

Moderne Lokomotiven und ihr Einfluss auf die Fahrwegbelastung

Wie moderne Universallokomotiven deutlich höhere Zugkräfte erreichen und dabei die Fahrwegbelastung reduzieren.

WERNER BREUER | MARTIN ROSENBERGER

Moderne Hochleistungslokomotiven werden für den europaweit grenzüberschreitenden Verkehr ausgelegt. Dabei ist besonders im Güterverkehr eine hohe und sicher reproduzierbare Reibwertausnutzung wichtig, da sie betrieblich hohe Zugkräfte ermöglicht: gemäß der Speditionsweisheit, dass „... mit dem letzten Wagen das Geld verdient wird ...“. Daraus ergeben sich Kompromisse, deren Einfluss auf die Fahrwegbelastung in letzter Zeit intensiv diskutiert wurden. Im Folgenden werden die durch die Traktionseigenschaften dominierten Schädigungsparameter für zwei Lokomotiven anhand von Anfahrversuchen und einer vertiefenden Untersuchung unter Zuhilfenahme von Simulationen analysiert.

Entwicklung der Traktionseigenschaften moderner Lokomotiven

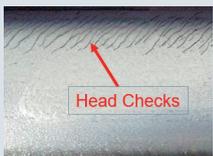
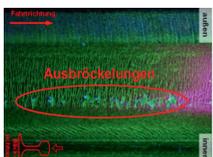
Die Einführung der Umrichter angesteuerten Drehstromantriebe ab den 1970er Jahren erlaubt es, Antriebsleistungen von mehr als 1 MW pro Radsatz zu realisieren. Das ermöglicht die Entwicklung von Universallokomotiven mit genügend hoher Antriebsleistung im schnellen Personenverkehr und gleichzeitig hohen Zugkräften beim Anfahren.

Die hohe Zugkraft ist betrieblich nur sinnvoll, wenn sie zuverlässig auf die Schiene gebracht werden kann. Eine Kennzahl, die das zu beurteilen hilft, ist der Quotient aus Zugkraft und Gewicht pro Radsatz, die sogenannte Reibwertausnutzung. Je höher die Reibwertausnutzung, umso riskanter ist es, die Zugkraft unter allen Betriebsbedingungen auf die Schiene zu bringen. Mit Betriebsbedingungen

sind dabei insbesondere Witterungseinflüsse und Schienenverschmutzung gemeint, aber auch die Fahrwiderstände infolge der Trassierung sind interessant, wie z. B. das Anfahren im engen Bogen bis zu einer Geschwindigkeit von 30 km/h.

Die Entwicklung der Reibwertausnutzung in den letzten Jahrzehnten ist in Abb. 1 dargestellt. Es zeigt sich klar die Tendenz hin zu höheren Reibwertausnutzungen mit einer Steigerung von ca. 20 % seit Einführung der Drehstrom-Lokomotiven.

Die Fortschritte in der Antriebsregelung ermöglichen es, die steigende Reibwertausnutzung betrieblich sicher umzusetzen. So haben die meisten modernen Drehstrom-Lokomotiven einzeln geregelte Fahrmotoren, wobei die Schlupfgeschwindigkeit des zugehörigen Radsatzes vorwiegend direkt geregelt wird.

		Mechanismus	Ursache	Merkmale	Modelle
Schienenverschleiß		<ul style="list-style-type: none"> Materialabtrag Plastische Verformung 	<ul style="list-style-type: none"> Gleiteffekte im Rad-Schiene-Kontakt: Reibarbeit 	<ul style="list-style-type: none"> Tritt verstärkt an Außenbahnschienen in engen Bögen auf 	<ul style="list-style-type: none"> Krause/Poll [1] Archard [2]
Head Checks		<ul style="list-style-type: none"> Rollkontaktermüdung Rissentstehung typischerweise an der Fahrkante 	<ul style="list-style-type: none"> Mechanische Belastung im Rad-Schiene-Kontakt 	<ul style="list-style-type: none"> Tritt verstärkt an Außenbahnschienen im Bogenradienbereich zwischen 700 m und 1500 m auf 	<ul style="list-style-type: none"> T-Gamma-Modell [3] Shake-Down Map [4] Ekberg Indizes [5] Wedge-Modell [6]
Ausbröckelungen		<ul style="list-style-type: none"> Rollkontaktermüdung Risswachstum 	<ul style="list-style-type: none"> Mechanische Belastung im Rad-Schiene-Kontakt 	<ul style="list-style-type: none"> Entsteht aus dem Zusammenwachsen von Oberflächenrissen 	<ul style="list-style-type: none"> T-Gamma-Modell [3] Shake-Down Map [4] Ekberg Indizes [5] Wedge-Modell [6]
Squats		<ul style="list-style-type: none"> Rollkontaktermüdung Risswachstum 	<ul style="list-style-type: none"> Thermischmechanische Belastung im Rad-Schiene-Kontakt Stoßartige Belastung 	<ul style="list-style-type: none"> Treten häufig als Einzeldefekte auf Tritt in Kombination mit Reibmartensit bzw. white etching layers auf 	<ul style="list-style-type: none"> Kein geschlossenes Modell vorhanden u. a. mit hohen Temperaturen in Verbindung gebracht [7]
Schleuderstellen		<ul style="list-style-type: none"> Materialabtrag Plastische Verformung 	<ul style="list-style-type: none"> Thermischmechanische Belastung im Rad-Schiene-Kontakt 	<ul style="list-style-type: none"> Tritt paarweise an / auf beiden Schienen auf 	<ul style="list-style-type: none"> Veränderung der Oberflächengeometrie durch Verschleiß und Temperatur [8]

Tab. 1: Typische Fahrwegschädigungen an der Oberfläche von Schienen, die im Zusammenhang mit Antriebs- bzw. Bremsvorgängen stehen

Die moderne Digitaltechnik mit immer kürzer werdenden Taktzeiten erlaubt die über die Jahre optimierten Regelungskonzepte robust umzusetzen. Was das für die Infrastruktur bedeutet, wird im Folgenden am Vergleich zweier Universallokomotiven aus dem Hause Siemens diskutiert. Bei den Lokomotiven handelt es sich um ein Altfahrzeug mit einer Masse von 88 t und einer Anfahrzugkraft von 300 kN sowie um ein Fahrzeug aus der Vectron Lokomotiv-Plattform mit einer Fahrzeugmasse von 90 t und einer Anfahrzugkraft von 350 kN.

Fahrwegschädigung

Fahrwegschädigungen, die im Zusammenhang mit Antriebs- bzw. Bremsvorgängen diskutiert und analysiert werden, sind primär Schäden an der Oberfläche von Schienen. Tab. 1 fasst die wichtigsten Oberflächenschäden zusammen.

Die Auflistung der Mechanismen und Modellvorstellungen in Tab. 1 zeigt, dass im Rad-Schiene-Kontakt das Zusammenwirken von Schlupfgeschwindigkeiten und Kräften – in Fahrtrichtung und quer dazu – sowie plastische Verformungen die Schädigungen verursachen. Jedes der Schädigungsphänomene nach Tab. 1 entsteht durch das spezifische Zusammenwirken dieser physikalischen Vorgänge. Die Beschreibung dieser Schädigungsphänomene ist nach wie vor Gegenstand der Forschung.

Sowohl der natürliche oder auch abrasive Verschleiß als auch Rollkontaktermüdungsphänomene, wie z.B. Head Checks, werden nach den gängigen Modellen mit der im Kontakt zwischen Rad und Schiene dissipierten Reibarbeit in Verbindung gebracht. Krause und Poll [1] multiplizieren die Reibarbeit mit einem Verschleißfaktor, der abhängig von der Reibleistung und der Kontaktflächengröße für milden und heftigen Verschleiß angegeben wird. Im T-Gamma-Modell nach Burstow [3] wird die Neigung zur Initiierung von Rollkontaktermüdungsrisse (engl. Rolling Contact Fatigue, RCF) über eine empirisch ermittelte RCF-Schädigungsfunktion beschrieben. Dabei erreicht die Schädigungsfunktion bei einem Wert der spezifischen Reibarbeit von 75 Nm/m ihr Maximum. Ab dem Wert von 175 Nm/m, der sogenannten Magic Wear Rate, dominiert der natürliche Verschleiß, d.h. entstehende Risse werden abrasiv entfernt (Abb. 2).

Squats werden Schienenfehler auf Schienenoberflächen mit einem charakteristischen äußeren „lungenförmigen“ Erscheinungsbild genannt. Sie weisen eine geometrische Abweichung der Schienenoberfläche auf, durch die der Fahrspiegel geringfügig absinkt und sich verbreitert. An und unter der Oberfläche eines Squats entstehen Risse, die durch Zusammenwachsen zu größeren Ausbröckelungen und einem Versagen der Schiene führen können. Squats werden häufig durch Martensitoberflächen initiiert [7], die im Allgemeinen durch hohe Temperatur und rasche Abkühlung ent-

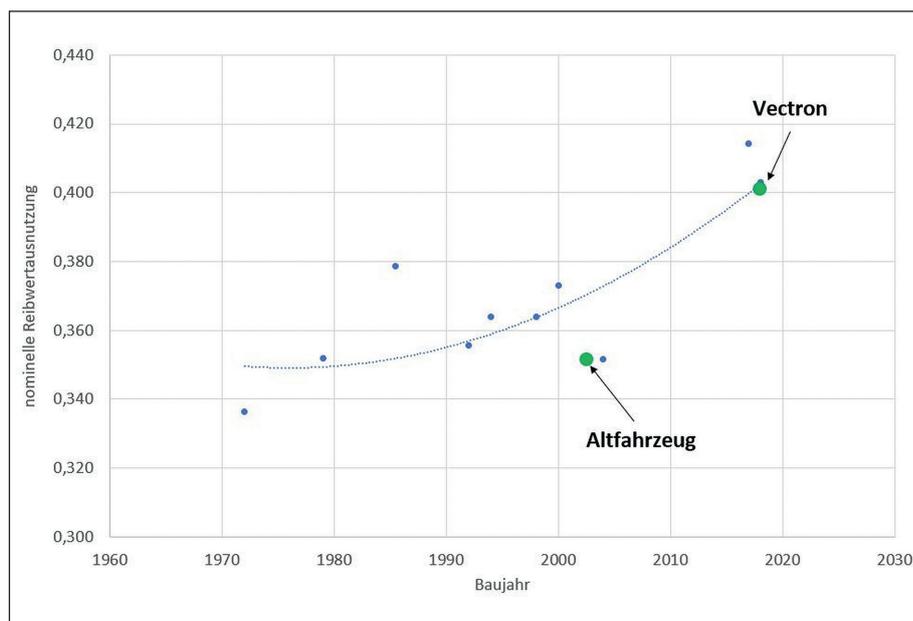


Abb. 1: Entwicklung der Reibwertausnutzung vierachsiger Lokomotiven in den letzten 50 Jahren – die grünen Punkte kennzeichnen die Lokomotiven, die verglichen werden.

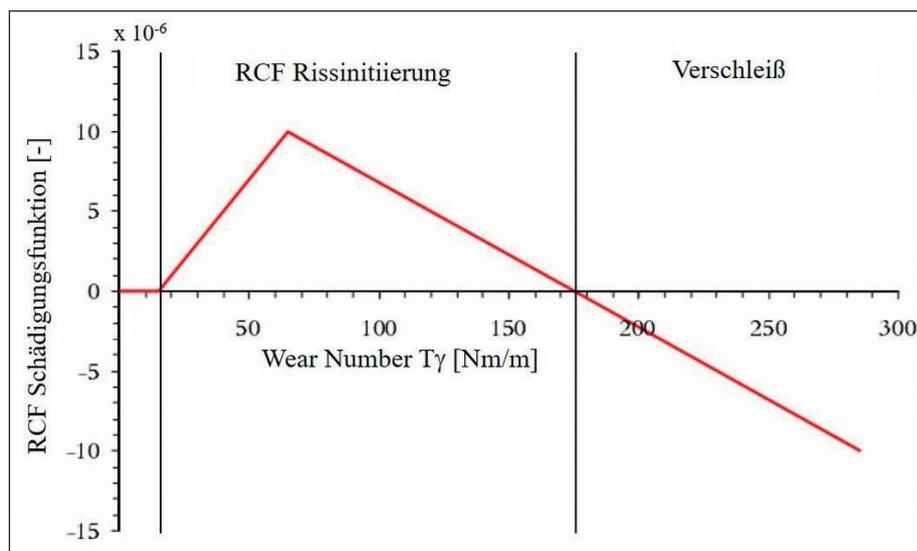


Abb. 2: RCF-Schädigungsfunktion (auch T-Gamma-Modell) [3]

stehen. Die für diese Materialumwandlung erforderliche Austenitisierungstemperatur liegt für Schienenstähle bei ca. 700°C. Temperaturen in dieser Größenordnung können durch Antriebs- und Bremsvorgänge an der Oberfläche von Rad und Schiene sehr wohl entstehen. Auch der erforderliche schnelle Temperaturabfall von mehreren 100°C pro Sekunde, der für die darauffolgende Martensitbildung erforderlich ist, ist auf jeden Fall möglich.

In weiterer Folge liegt der Fokus auf dem Relativvergleich der beiden Lokomotiven mit Bezug auf durch sie verursachte Schienenoberflächenschäden, dazu werden sie unter denselben Bedingungen und Szenarien betrachtet. Dabei werden für die Schädigungsbewertung folgende Kriterien herangezogen:

- die Reibarbeit für den natürlichen Verschleiß,

- spezifische Reibarbeit T-Gamma für die Neigung zur Head-Check-Bildung und
- die Temperaturentwicklung im Rad-Schiene-Kontakt nach Ertz [9] als Maß für eine mögliche Martensit- und damit Squat-Bildung.

Auf eine tiefere Auseinandersetzung mit den Parametern der Modelle bzw. fortgeschrittenen Modellen wird bewusst verzichtet. Für die angestrebte Relativbewertung der beiden Lokomotiven reicht die Verwendung der zentralen Einflussparameter aus, zudem lassen auch die neuesten Modelle aus der Forschung absolute, quantitative Aussagen noch nicht zu.

Feldversuche zur Fahrwegbelastung

Die Feldversuche fanden an der Tauernnordrampe statt. Dabei wurden die betrieblich zulässigen Anhängelasten der beiden Lokomo-

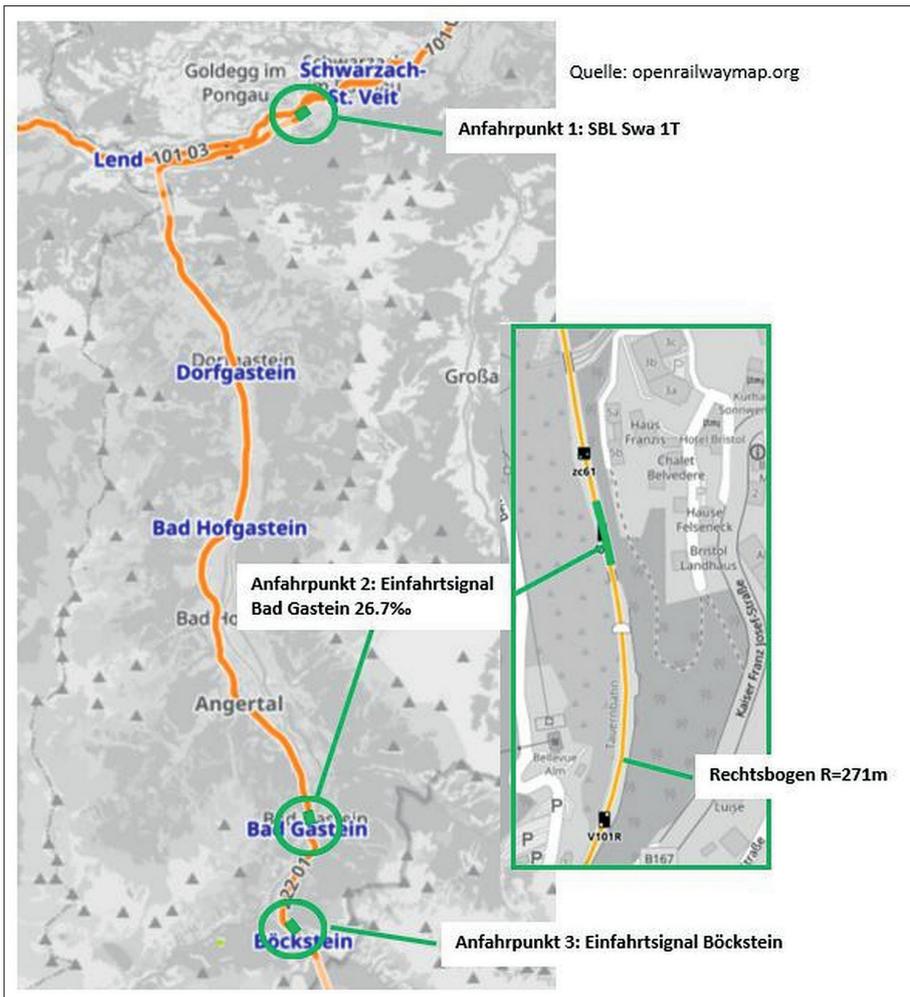


Abb. 3: Anfahrpunkte an der Tauern Nordrampe zur Ermittlung der sogenannten Lasttafeln

tiven ermittelt. Ursächliches Ziel der Versuche war die Einordnung dieser Anhängelasten in sogenannte Lasttafeln der ÖBB Infrastruktur. Diese Festlegung der Anhängelast soll Liegenbleiber beim Alpentransit über den Tauern verhindern. Das Kriterium dabei ist, an drei Anfahrpunkten einen bestimmten Wegabschnitt vom Stillstand bei mehreren Anfahrten in einer vorgegebenen Zeit zu durchfahren.

Abb. 3 zeigt die Lage der Anfahrpunkte. Die Fahrten wurden von der Messgruppe der ÖBB Produktion durchgeführt. Um möglichst einheitliche und vergleichbare Randbedingungen sicherzustellen, wurden die führenden Radsätze der zu begutachtenden Lokomotiven entsprechend bewässert. Im Folgenden werden Ergebnisse des Anfahrpunktes 2 in Bad Gastein dargestellt, der in einer Steigung von 26,7 ‰ liegt und an den ein

Rechtsbogen mit einem Radius von 271 m anschließt. Bewertet werden die Zugkräfte und Schlupfgeschwindigkeiten pro Radsatz, aufgezeichnet aus der Leittechnik der jeweiligen Lokomotiven, die Fahrgeschwindigkeit wurde per GPS bestimmt. Diese Messgrößen erlauben vorrangig die Bestimmung der Reibarbeit, die Temperaturentwicklung im Rad-Schiene-Kontakt kann derzeit messtechnisch nicht erfasst werden. Mittels der Simulation können jedoch die erforderlichen Inputdaten für das Modell nach Ertz berechnet werden.

Abb. 4 zeigt die Geschwindigkeiten und die Gesamtzugkräfte der beiden Lokomotiven für jeweils zwei Anfahrvorgänge am Anfahrpunkt 2 der Tauern Nordrampe. Das Altfahrzeug beschleunigt anfänglich, kann die Beschleunigung jedoch nicht aufrechterhalten, das führt zu Liegenbleibern im Sinn des oben beschriebenen Kriteriums. Dagegen beschleunigt der Vectron konstant. Grund hierfür sind die Unterschiede im Verlauf der Zugkraft über den Anfahrvorgang, die im rechten Diagramm der Abb. 4 dargestellt sind. Die im Gegensatz zum Altfahrzeug 20 Jahre modernere Vectron Antriebssteuerung ist in der Lage, vom Losreißen bis zum Erreichen der Schrittgeschwindigkeit die volle Anfahrzugkraft auf die Schiene zu bringen. Beim Altfahrzeug nimmt die Zugkraft vom Losreißen weg kontinuierlich ab und kann vom zweiten Losreißpunkt ab ca. 100 m zurückgelegter Wegstrecke nur mit sehr hoher Dynamik und einem dadurch bedingt schlechten Effektivwert wiederaufgebaut werden.

Abb. 5 stellt die gemessenen Reibarbeiten des Altfahrzeugs und des Vectron bei den beiden Anfahrten gegenüber. Die mittlere Reibarbeit an den Vectron Radsätzen ist um den Faktor 5,7 kleiner als die an denen des Altfahrzeugs. Ähnliches ergibt sich an den anderen Anfahrpunkten: Hier ist die mittlere Reibarbeit für den Vectron um mindestens den Faktor 2 kleiner als die des Altfahrzeugs. Damit kann gefolgert werden, dass der Verschleiß an den Schienen durch den Vectron deutlich kleiner als durch das Altfahrzeug ist.

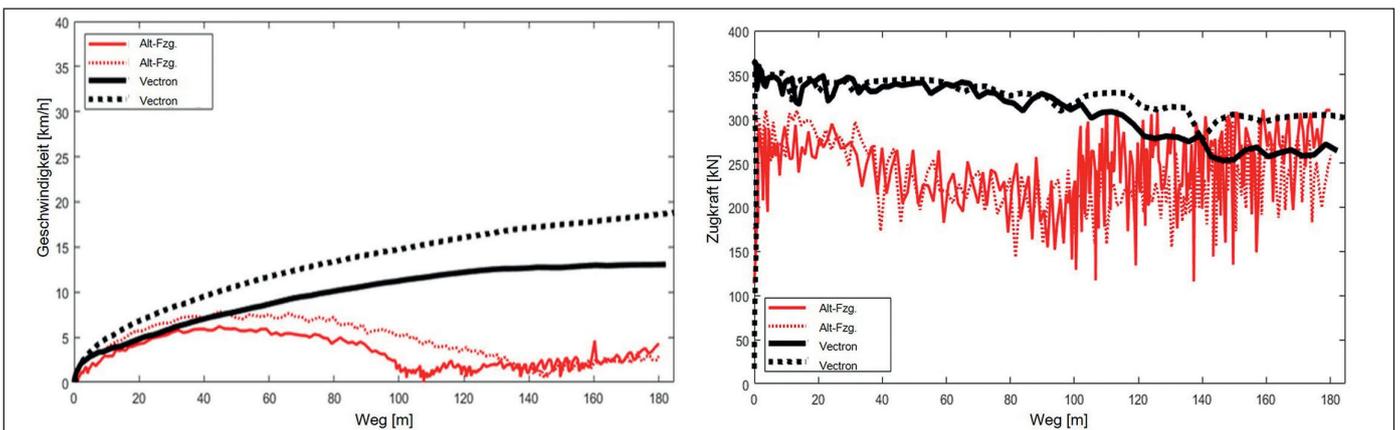


Abb. 4: Geschwindigkeit und Gesamtzugkraft für zwei Anfahrten am Anfahrpunkt 2 der Tauern Nordrampe

Die dynamischen Reibwertausnutzungen sind für die Anfahrversuche in Abb. 6 dargestellt. Es bestätigt sich eindrucksvoll, dass die Höhe der betrieblich umsetzbaren Reibwertausnutzung über das Losreißen entscheidet. Zudem werden die dynamischen Unterschiede zwischen den beiden Fahrzeugen deutlich: Der Schwerpunkt der Schlupfgeschwindigkeit des Vectron bewegt sich um den Wert 0,1 m/s, mit vereinzelt Ausreißern bis 0,27 m/s; wohingegen der Schwerpunkt der Schlupfgeschwindigkeit des Altfahrzeugs um den Wert 0,17 m/s liegt, mit einem ganz massiven Ausreißerbereich zwischen 0,4 m/s und 0,5 m/s. Das optimierte Antriebssystem des Vectron führt zu einer im Vergleich zum Altfahrzeug höheren Reibwertnutzung bei geringeren Schlupfgeschwindigkeiten. Welche Auswirkungen dieses grundsätzliche Verhalten auf weitere Aspekte der Schienenoberflächenschädigung hat, soll im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

Weitere Aspekte der Fahrwegbelastung

Fahrzeugmessungen können nur begrenzt für die Bewertung der Fahrwegbelastung herangezogen werden, da viele Eingangsparameter für die bekanntesten Modelle zur Fahrwegbelastung bzw. -schädigung nicht direkt gemessen werden können. Hierfür kann die Simulation des Fahrzeugverhaltens unterstützend eingesetzt werden. Durch die Beschreibung des Fahrzeugverhaltens mit der Mehrkörpersystem-Methode (MKS-Methode), die seit vielen Jahrzehnten erfolgreich im Schienenfahrzeugsektor eingesetzt und kontinuierlich weiterentwickelt wird, können die für die Schädigungsbewertung erforderlichen Rad-Schiene-Kontaktgrößen berechnet werden. Für eine belastbare und vertrauenswürdige Bewertung mittels Simulation muss sichergestellt sein, dass der verwendete Simulationsansatz für den zugrundeliegenden Anwendungsbereich Gültigkeit besitzt. Um das zu bewerten, wurden die Ergebnisse aus den oben beschriebenen Anfahrversuchen herangezogen und mit MKS-Modellen der Lokomotiven nachgebildet.

Abb. 7 zeigt die Gegenüberstellung der Messungs- und Rechnungsergebnisse der Gesamtzugkräfte und der Relativgeschwindigkeiten (Schlupfgeschwindigkeiten) im Rad-Schiene-Kontakt für einen Anfahrvorgang im Anfahrpunkt 2. Sowohl die Gesamtzugkraft als auch die Relativgeschwindigkeit in den Kontaktpunkten zwischen den Rädern und den Schienen können sehr gut reproduziert werden. Stellt man die in Messung und Rechnung generierten Reibarbeiten als objektive Validierungsgrößen gegenüber, liegt die Abweichung zwischen Messung und Rechnung bei weniger als 5 %. Damit können die mittels Simulation ermittelten Rad-Schiene-Kontaktgrößen für die Bewertung weiterer Aspekte der Fahrwegschädigung herangezogen werden.

Die Simulationen weisen für den Vectron gegenüber dem Altfahrzeug deutlich verringerte spezifische Reibarbeiten (T-Gamma-Werte) aus (Abb. 8), was einen deutlich reduzierten natürlichen Verschleiß erwarten lässt. Für beide Lokomotiven liegt der T-Gamma-Wert während des Anfahrvorgangs deutlich über der Magic Wear Rate von 175 Nm/m, bis zu der sich Head Checks ausbilden. Damit wird gezeigt, dass Head Checks durch Anfahrvorgänge nicht zu erwarten sind.

Auch die Berechnung der Temperaturen, die häufig für die Squat-Entstehung verantwortlich gemacht werden, zeigen im Anfahrvorgang für den Vectron deutlich niedrigere Werte im Kontaktpunkt, wogegen die Temperaturen für das Altfahrzeug sehr wohl im Bereich der Austenitierungstemperatur zu liegen kommen.

Zur weiteren Absicherung der Ergebnisse wurde das Verhalten der beiden Lokomotiven und deren Antriebsregelungen unter typischen Szenarien gemäß Tab. 2 beim Rollen und beim Antreiben untersucht. Für die Reibwertausnutzung wurden die Mittelwerte aus den Anfahrversuchen herangezogen: 0,28 für das Altfahrzeug und 0,37 für den Vectron (Abb. 6).

In allen untersuchten Szenarien sind die Reibarbeiten im Rad-Schiene-Kontakt für den Vectron deutlich niedriger als beim Altfahrzeug (Abb. 9).



Get
on track for

Rail 4.0

Bahnbrechend. Wegweisend. – Was wir neben automatisieren hauptsächlich tun? In sicheren Bahnen denken! Als Sicherheitsexperte, Digitalisierer und Lösungsanbieter steuern wir Sie in Richtung digitale Schiene, und das mit Beratung und Engineering im Gepäck. Mit unserer sicheren Steuerungstechnik fahren Sie richtig.

www.pilz.com/railway

PILZ
THE SPIRIT OF SAFETY

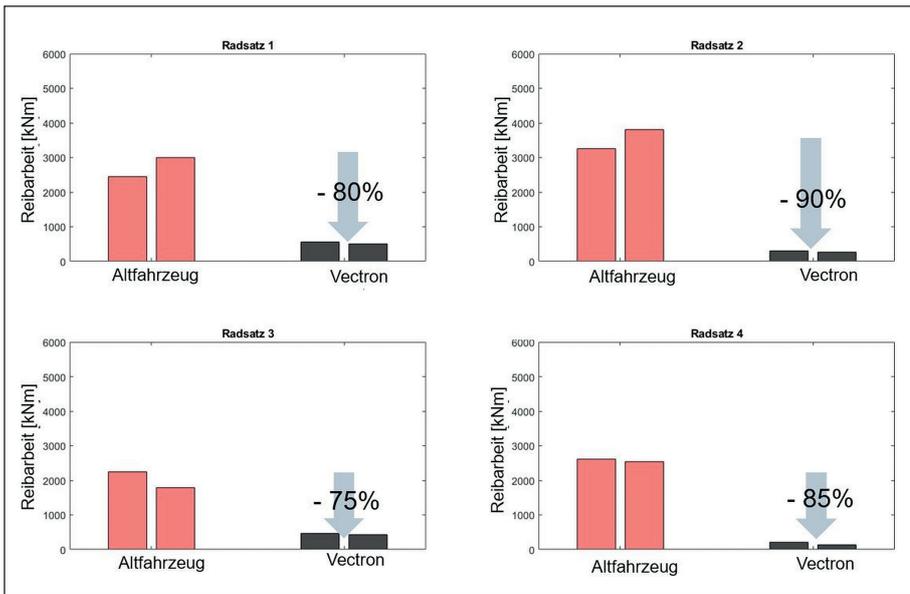


Abb. 5: Vergleich der Reibarbeiten zwischen Altfahrzeug und Vectron am Anfahrpunkt 2 der Tauernnordrampe

Dies lässt einen deutlich geringeren Schienenverschleiß durch den Vectron erwarten. Der Vergleich der Radscheiben-Standzeit zwischen den beiden Lokomotiven bestätigt das: Die Radscheiben-Laufleistung ist in der Vectron-Plattform mindestens um 50 % höher als beim Altfahrzeug. Für beide Lokomotiven liegen die spezifischen Reibarbeiten in den betrachteten Szenarien über der Magic Wear Rate von 175 Nm/m und damit in einem Bereich, in dem initiierte Risse durch den natürlichen Verschleiß entfernt werden. Daraus lässt sich schließen, dass der natürliche Verschleiß dominiert und RCF-Phänomene nicht direkt dem Antrieb zugeschrieben werden können. Dieser Sachverhalt wurde auch bereits von Six et al. in [10] diskutiert.

Abb. 10 fasst die nach [9] ermittelten Temperaturen im Rad-Schiene-Kontakt zusammen, die in den oben genannten Szenarien entstehen. Auch hier zeigt sich qualitativ dasselbe Verhalten wie bei den Anfahrversuchen. Der Vectron weist deutlich niedrigere Temperaturen im Rad-Schiene-Kontaktpunkt als das Altfahrzeug auf.

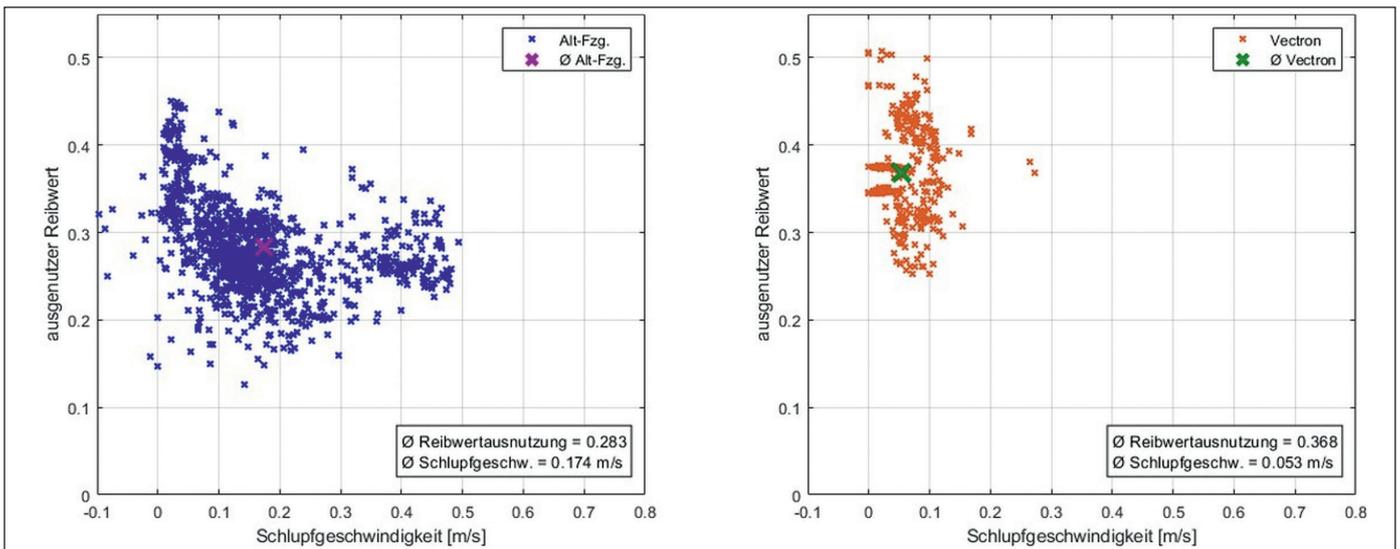


Abb. 6: Vergleich der dynamischen Reibwertausnutzungen zwischen Altfahrzeug und Vectron am Anfahrpunkt 2 der Tauernnordrampe

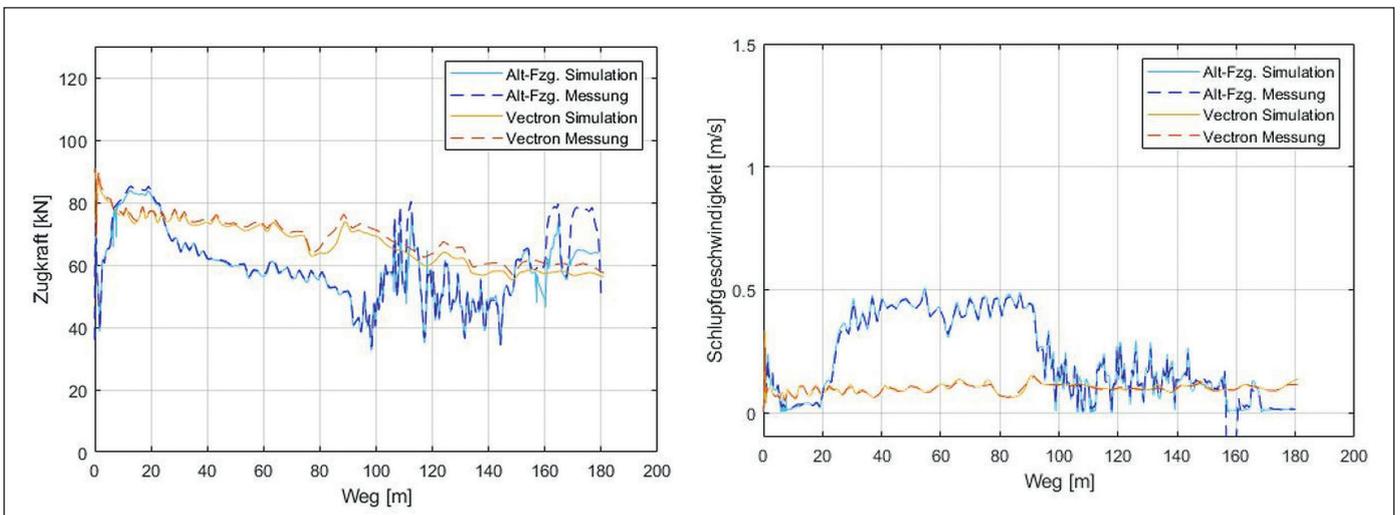


Abb. 7: Messungs-Rechnungsvergleich der Gesamtzugkräfte und der Schlupfgeschwindigkeiten von Altfahrzeug und Vectron Lokomotive am Anfahrpunkt 2

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Siemens Mobility GmbH /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
 genehmigt / © DVV Media Group GmbH

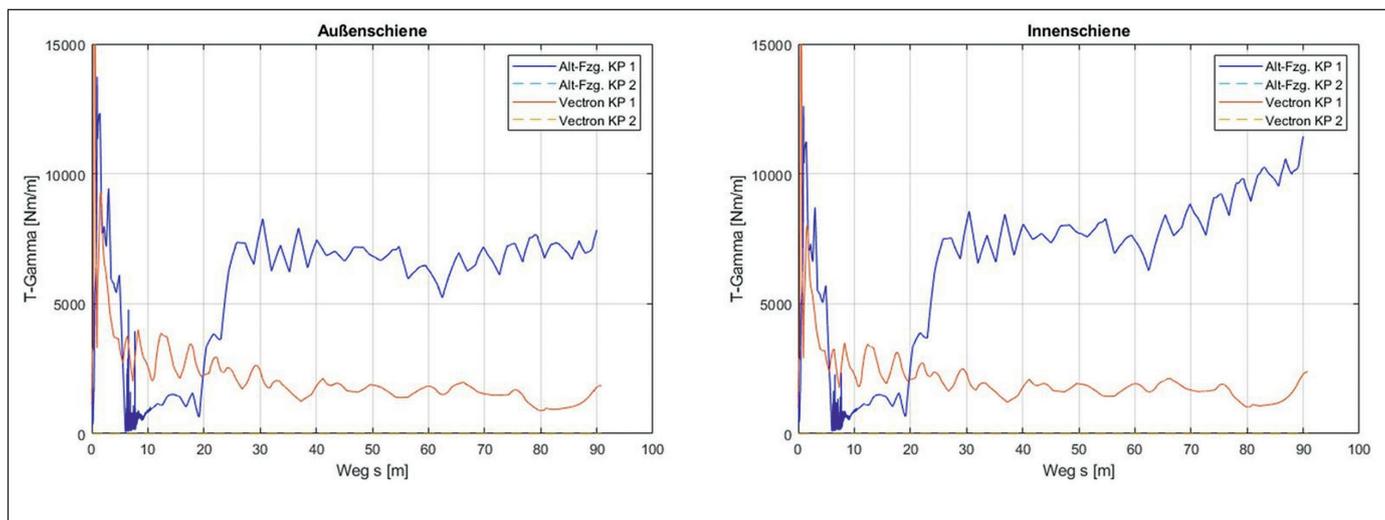


Abb. 8: Rechnerisch ermittelte spezifische Reibarbeiten (T-Gamma-Werte) von Altfahrzeug und Vectron Lokomotive am Anfahrpunkt 2

Zusammenfassung

Für Lokomotiven im Güterverkehr ist das Losreißen mit hohen Anhängelasten auf bogenreichen Bergstrecken ein wichtiges Performance-Merkmal. Um das zu erreichen, zeigt die Erfahrung, dass es wichtig ist, kleine Schlupfgeschwindigkeiten betriebssicher umzusetzen. Die dazu notwendigen Antriebsregelstrategien sind in der Siemens Vectron-Plattform umgesetzt.

Ein Vorteil dieser Technologie zeigt sich in der gegenüber Altfahrzeugen verringerten Fahrwegschädigung. Die Auswertungen der Feldversuche an der Tauern Nordrampe belegen für den Vectron

- sehr geringe Reibarbeiten beim Anfahren trotz hoher Reibwertausnutzung,
- geringes Squat-Risiko wegen der niedrigen Temperaturen im Rad-Schiene-Kontakt und
- geringe Neigung zu Rollkontaktermüdung. Trotz der gemäß Lasttafel um 25 % höheren Anhängelasten sind die Reibarbeiten im Rad-Schiene-Kontakt für den Vectron um den Faktor 2 bis 10 kleiner als beim Altfahrzeug. Damit ist ein deutlich verringerter Schienenverschleiß durch den Vectron zu erwarten.

Um die Fahrwegbelastung in weiteren Szenarien zu untersuchen, werden Mehrkörpersystemsimulationen verwendet. Die Plausibilisierung der Modelle mit den Feldversuchen zeigt eine überzeugende Übereinstimmung bezüglich der Systemzustände und hinsichtlich schädigungsrelevanter Parameter. Damit ist die Mehrkörpersystemsimulation sehr gut zur Fahrwegschädigungsbewertung geeignet.

Auch in den hier betrachteten Szenarien zeigen die Weiterentwicklungen bei der Antriebsregelung von modernen Lokomotiven deutlich geringere Reibarbeiten und Temperaturen im Rad-Schiene-Kontakt. Zudem bestätigen die Untersuchungen an weiteren

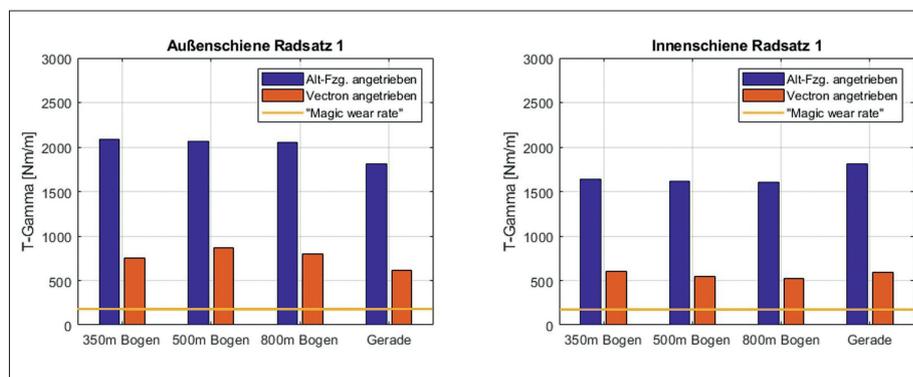


Abb. 9: Vergleich der berechneten spezifischen Reibarbeit (T-Gamma) beim Antreiben zwischen dem Altfahrzeug und dem Vectron für die Szenarien nach Tab. 2

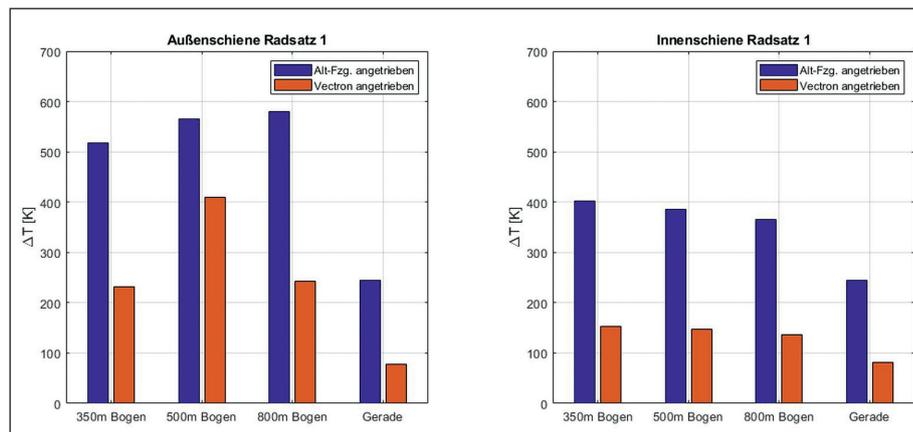


Abb. 10: Vergleich der berechneten Temperaturen im Rad-Schiene-Kontakt beim Antreiben zwischen dem Altfahrzeug und dem Vectron für die Szenarien nach Tab. 2

Bogen / Gerade [m]	Geschwindigkeit [km/h]	Querbeschleunigung aQ [m/s ²]	Überhöhung [mm]
350	80	0,43	150
500	80	0,43	85
800	80	0,43	30
Gerade	80	-/-	-/-

Tab. 2: Szenarien, die in den Parameterstudien für das Rollen und das Antreiben betrachtet wurden

typischen Szenarien, wie bereits in anderen Arbeiten publiziert, dass der Antrieb nicht für Rollkontaktermüdungsprobleme verantwortlich gemacht werden kann.

Die Feldversuche und die Parameterstudien zeigen ein klares Potenzial zur Reduktion der Fahrwegbelastung durch moderne Antriebsregelstrategien auf. Der Vergleich der Siemens Vectron-Plattform mit einem Siemens Altfahrzeug macht die erfolgreiche Umsetzung moderner Antriebsregelstrategien eindrucksvoll sichtbar. ■

QUELLEN

- [1] Krause, H.; Poll, G.: Wear of Wheel-Rail Surfaces, *Wear*, 113 (1986), S. 103-122
 [2] Archard, J. F.: Contact and Rubbing of Flat Surfaces, *Journal of Applied Physics*, Volume 24, Number 8 (1953), S. 981-988
 [3] Burstow, M.C.: Whole Life Rail Model Application and Development for

RSSB – Continued Development of an RCF Damage Parameter AEATR-ES-2004-880, Issue 2, 2004

[4] Johnson, K. L.: The Application of Shakedown Principles in Rolling and Sliding Contact, *European Journal of Mechanics – A/Solids*, Vol. 11, Special Issue (1992), S. 155-172

[5] Ekberg, A.; Kabo, E.; Andersson, H.: An Engineering Model for predicting Rolling Contact Fatigue of Railway Wheels, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures* 25 (2002), S. 899-909

[6] Six, K.; Meierhofer, A.; Trummer, G.; Bernsteiner, Ch.; Marte, Ch.; Müller, G.; Lubner, B.; Dietmaier, P.; Rosenberger, M.: Classification and Consideration of Plasticity Phenomena in Wheel-Rail Contact Modelling, *The International*

Journal of Railway Technology (IJRT), Vol 5, Issue 3, 2016, S. 55-77

[7] Bernsteiner, Ch.: Untersuchung von Mechanismen zur Entstehung des Schienenfehlers Squat, Dissertation, Technische Universität Graz, 2018

[8] Six, K.: Schadensbilder auf der Schiene, ÖVG Arbeitsgruppe Rad-Schiene Interaktion und dynamische Fahrzeug-Fahrweg Wechselwirkungen, Wien, 2012

[9] Ertz, M.: Temperatur, Materialbeanspruchung und Kraftschluss im Rad-Schiene-Kontakt, Forschungsbericht VDI-Reihe 12, Nr. 549, Düsseldorf 2003

[10] Six, K.; Rosenberger, M.; Marte, Ch.; Trummer, G.: Rad-Schiene Interaktion – Aspekte der Fahrzeug-Fahrweg Schädigung, ZEVrail 135 (2011) Tagungsband SFT Graz 2011, S. 8-17



Dr. Werner Breuer

Senior Principal Key Expert
 Locomotives
 Siemens Mobility GmbH, München
 werner.breuer@siemens.com



DI Dr. techn. Martin Rosenberger

Teamleiter Vehicle Dynamics,
 Acoustics & Analytics
 Siemens Mobility GmbH Österreich,
 AT-Graz
 martin.rosenberger@siemens.com

► 11.10. – 15.10.21

ITS World Congress, Hamburg • Heft Nr. 10/21

► 25. – 26.10.21

19. VDEI Fachtagung Telekommunikation,
 Fulda • Heft Nr. 10/21

► 19. – 20.01.22

66. VDEI Eisenbahntechnische Fachtagung,
 Leipzig • Heft Nr. 1/22

OKTOBER
2021

NOVEMBER
2021

JANUAR
2022

FEBRUAR
2022

► 11.– 12.11.21

21. Internationaler SIGNA+DRAHT-KONGRESS, Fulda • Heft Nr. 11/21

► 16.11. – 18.11.21

3. IRSA, Aachen • Heft Nr. 11/21

► 24.11. – 26.11.21

STUVA Expo 2021,
 Karlsruhe • Heft Nr. 11/21

► 15. – 16.02.22

24. EBA-Sachverständigentagung,
 Fulda • Heft Nr. 2/22

DER
EISENBahn
INGENIEUR

Wir sind dort, wo Ihre Kunden sind.

Änderungen vorbehalten.

Weitere Infos: Silke Härtel • 040/237 14-227 • silke.haertel@dvvmedia.com