

# Unrunder Radverschleiß – Simulation zur Polygonisierung an einer Messstraßenbahn

Das Phänomen der Polygonisierung spielt bei der Instandhaltung von Straßenbahnrädern eine zunehmend wichtige Rolle. Ein Konzept zur rechnerischen Simulation des unrunder Radverschleißes, welches auf eine Messstraßenbahn angewendet wird, ermöglicht ein tieferes Verständnis der Ausprägung von Polygonen.



## 1. Einführung

Unebenheiten im Kontakt zwischen Fahrzeug und Fahrweg bilden verkehrsträgerübergreifend eine beständige Herausforderung für die Instandhaltung und Entwicklung. Insbesondere im innerstädtischen Straßenverkehr verursachen kurzweilige Anregungen, z.B. in Form von Pflastersteinen und Reifenprofilmustern, eine anhaltende akustische Belastung. Während dies bereits beim dämpfenden Reifen-Fahrbahn-Kontakt ein erhebliches Problem darstellt, gehen die Auswirkungen beim Rad-Schiene-Kontakt darüber hinaus. Aufgrund der Stahl-Stahl-Kontaktpaarung führen Unebenheiten an Rad und Schiene zur direkten Anregung von Schall und Vibration und wirken sich dabei nicht nur auf die Fahrgäste, sondern durch die Übertragung via Körperschall und Bodenvibration auch auf die Anrainer aus. Die resultierenden Schwingungen führen nicht nur zu Lärm und einer Komfortminderung, sondern belasten auch das technische System Fahrzeug-Fahrweg selbst und können zur Ermüdung von Bauteilen führen.

Unrunde Räder in Form von Polygonen spielen dabei eine besondere Rolle, da sie nahezu unabhängig von Gleis und Fahrgeschwindigkeit über die gesamte Fahrstrecke hinweg kontinuierlich Vibrationen verursachen. Als „Polygon“ werden dabei alle über dem Radumfang periodischen Verschleißerscheinungen bezeichnet, deren Wellenlängen mit  $\lambda \geq 40\text{mm}$  oberhalb der Rauigkeit liegen. Deren Bildungsprozess, die sogenannte „Polygonisierung“, ist durch selbstverstärkende Effekte gekennzeichnet, was bedeutet, dass regulär auftretender Radverschleiß zumeist nicht zum selbstständigen Einebnen der Unrundheiten führt.

Polygonisierung ist in verschiedensten Anwendungen von Hochgeschwindigkeitstriebzügen über Lokomotiven bis hin zu U- und Straßenbahnen in unterschiedlich gravierenden Formen und Wellenlängen anzutreffen. Die Ursache der Polygonbildung ist im Zusammenspiel vieler systemischer Einflussfaktoren zu suchen [1]. Nur in Ausnahmefällen können eindeutige Ursachen oder Bildungsmechanismen wie z.B. Reprofilierungsfehler, Materialin-



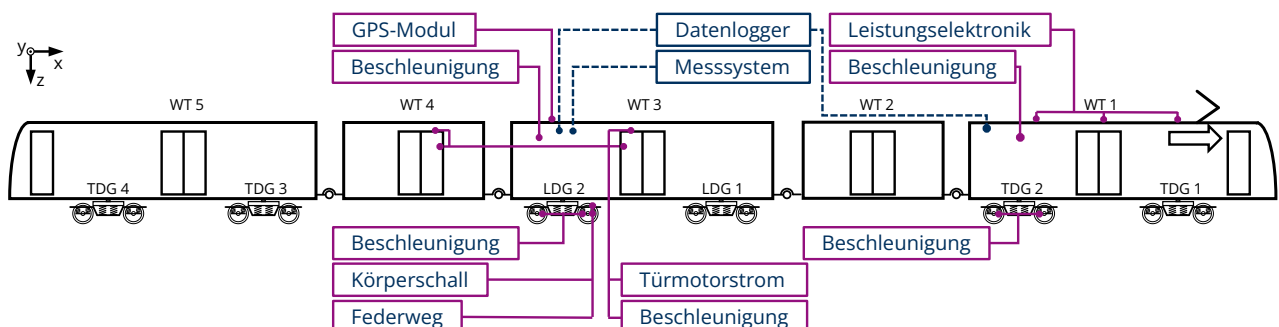
**Dipl.-Ing. Fabian Wendrock**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Professur für Dynamik und Mechanismentechnik, Technische Universität Dresden  
fabian.wendrock@tu-dresden.de



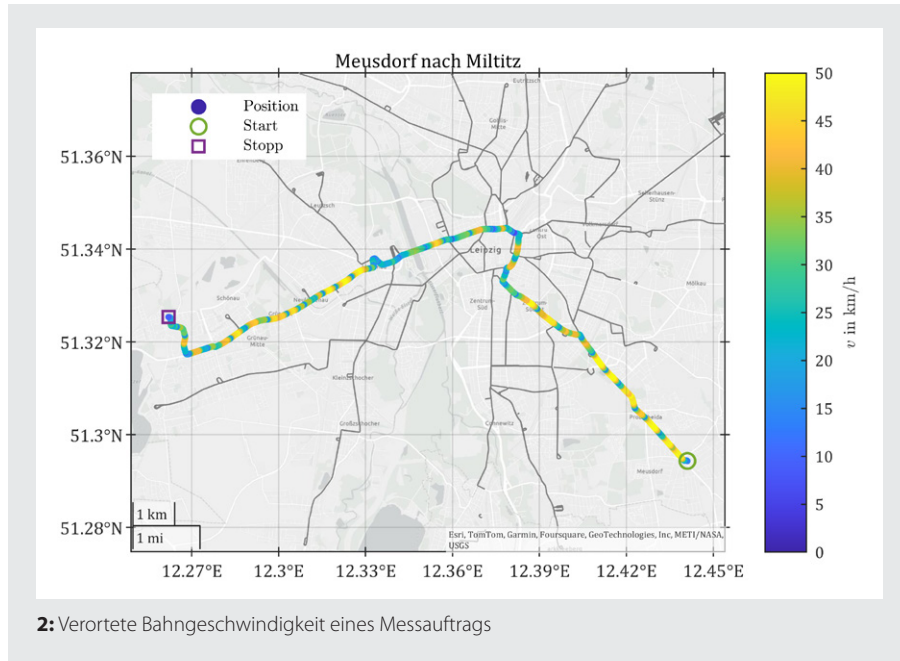
**Prof. Dr.-Ing. Michael Beitel Schmidt**

Lehrstuhlinhaber, Professur für Dynamik und Mechanismentechnik, Technische Universität Dresden  
michael.beitel@tu-dresden.de



1: Messaufbau der Messstraßenbahn 2.0

Quelle: LRVtwin



homogenitäten oder selbsterregte Schwingungen gefunden werden [1]. Unabhängig von der Ursache für das Vorliegen einer polygonalen Unrundheit ist die Beschreibung, Simulation und Vorhersage der (weiteren) Entwicklung initialer Polygone zum besseren Verständnis des Radverschleißprozesses von Interesse und soll Bestandteil dieses Beitrags sein.

Die Simulation von unrundem Radverschleiß an Straßenbahnen ist herausfordernd. Im Vergleich zu Vollbahnen sind zahlreiche Umgebungsbedingungen wie Trassierung, Rad-Schiene-Profilgeometrien, Fahrwegparameter und Fahrgeschwindigkeitsprofile wesentlich vielfältiger. Zugleich muss das Berechnungsmodell die dynamische Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrweg hinreichend genau abbilden. Während bereits bei der Simulation von klassischem Radprofilverschleiß die Komplexität des Zusammenspiels der verschiedenen Zeitskalen von Fahrzeugdynamik und Verschleißentwicklung ein wesentliches Problem darstellt [2], kommt derartigen Wechselwirkungen bei der Betrachtung von unrundem Radverschleiß aufgrund selbstverstärkender Effekte eine noch größere Bedeutung zu.

**2. Messstraßenbahn 2.0**

Im Rahmen des mFUND-Projekts „LRV-Twin“ wird seit 2023 in Leipzig eine Messstraßenbahn betrieben [3]. Die „Messstraßenbahn 2.0“ ist ein Nachfolger der bis ins Jahr 2022 verkehrenden Dresdner Mess-

straßenbahn, die über den Zeitraum von 10 Jahren Messdaten sammelte, die der TU Dresden für die Forschung weiterhin zur Verfügung stehen [4].

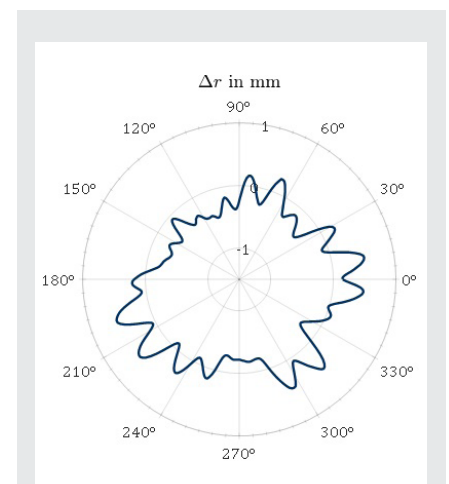
Der in Abb. 1 schematisch dargestellte Messaufbau der Messstraßenbahn 2.0 zeigt den derzeitigen Stand der verbauten Messtechnik zur gezielten Überwachung ausgewählter Komponenten. Für den Projektteil zum unrundem Radverschleiß sind neben der Zustandsüberwachung mittels GPS, Tachometer und Wagenkastenbeschleunigung insbesondere die Schwingungsmessung mittels Beschleunigungsaufnehmer an den Radsatzlagern sowie die Primärfederwegsensorik relevant.

Die Messstraßenbahn 2.0 kommt als Bestandsfahrzeug des Typs „Flexity Classic XXL“ im regulären, täglichen Linienbetrieb der Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) zum Einsatz. Die Messungen erfolgen kontinuierlich und werden in Messaufträge von Endhaltestelle bis Endhaltestelle gegliedert. Abb. 2 zeigt exemplarisch die verortete Fahrzeuggeschwindigkeit eines Messauftrags. Erfasste Messdaten werden einheitlich formatiert und auftragsweise drahtlos in eine Cloud übertragen, wo sie der weiteren Datenkette zugeführt werden. Dort erfolgt u.a. ein Verortungsprozess, sodass dem Fahrzeug trotz unbekannter Dispositionsdaten zu jedem Zeitpunkt ein eindeutiges Gleis zugeordnet wird. Die Zuordnung zur Schieneninfrastruktur wird durch die verknüpfte Datenbank gewährleistet. Näheres zum Messprinzip findet sich z.B. in [5]. Informationen zum Projekt

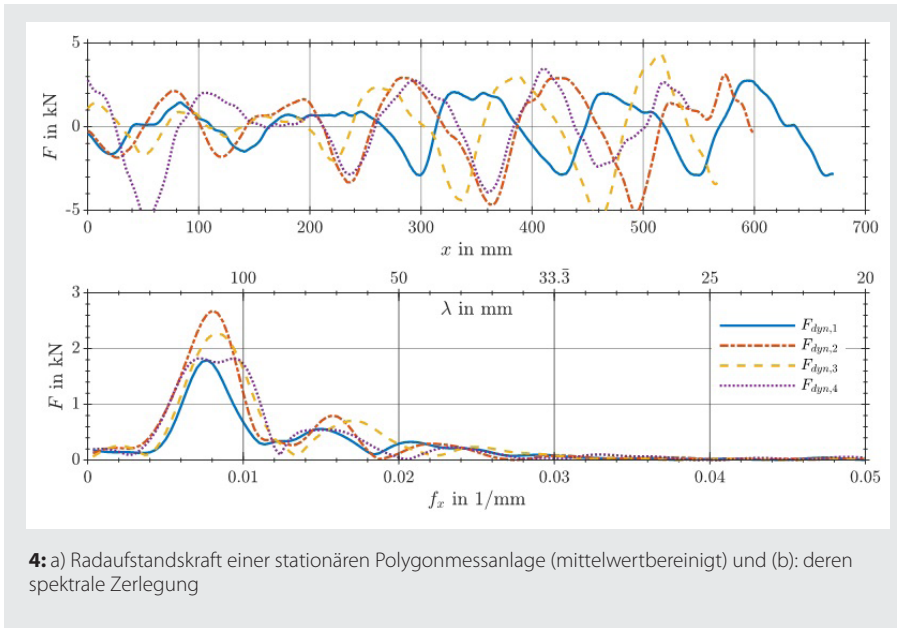
LRVTwin stehen auf den Seiten des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr zur Verfügung [3].

**3. Polygone an Straßenbahnen**

Im Vergleich zum Radprofilverschleiß treten Polygone an betroffenen Fahrzeugen nicht zwangsläufig nach gewissen Laufleistungen auf. Diese Beobachtung spricht für die Notwendigkeit einer Störungsinitiierung, welche an stochastische Ereignisse gekoppelt sein kann. Deswegen kommen für die betriebliche Überwachung von Unrundheiten häufig stationäre Messanlagen zum Einsatz, welche von den Fahrzeugen einer Flotte in regelmäßigen Abständen passiert werden. Je nach Messprinzip wird das Polygon entweder direkt mit Referenz zur Spurkränzkuppe gemessen oder indirekt über die Systemantwort der Schiene detektiert. Der Verlauf der Radaufstandskraft kann bei gleichförmiger Fahrzeugüberfahrt mittels Dehnmessstreifen oder Neigungssensoren an den Schienen bestimmt werden. Im Gegensatz zur direkten geometrischen Rundheitsmessung sind indirekte Messungen einer Großzahl von Einschränkungen (Anhaftungen, laterale Stellung, Beladungszustand usw.) unterworfen. Die Bewertungsqualität von Polygonen wird zudem maßgeblich durch die effektive Messlänge eines Sensors, typischerweise ein Schwellenfach, beschränkt. Da der Radumfang den Schwellenabstand im Allgemeinen deutlich übertrifft, ist die Erfassung einer gesamten Radumdrehung mit nur einem Sensorsignal unmöglich. Wenn keine Beschränkung auf Polygone höherer Ordnung erfolgen soll, müssen die



3: Polardarstellung einer gemessenen Rundheitsabweichung



Messergebnisse von mehreren Sensoren entlang der Strecke sinnvoll fusioniert werden. Im betrieblichen Alltag ist in der Regel lediglich die gemessene Intensität von Interesse, weshalb üblicherweise Schwellwerte der Fluktuationen von Radaufstandskraft o. ä. eingerichtet werden. Die Güte einer direkten geometrischen Rundheitsmessung, wie sie in Abb. 3 dargestellt ist, kann damit nicht erreicht werden.

Abbildung 4a zeigt die dynamischen Kraftverläufe einer Polygonmessstelle eines unrunder Rades über dem Umfang. Die Kraftverläufe werden dafür entlang vier benachbarter Schwellenfächer gemessen. Aus diesen kurzen Sequenzen kann mittels spektraler Zerlegung die dominante Wellenlänge in Abb. 4b extrahiert werden. Zur Validierung der Polygonordnung und um genauere Aussagen zur Form und Tiefe des Polygons zu erlangen, sollten anschließende geometrische Messungen vorgenommen werden, um die Polygonkontur nach Abb. 3 zu bestimmen. Eine nominelle Abschätzung der Polygontiefe mittels Kraftmessung erfordert eine statistische

Auswertung wiederholter Überfahrten mit ggf. empirischer Skalierung.

4. Simulationsmethodik

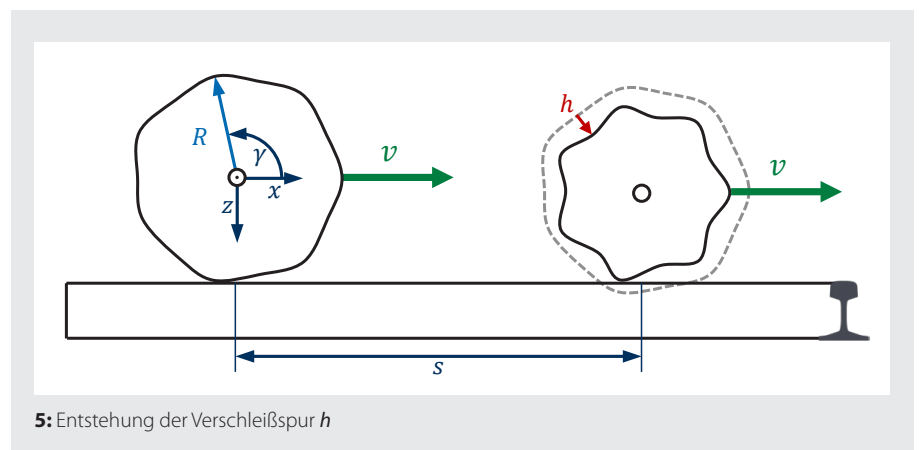
Die vorgestellte Simulationsmethodik basiert auf einem Mehrkörpersystem des Fahrzeug-Fahrwegsystems mit einem nichtlinearen Rad-Schiene-Kontaktelement. Die Mehrkörpersimulation (MKS) ist als Simulationsmethode für die Abbildung der Fahrzeugdynamik weit verbreitet. Sie bietet die Möglichkeit, den gültigen Frequenzbereich des Modells durch den Detaillierungsgrad der Modellbildung zu beeinflussen. Je nach Anwendung kann durch die Modellbildung mit starren oder elastischen Körpern sowie linearen oder nichtlinearen Kraftgesetzen die Güte und Komplexität des Modells variabel eingestellt werden. Für die Simulation des Radverschleißes ist insbesondere auf

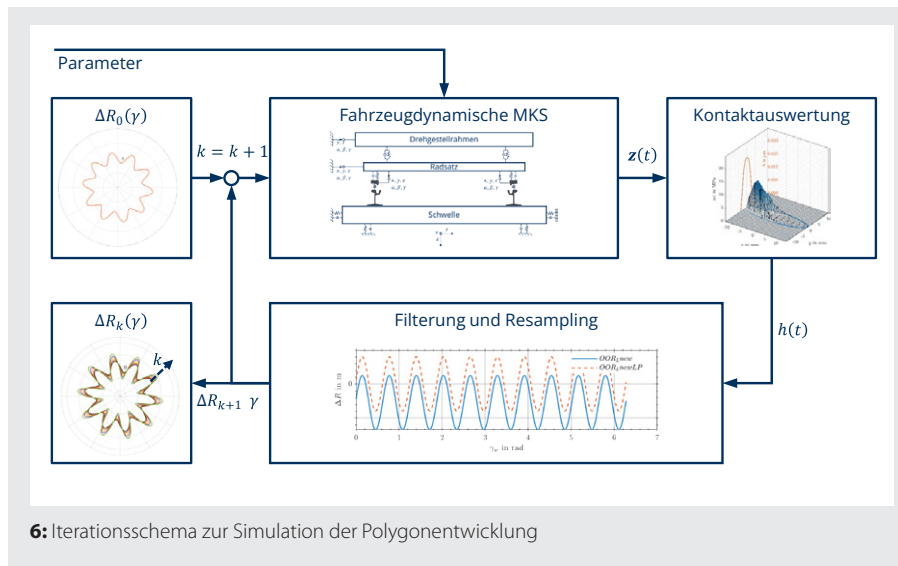
eine hinreichende Abbildung der Komponenten nahe des Rad-Schiene-Kontakts zu achten. Neben der Kinematik des Gesamtfahrzeugs spielt die Modellierung von gummigefedertem Rad, Primärfeder und elastischem Radsatz eine maßgebliche Rolle. Auf Seite des Fahrwegs sind die modelltechnischen Beeinflussungsmöglichkeiten ähnlich groß, wenngleich die Modellierung hier nicht nur aufgrund einer Vielzahl von Oberbauvarianten im Streckennetz ungleich schwieriger ist. Im einfachsten Fall wird eine generalisierte Gleismasse und -steifigkeit definiert.

Ein nichtlineares Kraftgesetz kommt zur Abbildung der zwischen Rad und Schiene wirkenden Kräfte zum Einsatz. Dies ist insbesondere hinsichtlich der durch unrunder Räder verursachten hohen Kraftamplituden im Vergleich zur statischen Radaufstandskraft erforderlich [1]. Zudem spielt der Phasenversatz zwischen der Kraftantwort und anregenden Unrundheit eine erhebliche Rolle für die Simulation der Polygonentwicklung. Die Kräfte zwischen Rad und Schiene weisen zwei für die Polygonisierung relevante Nichtlinearitäten auf: Zum ersten hängt die Normalkraft nichtlinear von der Deformation der Kontaktpartner Rad und Schiene ab und zum zweiten verhält sich die resultierende Tangentialkraft nichtlinear zur auftretenden Schlupfgeschwindigkeit

Für gemessene Profilpaarungen können im relevanten Teil der Lauffläche hinreichend gute Übereinstimmungen mit elliptischen Kontaktflächenapproximationen gefunden werden, sodass hier die Hertzsche Theorie zur Lösung des Normalkraftproblems Anwendung findet. Für die Tangentialkräfte sowie die lokale Spannungs- und Schlupfverteilung kommen geeignete Varianten des FASTSIM-Algorithmus zum Einsatz [6].

Regulär auftretender Radverschleiß führt zumeist nicht zum selbstständigen Einebnen von Polygonen.





6: Iterationsschema zur Simulation der Polygonentwicklung

Die häufig für den Profilverschleiß herangezogene globale Reibleistung  $T_\gamma$  mit betragsmäßiger Definition aus Kontaktkräften und Schlüpfen ist als Kenngröße für unrunnen Radverschleiß ungeeignet. Die Betragsbildung der globalen Kontaktgrößen führt i. A. nicht zu einer harmonischen Systemantwort auf harmonische Unrundheiten. Ein der linearen Systemtheorie entsprechender Zusammenhang kann aber näherungsweise durch die Auswertung der lokalen Reibleistungsverteilung  $t_\gamma$  innerhalb der Kontaktfläche gefunden werden. Die Schwingungen der Verschleißfunktion können mit  $t_\gamma$  hinreichend abgebildet werden und zeigen erwartbar annähernd lineares Systemverhalten. Mit Anwendung bekannter Reibgesetze wird die Tiefe der Verschleißspur  $h$  bestimmt (siehe Abb. 5.) [7].

#### 4.1. Polygonentwicklung

Verschleiß an Rad und Schiene ist erst nach langen Zeiträumen in Form von Geometrieänderungen messbar. Derartige Zeiträume sind MKS-Berechnungen nicht ohne weiteres zugänglich. Die Entkopplung der Zeitskalen von Fahrzeugdynamik und Verschleißentwicklung gelingt mit einem iterativen Vorgehen gemäß dem Schema in Abb. 6. Dabei werden wiederholt kurzzeitdynamische Simulationsrechnungen für möglichst repräsentative Simulationsszenarien durchgeführt, für die keine relevante Änderung der Unrundheit erwartet wird. Die Rundheitsabweichung  $\Delta R(\gamma)$  bleibt während einer Simulationsrechnung unverändert. Im Anschluss an die Mehrkörpersimulation (MKS) werden die Zu-

stände  $z(t)$  orts aufgelöst ausgewertet und es wird die zeitabhängige Tiefe der Verschleißspur  $h(t)$  am Rad bestimmt.

Die über die Lauflänge  $s$  berechnete Verschleißtiefe  $h$  wird anschließend geeignet auf große Laufleistungen skaliert. Nach Filterung numerisch bedingter Rauschereffekte wird durch Resampling eine neue Rundheitsabweichung  $\Delta R(\gamma)$  erzeugt, welche dem nächsten Iterationsschritt  $k$  als Eingang dient.

Die iterative Simulation der Polygonentwicklung bietet sich insbesondere im Fahrzeugentwicklungsprozess an, um charakteristische Ordnungen zu identifizieren und deren Entstehung ggf. vorzubeugen. Gleichfalls eignet sich dieser Simulationsansatz, um Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Ordnungen und äußeren Gegebenheiten wie z. B. Schienenriffeln zu untersuchen. Bei der Anwendung dieser iterativen Methode müssen Hürden hinsichtlich Rechenzeit, Reproduzierbarkeit und Verallgemeinerung der gewählten Kurzzeitszenarien beachtet werden.

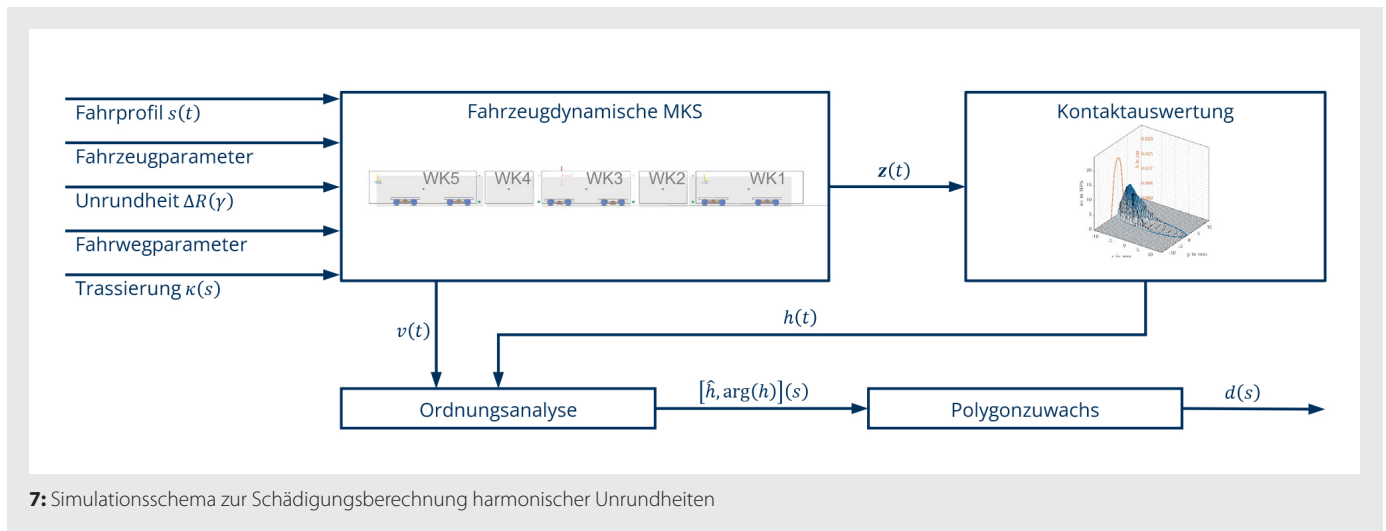
#### 4.2. Messdatengestützte Polygonprognose

Während die iterative Berechnung der Polygonentwicklung maßgeblich durch das messtechnische Äquivalent einer regelmäßigen geometrischen Rundheitsmessung motiviert wird, ist aus betrieblicher Sicht vorwiegend die Identifikation verschleißverursachender Zustände von Interesse. Für die Messstraßenbahn 2.0 ist eine zeit- bzw. orts aufgelöste Verschleißkenngröße in Form der messtechnisch nicht zugänglichen Tiefe der Verschleißspur gesucht. Dafür wurde eine automatisierte Erzeugung

von Simulationsszenarien gemäß dem Schema in Abb. 7 implementiert. Trasierung und Fahrwegparameter werden fahrtspezifisch gemäß der real befahrenen Gleissegmentfolge aus einer Streckennetzreferenz extrahiert und mit dem gemessenen Geschwindigkeitsprofil und weiteren Umgebungsvariablen (z. B. Reibwertschätzung nach Wetterdaten, Verschleißprofilgeometrien) abgelegt. Gegenstand der Untersuchung ist die Prognose der Polygontiefe ausgehend von initialen harmonischen Unrundheiten. Die dominante Polygonordnung muss aus Daten stationärer Messanlagen geschätzt werden oder aus Erfahrung vorliegen.

Die initiale Unrundheit  $\Delta R(\gamma)$  wird als harmonisches Polygon mit bekannter Wellenlänge gebildet. Es erfolgen in Fahrzyklen gegliederte Mehrkörpersimulationen und lokale Kontaktauswertungen analog der iterativen Simulationsmethode. Eine Änderung des lateralen Radprofils wird nicht berücksichtigt und die Verschleißtiefe  $h(t)$  als eindimensionale Ausgabegröße verwendet. Um die Rückwirkung der Verschleißfluktuation auf das initiale Polygon zu analysieren, wird die Verschleißtiefe  $h(t)$  unter Zuhilfenahme der Fahrgeschwindigkeit  $v(t)$  einer Ordnungsanalyse mittels geeigneter parametrierter Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT) unterzogen. Als Ergebnis stehen ortsabhängige Aussagen in Amplitude  $\hat{h}$  und Phase  $\varphi$  gegenüber der anregenden Unrundheit zur Verfügung. Die Phasenlage  $\varphi$  bestimmt dabei, ob das initiale Polygon abgetragen oder vertieft wird, während die Amplitude der Verschleißspur  $\hat{h}$  die Polygonänderung skaliert. Die Ergebnisse werden in der dimensionslosen Größe des Polygonzuwachses  $d$  zusammengefasst. Trotz nichtlinearer Modellbestandteile wird der Polygonzuwachs unabhängig von der initialen Polygontiefe bestimmt und wirkt als logarithmisches Schädigungsmaß auf die initiale Unrundheit. Die Information zum Polygonwachstum findet sich im Vorzeichen der berech-

Die hier vorgestellte Methodik schafft die Grundlage für die Erstellung und Validierung einfacherer Modelle bzw. datengetriebener Methoden.



neten Größe des Polygonzuwachses  $d$ . Durch Akkumulation des Polygonzuwachses  $d$  entlang der Wegstrecke entsteht eine integrale Größe, welche sich zur Modellkalibrierung eignet.

Mit dem Polygonzuwachs  $d$  lässt sich das Ergebnis der Simulation analog zu den digitalen Messkanälen der Messstraßenbahn verarbeiten und kann neben den klassischen Verfahren der Messwertverarbeitung auch Auswertungen mittels datengetriebener Methoden zugeführt werden. Systematische Zusammenhänge und ortsaufgelöste Schädigungsereignisse können somit analysiert werden.

Das beschriebene Verfahren zur Polygonprognose erfordert eine dem Stand der Technik ausgerüstete Messstraßenbahn mit nachfolgender numerischer Simulation. Die Ausstattung aller Fahrzeuge einer Flotte zu Messstraßenbahnen und die systematische Simulation aller Fahrzeugbewegungen ist für eine betriebliche Polygonprognose derzeit wirtschaftlich dauerhaft kaum tragbar. Die hier vorgestellte Methodik schafft jedoch die Grundlage für die Erstellung und Validierung einfacherer Modelle bzw. datengetriebener Methoden, welche auf Fahrzeugflotten im Betriebsalltag anwendbar sind.

Im Projekt LRVTwin [3] wird daran geforscht, diese Methoden an einer Flotte von Standardbahnen zu erproben, welche mit preiswerter Minimalsensorik und einem GNSS-Logger ausgestattet sind.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Während digitale Zwillinge zum Radprofilverschleiß bereits in Anwendung sind bzw. kurz vor der Einführung stehen [2], steht

die Polygonprognose noch am Anfang der Forschung. Am Beispiel der Messstraßenbahn 2.0 wird gezeigt, dass Berechnungsmethoden existieren, um die Entwicklung polygonaler Unrundheiten zu beschreiben. Die Analyse bzw. Prognose von unrundem Radverschleiß mit Hilfe der Mehrkörpersimulation erweist sich als zweckmäßig, um ein Verständnis für die Polygonentwicklung existierender Unrundheiten aufzubauen. Für die Anwendung auf eine Messstraßenbahn ist insbesondere die Ordnungsanalyse der zeitlich fluktuierenden Tiefe der Verschleißspur vielversprechend, um zukünftig mit Methoden der Datenverarbeitung vereinfachte physikalische und datenbasierte Modelle für die betriebliche Polygonprognose zu erstellen. Weiterer Untersuchungsbedarf besteht hinsichtlich der Kalibrierung und Validierung, welcher anhand der Messstraßenbahn 2.0 weiter vollzogen werden soll, bevor eine Konzeptentwicklung zur Umsetzung und Eingliederung der Ergebnisse in den betrieblichen Prozess erfolgen kann.

## 6. Danksagung

Die Autoren danken für die Förderung durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr im Rahmen der Forschungsinitiative mFUND, Förderkennzeichen: 19FS2012A, Forschungsprojekt LRVTwin. •

## Literatur

- [1] Iwnicki, I., Nielsen, J. C. O., Tao, G.: Out-of-round railway wheels and polygonisation, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 61:7, S. 1787-1830, 2023.
- [2] Wilbrecht, S., Ruscher, M., Bregulla, T., Heinz, M., Tegt-

- meier, T., Heyder, R., Beiteltschmidt, M., Stephan, A.: Ein digitaler Zwilling zur Prognose von Radverschleiß, *EI – Der Eisenbahningenieur*, 1/24, S. 26-30, 2024.
- [3] Light Rail Vehicle Twin, Ein digitaler Stadtbahnzwilling – LRVTwin, Homepage vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr, <https://bmdv.bund.de/Shared-Docs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/lrvtwin.html> [Zugriff am 10.01.2025].
- [4] Beiteltschmidt, M., Rennert, R., Dürrschmidt, G., Zechel, G., Harter, M., Loderer, M.: Ergebnisse aus dem 10-jährigen Betrieb der Dresdner Messstraßenbahn. Tagungsband 47. Schienenfahrzeugtagung Graz, ZEVrail, April 2022.
- [5] Wendrock, F., Beiteltschmidt, M.: Überwachung der Fahrzeug-Fahrweg-Interaktion einer Straßenbahn durch fahrzeugfeste Sensorik im Hinblick auf Polygonisierung, 4. VDI-Fachtagung Schwingungen, VDI-Berichte 2429, 2023.
- [6] Kalker, J. J.: A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact, *Vehicle System Dynamics*, 11, 1-13, 1982.
- [7] Peng, B., Iwnicki, I., Shackleton, P., Song, Y.: General conditions for railway wheel polygonal wear to evolve, *Vehicle System Dynamics*, 59:4, 568-587, 2021.

## Summary

### Out-of-round wheel wear - simulation for polygonisation on a measuring tram

The measuring tram 2.0 in the mFUND project LRVTwin continuously collects vehicle measurement data during regular operation in Leipzig. Using them as input for simulation, the development of out-of-round wheels is studied. In addition to an iterative simulation procedure, a simulation method is proposed to predict the self-amplification of polygonal wheels along tram driving profiles using multi-body simulation. The results are used to feed a digital twin for predictive maintenance.