Schlupfwellen und Radpolygone: Entstehungsmechanismen und Minderungsmaßnahmen

Felix Platzer[1], Simon Berner[2], Martin Leitner[3], Klaus Six[1]

[1] Virtual Vehicle Research GmbH

[2] RAILplus AG

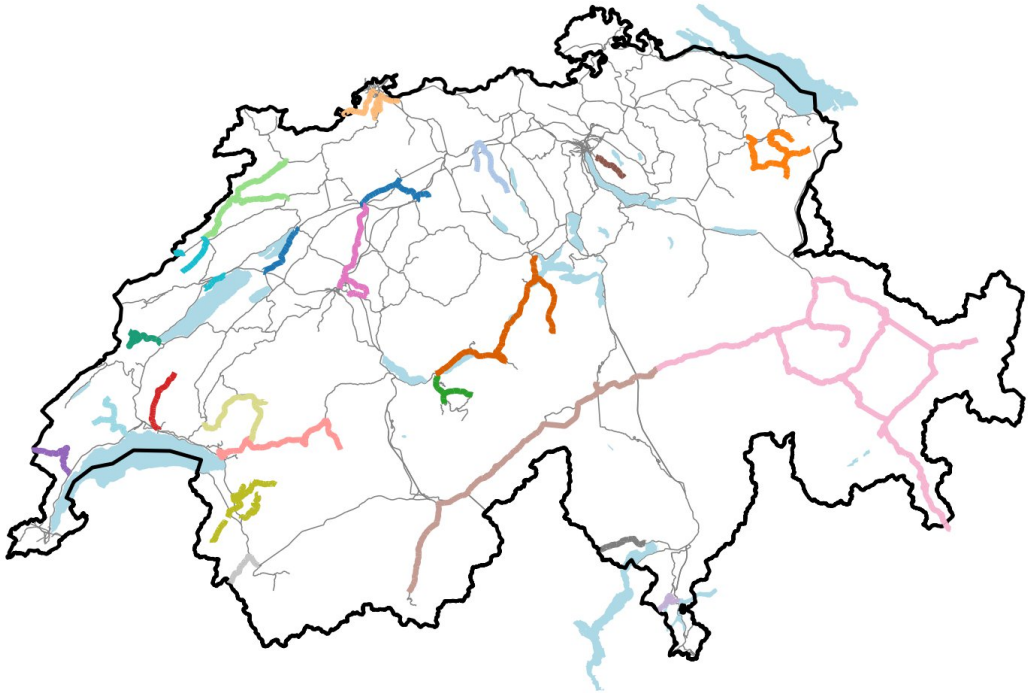
[3] Technische Universität Graz - Institut für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik

10. November 2026 | Graz



www.virtual-vehicle.at

Motivation



Stark betroffen durch:

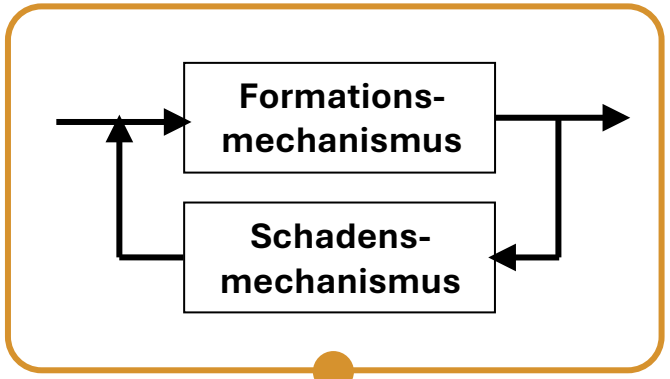
- Profilverschleiß
- Lärm- und Erschütterungen
- Schlupfwellen
- Radpolygone

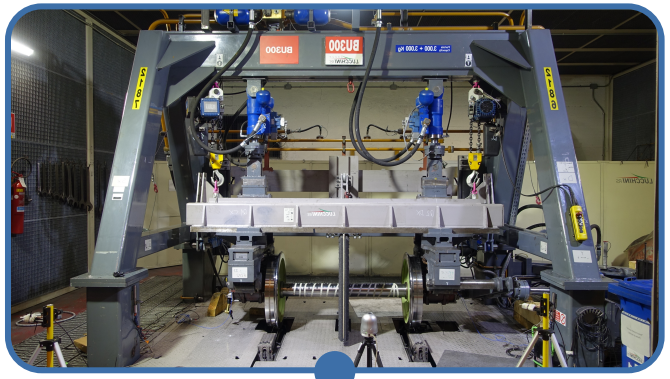




Forschungsprojekt zur Optimierung der Fahrzeug-Fahrweg-Interakti

Agenda





Motivation

Stand der Forschung

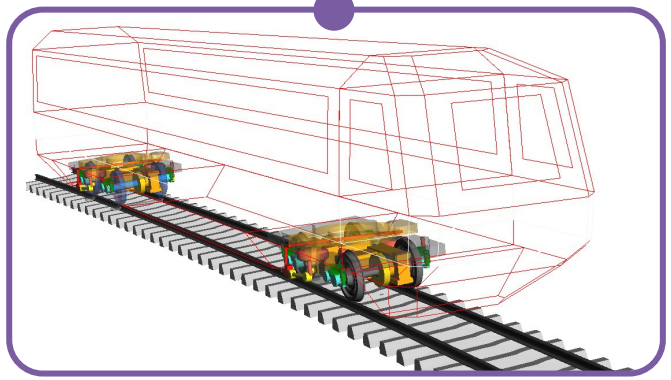
Feldmessungen

Laborversuche

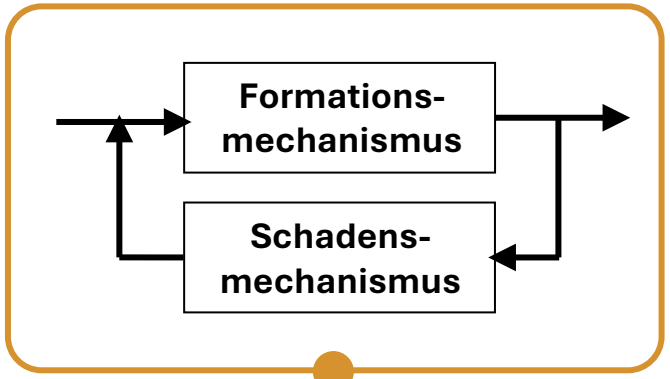
Simulation

Ergebnisse &
nächste Schritte





Agenda



Motivation

Stand der Forschung

Feldmessungen

Laborversuche

Simulation

Ergebnisse &
nächste Schritte

Schlupfwellen im Überblick:

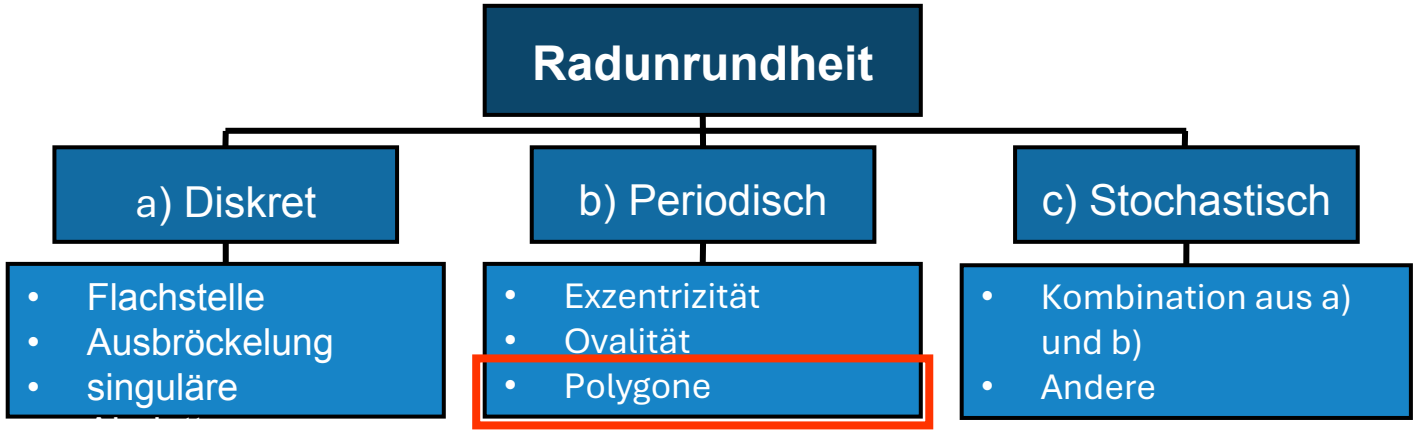
- Englische Bezeichnung: Rail rutting corrugation
- Treten in Bögen mit Radien < 800 m in unterschiedlichsten Bahnsystemen auf (Normalspur- und Meterspurbahnen, Straßenbahnen, U-Bahnen)
- Entstehen hauptsächlich auf der bogeninneren Schiene
- Wellenlängenbereich: 30–300 mm
- Schlupfwellentiefe: < 1 mm
- Gekennzeichnet durch glatte, glänzende Wellenberge und pulvrig-matte Wellentäler



Stand der Forschung

Radpolygone im Überblick:

- Unterkategorie von Radunrundheit:





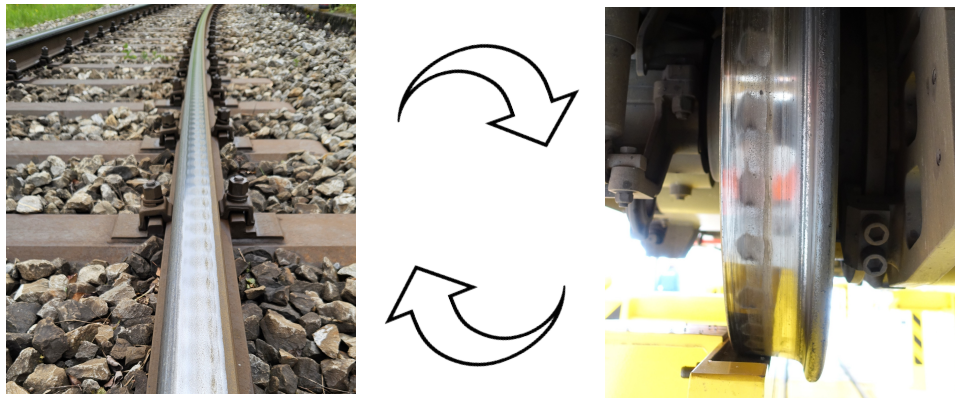
- Treten bei Zügen unterschiedlichster Bahnsysteme auf
- Polygonordnungen zwischen 3 und 28
- Polygontiefe: < 1 mm

Entstehung von Schlupfwellen und Radpolygonen



Nachhaltige Lösungen bzw. Minderungsmaßnahmen erfordern ein fundiertes Verständnis der Entstehung von Schlupfwellen und Radpolygonen, insbesondere hinsichtlich:

- Formationsmechanismus
- Langzeitverhalten
- Interaktion zwischen den Schadensbildern



Agenda

Motivation

Stand der Forschung

Feldmessungen

Laborversuche

Simulation

Ergebnisse &
nächste Schritte

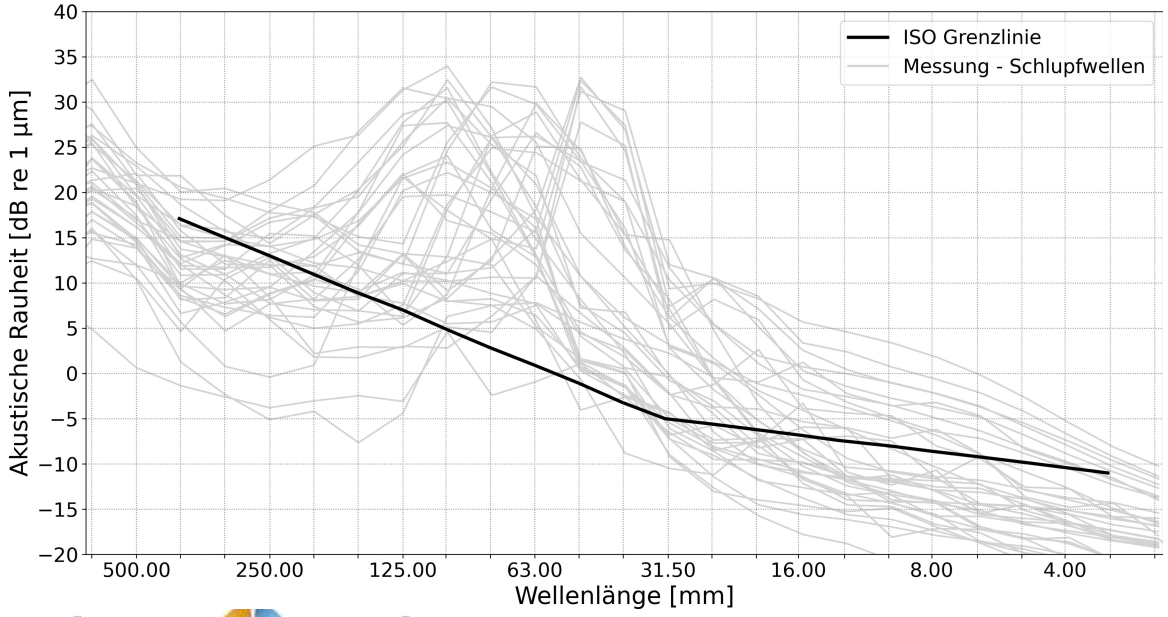


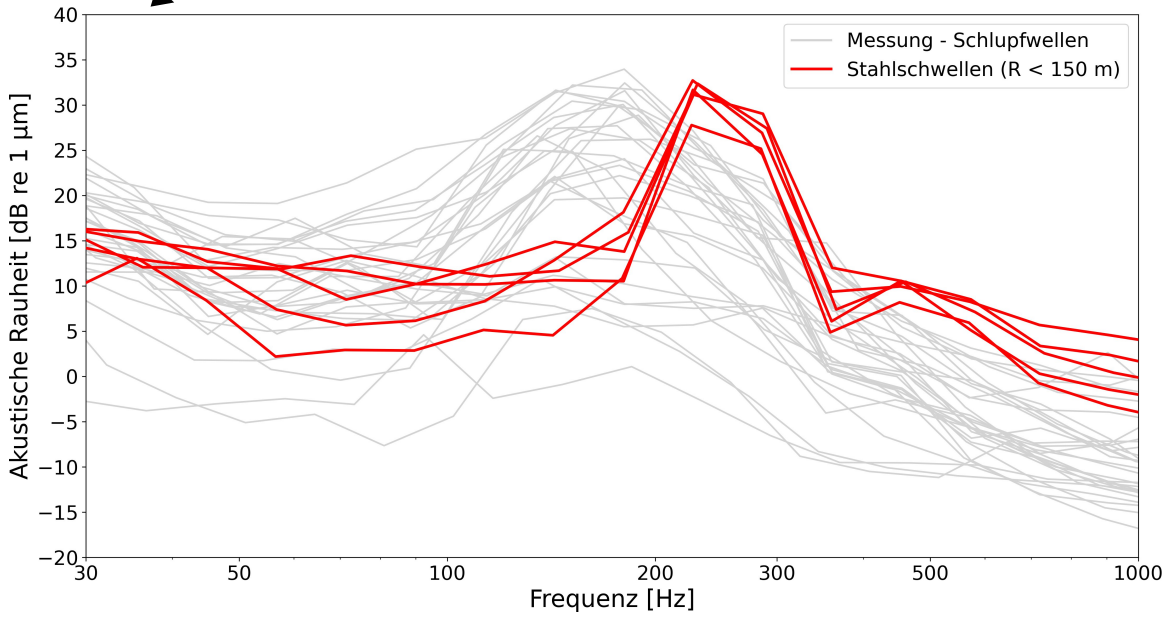
Feldmessungen

Schlupfwellen wurden in mehreren Bögen gemessen und gemäß EN 15610 ausgewertet:

- Schlupfwellen treten konsistent in Bögen mit Radien unter 400 m auf.
- Die dominante Wellenlänge hängt von der Oberbaukonfiguration und der Betriebsgeschwindigkeit ab.
- Über die Betriebsgeschwindigkeit wurden die Wellenlängen in den Frequenzraum umgerechnet.
- Im Frequenzraum zeigt sich ein deutliches Clustern bei bestimmten Frequenzen, abhängig vom Oberbautyp.

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

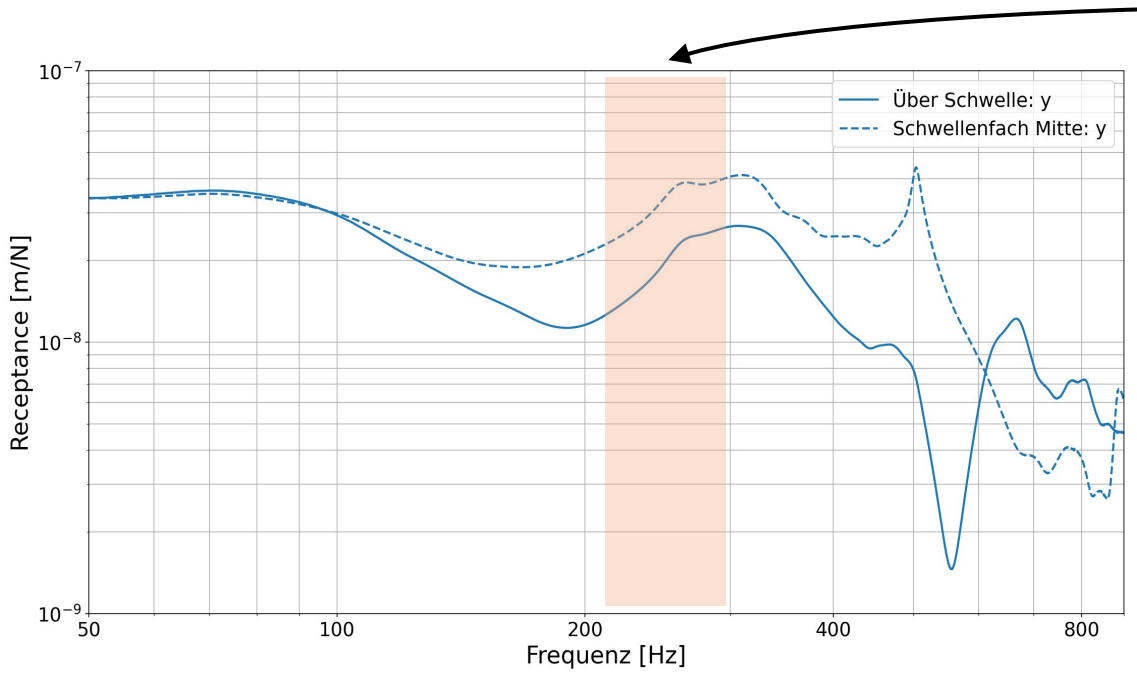


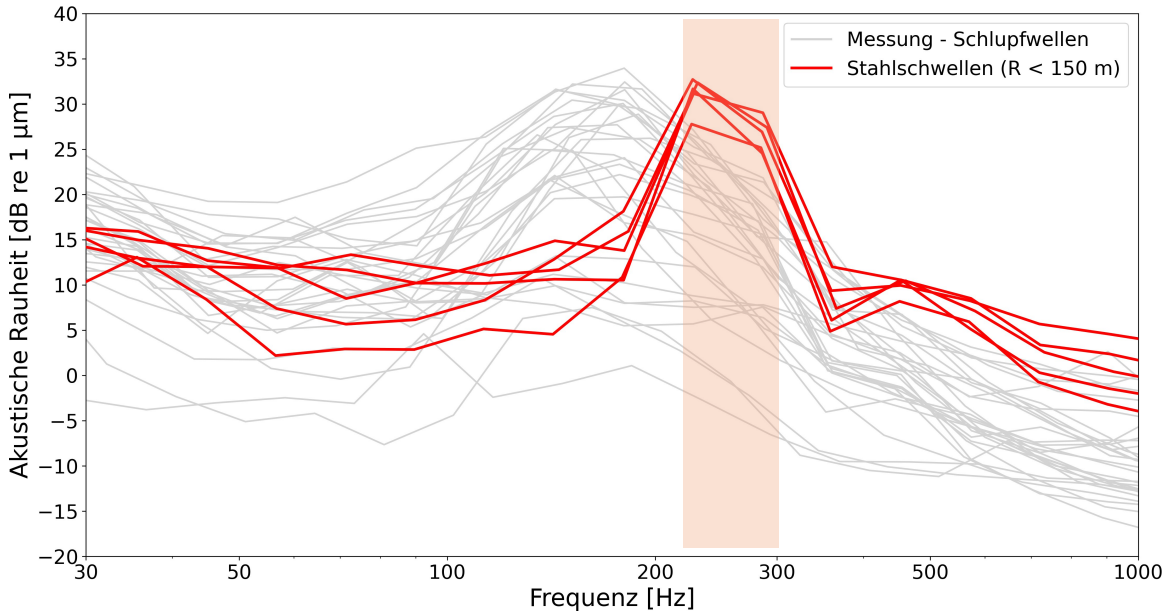


Feldmessungen

Die Eigenfrequenzen und Schwingungsformen von Oberbau und Radsätzen wurden mittels Impulshammermessungen bestimmt und den Frequenzen der Schlupfwellen gegenübergestellt.

- Auf der Fahrzeugseite zeigen Biegemoden der Radsätze die beste Übereinstimmung.
- Auf der Fahrwegseite sind die vertikale Oberbauresonanz und die laterale Schiene-Zwischenlage-Resonanz die nächstliegenden Moden.

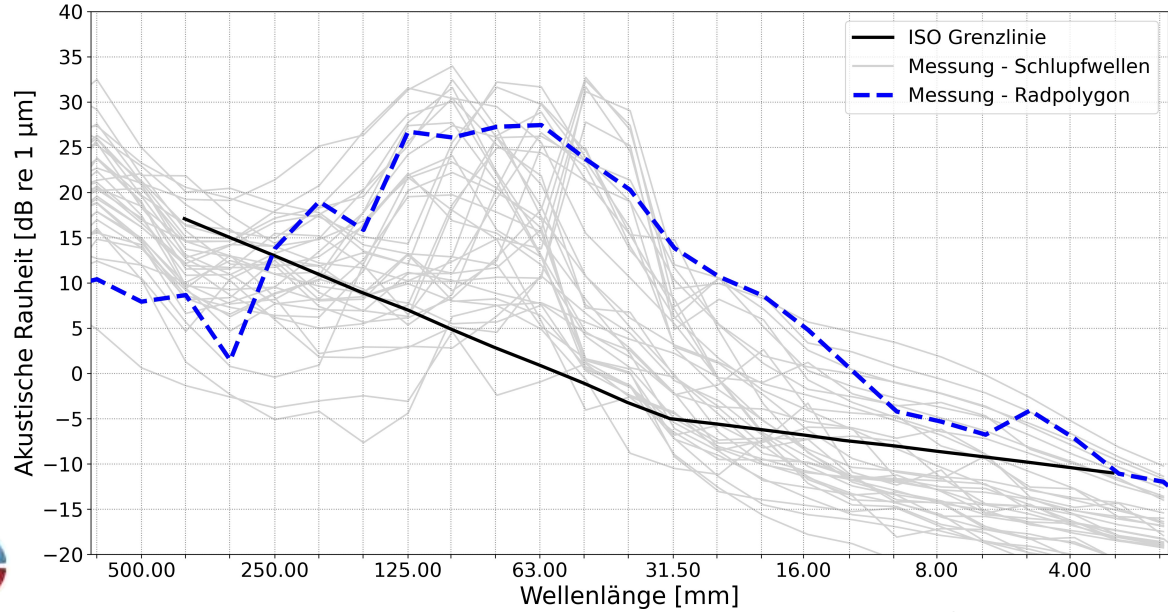


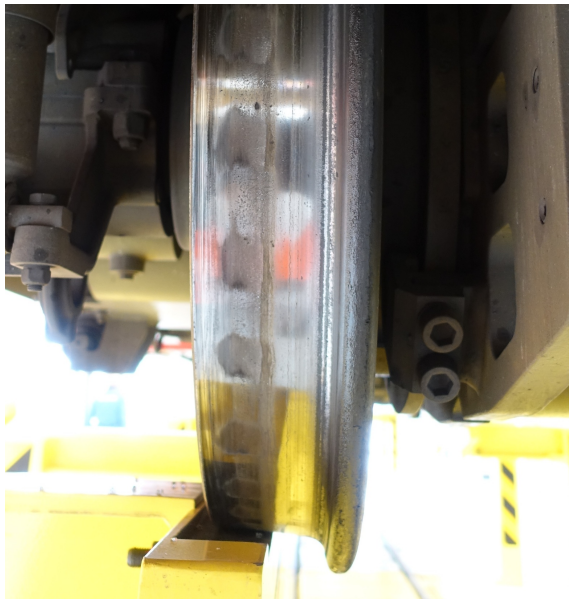


Feldmessungen

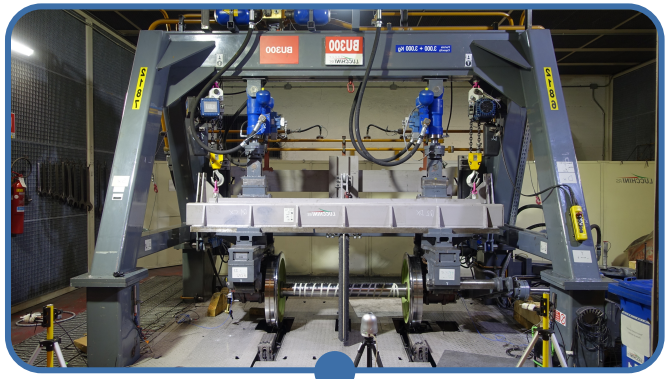
Radpolygone wurden an den Laufflächen von Adhäsions- und Zahnradtriebdrehgestellen gemessen und mit den gemessenen Schlupfwellen verglichen.

- Die Rauheitsverteilung der Radpolygone erstreckt sich über denselben Wellenlängenbereich wie die der Schlupfwellen (ca. 30–125 mm).
- Die Polygone sind zur Feldseite des Rades verschoben. Das entspricht der Kontaktposition auf der bogeninneren Schiene in engen Bögen.
- Das deutet auf einen gemeinsamen Entstehungsmechanismus hin, der bei Bogenfahrt in engen Bögen auf der bogeninneren Schiene wirkt.





Agenda



Motivation

Stand der Forschung

Feldmessungen

Laborversuche

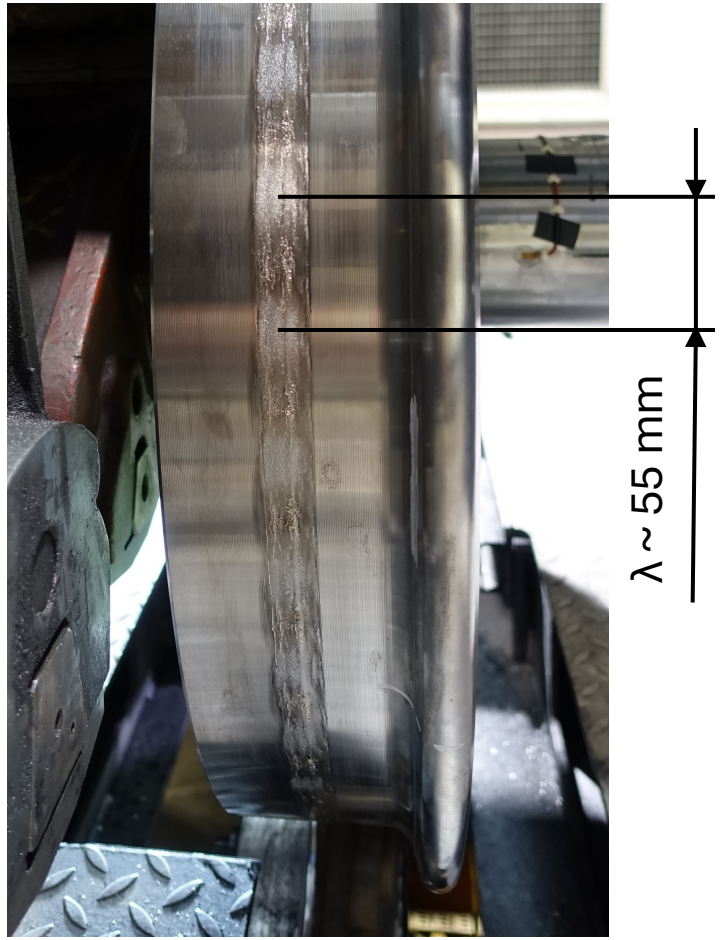
Simulation

Ergebnisse &
nächste Schritte

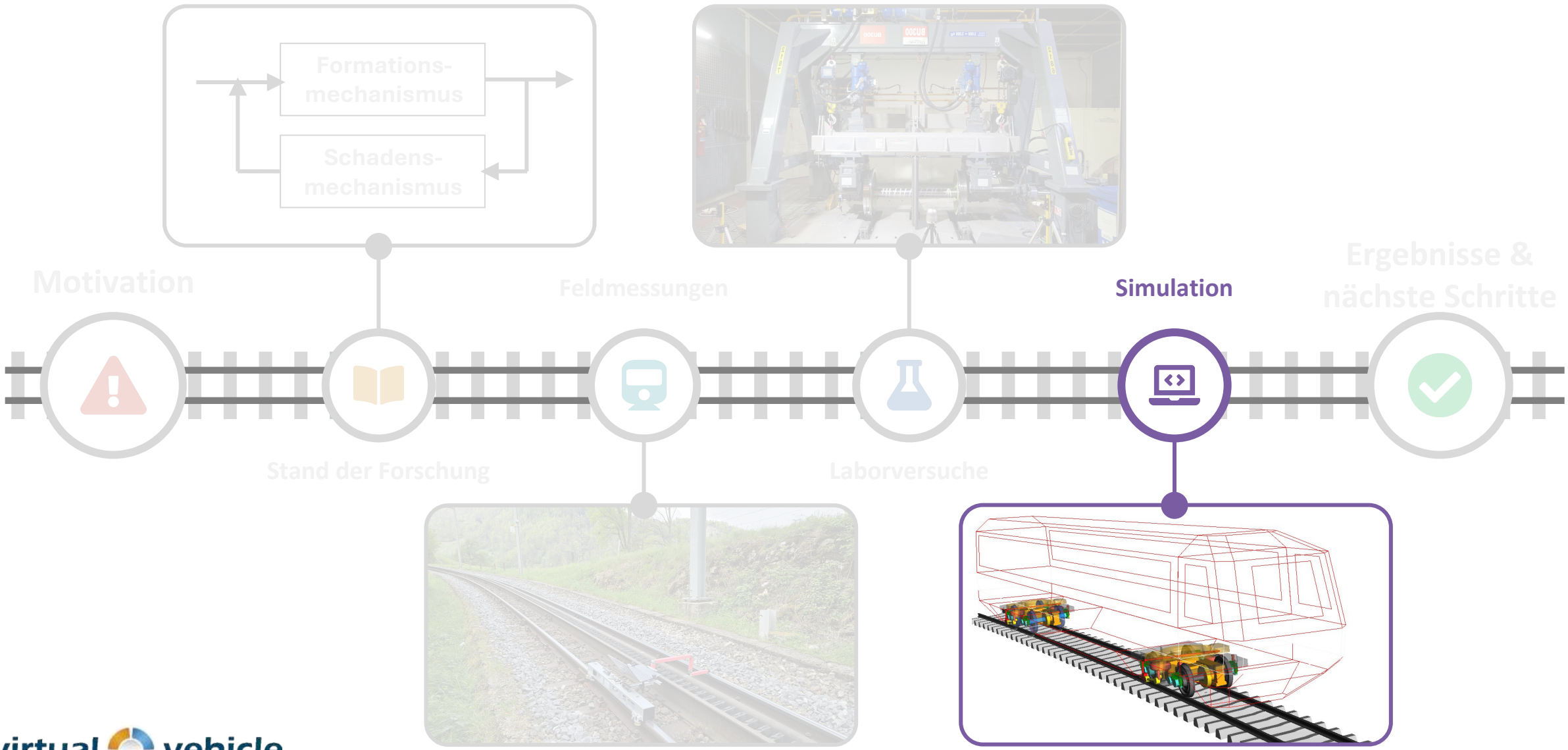
Laborversuche

Die aus Feldmessungen und Literatur abgeleitete Hypothese zur Entstehung von Radpolygonen und Schlupfwellen wurde unter kontrollierten Bedingungen am 1:1-Rollenprüfstand BU300 (Lucchini RS S.p.A.) vertieft untersucht:

- Radpolygone und Schlupfwellen wurden in stationären Bogenfahrversuchen an Radsatz- und Schienenrädern reproduziert. Die gemessenen Wellenlängen von 25-80 mm stimmen gut mit dem Feld überein.
- Mittels Impulshammermessungen an Radsatz und Schienenrädern wurden die gemessenen Wellenlängen den Biegeeigenformen des Radsatzes und den lateralen Eigenformen der Schienenräder zugeordnet, analog zu den Feldmessungen.
- Als wahrscheinlichste Anregungsquelle wurde die Ausgangsrauheit nach dem Reprofilieren identifiziert.



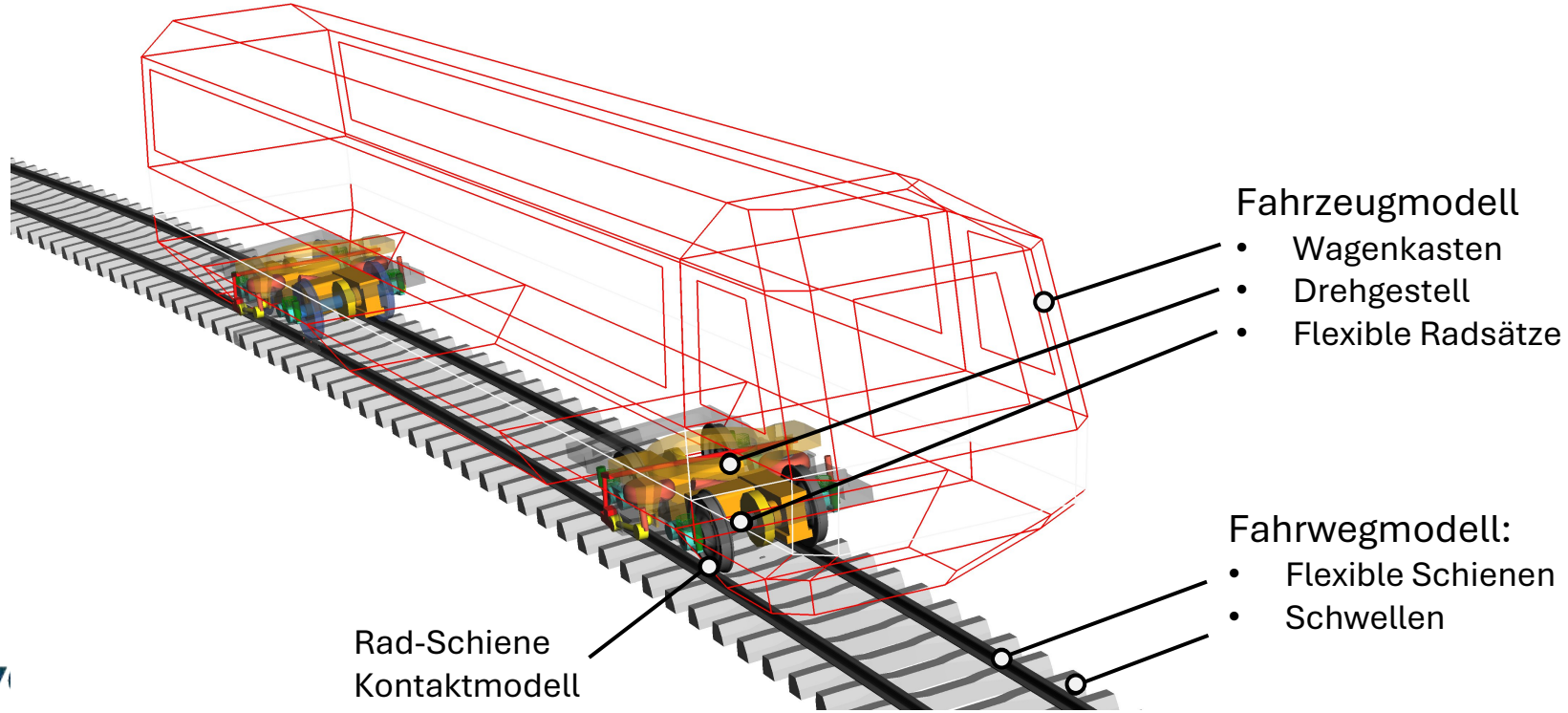
Agenda


Formations-
mechanismus
Schadens-
mechanismus
Motivation
Stand der Forschung
Feldmessungen
Laborversuche
Simulation
Ergebnisse &
nächste Schritte

Simulation

Simulationskette zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen und zur Bewertung von Minderungsmaßnahmen, bestehend aus:

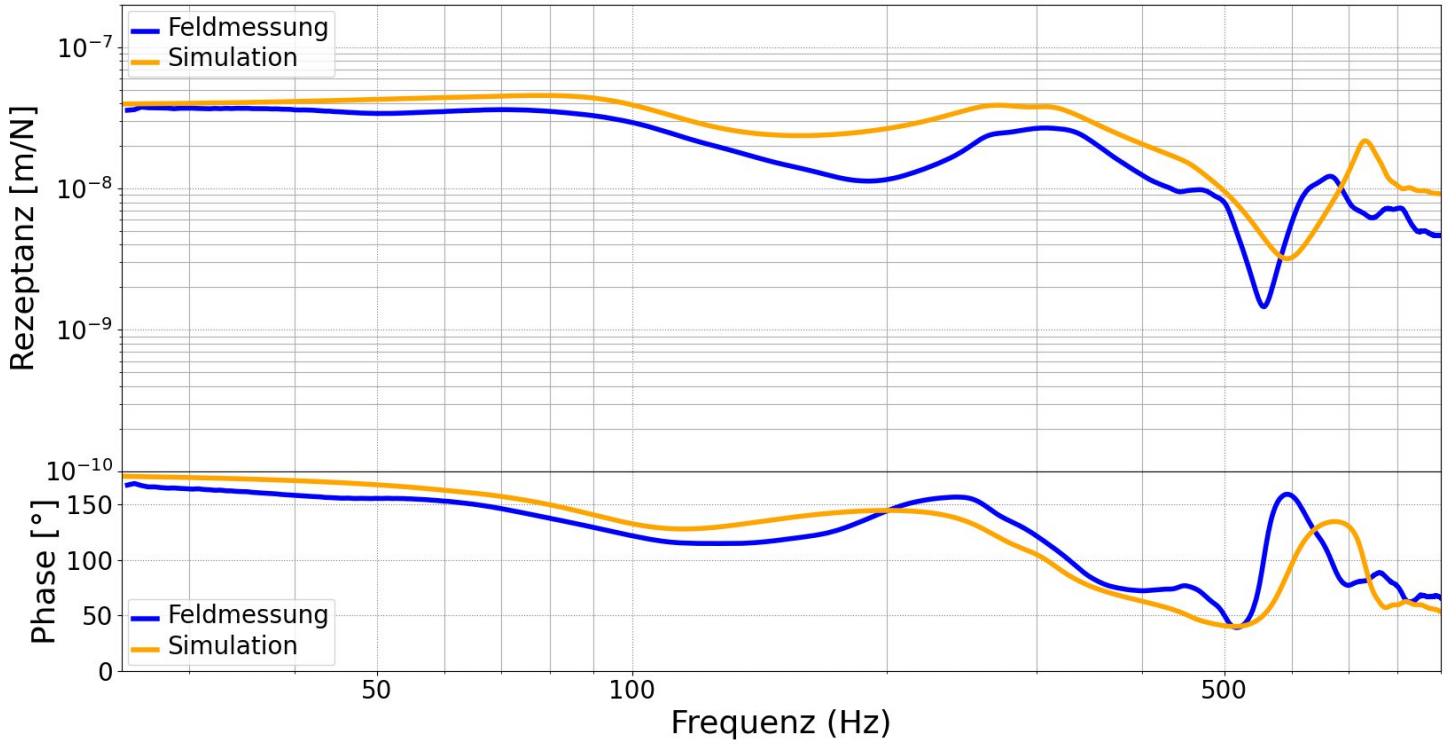
- Mehrkörpersimulation (MKS) im Zeitbereich, mit Radsätzen und Schienen als flexible Körper.
- Berechnung des Materialabtrags durch Verschleiß aus den MKS-Ergebnissen.
- Ermittlung der wachstumsfähigen Wellenlängen mittels Entwicklungstendenzkurven (ETC).



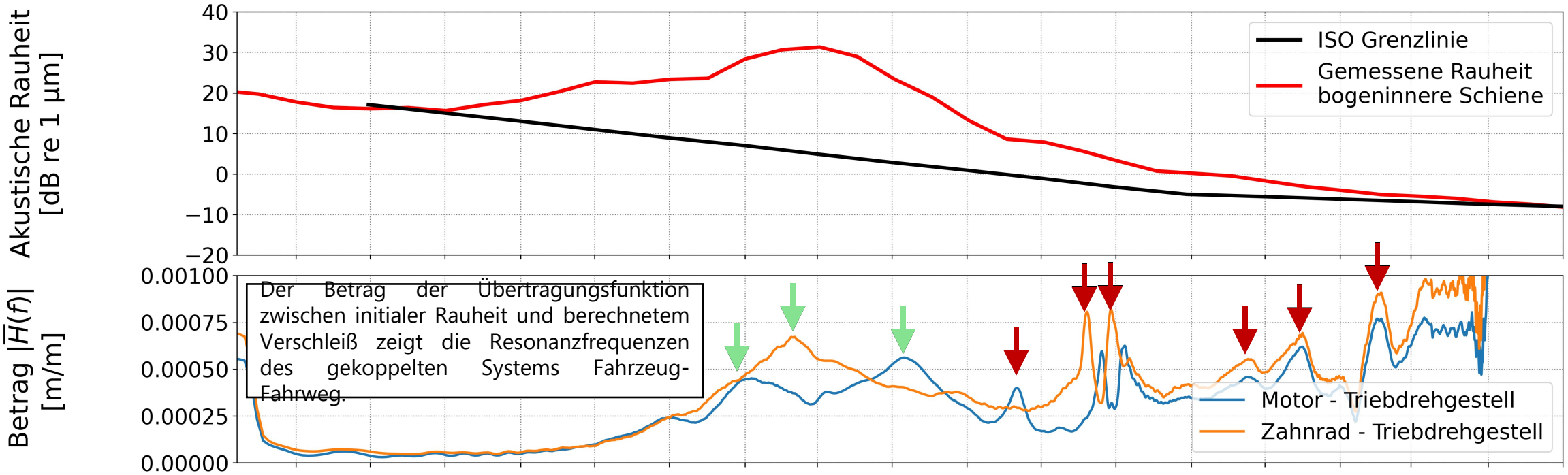
Simulation

Die strukturdynamischen Eigenschaften von Radsätzen und Oberbau wurden aus den Impulshammermessungen der Feldkampagne im Modell nachgebildet.

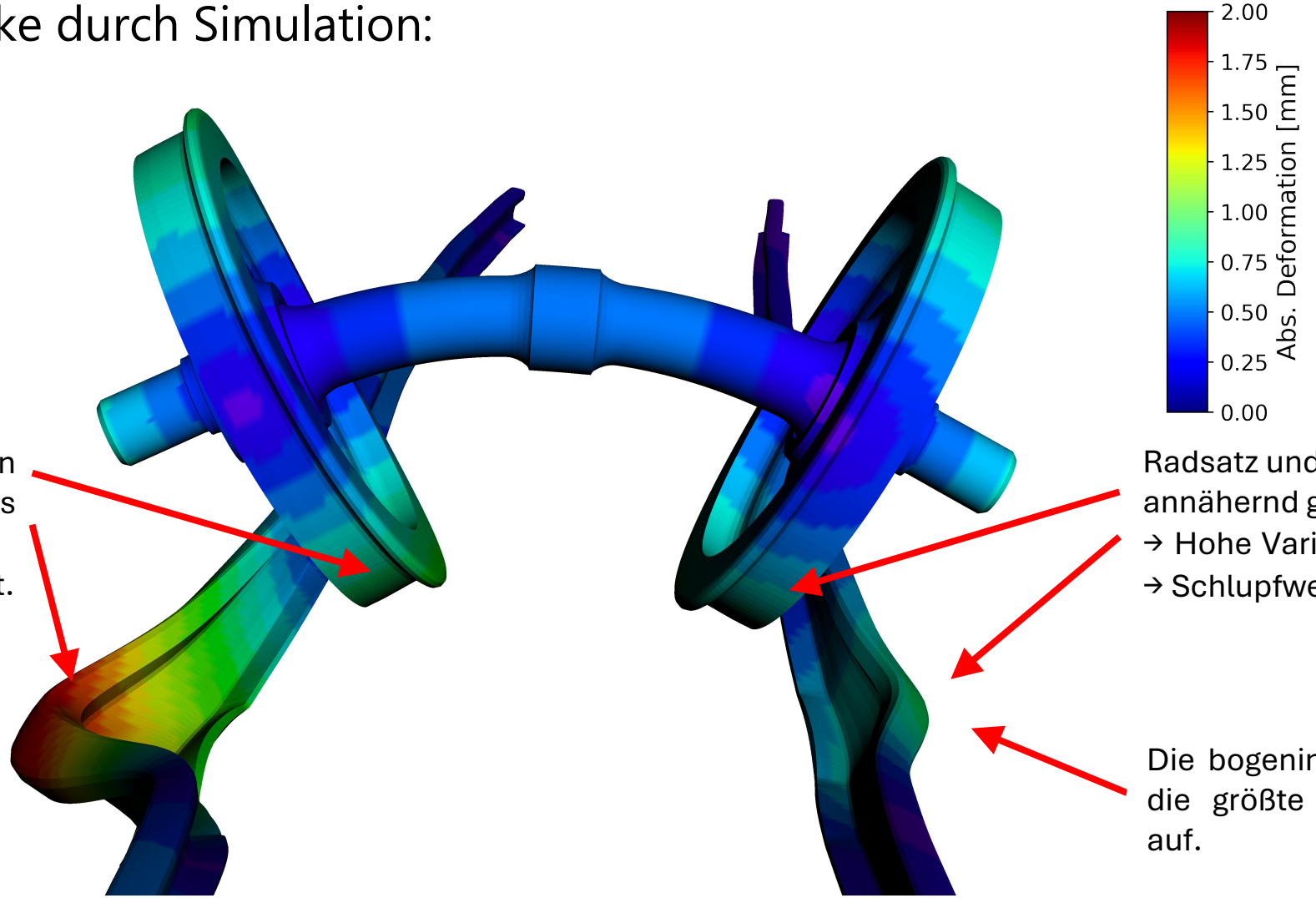




Validierung: Vergleich mit gemessenen Schlupfwellen



Vertiefte Einblicke durch Simulation:



Radsatz und Schiene schwingen aufgrund des Spurkranzkontakts annähernd in Phase
→ Geringe Variation der Reibarbeit.

Radsatz und Schiene schwingen annähernd gegenphasig
→ Hohe Variation der Reibarbeit
→ Schlupfwellen / Polygone

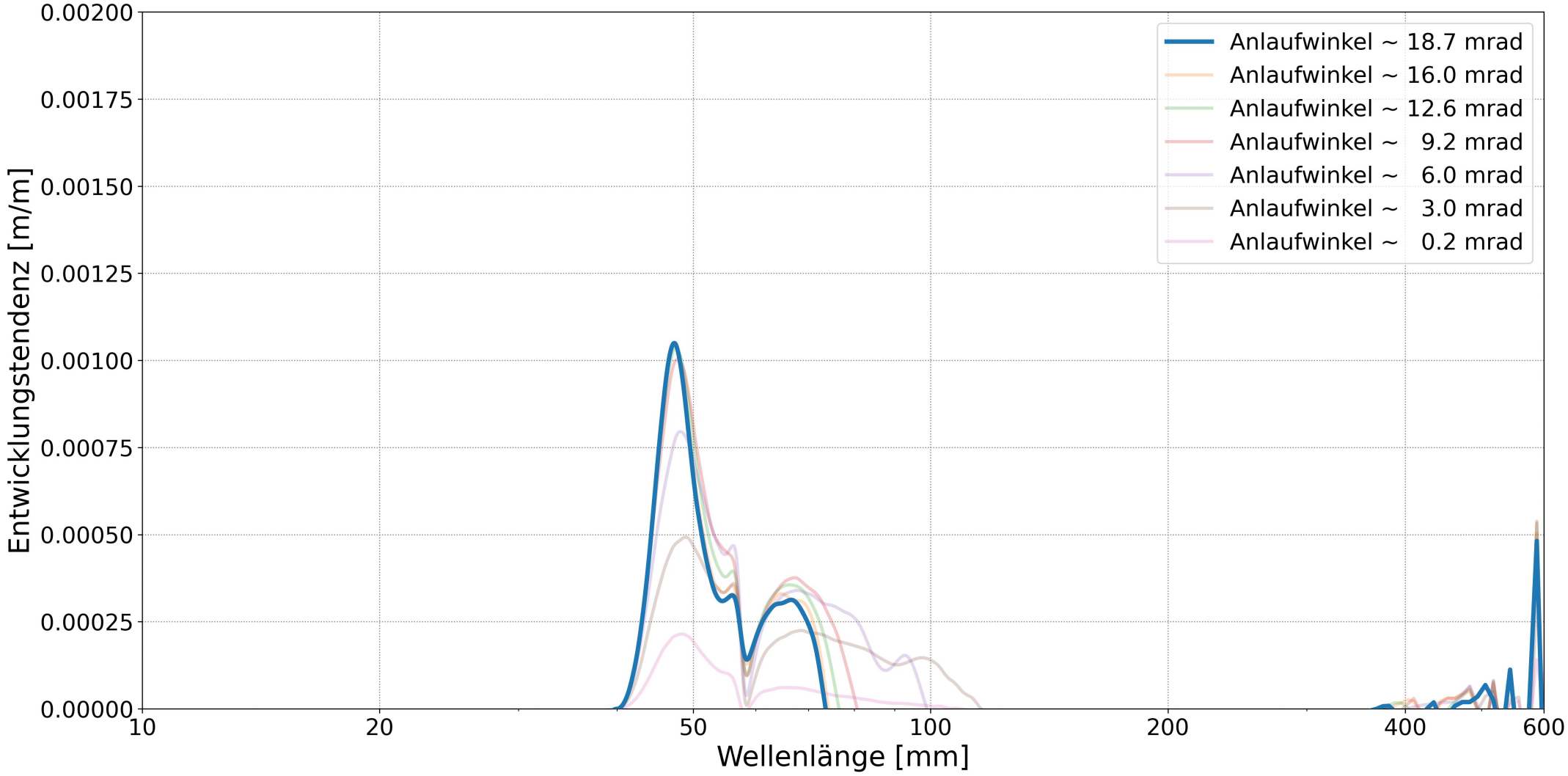
Die bogeninnere Schiene weist die größte laterale Bewegung auf.

Bogenäußere Schiene

Bogeninnere Schiene

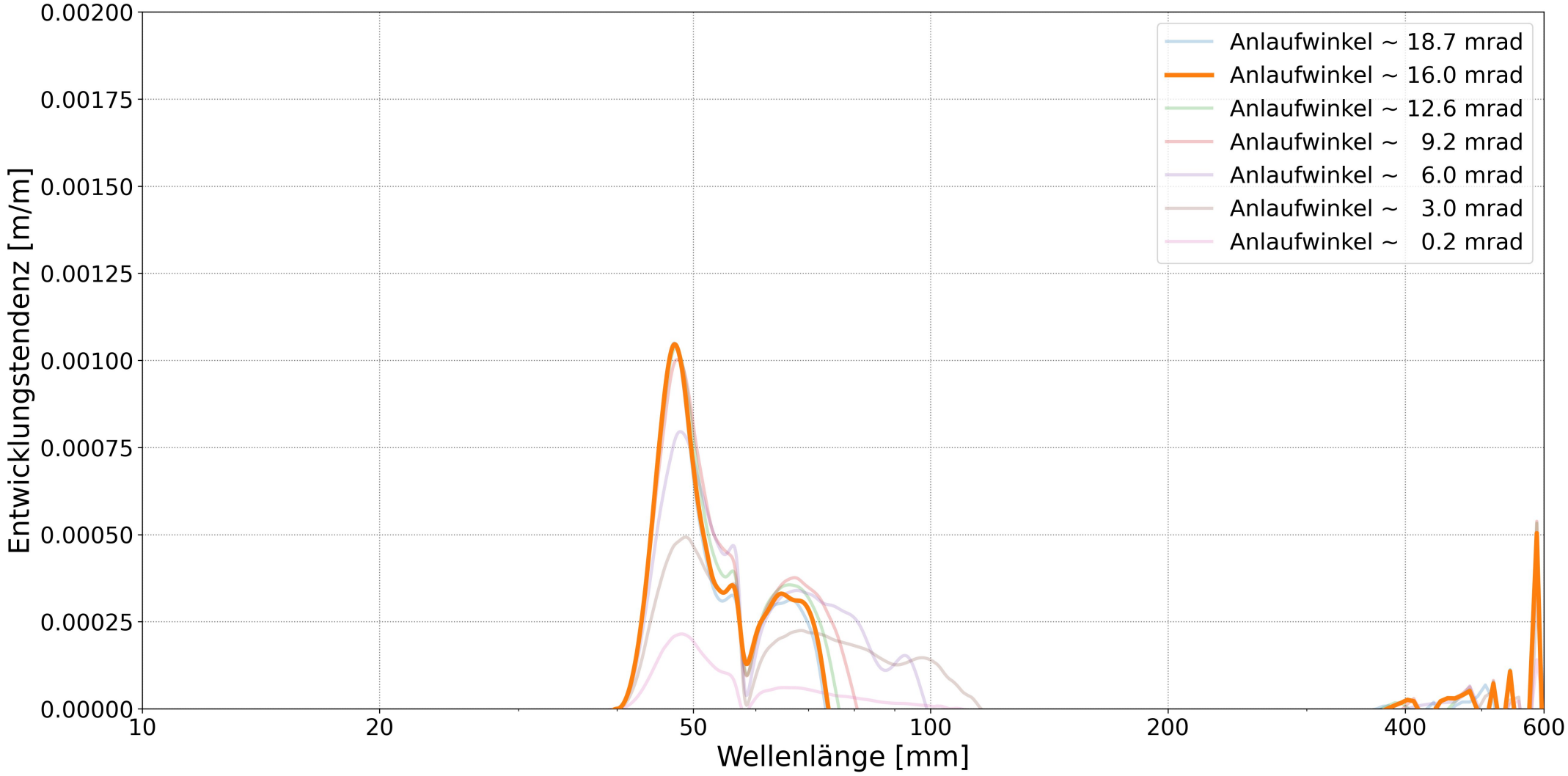
Simulation

Parameterstudie: Einfluss des Anlaufwinkels (R = 110 m)



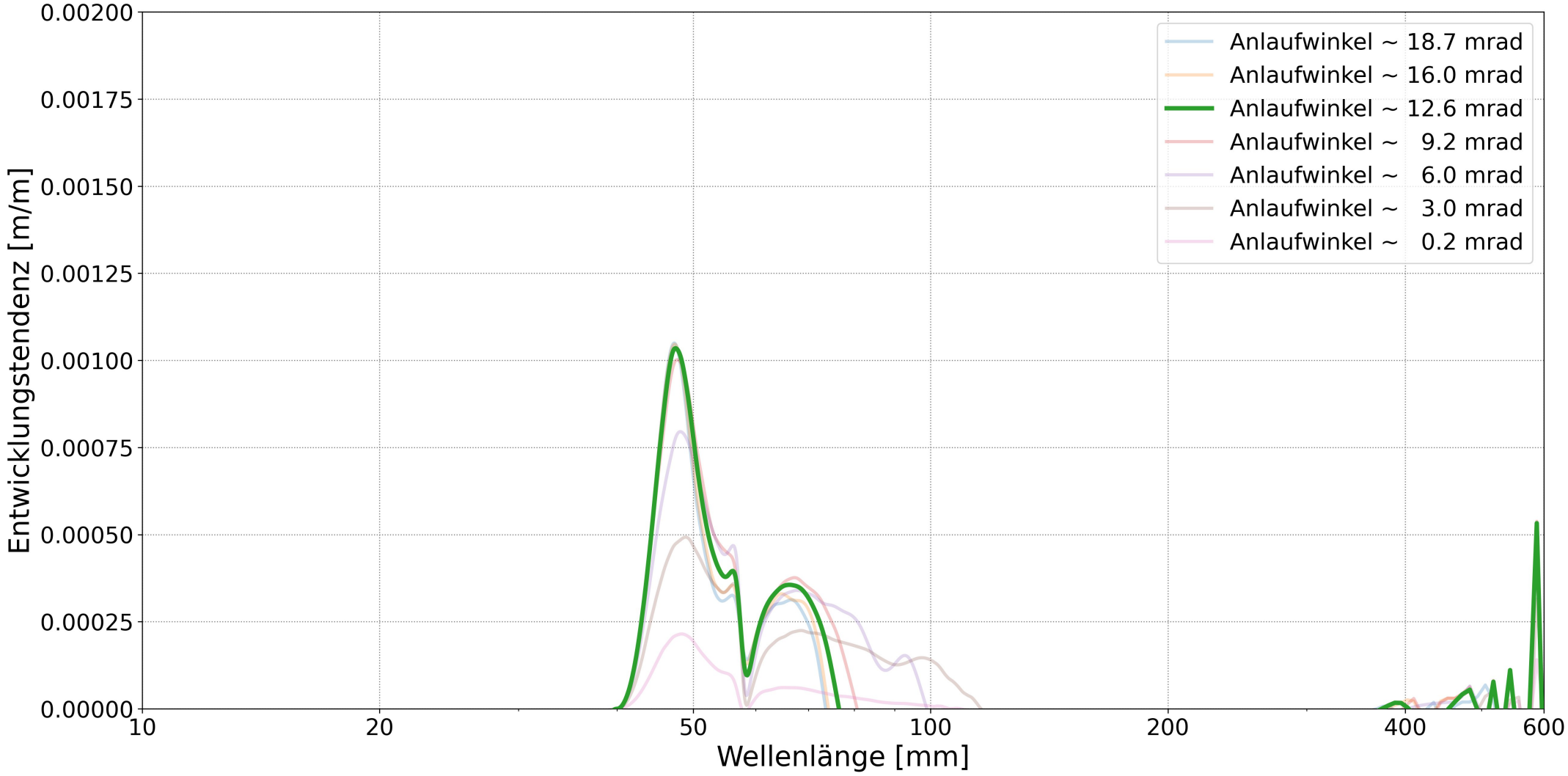
Simulation

Parameterstudie: Einfluss des Anlaufwinkels (R = 110 m)



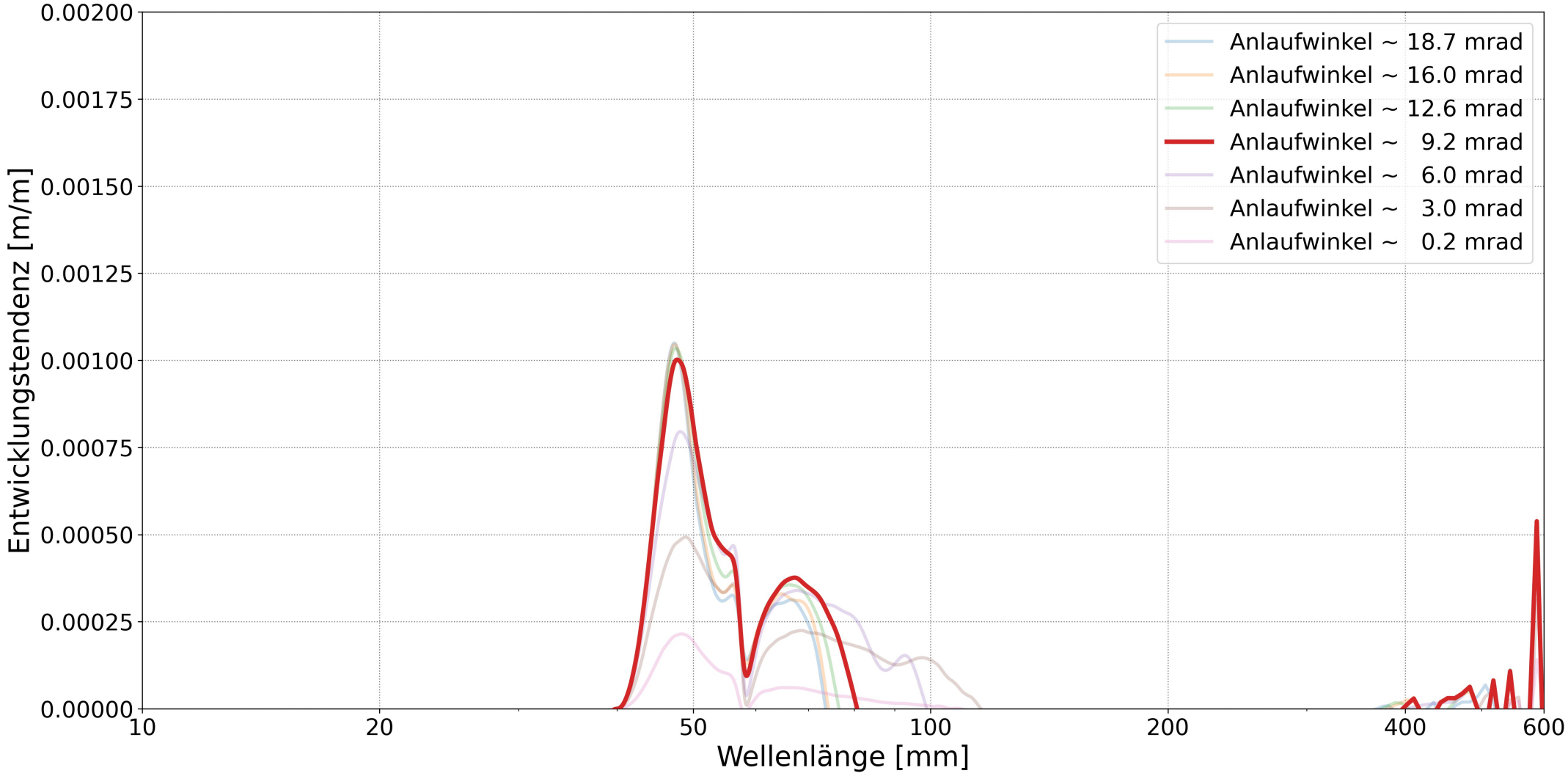
Simulation

Parameterstudie: Einfluss des Anlaufwinkels (R = 110 m)



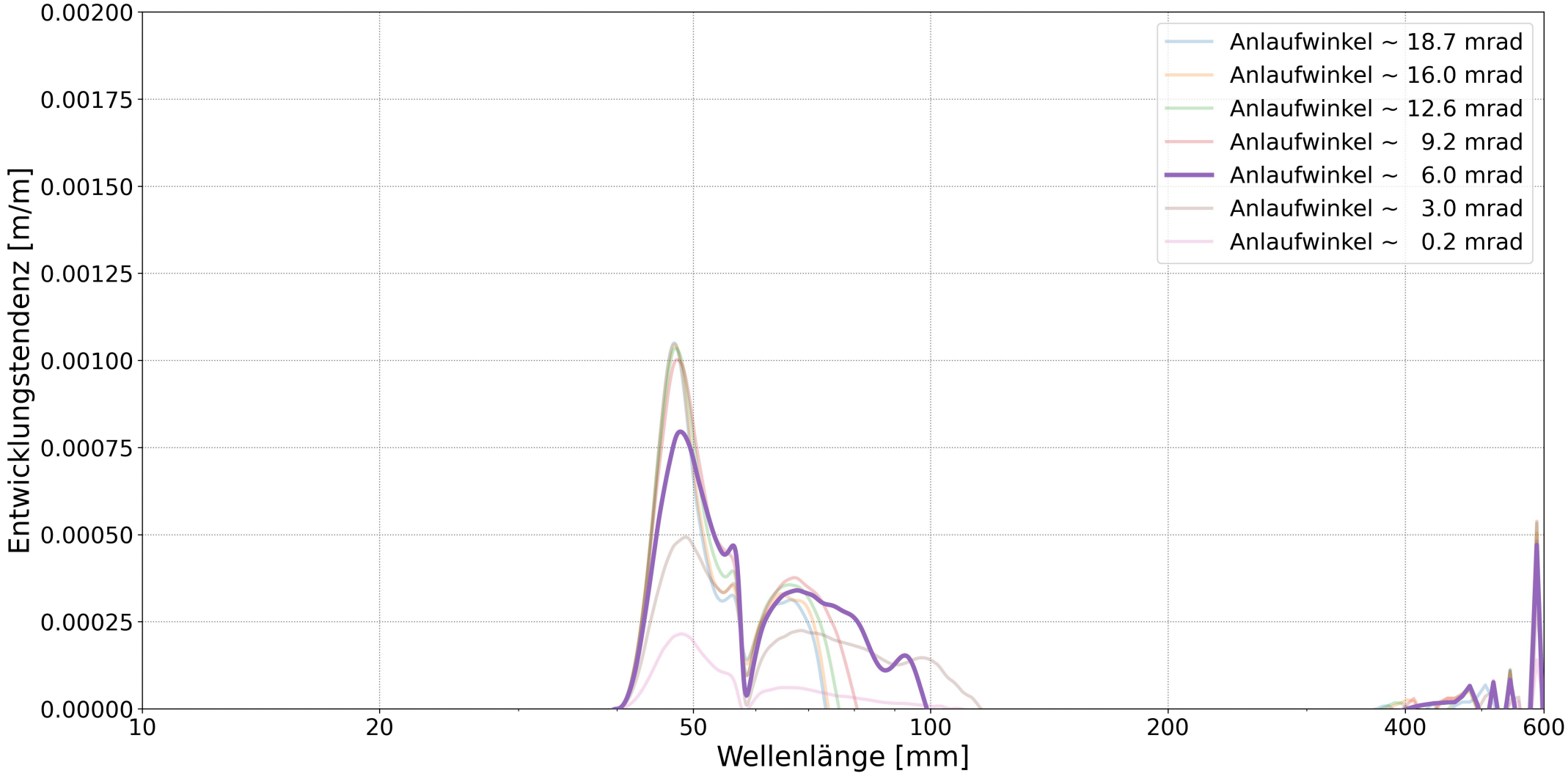
Simulation

Parameterstudie: Einfluss des Anlaufwinkels (R = 110 m)



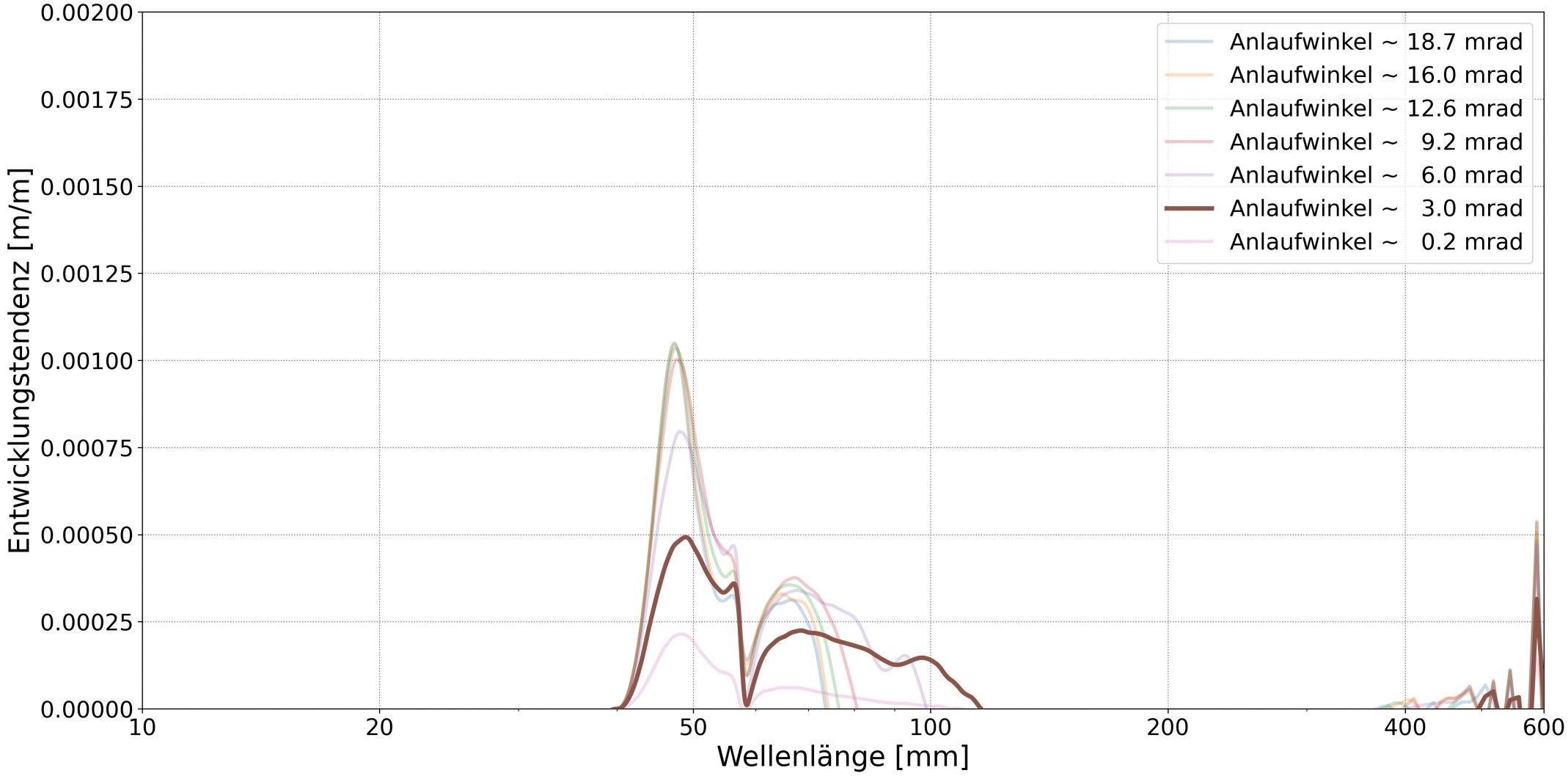
Simulation

Parameterstudie: Einfluss des Anlaufwinkels (R = 110 m)



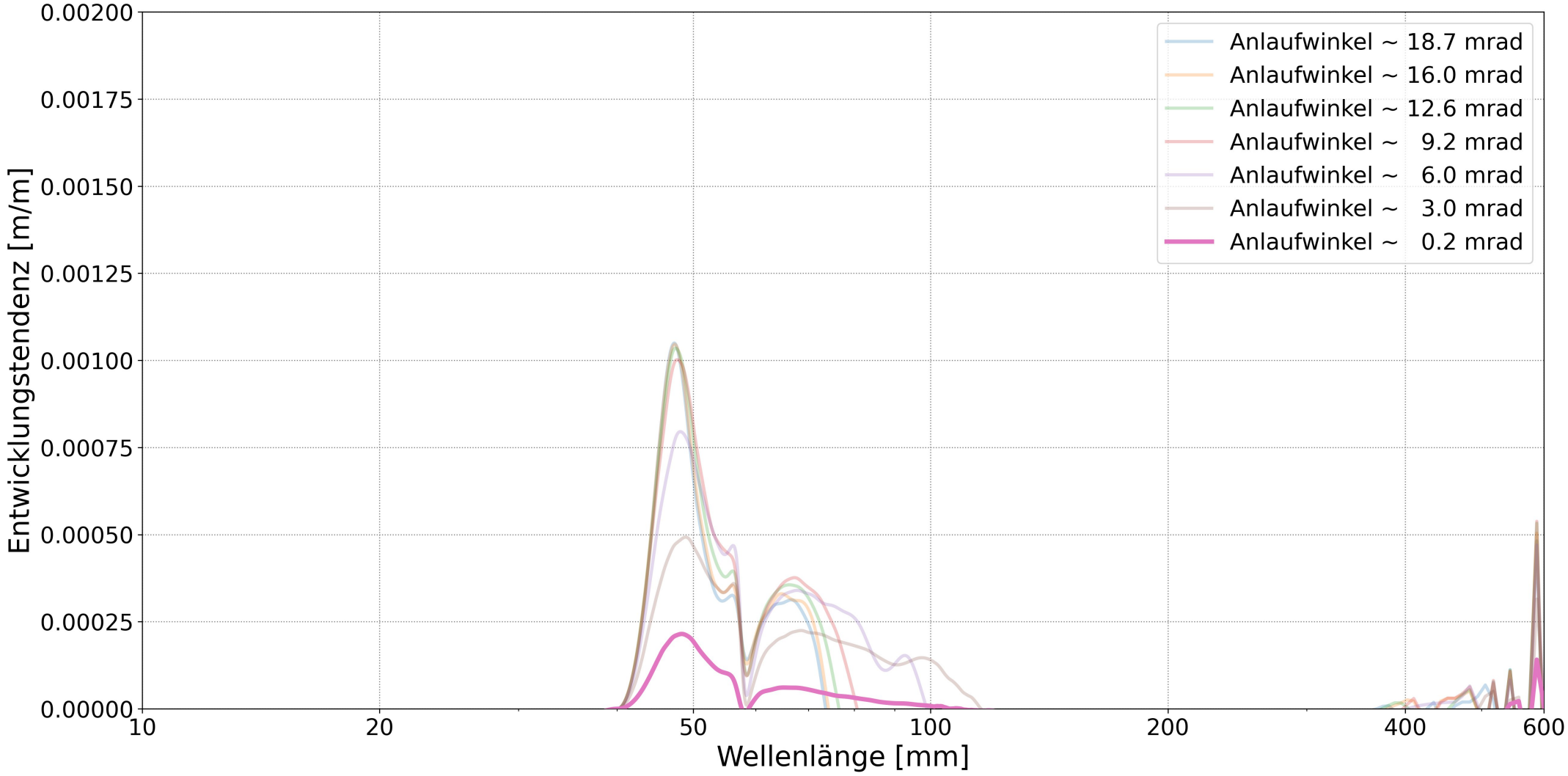
Simulation

Parameterstudie: Einfluss des Anlaufwinkels (R = 110 m)



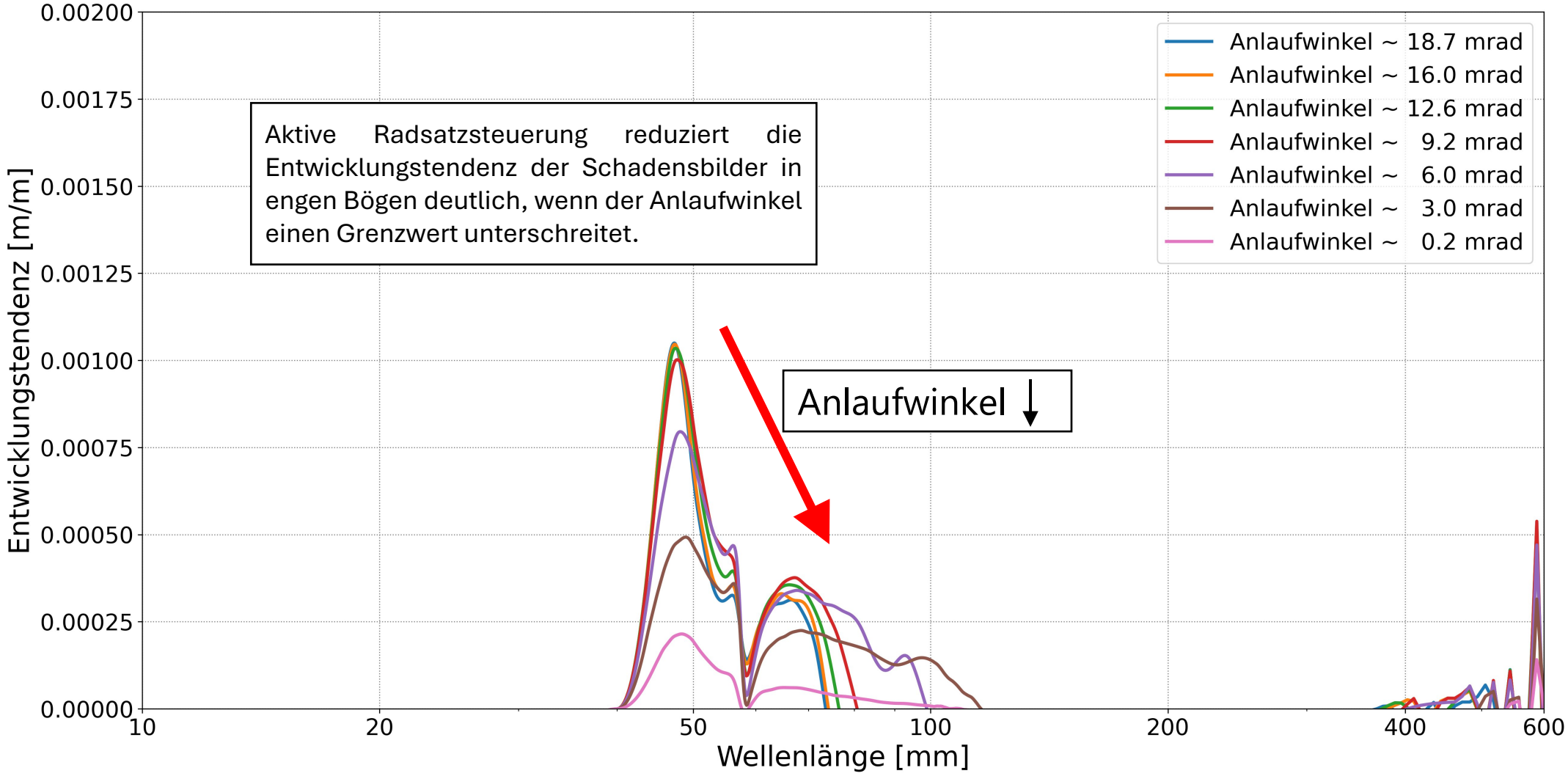
Simulation

Parameterstudie: Einfluss des Anlaufwinkels (R = 110 m)



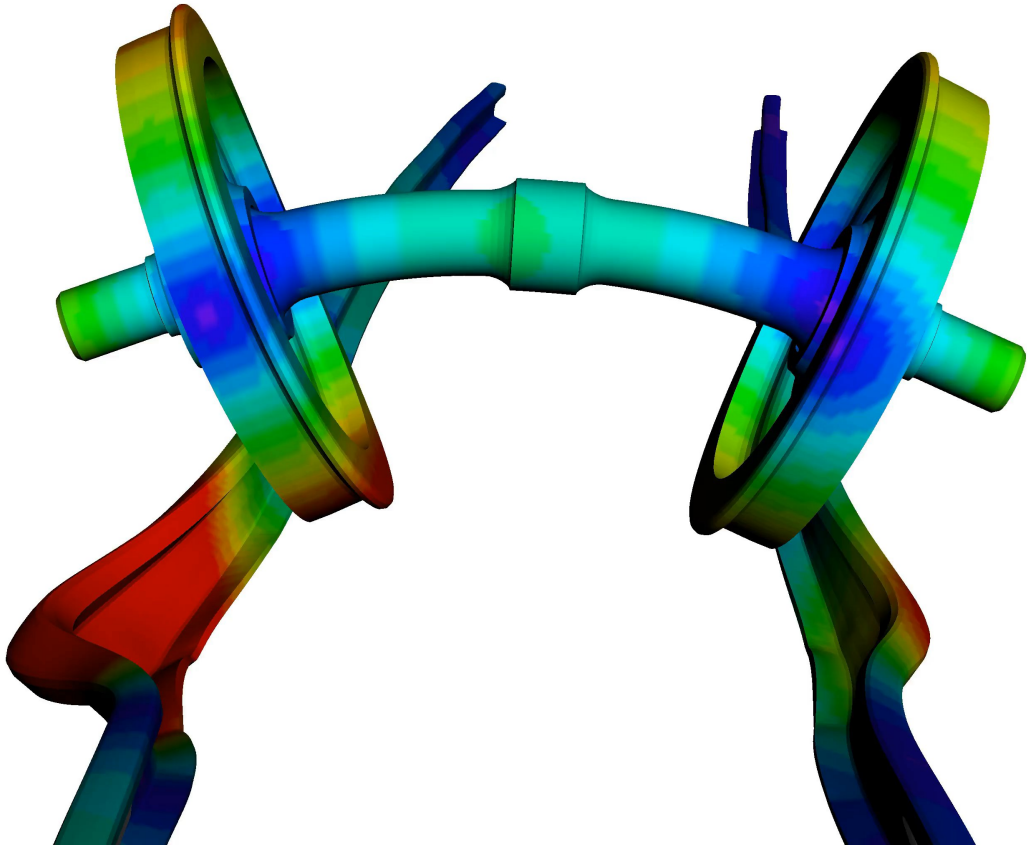
Simulation

Parameterstudie: Einfluss des Anlaufwinkels (R = 110 m)



Parameterstudie: Einfluss des Anlaufwinkels (R = 110 m)

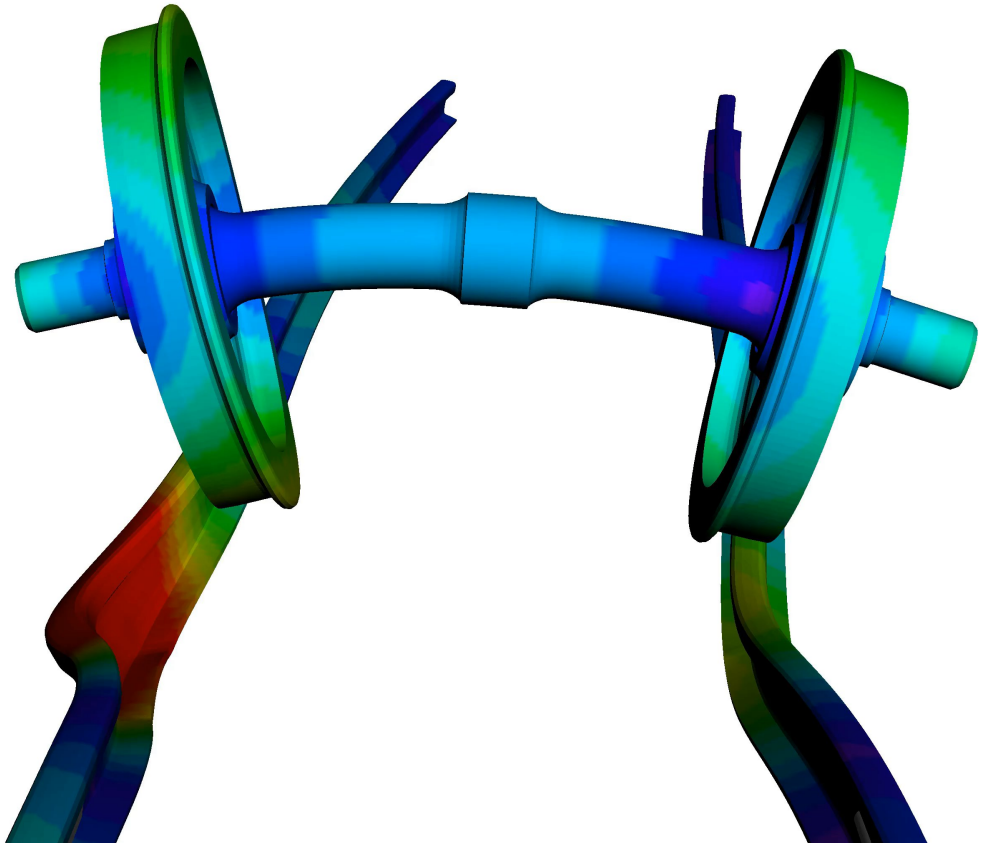
Ist Zustand: AoA ~ 18.5mrad



Bogenäußere Schiene

Bogeninnere Schiene

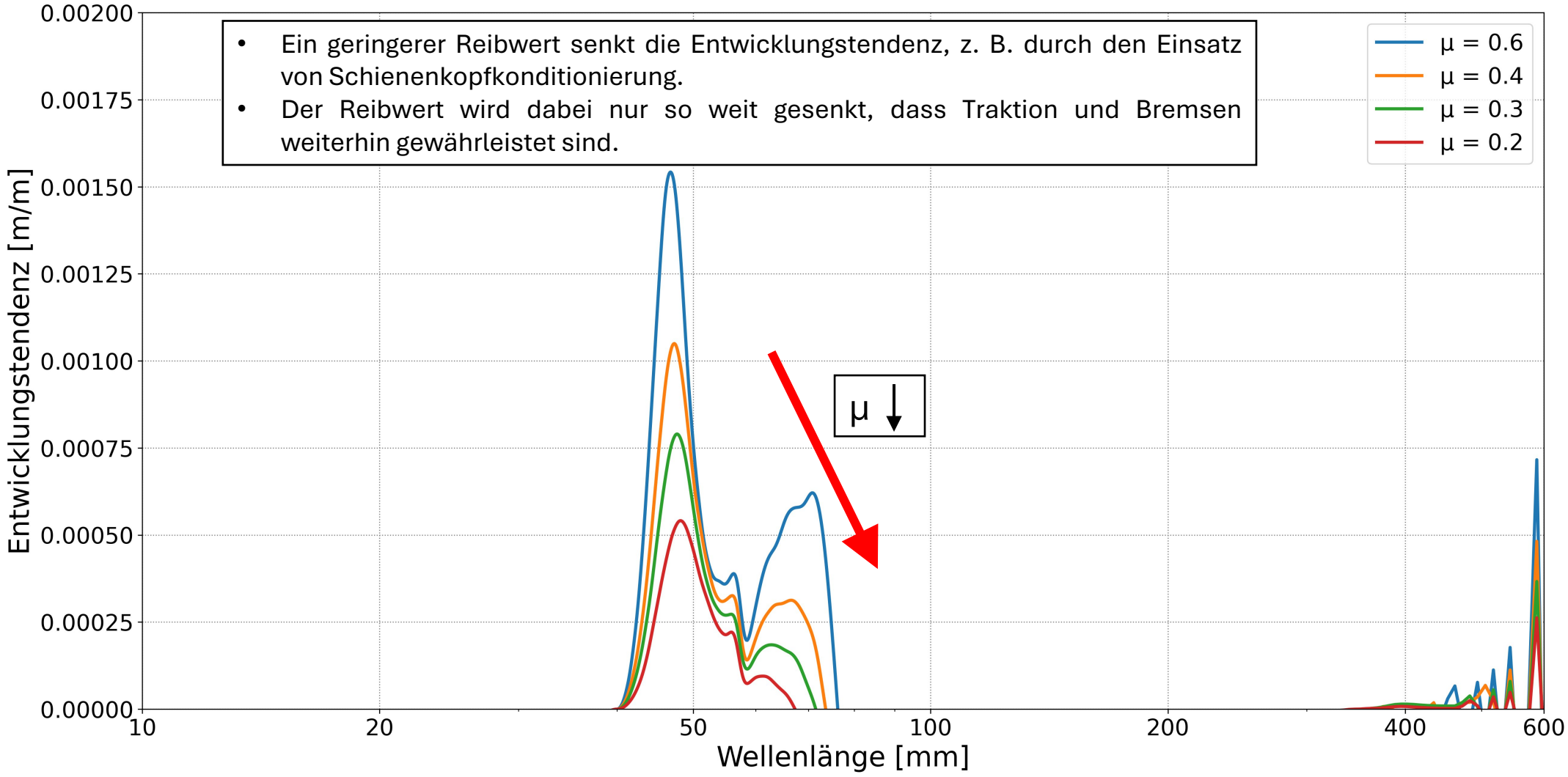
Aktive Radsatzsteuerung: AoA ~ 0.25mrad



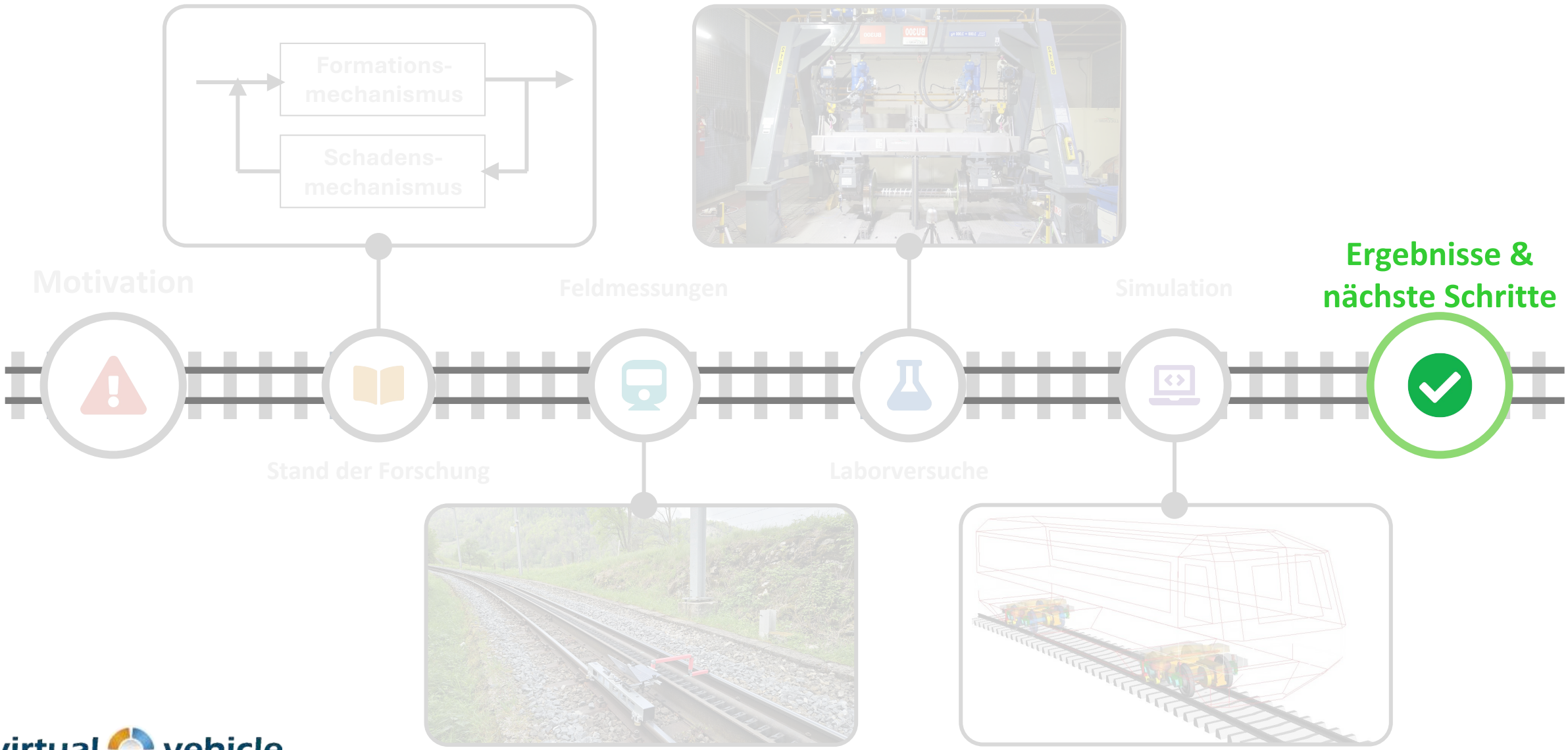
Bogenäußere Schiene

Bogeninnere Schiene

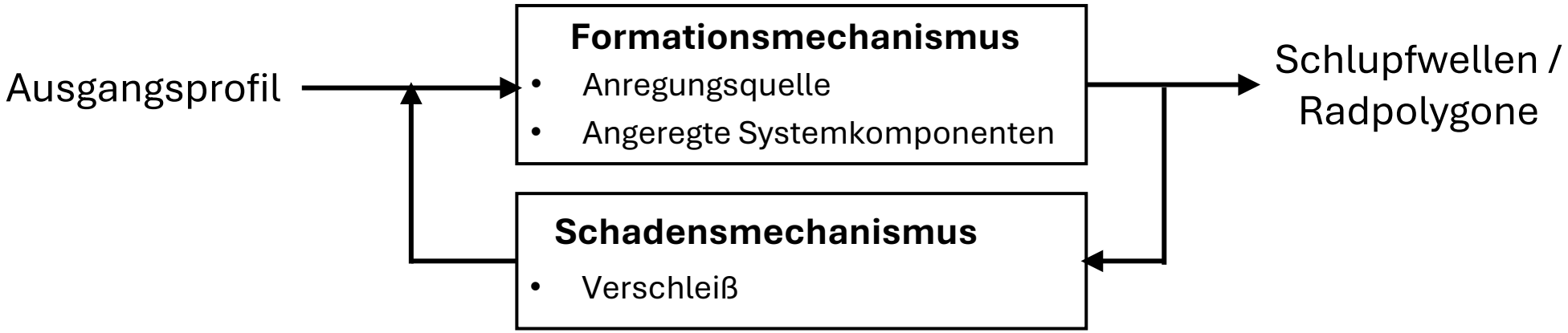
Simulation


• Ein geringerer Reibwert senkt die Entwicklungstendenz, z. B. durch den Einsatz von Schienenkopfkonditionierung.
• Der Reibwert wird dabei nur so weit gesenkt, dass Traktion und Bremsen weiterhin gewährleistet sind.
μ = 0.6
μ = 0.4
μ = 0.3
μ = 0.2
μ ↓
Entwicklungstendenz [m/m]
0.00200
0.00175
0.00150
0.00125
0.00100
0.00075
0.00050
0.00025
0.00000
10
20
50
100
200
400
600
Wellenlänge [mm]

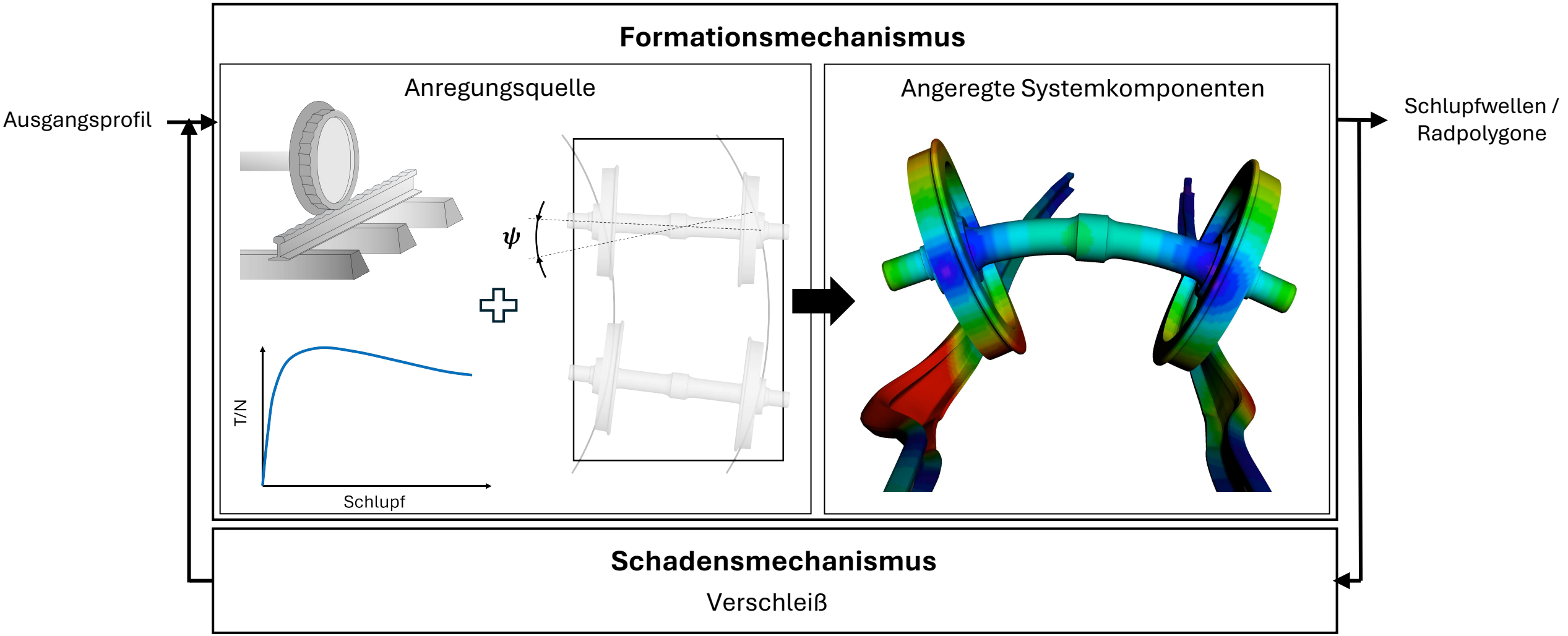
Agenda


Formations-
mechanismus
Schadens-
mechanismus
Motivation
Stand der Forschung
Feldmessungen
Laborversuche
Simulation
Ergebnisse &
nächste Schritte

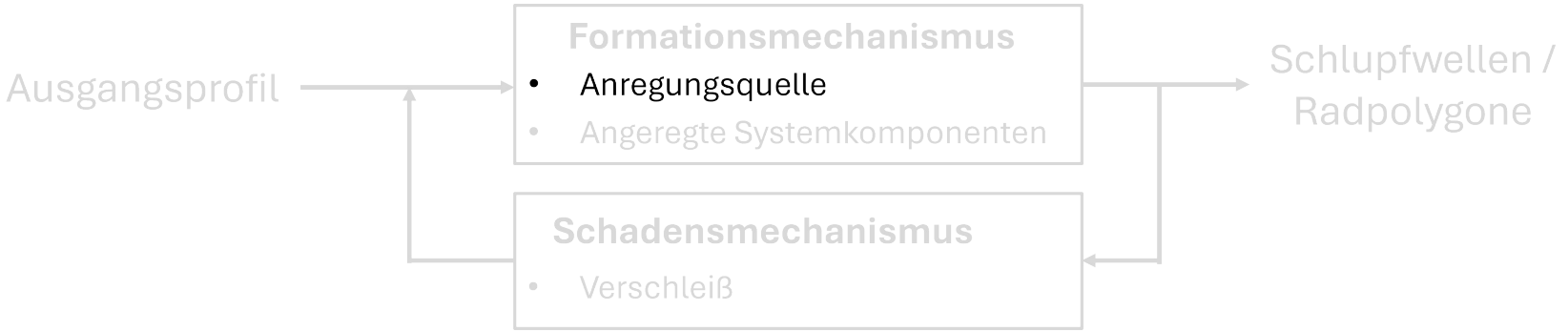
Ergebnisse & nächste Schritte



Ergebnisse & nächste Schritte

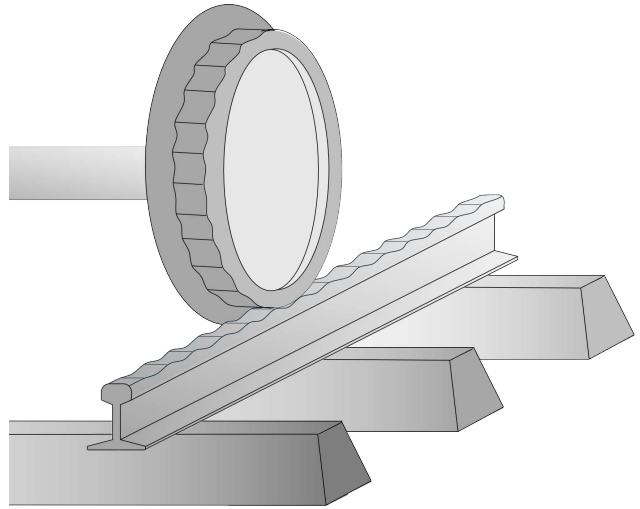


Ergebnisse & nächste Schritte

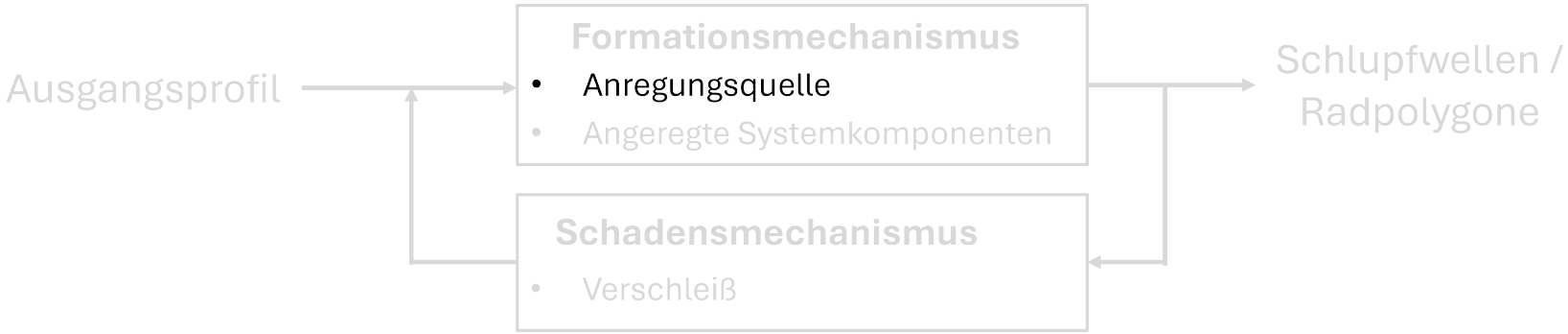


Interaktion Rad-Schiene:

- Die Oberflächenrauheit nach dem Schleifen bzw. Reprofilieren reicht aus, um Resonanzen des gekoppelten Systems Fahrzeug-Fahrweg während der Bogenfahrt anzuregen.
- Schlupfwellen können auch auf der bogenäußeren Schiene auftreten. Werden diese nicht geschliffen, kann das laut Feldmessungen und Simulationen die Entstehung von Schlupfwellen auf der bogeninneren Schiene beschleunigen.
- In Simulation und Feldversuchen wird derzeit der Einfluss asymmetrischer Schienenprofile in Kombination mit verschleißoptimierten Radprofilen und der zugehörigen optimalen Spurweite untersucht.

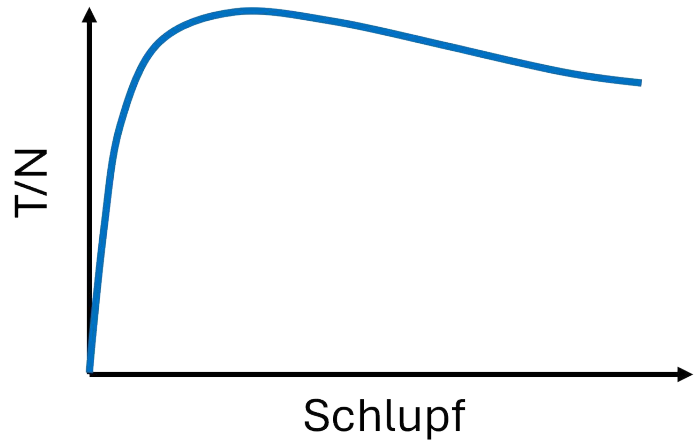


Ergebnisse & nächste Schritte

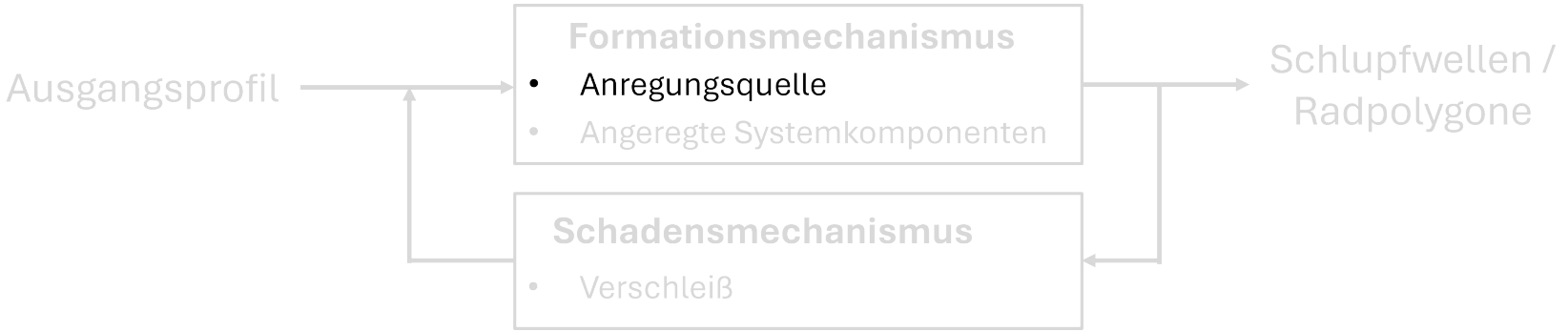


Kraftschlusscharakteristik:

- Die Oberflächenrauheit regt das System vertikal an. Über die Schlupfkräfte im Rad-Schiene-Kontakt wird diese Anregung in eine laterale Schwingung übertragen. Ein geringerer Reibwert reduziert die Schlupfkräfte und damit das Wachstum der Schadensbilder.
- „Falling Friction“ kann die Anregung verstärken, ist für die Entstehung aber nicht zwingend erforderlich.
- Schienenkopfkonditionierung auf der bogeninneren Schiene senkt gezielt den Reibwert und verringert so das Wachstum. Der Reibwert wird dabei nur so weit gesenkt, dass Traktion und Bremsen weiterhin gewährleistet sind.

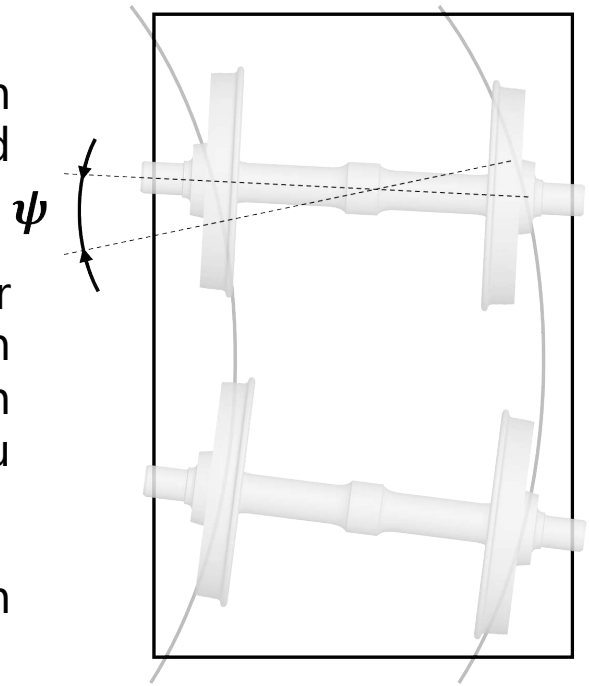


Ergebnisse & nächste Schritte

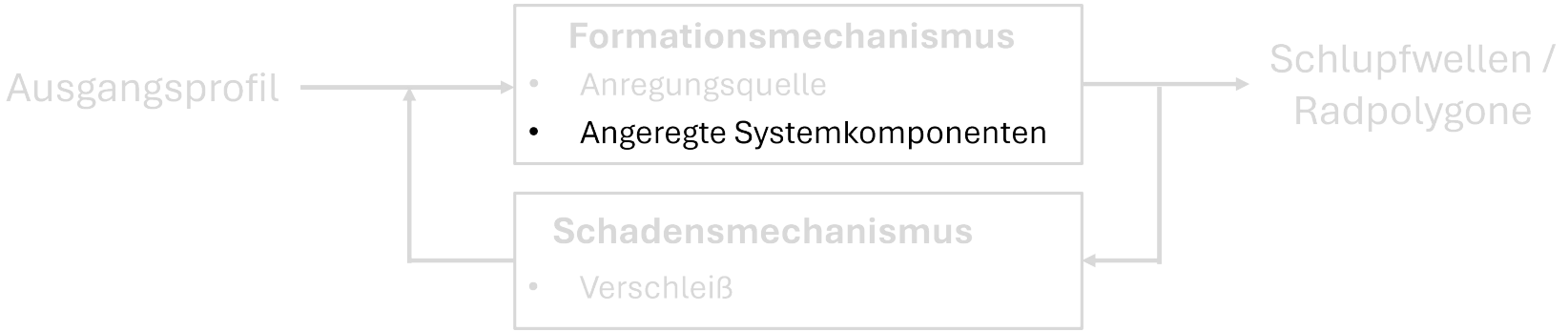


Anlaufwinkel:

- Rauheit und „Falling Friction“ führen vor allem dann zu schnellem Wachstum, wenn der Anlaufwinkel des führenden Radsatzes groß und der Kraftschluss dadurch gesättigt ist.
- Passive Systeme wie eine weichere Radsatzlängsführung oder hydraulische Achslenklager können den Anlaufwinkel in größeren Bögen (R > 200 m) so weit reduzieren, dass der Kontakt den Sättigungsbereich verlässt. Der Einfluss auf die Laufstabilität auf der Geraden ist dabei zu untersuchen.
- Aktive Radsatzsteuerung reduziert den Anlaufwinkel unabhängig vom Bogenhalbmesser. Die Erprobung an einem Versuchsträger ist geplant.

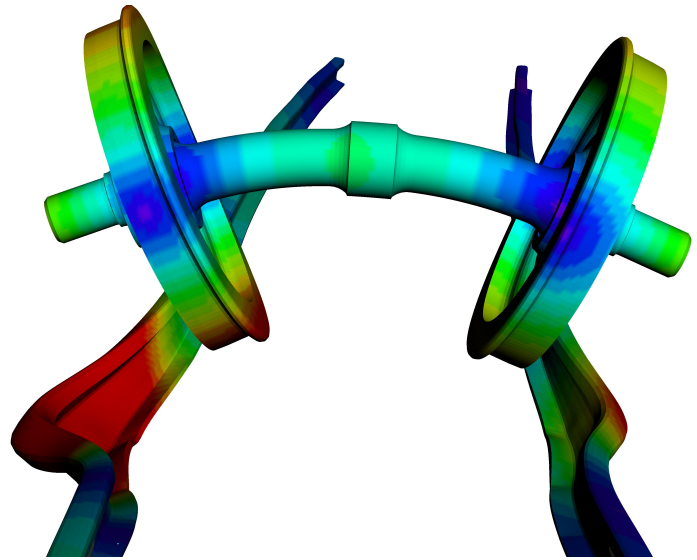


Ergebnisse & nächste Schritte

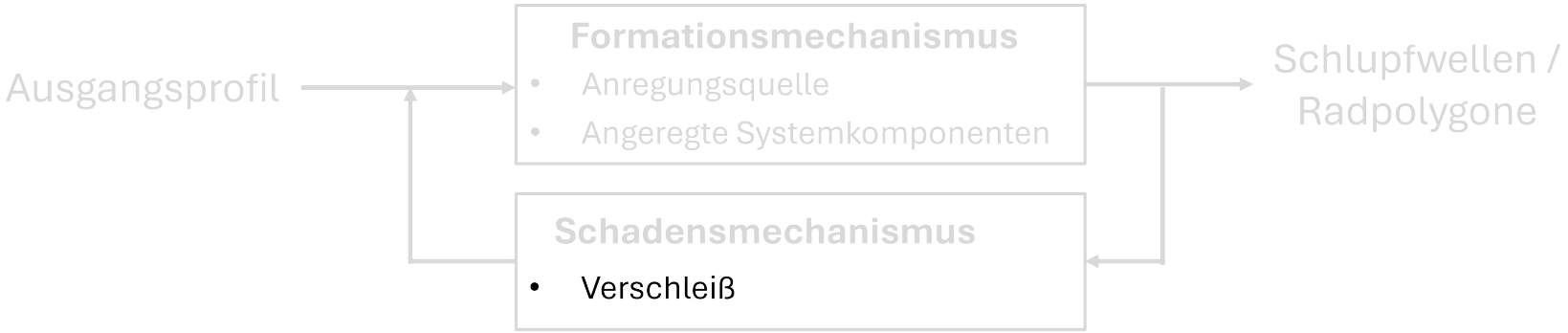


Angeregte Komponenten:

- Die Wellenlängen der Schadensbilder ergeben sich aus den Resonanzfrequenzen des gekoppelten Systems Fahrzeug-Fahrweg und der Betriebsgeschwindigkeit. Eine Modifikation dieser Komponenten kann das Wachstum beeinflussen.
- Erste Simulationsergebnisse zeigen ein reduziertes Wachstum mit geringerer Zwischenlagensteifigkeit und höherer Zwischenlagendämpfung. Die Wirksamkeit von Zwischenlagen-Steifigkeit und -Dämpfung wird im Feldversuch überprüft.



Ergebnisse & nächste Schritte



Werkstoffwahl:

- Schlupfwellen und Radpolygone entstehen durch Verschleiß. Ihre Wachstumsrate hängt daher direkt vom Verschleißverhalten der Werkstoffe ab.
- Höhere Schienenstahlgüten reduzieren nachweislich die Wachstumsrate von Schlupfwellen im Feld. Versuche zum Einfluss der Radstahlgüte auf Radpolygone stehen noch aus.

Danksagung

Diese Arbeit entstand an der Virtual Vehicle Research GmbH in Graz, Österreich. Die AutorInnen bedanken sich für die Förderung im Rahmen des COMET K2 Competence Centers for Excellent Technologies durch das Österreichische Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI), das Österreichische Bundesministerium für Wirtschaft, Energie und Tourismus (BMWET), das Land Steiermark (Abt. 12) sowie die Steirische Wirtschaftsförderung (SFG). Das Programm wird durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) abgewickelt. Ebenfalls danken sie den unterstützenden Industriepartnern RAILplus AG, Stadler Bussnang AG, voestalpine Rail Technology GmbH, voestalpine Railway Systems GmbH und Lucchini RS S.p.A. sowie dem Bundesamt für Verkehr (BAV) der Schweiz, das die RAILplus AG in diesem Projekt finanziell unterstützt hat.