiene-Systemen. Sie berechnet einen Faktor basierend auf dem Schräglaufwinkel, der in die Bestimmung des Grenzwerts der Bemessungskontaktkraft für Ermüdung einfließt. Allerdings lässt sich aus dieser Berechnung nicht ableiten, wann ein Rad aufgrund von Verschleiß ausgetauscht werden muss. Daher kann eine vorausschauende Wartung wegen Verschleiß nur auf Basis bisheriger Erfahrungswerte erfolgen.

Aus diesem Grund wurde am Lehrstuhl fml an der TU München im Jahr 2023 das Forschungsprojekt der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) „VerStaRad: Verschleißverhalten von Stahlaufrädern an Regalbediengeräten „(IGF-Projekt Nummer 23053) gestartet. Ziel dieses Projekts ist, eine Berechnungsmethode zu entwickeln, die den auftretenden Verschleiß an Laufrädern im Rad-Schiene-System von RBG basierend auf den zum Auslegungszeitpunkt bekannten Konfigurationsparametern des RBGs vorhersagen kann. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau eines typischen RBGs, das in diesem Projekt untersucht wird. Die Hauptbaugruppen lassen sich in den Mast, den Hubwagen, das Rad-Schiene-System und den Traverse einteilen.

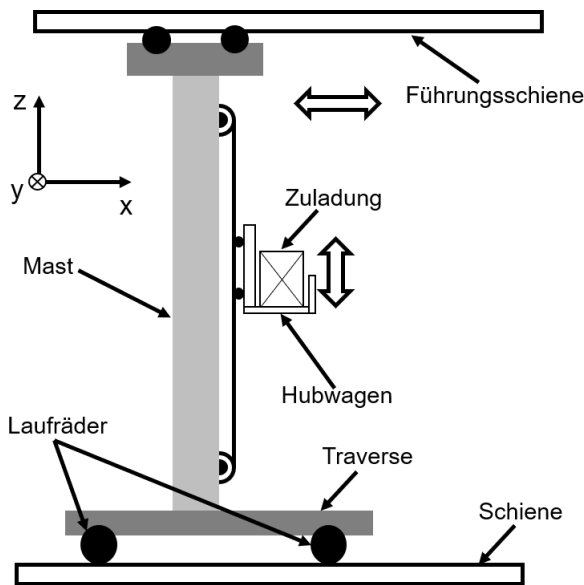


Abbildung 1. Schema eines Regalbediengeräts (eigene Darstellung)

In diesem Beitrag wird zunächst der aktuelle Forschungsstand zur Untersuchung des Verschleißes von Rad-Schiene-System dargestellt. Anschließend wird die entwickelte, simulationsbasierte Verschleißberechnungsmethode vorgestellt und im Detail beschrieben. Dabei werden alle wesentlichen Bestandteile der Simulationsläufe erläutert. Danach erfolgt die Validierung dieser Methode anhand von zwei RBG-Anwendungsfällen unter Verwendung experimenteller Messdaten von Hesse. Abschließend werden die Schlussfolgerungen diskutiert und zukünftige Forschungsperspektiven aufgezeigt.

2 LITERATUR

Rad-Schiene-Systeme sind seit geraumer Zeit Gegenstand vielfältiger Forschungsarbeiten. Die Methoden zur quantitativen Untersuchung des Rad- und Schienenverschleißes lassen sich im Wesentlichen in experimentelle und numerische Verfahren unterteilen. Shebani und Iwnicki [2] verwendeten einen Zwei-Scheiben-Prüfstand

zur Untersuchung des Verschleißes von Eisenbahnschienen unter trockenen, nassen, geschmierten und abrasiven Kontaktbedingungen. Die Verschleißmessungen wurden mit Replikamaterialien und Profilmessern durchgeführt. Basierend auf den gesammelten experimentellen Daten entwickelten Shebani und Iwnicki ein künstliches neuronales Netz, um die Beziehung zwischen Verschleiß, Belastung, Fahrgeschwindigkeit und Radschräglaufwinkel vorherzusagen. Sun et al. [3] führten umfassende experimentelle Untersuchungen zum Verschleißverhalten verschiedener Materialpaarungen durch. Dabei zeigte sich, dass sich die Verwendung härterer Radmaterialien positiv auf den Verschleiß der Räder, jedoch negativ auf den Verschleiß der Schiene auswirkt.

Neben experimentellen Methoden werden auch numerische Simulationen verwendet, um das Verschleißverhalten von Rad-Schiene-System zu quantifizieren. Butini et al. [4] arbeiteten an einem Mehrkörpersimulationsmodell von Zügen in der Simpack Rail-Umgebung. Die Ergebnisse der Mehrkörpersimulation dienen als Eingabe für ein Verschleißmodell, das auf der Energieabgabe basiert und den Verschleiß von Rad und Schiene berechnet. Heck [5] nutzte die Finite-Elemente-Methode zur Entwicklung einer Simulationsmethodik für den Rad-Schiene-Verschleiß an Straßenbahnen. Hartwich et al. [6] entwickelten eine hybride Methode, die historischen experimentellen Verschleißmessungen mit dynamischer Simulation kombiniert, um die Profiländerung der Räder eines Zuges für spezifische Betriebsszenarien vorherzusagen.

Alle Ergebnisse der Untersuchungen des Rad-Schiene-Systems im Bahnverkehr lassen sich nur eingeschränkt auf Regalbediengeräte übertragen. Dies liegt daran, dass sich beide Systeme erheblich in Geometrie, Geschwindigkeit und Beschleunigung unterscheiden. Während Züge üblicherweise in einer konstanten Bewegungsrichtung auf geraden und kurvigen Gleisen fahren, bewegen sich Regalbediengeräte typischerweise bidirektional schienenführend entlang der Gasse.

Bezüglich der Auslegung von fördertechnischen Rad-Schiene-Systemen gibt es deutlich weniger Untersuchungen. Havlicek [7] entwickelte ein analytisches Modell zur Berechnung des Längsschlupfs an Kranantriebsrädern. Mit einem Linienkontaktmodell, das eine äquivalente Rad-Schiene-Kontaktfläche berücksichtigt, kann der Längsschlupf der Räder präzise bestimmt werden. Allerdings wurde der Verschleiß der Laufräder nicht berücksichtigt. Teuchert [8] führte geometrische und metallografische Untersuchungen an Kranschiene durch, um die Profiländerung durch plastische Verformung und Verschleiß zu bewerten. Hesse [9] führte umfangreiche experimentelle Verschleißmessungen mit unterschiedlichen Materialpaarungen von Schienen und Laufrädern für fördertechnische Anlagen durch. Er entwickelte ein empirisches Berechnungsmodell, das die Verschleißrate in Abhängigkeit von

maximaler Hertz'scher Pressung, Schräglaufwinkel, axialem Kraftschluss, Laufraddurchmesser und wirklicher Kontaktflächenlänge beschreibt. Darüber hinaus berücksichtigte Hesse auch die Auswirkungen der Reversierbewegung auf den Verschleiß, die bei RBG vorkommt. Er stellte fest, dass eine wechselnde Laufrichtung den Verschleiß um etwa 20% reduzieren kann.

Bisher gibt es keine Untersuchungen zum Verschleiß der Laufräder von RBG. Die Vielzahl an Parametern der RBG- und Lagerkonfiguration, wie die Höhe des RBGs, die Masse der Zuladung, der Durchmesser der Laufräder sowie das bidirektionale Bewegungsmuster des RBGs, erschwert die Anwendung experimenteller Methoden zur Verschleißberechnung. In diesem Beitrag wird eine auf Co-Simulation basierende Berechnungsmethode vorgestellt, die es ermöglicht, die Verschleißrate der Laufräder eines

RBGs beliebiger Konfiguration über die geplante Lebensdauer zu berechnen.

3 METHODIK

Dieses Kapitel beschreibt eine numerische Methode zur Berechnung der Verschleißrate der Laufräder im Rad-Schiene-System eines RBGs mit Hilfe einer Co-Simulation. Abbildung 2 zeigt das Layout der vorgestellten Berechnungsmethode. Die von MATLAB/Simulink erzeugten Bewegungssignale werden über die Co-Simulationsschnittstelle SIMAT in das Simpack-Mehrkörpersimulationsmodell eingespeist. Die Berechnungen zum Rad-Schiene-Kontakt und zum Verschleiß der Laufräder werden in Simpack durchgeführt. In diesem Abschnitt werden die Eingangsparameter, die Zielgröße sowie die einzelnen Simulationsschritte detailliert erläutert.

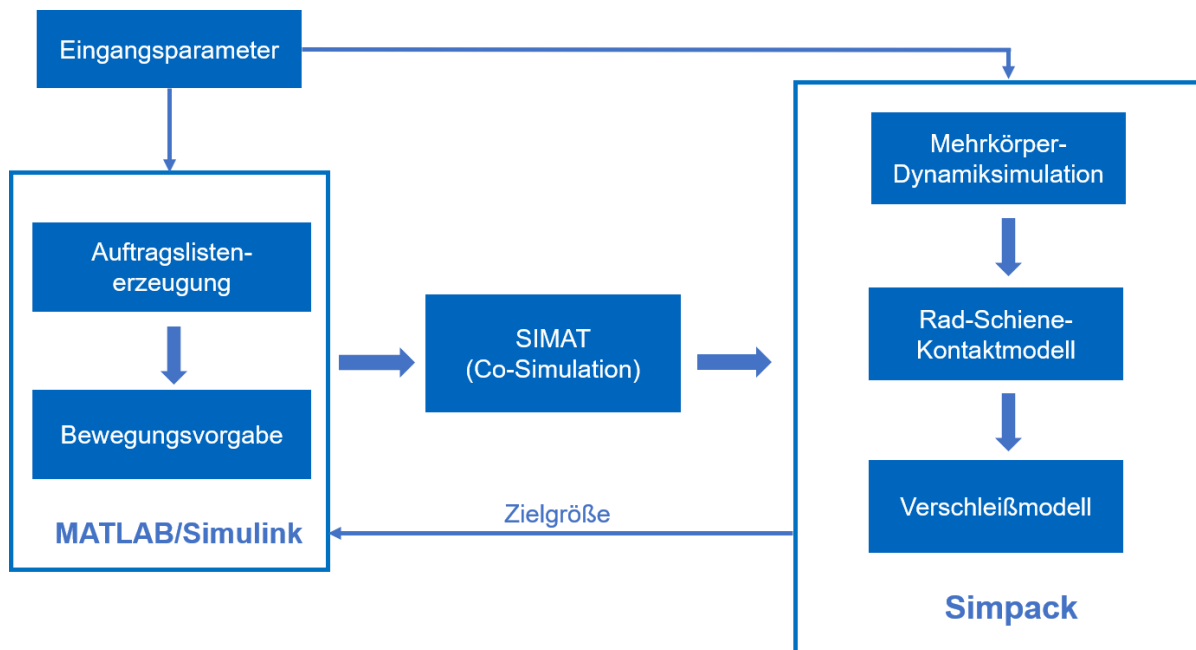


Abbildung 2. Layout der entwickelten Methode zur Verschleißberechnung (eigene Darstellung)

3.1 EINGANGSPARAMETER

Die vorgestellte Berechnungsmethode zur Bestimmung der Verschleißrate basiert auf drei Arten von Eingangsparametern, die sich auf die Konstruktion des RBGs, die Bewegung des RBGs und die Auslegung des Regals und Lagers beziehen. Bei diesen ist ein direkter oder indirekter Einfluss auf das Verschleißverhalten im Rad-Schiene-Kontakt des RBGs zu erwarten. Die Eingangsparameter und deren Wertintervalle wurden in Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses definiert. Sie decken die wesentlichen Faktoren ab, die bei der Auslegung und dem Betrieb eines RBGs berücksichtigt werden müssen. Tabelle 1 bietet einen Überblick über die verwendeten Eingangsparameter.

Konstruktive Parameter beziehen sich auf die physischen Eigenschaften der Hauptbaugruppe des RBGs, wie in Abbildung 1 dargestellt. Bewegungsparameter umfassen die maximale erlaubte Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie die Verschliffzeit des RBGs und des zugehörigen Hubwagens in beiden Bewegungsrichtungen. Die Verschliffzeit bezeichnet den Zeitraum, in dem sich die Beschleunigung von Null auf das Maximum oder umgekehrt ändert. Regal- und Lagerparameter betreffen die Konstruktions- und Betriebseigenschaften des Lagersystems.

Tabelle 1. Zusammenfassung verwendeter Eingangsparameter

Konstruktive Parameter RBG	Bewegungsparameter RBG und Hubwagen	Regal- und Lagerparameter
<ul style="list-style-type: none"> • Mast: Höhe, Länge, Breite, Wanddicke, Zusatzmasse, Schwerpunkt in x-Richtung • Traverse: Länge, Masse, Schwerpunkt in x- und z-Richtung, Zusatzmasse • Hubwagen: Leermasse, Zuladungsmasse, tiefste Position in z-Richtung, Schwerpunkt in x-Richtung, Anbindungsseite • Laufrad: Material, Radstand, Raddurchmesser, Radmasse, Schräglaufwinkel 	<ul style="list-style-type: none"> • Maximale Beschleunigung • Maximale Geschwindigkeit • Verschleißzeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Lagerhöhe- und länge • Fachhöhe- und länge • Lagerbetriebs- und halterungsstrategie • Lagerfüllgrad • Kapazität Lastaufnahmemittel

3.2 SIMULATIONSLÄUFE

Die oben beschriebenen Parameter dienen als Eingangsgrößen für die Simulationsläufe, die in vier Schritte unterteilt sind. Zuerst wird eine Auftragsliste erstellt. Auf Basis dieser Auftragsliste werden die Bewegungsparameter des RBGs und des Hubwagens berechnet. Die Bewegungsparameter werden über die Co-Simulation-Schnittstelle in das Simpack-Mehrkörpersimulationsmodell des RBGs eingegeben, um dessen Bewegung zu steuern. Im Rad-Schiene-Kontaktmodell werden Kontaktparameter wie Kontaktfläche und Kontaktkräfte ermittelt. Diese Parameter dienen als Eingangsgrößen für das Verschleißmodell, welches das Verschleißverhalten der Laufräder quantitativ berechnet. Die folgenden Unterabschnitte erläutern die Simulationsläufe im Detail.

3.2.1 ERZEUGUNG DER AUFTRAGSLISTEN

Die in dieser Veröffentlichung verwendete Methode zur Auftragslistenerzeugung wurde in [10] entwickelt und in MATLAB implementiert. Die Auftragsliste erfasst die Positionen, die ein RBG während eines aktuellen Arbeitszyklus in der x-Fahrtrichtung und der z-Hubrichtung erreicht. Es werden drei typische Lagerbetriebsstrategien berücksichtigt: Einzel-, Doppel- und Vierterspiel. Die Eingangsparameter für die Auftragslistenerstellung sind die Regal- und Lagerparameter. Jeder Zyklus endet mit einer Rückfahrt zum Ein- und Auslagerpunkt.

3.2.2 BEWEGUNGSVORGABE

Die Bewegungsvorgabe hat die Aufgabe, die Positions-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe in Fahrtrichtung und Hubrichtung zu berechnen. Hierzu werden folgende Bewegungsparameter benötigt: maximale Beschleunigung, maximale Geschwindigkeit und Verschleißzeit in den jeweiligen Richtungen. Die Berechnung

der RBG-Bewegung ergibt einen nahezu trapezförmigen Geschwindigkeitsverlauf. Sollte die Fahrstrecke zu kurz sein, um die maximale Geschwindigkeit in x-Richtung zu erreichen, liegt ein dreieckförmiger Geschwindigkeitsverlauf vor. In diesem Fall entfällt die Phase mit konstanter Geschwindigkeit.

Die oben beschriebene Bewegungssteuerung wurde in MATLAB umgesetzt. Die berechneten Bewegungssignalen (Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung) werden über die SIMAT-Schnittstelle in einer Co-Simulation an Simpack übergeben. Für die Bewegungsvorgabe ist ein spezifischer Zeitschritt erforderlich. Je kleiner der Zeitschritt, desto höher ist die Genauigkeit der Simulation, aber auch verlängerte Simulationsdauer. In diesem Beitrag wurde durch den Vergleich der Simulationsergebnisse und der benötigten Simulationszeiten bei verschiedenen Zeitschritten ein Zeitschritt von 0,01 Sekunden festgelegt.

3.2.3 BERECHNUNG DER KONTAKTKRÄFTE

Während der Durchführung der Arbeitszyklen des RBGs in Simpack analysiert das Kontaktmodell die Ergebnisse der dynamischen Analyse zur Berechnung der Kontaktparameter. Das Rad-Schiene-Kontaktproblem lässt sich in ein normales Kontaktproblem und ein tangenciales Kontaktproblem unterteilen. Die normalen Kontaktkräfte werden nach der Hertz'schen Theorie berechnet, während die Berechnung der tangentialen Kontaktkräfte mit FASTSIM durchgeführt wird. Die Hertz'sche Normalkraft dient als Eingangsgröße für FASTSIM. In der Hertz'schen Theorie wird die Kontaktfläche als Ellipse betrachtet, deren Größe von der normalen Last abhängt. Die maximale Normalspannung wird durch die elastischen Eigenschaften der Materialien und die Geometrien der Kontaktpaarungen bestimmt. Bei FASTSIM wird die elliptische Fläche diskretisiert, und die Tangentialspannung in den einzelnen Flächenelementen wird zur Tangentialkraft integriert.

3.2.4 ERMITTLUNG DER VERSCHLEIßRATE

Im letzten Schritt der Simulation wird die Verschleißrate der Laufräder des RBGs berechnet. Das Verschleißmodell verwendet hierfür die Kontaktparameter als Eingabe, um die abgetragene Menge an Radmaterial zu bestimmen.

3.3 VERSCHLEIßBERECHNUNG

3.3.1 DAS ARCHARD VERSCHLEIßMODELL

In diesem Beitrag basiert die Berechnung auf dem Modell nach Archard [11]. Laut diesem Modell ist der volumetrische Materialverlust durch Verschleiß proportional zur Normalkraft und der Gleitstrecke, während er umgekehrt proportional zur Materialhärte steht. Die entsprechende Formel lautet:

$$V_A = \frac{Nd}{H} \cdot k_A \quad (1)$$

Dabei bezeichnet V_A das Verschleißvolumen, N die Normalkraft, d die Gleitstrecke, und H die Härte des weichen Materials im Rad-Schiene-Kontakt. k_A ist ein dimensionsloser Verschleißkoeffizient, der von der Kontaktpressung und der Gleitgeschwindigkeit abhängt. Die Verschleißkoeffizienten orientieren sich an den vier empirisch ermittelten Zonen in Abbildung 3 [12]. Für die Auswahl der Verschleißkoeffizienten wurde in diesem Beitrag der Mittelwert der jeweiligen Zonen verwendet. Die Verschleißkoeffizienten für die Zonen I, II, III und IV wurden auf $5 \cdot 10^{-4}$, $35 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-4}$ und $350 \cdot 10^{-4}$ festgelegt.

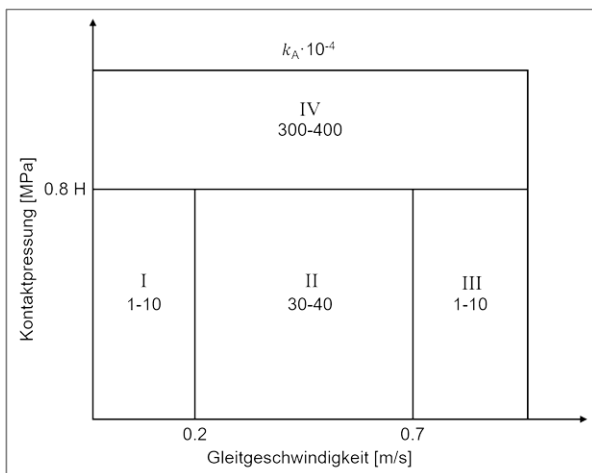


Abbildung 3. Verschleißdiagramm für den Verschleißkoeffizient [12]

3.3.2 BERECHNUNG DER VERSCHLEIßTIEFE

Das Archard-Modell berechnet den globalen volumetrischen Materialverlust durch Gleitverschleiß, wie in Formel (1) dargestellt. Zur Bestimmung der Verschleißverteilung auf der Kontaktfläche wird zunächst der Radradius am

Kontaktpunkt in Simpack berechnet. Dies ergibt die Verschleißfläche im radialen Querschnitt des Rades aus dem globalen Verschleißvolumen. Schließlich wird die normale Verschleißtiefe $z(y)$ quer zur Radoberfläche ermittelt. Abbildung 4 zeigt die Verschleißtiefe $z(y)$ als Ergebnis der Simulationsläufe.

Um das Verschleißverhalten im Rad-Schiene-Kontakt des RBGs zu quantifizieren und den Einfluss der Glättung auf die Ergebnisse zu vermeiden, wurden die Verschleißtiefen in dieser Arbeit nicht geglättet. Stattdessen wurde der Spitzenwert mit der maximalen Verschleißtiefe z_{\max} , als Maß verwendet.

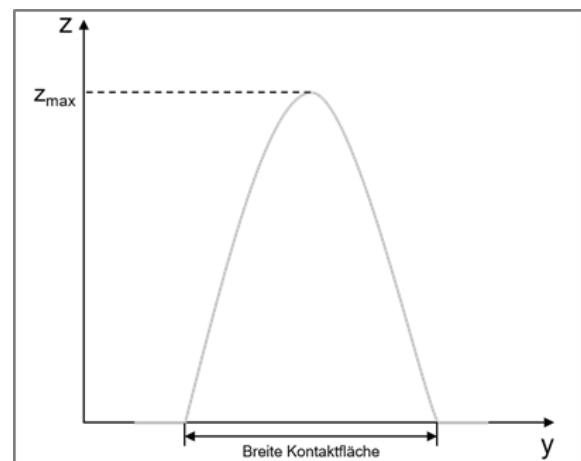


Abbildung 4. Verschleißverteilung auf der Kontaktfläche in Simpack (eigene Darstellung)

In der Praxis ist Verschleiß ein kontinuierlicher Prozess, der fortlaufend zu Veränderungen der Rad- und Schienenprofile führt. Während der Simulation bleiben jedoch die Rad- und Schienenprofile konstant. Das Verschleißvolumen wird nach der Simulation aller definierten Arbeitszyklen des RBGs einmalig berechnet. Anschließend wird die gesamte Integrationszeit aufsummiert. Am Ende der Simulation erhält man die Verteilung der Verschleißtiefe auf beiden Rädern.

Das in diesem Beitrag vorgestellte Simulationsmodell und die Berechnungsmethode berücksichtigen den Verschleiß der Laufräder über die Lebensdauer des RBGs, die durch den Arbeitszyklus repräsentiert wird. Aufgrund der großen Anzahl an Arbeitszyklen des RBGs und der langen Simulationszeit für jeden einzelnen Zyklus ist es jedoch nicht möglich, den gesamten Arbeitszyklus von RBG in der Simulation abzubilden. Zudem können sich bei zu langen Simulationszeiten Rundungsfehler akkumulieren, was zu numerischen Problemen führt und die Berechnung kleiner Größen, wie z.B. des Verschleißes, erheblich erschwert. Aus diesen Gründen wird ein Vergrößerungsfaktor k_s bei der Verschleißberechnung eingeführt. Dieser Faktor entspricht dem Verhältnis zwischen den geplanten Arbeitszyklen und den tatsächlich simulierten Arbeitszyklen. Wenn beispielsweise der Verschleiß für 100.000 Arbeitszyklen hochskaliert werden soll, obwohl nur 1.000 Zyklen

simuliert wurden, beträgt der Vergrößerungsfaktor $k_s = 100.000 / 1.000 = 100$.

3.3.3 ERMITTLUNG DER ZIELGRÖßE

Die Verschleißrate ist eine wesentlichere Zielgröße zur Quantifizierung des Verschleißes als die aus Simpack ermittelte Verschleißtiefe, da sie eine Abschätzung der Lebensdauer der Laufräder ermöglicht. Die Verschleißrate ergibt sich aus dem Verhältnis der maximalen Verschleißtiefe Z_{\max} zu einer geeigneten Bezugsgröße. In diesem Zusammenhang wird anstelle der direkt in der Simulation verwendeten Arbeitszyklen die Überrollungszahl der Räder als Bezugsgröße herangezogen. Die Gründe hierfür sind im Folgenden aufgelistet:

- Das RBG verfügt über unterschiedliche Lagerbetriebsstrategien, darunter Einzel-, Doppel- und Vierfachspiel. Die Anzahl der Arbeitszyklen in der Simulation bezieht sich nur auf eine dieser Lagerbetriebsstrategien und kann daher nicht alle drei Fälle gleichzeitig berücksichtigen.
- Die Überrollungszahl wird in der Norm DIN EN 13001-3-3 zur Nachweisführung der dynamischen Ermüdungsfestigkeit der Laufräder verwendet. Die Verwendung dieser Bezugsgröße vereinfacht zukünftige Ergänzungen der DIN EN 13001-3-3 hinsichtlich des Verschleißes im Rad-Schiene-Kontakt.
- Für die Validierung der Berechnungsmethode wird ebenfalls die Überrollungszahl verwendet. Die Details zu der Validierungsmethode und den Ergebnissen werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Um die Anzahl der Radüberrollungen zu bestimmen, ist es erforderlich, die zurückgelegte Fahrstrecke des RBGs während der Auslegungslbensdauer zu kennen. Diese Fahrstrecke ist jedoch zum Auslegungszeitpunkt nicht exakt bestimmbar und muss daher geschätzt werden. Im Rahmen des von 2018 bis 2021 am Lehrstuhl fml bearbeiteten Forschungsprojekts „Methodik zur praxisgerechten Auslegung des Rad-Schiene-Systems von Regalbediengeräten“ (MARS) [13] wurde die Gesamtzahl der Radüberrollungen mittels maschinellen Lernens ermittelt. Das Ergebnis dieses Forschungsprojekts zeigt, dass die Radüberrollungen lediglich von der Lagerbetriebsstrategie, der Anzahl der Arbeitszyklen, dem Raddurchmesser und der Lagerlänge abhängen. Wenn diese vier Parameter bekannt sind, lässt sich die Anzahl der Radüberrollungen zuverlässig abschätzen. Diese Erkenntnisse werden hier genutzt, um die Anzahl der Arbeitszyklen in die Radüberrollungen umzurechnen.

4 VALIDIERUNG

Zur Validierung der numerischen Ergebnisse dieser Berechnungsmethode werden experimentelle Daten zur Messung der Materialabnutzung im Rad-Schiene-Kontaktsystem herangezogen. Ein kritischer Aspekt dabei ist die Verfügbarkeit dieser experimentellen Daten, die für die Validierung des gesamten Simulationsmodells erforderlich sind. Der Grund dafür ist, dass der Verschleißprozess sehr langwierig ist. Zur Validierung müssten daher über eine erhebliche Zeitspanne hinweg systematisch Daten erhoben werden. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit keine Versuche durchgeführt. Stattdessen wird die Berechnungsmethode anhand des von Hesse [10] abgeleiteten empirischen Berechnungsmodells validiert, welches im Unterabschnitt 4.2 ausführlicher beschrieben wird. Für die Validierung werden zwei typische RBG-Konfigurationen als Anwendungsfälle verwendet: mittelgroß und klein.

4.1 RBG-KONFIGURATIONEN

Die untersuchten RBG werden anhand ihrer Konstruktionsmerkmale in zwei Konfigurationen unterteilt: mittelgroß (Höhe 10 m bis 25 m) und klein (Höhe < 10 m). Um möglicher Verzerrungen, hervorgerufen durch Mast-schwingungen, zu vermeiden, wurde die Konfiguration für große RBGs (Höhe > 25 m) nicht berücksichtigt.

Diese beiden Konfigurationen repräsentieren die unteren und mittleren Bereiche der Wertintervalle der Eingangsgrößen. Die maßgeblichen konstruktiven Parameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2. RBG-Konfigurationen für die Validierung

RBG-Parameter	Mittelgroß	Klein
RBG Höhe	25 m	10 m
Mast Länge	1 m	0,8 m
Mast Wanddicke x-Richtung; Mast Wanddicke y-Richtung	10 mm; 5 mm	5 mm; 1 mm
Traverse Masse	3000 kg	1500 kg
Radstand	6 m	4 m
Raddurchmesser	600 mm	450 mm
Hub Masse (Hubwagen und Zuladung)	2000 kg	800 kg
Maximale Beschleunigung x-Richtung	1 m/s ²	1,5 m/s ²
Maximale Geschwindigkeit x-Richtung	5 m/s	5 m/s

Zusätzlich gibt es eine Reihe von Parametern bezüglich der Materialeigenschaften und Geometrie von Rad und Schiene, die für beide Konfigurationen identisch sind. Diese Parameter sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3. Materialparameter der Räder und der Schiene

Radmaterial	42CrMo4
Schienenmaterial	R260Mn
Schräglaufwinkel Laufrad	0,0015 Rad
Wirksame Schienenkopfbereite	75 mm
Poisson'sche Konstante für Stahl	3
Elastizitätsmodul für Stahl	210.000 N/mm ²

4.2 ERGEBNISSE DER VALIDIERUNG

Im empirischen Berechnungsmodell von Hesse wird die Verschleißrate anhand von 100.000 Radüberrollungen berechnet. Die Anzahl der Arbeitszyklen für die mittel-große und die kleine RBG-Konfiguration wurde auf jeweils 1.200 und 1.500 festgelegt, um die 100.000 Radüberrollungen zu erreichen.

Abbildung 5 gibt eine Übersicht über die Ergebnisse der Radverschleißraten von Hesse's Modell und von Simpack. Abbildung 5 (a) und (b) zeigen die Validierungsergebnisse für die mittel-große und die kleine RBG-Konfiguration. Die Ergebnisse von Hesse liegen als graue Bandbreite vor, da Hesse einen Streubereich von $\pm 50 \mu\text{m}/10^5$ Radüberrollungen vorschlägt. Besonders hervorzuheben ist, dass der Reversierbetrieb von RBG den Verschleiß um 20 % reduziert. Die Ergebnisse der in diesem Bericht vorgestellten Berechnungsmethode sind in Abbildung 5 durch schwarze Linie dargestellt. Somit liegen die simulierten Verschleißraten innerhalb der Bandbreite des Hesse'schen Modells. Die erreichte Genauigkeit wird als ausreichend für die Validierung der in diesem Beitrag vorgestellten Berechnungsmethode angesehen.

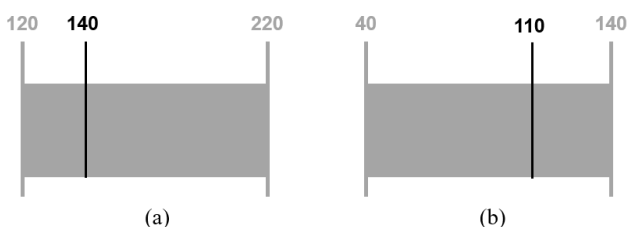


Abbildung 5. Validierungsergebnisse in $\mu\text{m}/10^5$ Radüberrollungen unterschiedlicher RBG-Konfigurationen (a): mittel-groß (b): klein

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Verschleiß am Laufrad ist ein häufiger Schadensfall bei RBG. Derzeit gibt es jedoch keine relevanten Untersuchungen oder Normen zur Auslegung von RBG unter Berücksichtigung des Radverschleißes. In diesem Beitrag wird eine praxisgerechte Methode zur Verschleißberechnung im Rad-Schiene-System von RBG unter Verwendung der Co-Simulation von MATLAB/Simulink und Simpack vorgestellt. Das vollparametrisierbare Simulationsmodell berücksichtigt die Konstruktions- und Bewegungsparameter von RBG sowie Lagerparameter. Es ermöglicht die Untersuchung verschiedener RBG-Konfigurationen. Die Validierung der simulationsbasierten Methode erfolgt anhand experimenteller Daten von Hesse, wobei zwei RBG-Konfigurationen, klein und mittel-große RBGs, als Testfälle gewählt wurden. Die Validierungsergebnisse zeigten, dass die simulierten Verschleißraten innerhalb des Bereichs der experimentellen Ergebnisse lagen. Dies bestätigt die Zuverlässigkeit der vorgestellten Berechnungsmethode.

Diese Berechnungsmethode weist noch einige Einschränkungen auf. Die Simulationszeit für einen einzelnen Arbeitszyklus beträgt zwischen 30 und 60 Sekunden. Obwohl in Simpack ein Vergrößerungsfaktor verwendet werden kann, um die Anzahl der Simulationszyklen zu reduzieren, kann die verbleibende Simulationszeit dennoch zu lang sein, um eine Vielzahl möglicher RBG-Konfigurationen zu vergleichen. Eine mögliche Lösung für dieses Problem könnten statistische Metamodelle sein. Daher schlägt dieser Beitrag weitere Forschungen vor, um ein solches Metamodell zu entwickeln.

6 FÖRDERHINWEIS

Wesentliche Teile dieses Beitrags wurden im Rahmen des Projekts der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) „VerStaRad: Verschleißverhalten von Stahlaufrädern an Regalbediengeräten“ (IGF-Projekt Nummer 23053) erarbeitet.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. : Krane - Konstruktion allgemein - Teil 3-3: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Laufrad/Schiene Kontakten., DIN EN Nr. 13001-3-3, 2014.
- [2] A. Shebani und S. Iwnicki, „Prediction of wheel and rail wear under different contact conditions using artificial neural networks,“ *Wear*, Bd. Volumes 406–407, pp. 173-184, 2018.

- [3] Q. Sun, C. Chen, A. Kemp und P. Brooks, *Mechanical Systems and Signal Processing*, p. 107540, 153, 2021.
- [4] E. Butini, L. Marini, M. Meacci, E. Meli, A. Rindi, X. Zhao und W. Wang, „An innovative model for the prediction of wheel - Rail wear and rolling contact fatigue,“ *Wear*, 436-437, 203025, 2019.
- [5] J. Heck, *Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen*, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2016.
- [6] D. Hartwich, G. Muller und A. Meierhofer, „A new hybrid approach to predict worn wheel profile shapes,“ Taylor & Francis in *Vehicle System Dynamics*, Sheffield, 2022.
- [7] G. Havlicek und G. Kartnig, „Ermittlung des Längsschlupfes eines angetriebenen Kranrads bei bombiertem Schienenkopf,“ *Logistics Journal*, 01 10, 2017.
- [8] K. Teuchert, *Verschleiß von Kranschiene - Analyse des gegenwärtigen Zustandes und Maßnahmen zur Erhöhung des Gebrauchswertes*, Dissertation: Technische Universität Dresden, 1992.
- [9] W. Hesse, *Verschleißverhalten des Laufrad-Schiene-Systems fördertechnischer Anlagen*, Dissertation: Ruhr-Universität Bochum, 1983.
- [10] A. Rücker, J. Rief und J. Fottner, „An investigation of mean energy demand, performance and reference cycles for stackercranes,“ in *FME Transactions* 48,2,307-312, 2020.
- [11] J. Archard, „Contact and Rubbing of Flat Surfaces,“ *Journal of Applied Physics*, p. 981–988, 24(8), 1953.
- [12] T. Jendel, „Prediction of wheel profile wear—comparisons with field measurements,“ *Wear*, pp. 89-99, 253, 2002.
- [13] J. Fottner, „Forschungsbericht: Methodik zur praxisgerechten Auslegung des Rad-Schiene-Systems von Regalbediengeräten (IGF-Vorhaben 20096 N/1),“ Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München, Garching bei München, 2022.

Minggong Yu, M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) an der Technische Universität München

Johannes Fottner, Prof. Dr. -Ing., Professor am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) an der Technische Universität München

Adresse: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München, Deutschland

Telefon: +49 (89) 289 – 15947

E-Mail: minggong.yu@tum.de