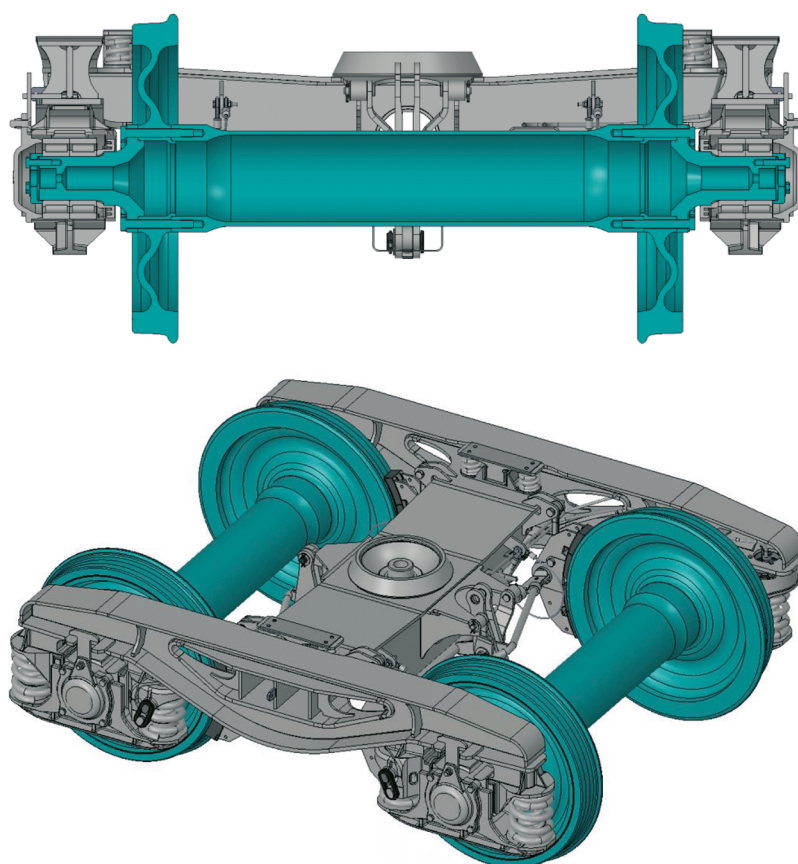


Radsatz der Zukunft

Wheelset of the Future



Radsatz der Zukunft

Wheelset of the Future

Dr. Johann Blaha, Dr. Laszlo Boronkai, Ing. Dschambul Huber, Dr. Martin Rosenberger,
Dr. Gerald Schleinzner, Dipl.-Ing. Gerhard Stine, Dipl.-Ing. Helmut Trantin, Dr. Franz-Josef Weber,
Dipl.-Ing. Rüdiger Zenz, Graz (Österreich)

Zusammenfassung

Dem Radsatz kommt aufgrund seines erheblichen Einflusses auf die Sicherheit, Effizienz und Zuverlässigkeit des Schienenfahrzeugs sowie dessen Lebenszykluskosten eine signifikante Rolle im System Rad-Schiene zu. Radsätze werden seit den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts auf Basis derselben Technologien entworfen und hergestellt. Aufgrund geänderter Anforderungen ist es heute an der Zeit, für den Radsatz neue Lösungen zu suchen und einen Paradigmenwechsel zu vollziehen! Bei den Bauteilen des Radsatzes der Zukunft kommen für Welle und Rad höherfestere und verschleißbeständigere Stahl- und Eisengusswerkstoffe zum Einsatz. Genutzt wird das Potential dieser Werkstoffe durch den Einsatz von Prinzipien des Struktur-Leichtbaus sowie durch die Nutzung von Röhrenstrukturen und verteilter Kraftableitung. Die Siemens Light-Weight Axle (LWA) erlaubt die Montage in jeder Fachwerkstatt. Der Radsatz der Zukunft ist bis zu Geschwindigkeiten von 400 km/h mit abnehmbarem Wellenschutz SICAP® sicher gegen Steinschlag geschützt, seine Schallemissionen werden durch Radschallabsorber mit optimierter Schnittstelle minimiert und die Ventilationsverluste der strömungsoptimierten Bremscheiben betragen nur einen Bruchteil der Verluste bisher bekannter Konstruktionen.

Abstract

The wheelset plays a significant role in the wheel-rail system due its substantial impact on the safety, efficiency, and reliability of the rail vehicle as well as its lifecycle costs. Since the 1950s, wheelsets have been designed and manufactured based on the same technologies. However, due to changing requirements, it is now time to look for new solutions for the wheelset and undergo a paradigm shift. The future wheelset utilizes high-strength and wear-resistant steel and cast iron materials for its subcomponents, such as the axle and wheel. It exploits the potential of these materials through the application of principles of structural light-weight design, by using tubular structures and distributed force transmission. The Siemens Light-Weight Axle (LWA) is designed for assembly in any workshop. The wheelset of the future is equipped with a removable Siemens axle protection system called SICAP®, which provides safe protection against swirled gravel at speeds of up to 400 km/h. Its noise emissions are minimized through the application of wheel sound absorbers with an optimized interface, and the ventilation losses of the aerodynamically optimized brake discs amount only a fraction of the losses observed for standard designs.

1 Einführung

Moderne Schienenfahrzeuge sind ein zentraler Eckpfeiler im Personenverkehr und Gütertransport. Hochgeschwindigkeitszüge bieten eine qualitativ hochwertige Alternative zu Kurzstreckenflügen. In städtischen Gebieten bieten U-Bahnen, Nahverkehrszüge und Straßenbahnen zuver-

lässige Alternativen zum Straßenverkehr, wodurch Staus, CO₂-Emissionen und lokaler Schadstoffausstoß reduziert werden. Güterzüge ermöglichen den effizienten Transport großer Mengen von Gütern über lange Strecken und erleichtern den Zugang zu Handelsgütern. Innovative Mobilitätslösungen sind somit auch ein maßgeblicher Beitrag zur Bewältigung

globaler Megatrends, wie Bevölkerungswachstum, Klimawandel und Urbanisierung [1, 2]. Im Jahr 2050 wird die Weltbevölkerung 9,7 Milliarden Menschen betragen. Die Zahl an Megastädten (> 10 Mio. Einwohner) wird von heute 44 auf 67 anwachsen [3]. Diese Entwicklung wird in der EU mit einer Verdoppelung des Güterverkehrs und Verdreifachung des Hochge-

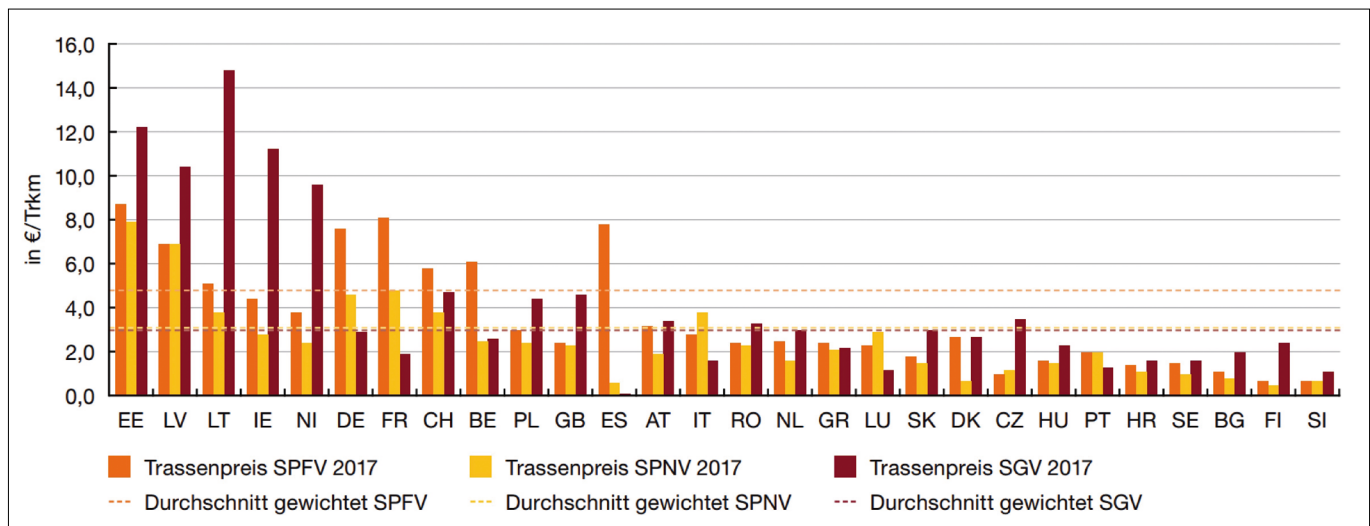


Bild 1: Überblick über die Trassenpreise in Europa je Trassenkilometer und Verkehrsart [5]

schwindigkeitsverkehrs einhergehen und bietet damit eine vielversprechende Perspektive für den Schienenfahrzeugmarkt. Bei Neuprojektierungen tritt dabei der ökologische Aspekt im Hinblick auf eine effiziente Nutzung vorhandener Ressourcen und eine möglichst geringe Auswirkung auf Umwelt und Gesellschaft in den Vordergrund. Schienenfahrzeuge bieten insbesondere hinsichtlich CO₂-Emissionen massive Vorteile gegenüber anderen Transportmitteln. Im Vergleich zum Flugzeug spart der Schienenverkehr 85 % der CO₂-Emissionen, verglichen zu Kraftfahrzeugen sogar 91 % [4].

Ein finanzieller Aspekt sind die Trassenpreise im Schienenverkehr in Europa. Diese sind für alle Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) von besonderer Bedeutung, da sie trotz einer einheitlichen europäischen Rechtsgrundlage länderspezifisch unterschiedlich geregelt sind und einen erheblichen Teil der Gesamtkosten der EVU ausmachen. Bild 1 [5] zeigt einen Überblick über die je Trassenkilometer (Trkm) bei den einzelnen Verkehrsarten (SPFV: Schienenpersonenfernverkehr, SPNV: Schienenpersonennahverkehr, SGV: Schienengüterverkehr) anfallenden Trassenbenutzungsgebühren.

Derzeit werden fahrzeugspezifische Eigenschaften nur im Trassenpreismodell der Schweiz und in Großbritannien berücksichtigt. Hier ist eine stark reduzierte Masse gegenüber konventionellen Konstruktionen besonders vorteilhaft. In den Berechnungsmodellen der Trassenpreise können je nach Einsatzrandbedingungen signifikante Einsparungen nachgewiesen werden, die in wenigen Jahren die vollen

(!) Investitionskosten des Radsatzes betragen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Masseinsparung beim Radsatz in vollem Umfang die ungefederte Masse des Fahrzeugs betrifft. Dies führt im Betrieb, unabhängig davon, ob es im Trassenpreismodell berücksichtigt wird oder nicht, zur Reduktion von Verschleiß und Schäden an der Infrastruktur.

Um all diese anspruchsvollen Anforderungen nachhaltig zu erfüllen, gilt es bei der Entwicklung der Schienenfahrzeuge der Zukunft folgende Ziele zu verfolgen:

- reduzierte Kosten (Beschaffung, Instandhaltung, End-of-Life – LCC),
- reduzierter Energieverbrauch im Betrieb,
- reduzierte CO₂-, Lärm- und Staubemissionen,
- reduzierte Schädigung der Schieneninfrastruktur,
- Erhöhung der Lebensdauer und Verfügbarkeit und
- autonome digitale Analyse und Bewertung des Fahrzeugzustands.

Ziel ist es, die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Belastungen bei Beschaffung und Betrieb moderner Fahrzeuge auf Basis frühzeitiger Lebenszyklus-Betrachtungen zu optimieren. Bei einem Anteil von ca. 40 % an den Gesamtlebenszykluskosten des Fahrzeugs trägt ein optimiertes Drehgestell design signifikant zu einer Kostenoptimierung bei.

In Bezug auf Lebenszykluskosten auf Ebene des Drehgestells ist vor allem der Radsatz als bedeutende Komponente zu nennen. Der Radsatz verursacht mit sei-

nen Verschleißteilen Rad, Radsatzlager und Bremsscheibe (korrektive Instandhaltung ist erforderlich), sowie der Notwendigkeit regelmäßiger zerstörungsfreier Prüfung der Radsatzwelle (präventive Instandhaltung) einen Großteil der Lebenszykluskosten. Der Tausch und die Überprüfung dieser Komponenten bestimmen darüber hinaus in hohem Maße die Intervalle für die präventive sowie zustandsbasierte Instandhaltung und reduzieren somit die Verfügbarkeit der Fahrzeuge. Um die teils widersprüchlichen Anforderungen hinsichtlich niedriger Kosten/Emissionen und hoher Verfügbarkeit der Fahrzeuge zu erfüllen, entwickelt Siemens Mobility Lösungen, um individuell auf spezielle Schwerpunktsetzungen zu reagieren.

Idealerweise ist die Schwerpunktsetzung hinsichtlich der Anforderungen bereits mit der Ausschreibung bekannt, und es kann bei der Entwicklung des Neufahrzeugs und seines Instandhaltungskonzepts auf ein Optimum hingearbeitet werden. Die Lösungsansätze von Siemens Mobility können jedoch auch nach den ersten Betriebs- bzw. Instandhaltungserfahrungen genutzt werden, um mit Anpassungen an Fahrzeug, Komponenten oder dem Instandhaltungskonzept ein Optimum zu erzielen.

2 Lösungsvorschläge

In der Folge werden einige Lösungsvorschläge zur Optimierung einzelner Komponenten, aber auch Teilsysteme, hinsichtlich Ihrer Anforderungen im Betrieb vorgestellt.

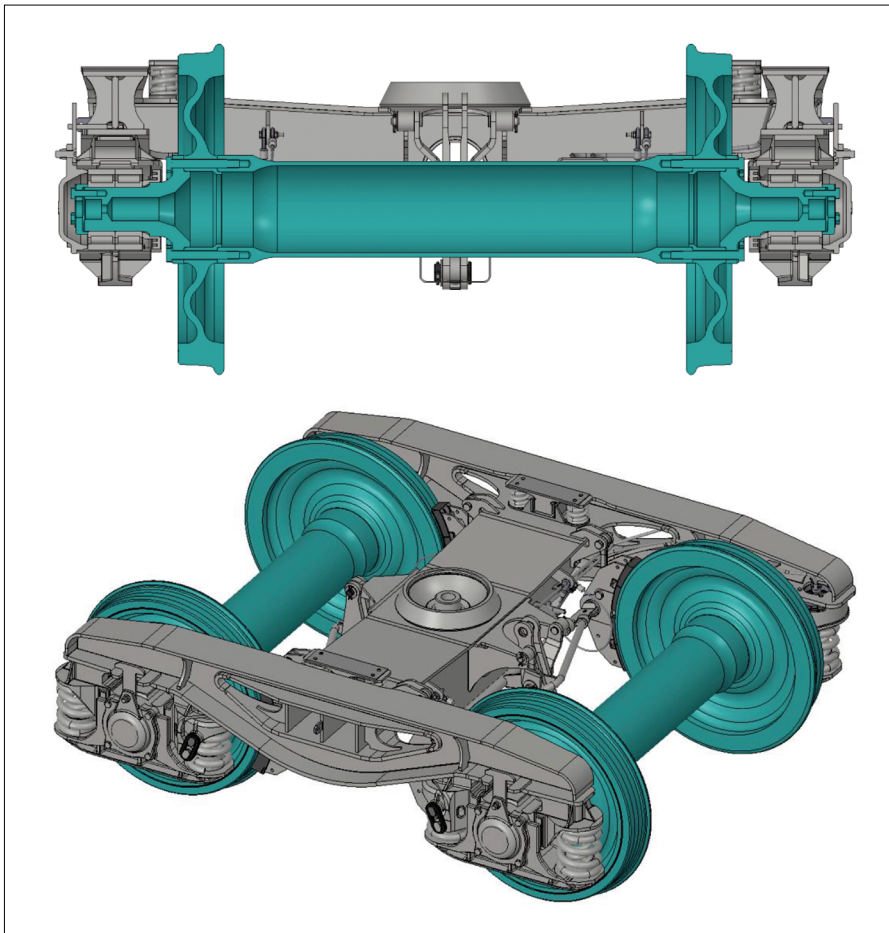


Bild 2: Erste Serienkonstruktion der Siemens-Light-Weight Axle (LWA) als Güterwagenradsatz, integriert in ein Y25 Drehgestell

2.1 Siemens-Light-Weight Axle (LWA)

Ein Radsatz für Schienenfahrzeuge besteht nach dem Stand der Technik aus den Hauptkomponenten Radsatzwelle und Räder, die durch eine Presspassung miteinander verbunden sind. Der Fügeprozess (Aufpressen der Räder auf die Welle) verlangt nach einer aufwendigen Radsatzpresse. Die Radsatzwellen sind derzeit ausgeführt als Voll- bzw. Hohlwellen aus speziellem Stahlwerkstoff, geschmiedet, wärmebehandelt und mechanisch bearbeitet.

Radsatzwellen sind weiters hochsicherheitskritische Bahnkomponenten, die während des langen Zeitraums ihrer Einsatzzeit hohen Belastungen ausgesetzt sind. Risse in der Radsatzwelle sind nur durch aufwendige zerstörungsfreie Prüfung erkennbar.

Für die Entwicklung der hier vorgestellten Siemens-LWA wurde die Anforderung der Reduzierung von Masse unter Beibehaltung aller funktionalen Eigenschaften gestellt. Die Struktur der LWA

wurde durch Anwendung bekannter Methoden des Strukturleichtbaus so gestaltet, dass sich das Widerstandsmoment des Wellenquerschnitts im Vergleich zu konventionellen Konstruktionen bei Reduktion der Masse erhöht. Die Festigkeitsbewertung wurde mit modernen Methoden der Betriebsfestigkeitsberechnung unter Beachtung geltender Normen durchgeführt. Dadurch konnte ein Rohrwellen-Radsatzsystem realisiert werden, das dem Endkunden direkt nutzbare Vorteile bietet:

- erhebliche Reduktion der ungefederten Masse,
- Montage und Demontage ohne Radsatzpresse und
- optionale Radsatz-Strukturdiagnose mittels Innendruckmessung, entweder manuell während definierter Intervalle oder automatisiert im Betrieb.

Für einen Feldversuch wurde ein erstes Konzept des Radsatzsystems als Beispiel eines Güterwagenradsatzes für eine Radsatzlast von 25 t realisiert. Die gewöhn-

lich aus dem Vollen geschmiedete Welle wurde durch ein nahtloses Stahlrohr mit einem höheren Widerstandsmoment ersetzt. Die Schnittstelle zum Rad wird durch einen Rohrflansch realisiert. Die Räder sind speziell für den Einsatz in diesem System an ihrer Schnittstelle ebenfalls angepasst worden. Der Presssitz wurde durch eine Schraubenverbindung substituiert, was weitere Vorteile bei der Masseneinsparung bringt. Die Radsatzwelle wird mittels mehrerer Schrauben über den Wellenschenkel mit den Rädern verschraubt.

Zur Validierung des Konzepts wurde ein Prototyp der LWA als Güterwagenradsatz entwickelt, konstruiert und realisiert, und eine Masseinsparung gegenüber konventionellen Konstruktionen von ca. 150 bis 200 kg (ca. 15 %, je nach Ausführung) erzielt. Der Prototyp wurde in einer Ausführung als Prüfling auch versuchstechnisch an einem Umlaufbiegeprüfstand der TU Graz geprüft und für einen Erprobungsbetrieb abgesichert. Im Jahr 2022 war der Prototyp mit einer Laufleistung von ca. 60 000 km im Serienbetrieb Ertransport für die Rail Cargo Austria (ÖBB) erfolgreich im Einsatz. Die grundsätzliche Funktion des Systems Radsatz während des Betriebs konnte bestätigt werden.

Beim Erprobungsbetrieb wurde auch das Prinzip der berührungslosen Innendruckmessung abgesichert. Dazu wurde ein Prototypaufbau realisiert, der den Innendruck des Radsatzes berührungslos während des Betriebs erfassen kann und die Information mittels Telekommunikation auf die Landseite überträgt.

Bei einem Durchriss des Rohres oder einem Lösen der Verschraubung kann im System ein Druckabfall gemessen werden. Mit diesem System ist es auf unterschiedliche Weise, manuell, automatisiert auf der Infrastruktur oder integriert im Fahrzeug möglich, ein beginnendes strukturelles Versagen zu detektieren und entsprechende Schutzreaktionen einzuleiten.

Aus den Ergebnissen des Erprobungsbetriebs und der Komponententests wurden Verbesserungsideen abgeleitet und in die erste Version einer Serienkonstruktion eingearbeitet (Bild 2). Eine Zulassung als Güterwagenradsatz nach TSI WAG ist als nächster Schritt geplant.

Die Siemens-LWA ist aber nicht auf die Ausführung als Güterwagenradsatz be-

schränkt. Im Zuge der Entwicklungsarbeit wurden Konzepte erarbeitet, die für unterschiedliche Anwendungen das große Potential an Masseinsparung aufzeigen.

Ein integrales Laufwerkskonzept für einen Treibradsatz für Metroanwendungen zeichnet sich beispielsweise dadurch aus, dass eine schnelllaufende Bremse direkt am Getriebe angebracht ist, die keine Schnittstelle mehr zum Radsatz hat [6]. Dadurch kann eine Massereduktion von ca. 420 kg (ca. 10 %) am Fahrwerk gegenüber dem Referenzfahrwerk erzielt werden.

Ein Laufradsatzkonzept für ein Regionalverkehrsfahrzeug mit einer LWA zeichnet sich beispielsweise durch eine Massereduktion von bis zu 200 kg gegenüber dem Referenzradsatz aus (ca. 16 %).

Begleitend zur technischen Entwicklung wird derzeit daran gearbeitet, die industrielle Herstellung der Radsätze im Sinne der Erreichung der funktionalen Anforderungen bei gleichzeitig kostengünstiger Produktion zu optimieren. Aufgrund der Neuartigkeit der Technologie ist im Vergleich zu den konventionellen Radsätzen derzeit noch mit erhöhten Investitionskosten zu rechnen. Dennoch zeigen schon in diesem frühen Stadium der Innovation spezifische Businesscasebetrachtungen, dass beim Einsatz der Siemens-LWA als Radsatzsystem Einsparungen über die Lebensdauer erzielt werden können.

Beispielsweise kann aufgrund der Senkung der mechanischen Beanspruchung der Radsatzwelle im Betrieb (geringere Biegespannungen) eine Reduktion der zerstörungsfreien Bauteilprüfung (z. B. Ultraschallprüfung) im Instandhaltungsregime wirksam gemacht werden. Bruchmechanisch kann hierfür der entsprechende Nachweis für die Betriebssicherheit geführt werden. Am Beispiel des Güterwagendradsatzes mit einer Radsatzlast von 25 t kann unter vergleichbaren Bedingungen (Lastkollektiv, Betrachtung des kritischen Schaftquerschnittes, Wellenwerkstoff, Bruchzähigkeit, Ausgangsriss) eine Verdoppelung der Restlaufleistung bis zum instabilen Riss nachgewiesen werden (Bild 3).

2.2 Wellenschutz SICAP®

Durch die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit und der Radsatzlast, aber auch

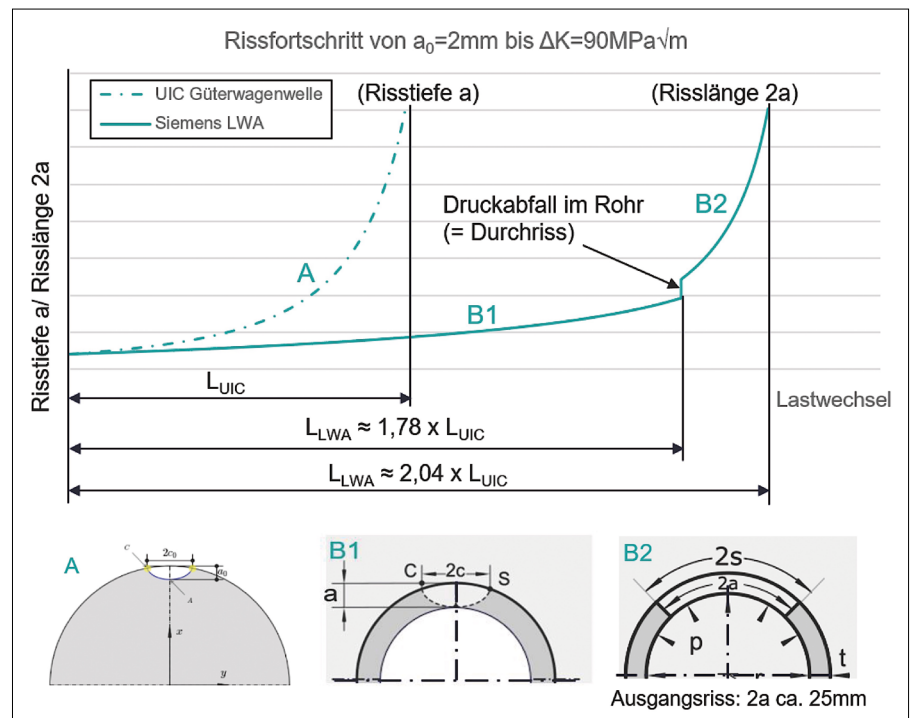


Bild 3: Bruchmechanische Restlaufleistung der Siemens-LWA im qualitativen Vergleich zu einem herkömmlichen UIC-Güterwagendradsatz

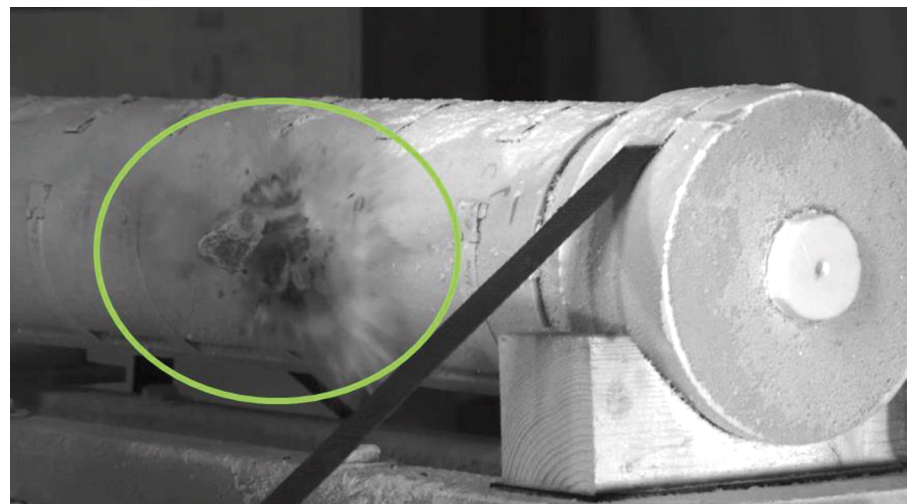


Bild 4: Beschusstest einer tiefgekühlten Radsatzwelle mit Oberbauschotter unter 90° Auftreffwinkel und einer Geschwindigkeit von $V = 400 \text{ km/h}$

durch die Reduktion der Raddurchmesser, wird die strömungstechnische Herausforderung zwischen Fahrzeug und Fahrweg immer anspruchsvoller. Dies wird unter anderem dadurch ersichtlich, dass Fahrzeuge im Betrieb häufiger mit dem Oberbauschotter interagieren und die Unterbodenkomponenten beschädigt werden. Eine der hier am stärksten exponierten Komponenten ist die Radsatzwelle.

Der Radsatzwellenschutz SICAP® stellt eine Weiterentwicklung des bereits über viele Jahre bewährten Produkts SISRAP® dar. Dabei werden die Funktionen des Korrosionsschutzes und des mechanischen Schutzes voneinander getrennt.

SICAP® ist ebenfalls ein demontierbarer Radsatzwellenschutz, der eine patentierte Stahl-Faserverbundstoff-Struktur aufweist. Die Widerstandsfähigkeit des Systems gegen Steinschlag oder Effekte, wie die Beanspruchungen durch Fliehkraft und Beschleunigungen, die aus der erhöhten Geschwindigkeit resultieren, ebenso wie gegen die chemischen Einwirkungen von Reinigungsmitteln, wurden durch umfassende Werkstoffcharakterisierung, Laborversuche, Simulationen und Echkörperversuche validiert.

Bild 4 zeigt den Aufprall von betriebsüblichem Bahnschotter auf einer mit SICAP® geschützten Radsatzwelle mit einer

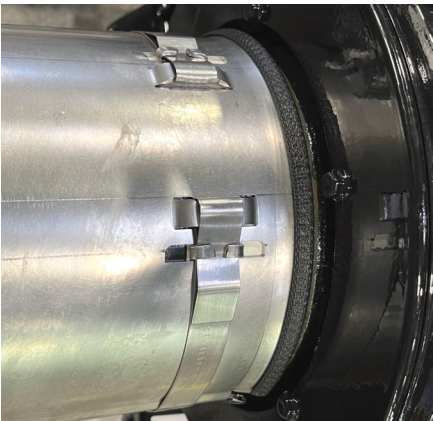


Bild 5: Integrierte Befestigung des SICAP®

Geschwindigkeit von ca. 400 km/h, was einer Aufschlagsenergie von ca. 1 300 J entspricht. SICAP® besteht aus zwei U-förmigen Stahlhalbschalen, die entsprechend der Wellengeometrie konstruiert sind: berücksichtigt werden der Wel-

lendurchmesser sowie die Übergangsgeometrie der Welle. Die Halbschalen werden auf die mit Korrosionsschutz beschichtete Oberfläche der Radsatzwelle gelegt und mit Hilfe von umlaufenden Befestigungsbändern befestigt. Die Entfernung der Halbschalen im Rahmen der Instandhaltung erfolgt durch das Durchtrennen der Befestigungsbänder. Durch die einfache Montage und Demontage sowie die Wiederverwendbarkeit bietet SICAP® eine kostengünstige und nachhaltige Instandhaltung gegenüber herkömmlichen Beschichtungssystemen. Im Falle von anspruchsvollen Bauraumforderungen (z. B. geringer Abstand zwischen Antrieb und Welle) steht eine niedrig bauende Variante zur Verfügung, welche die Befestigung der Bänder in die U-förmigen Schalen direkt integriert (Bild 5).

	Dickschichtlackierung	SISRAP®	SICAP®
Einsatztemperatur (°C)	-35 / +50	-50 / +50	-50 / +50
Validierte Aufprallenergie, Mittelwert (J)	90	600	1 300
Max. validierte Betriebsgeschwindigkeit (km/h)	320	250	400
Betriebserfahrung	- / +	+	in Erprobung
Brandschutz	-	+	+
Aufwand in Instandhaltung	-	+	+
LCC	-	+	+
+ ... besser			
- ... schlechter			

Tabelle 1: Vergleich Dickschichtlackierung mit SISRAP® und SICAP®

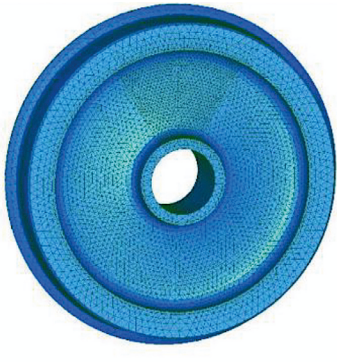
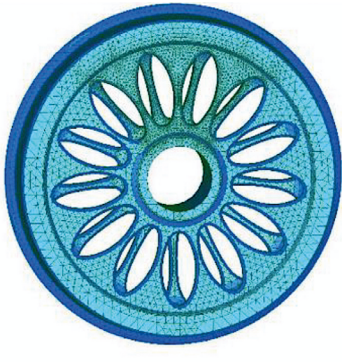
		
geschmiedet	gegossen	Werkstoff E-Modul Dichte Gewicht
ER8	ADI (GJS-900-8)	
210 GPa	168 GPa	
7,85 kg/dm³	7,1 kg/dm³	
296 kg	265 kg	

Bild 6: ADI-Speichenrad im Vergleich zu einem geschmiedeten Standardrad für einen Metro-Einsatz

In Tabelle 1 sind die beiden Siemens Wellenschutzsysteme für Hochgeschwindigkeitsanwendungen einer typischen Dickschichtlackierung gegenübergestellt.

2.3 ADI Speichenrad

Die Räder als Schlüsselement der traditionellen Schienenfahrzeuge verursachen einen erheblichen Teil der Kosten während der Lebensdauer eines Fahrzeugs. Die Kosten entstehen in erster Linie durch die Masse der Räder. Die Masse des Rades muss beim Anfahren beschleunigt und beim Bremsen abgebremst werden. Da es sich bei der Masse der Räder um unabgefederte Massen handelt, sind die zwischen Rad und Schiene wirkenden Kräfte besonders stark von der Masse des Rades abhängig. Fast noch wichtiger ist der Verschleiß zwischen Rad und Schiene, der neben dem dynamischen Verhalten des Fahrzeugs stark vom Material des Rades und von der Qualität der Radoberfläche beeinflusst wird. Die Räder sind auch für einen erheblichen Teil des vom Schienenfahrzeug erzeugten Lärms verantwortlich. Während Eisenguss, oft in Form von Kugelgraphitguss, im allgemeinen Maschinenbau, in der Fahrzeugtechnik und in der Energietechnik verwendet wird, hat er bisher als Radmaterial keine Rolle gespielt. Der entscheidende Grund dafür sind die hohen Anforderungen an das Rad im Radkontaktpunkt. Für den Einsatz als Vollrad wird daher ein Material gesucht, das sowohl eine hohe Festigkeit und geringe Verschleißtendenz im Radkontaktpunkt als auch eine hohe Duktilität und Ermüdungsfestigkeit im Radsteg aufweist. ADI steht für „Austempered Ductile Iron“ und bezeichnet ein wärmebehandeltes duktiles Gusseisen mit einer wesentlich höheren Festigkeit im Vergleich zu herkömmlichem Kugelgraphitguss bei gleicher Bruchdehnung. Die Verwendung eines Gussmaterials bietet die Möglichkeit einer freien Gestaltung des Radstegs. Diese Möglichkeit wurde bei der vorliegenden Entwicklung genutzt, anstelle des achsensymmetrischen Radstegs mit dem prozessbedingten Schmieden und Walzen. Es wurde ein Radsteg mit zahlreichen Öffnungen realisiert [7]. Für die finale Konstruktion sind die Speichen in zwei weitgehend parallelen Reihen an der Außenseite und Innenseite des Rades verteilt (Bild 6). Dadurch wird der

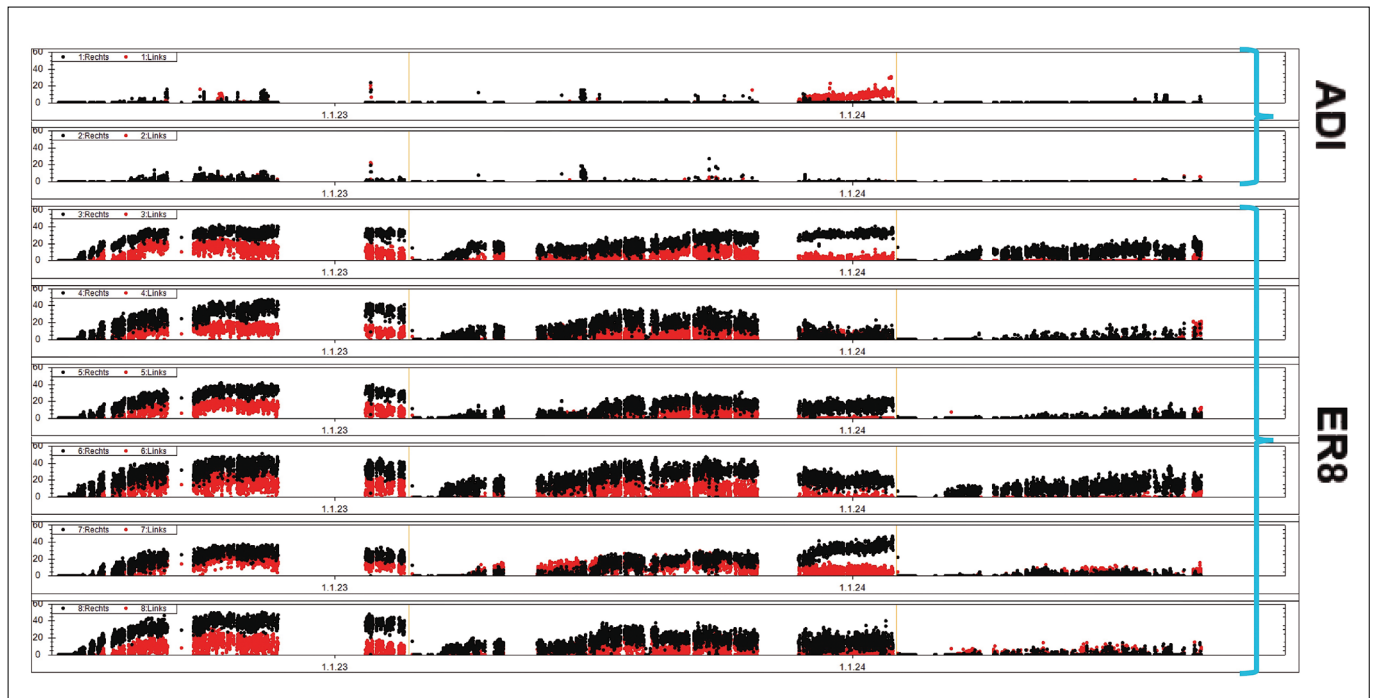


Bild 7: Beschleunigungsmessungen im Betrieb bei Radsätzen mit ADI- und konventionellen ER8-Rädern bei einem Metro-Einsatz

Raum optimal im Hinblick auf die Konstruktionsfestigkeit genutzt. Bei einem Ausfall einer Speiche können durch die Umverteilung des Kraftflusses von einer Speiche zur anderen die Radkräfte weiterhin übertragen werden. Das bedeutet die strukturelle Funktionalität des Rades ist auch bei Ausfall einer Speiche weiterhin gegeben.

Die Vorteile dieses neuen Radtyps sind:

- reduziertes Gewicht,
- geringere Lärmemissionen,
- reduzierter Radverschleiß und
- geringere Neigung zur Polygonbildung.

In *Bild 6* ist das ADI-Speichenrad einem Standard-Schmiederrad gegenübergestellt. Ein Vorteil der Speichenkonstruktion ist auch die geringere Schallabstrahlung, der bekannte Glockeneffekt des Radstegs als Lärmemissionsmembran tritt bei einem Speichenrad nicht auf.

Nach der Entwicklung und einer intensiven Testphase wurden Prototypen hergestellt, homologiert und sie befinden sich seit Dezember 2018 in einem Metro-Betrieb im Einsatz, um das Verhalten im Betrieb zu validieren. Im Betriebseinsatz wird an einer streckenfesten Beschleunigungsmessstelle ein Indikator für die Unrundheit der Räder bestimmt. Über einen Zeitraum von mehr als 2 Jahren und einer Laufleistung von > 150 000 km zeigt sich eine deutlich reduzierte Tendenz zur

Bildung von Unrundheiten (*Bild 7*). Während die Räder aus ER8 mehrfach wegen Unrundheiten überdreht werden mussten, wurden für die ADI-Speichenräder meist nur die Durchmesser aufgrund der Anforderungen an die zulässigen Durchmesserunterschiede im Fahrzeug angepasst.

2.4 Siemens-Schallabsorber

Lärm und Erschütterungen (Noise & Vibration) sind eines der Haupthindernisse für die öffentliche Akzeptanz bei der Einführung neuer Fahrzeuge, dem Bau neuer Strecken oder der Erhöhung des Verkehrsaufkommens auf bestehenden Strecken. Die Ökologisierung des Verkehrssektors ist ein weiteres Ziel der EU, das Hand in Hand mit den Initiativen zur Lärminderung geht. Wichtige Aspekte des Fahrzeuglärms sind Rollgeräusche und Kurvenquietschen. Beide können mit Hilfe von Radschallabsorbern bzw. Raddämpfern reduziert werden. Unterschiedliche Varianten sind am Markt erhältlich. Um den Einsatz dieser Technologie attraktiv zu machen, ist neben der Wirksamkeit ein niedriger Preis, eine einfache Montage und ein geringer Eingriff in die Radgeometrie für die Schnittstelle wichtig. Weiters soll die Unwucht gering und der Einsatz auch für klotzgebremste Räder möglich sein. Diese Ziele wurden mit dem Siemens-Schallabsorber erreicht.



Bild 8: Schallabsorbervariante für den Metro-Einsatz (Klotzbremse)

Die Bauweise des Schallabsorbers entspricht einem Sandwich aus Metall und Elastomer, wobei die Geometrie mit dem Ziel maximaler Raddämpfung optimiert wurde. Die Schnittstelle zum Rad ist eine einfache Nut mit 2 mm Tiefe, daher wäre auch ein Nachrüsten bestehender Räder im Prinzip möglich. Die Erprobung am Fahrzeug fand bis 320 km/h statt, am Prüfstand bis 400 km/h. *Bild 8* zeigt eine Variante für den Metro-Einsatz mit Klotzbremse. Der Wärmeeintrag auf den Absorber wird durch die Verzahnung am Ring, der in der Nut sitzt, verringert.

Bild 9 zeigt den Absorber im eingebauten Zustand für ein Hochgeschwindigkeitsfahrzeug. Ein Sicherungsstück sorgt für zusätzlichen Schutz gegen Verlust



Bild 9: Schallabsorber-Erprobung im Hochgeschwindigkeits-Einsatz (Velaro Novo) zur Reduktion des Rollgeräuschs

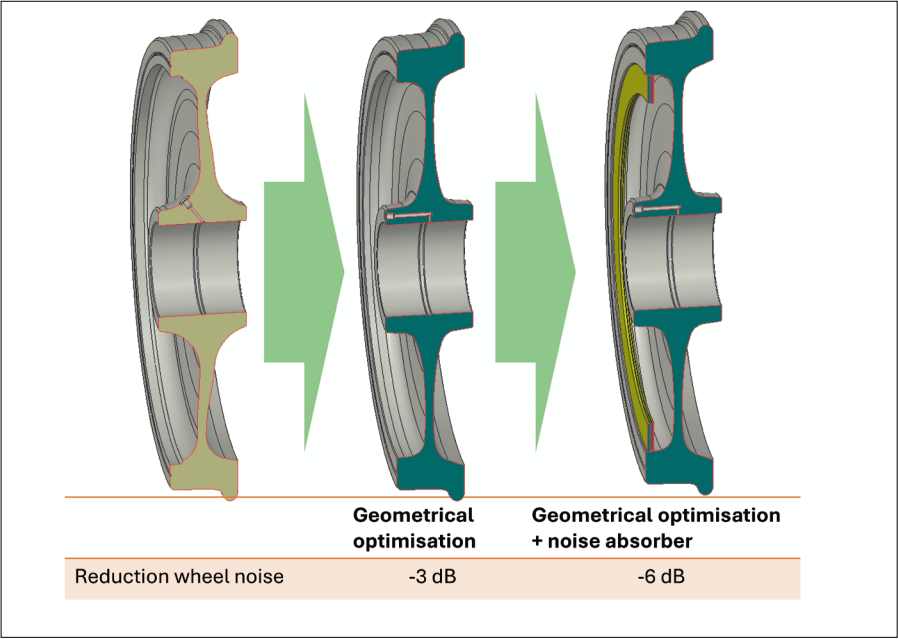


Bild 10: Reduktion Rollgeräusch durch optimierte Radgeometrie und Schallabsorber

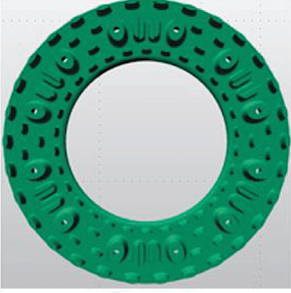
Variante 1	Variante 2	Variante 3
Benchmark mit radialen Kühlrippen		
49,0 kg	46,5 kg	47,1 kg

Bild 11: Bremsscheibenvarianten für Triebzüge mit optimiertem Kühlrippendesign

sowie für eine gute Auswuchtung des Rades.

Bild 10 stellt die Wirkung eines optimierten Raddesigns sowie eines zusätzlichen Schallabsorbers dar. Durch Optimieren der Radgeometrie kann die Schallabstrahlung des Rades bereits um 3 dB reduziert werden, durch die zusätzliche Anbringung des Schallabsorbers um weitere 3 dB.

2.5 Ventilationsoptimierte Bremsscheibe

Bremsen in Schienenfahrzeugen sind essenziell für die Sicherheit und Kontrolle von Zügen. Sie dienen dazu, die Geschwindigkeit zu reduzieren, den Zug sicher zum Stillstand zu bringen und die Geschwindigkeit auf Gefällestrrecken konstant zu halten. Sie sind thermisch und mechanisch hoch belastet und tragen, im Falle von Rad- und Wellenbremsscheiben, auch zu den ungefederten Massen bei, die maßgeblich die Schädigung von Rad und Schiene bewirken.

Durch eine geometrische Anpassung des Designs der Kühlkanäle können Gewicht bzw. Energieverbrauch (beschleunigte Massen und Ventilationsverluste) reduziert werden. Ventilationsverluste treten immer auf, sobald sich das Rad dreht, und müssen durch höhere Antriebsleistungen kompensiert werden. Bild 11 zeigt Varianten der ventilationsoptimierten Bremsscheibe. Um eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung mit geringen Thermospannungen zu erzielen, wurde für die Reibringe der Werkstoff GJL (Grauguss) gewählt. Die Entwicklung wurde durch FEM-Berechnungen des Verbundes Rad-Reibringe-Befestigungselemente und umfangreiche Prüfstandsversuche unterstützt.

Durch die Optimierung der Kühlrippen werden deutlich reduzierte Ventilationsverluste erzielt (Bild 12).

Die Radbremsscheiben mit optimierten Ventilationsverlusten zeigen bei Stoppbremsungen lediglich minimale Unterschiede im Auskühlverhalten (Bild 13). Bei Dauerbremsungen erhöht sich die Temperatur leicht, bleibt aber in einem unkritischen Bereich.

Weiters wird über die geometrische Gestaltung der Anbindung ans Rad, inkl. Verbindungs- und Zentrierelemente, eine geringe Beanspruchung der Schraubverbindung realisiert, die zu einer Redu-

zierung der Schraubenkräfte, vor allem im warmen Zustand, führt. Das wurde durch Temperatur- und Kräftemessungen an den Schrauben im Rahmen von Prüfstandsversuchen bestätigt. Zur weiteren Gewichtsoptimierung ist auch eine fahrzeugspezifische Anpassung des Verschleißvorrats möglich.

2.6 Digitalisierung des Radsatzes – Radsatzdiagnose

Um die Instandhaltungskosten der Radsätze über den Lebenszyklus zu reduzieren, die Verfügbarkeit und Planbarkeit zu erhöhen und darüber hinaus auch das Sicherheitsniveau beizubehalten bzw. sogar weiter erhöhen zu können, hat Siemens ein intelligentes Fahrwerksdiagnose-System entwickelt, das es erlaubt nicht nur die Radsätze, sondern das Fahrverhalten des Fahrzeugs als Ganzes, und auch wichtige instandhaltungsrelevante Einzelkomponenten des Fahrwerks kontinuierlich zu beobachten. Das Fahrwerksdiagnose-System liefert dem Instandhaltungsdepot folgende Informationen:

- Health States – in welchem Zustand ist der Radsatz bzw. das Fahrzeug,
- Remaining Useful Lifetime – wie lange kann das Fahrzeug noch betrieben werden, bis eine Instandhaltungsmaßnahme erforderlich ist, und
- Werkstattmeldungen – welche konkrete Instandhaltungsmaßnahme ist im Depot bei einer Abweichung von einem normalen Health State durchzuführen.

Die Basis des Fahrwerksdiagnose-Systems bilden Sensoren, welche an Radsatzlagern, Fahrwerksrahmen und im Wagenkasten verbaut sind. Diese Sensoren sind vorwiegend Beschleunigungssensoren, mit welchen es möglich ist, das dynamische Verhalten des Fahrzeugs, d. h. seine Reaktion auf die Strecke, die Umgebungsbedingungen und das Fahrspiel, zu erfassen. Die daraus gewonnenen Daten werden mit Informationen wie Beladenzustand, Fahrtrichtung und GPS-Position und Geschwindigkeit in einem Diagnoserechner zusammengeführt. Bedarfsgerechte und intelligente Algorithmen in der Bandbreite von klassischen Signalverarbeitungsmethoden über physikalische Ansätze bis hin zu modernsten Machine Learning und Artificial Intelligence

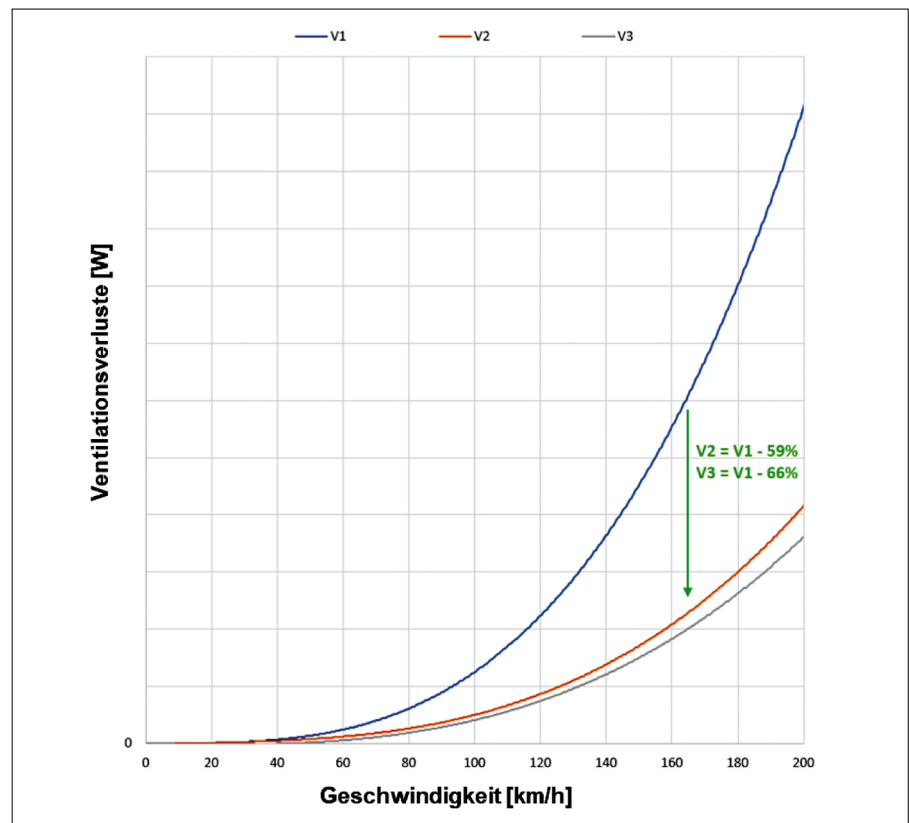


Bild 12: Ventilationsverluste unterschiedlicher Kühlrippenvarianten

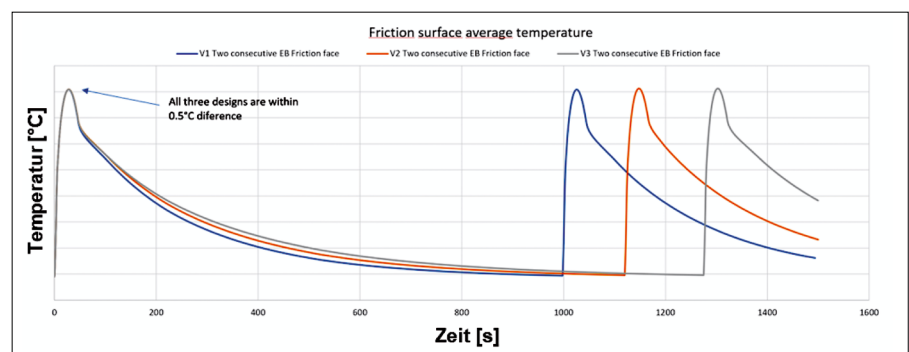


Bild 13: Temperaturverlauf bei einer Stoppbremung: Bremsausgangsgeschwindigkeit 200 km/h, Verzögerung $1,18 \text{ m/s}^2$, P_{max} 651 kW

Methoden verarbeiten die Daten zu Fahrwerksdiagnose-Informationen und liefern so Aussagen zu Radsatzlagern, Flachstellen, Raddurchmessern, Radunrundheiten, Rollkontaktermüdung am Rad (RCF) und Bremscheiben, etc. (Bild 14).

Mit der Fahrwerksdiagnose als modularem und skalierbarem System werden Schäden bereits frühzeitig erkannt und bewertet und durch eine vollständige Integration in die Instandhaltungssysteme wird die Transformation von korrektiven zu präventiven Instandhaltungsmaßnahmen erreicht (Bild 15). Damit werden ungeplante Stillstandszeiten vermieden und die notwendige Vorlaufzeit für die Planung von Instandhaltungstätigkeiten zur

Verfügung gestellt. Somit können Kosten für Ausfälle von z. B. Radsatzlagern reduziert werden. Für den Kunden ergibt sich gleichzeitig eine höhere Fahrzeugverfügbarkeit.

Durch das kontinuierliche Beobachten des Fahrwerks mit seinen Komponenten können längere Sichtkontrollintervalle erreicht werden, was ebenfalls zu niedrigeren Instandhaltungskosten und einer höheren Fahrzeugverfügbarkeit führt. Zusätzlich können im Depot die Instandhaltungsarbeiten über die Fahrzeuge hinweg besser geplant und die Fahrzeugdisposition und Ersatzteillogistik effizient gestaltet werden. Durch regelmäßige und präventive Analyse der Restlebensdauer

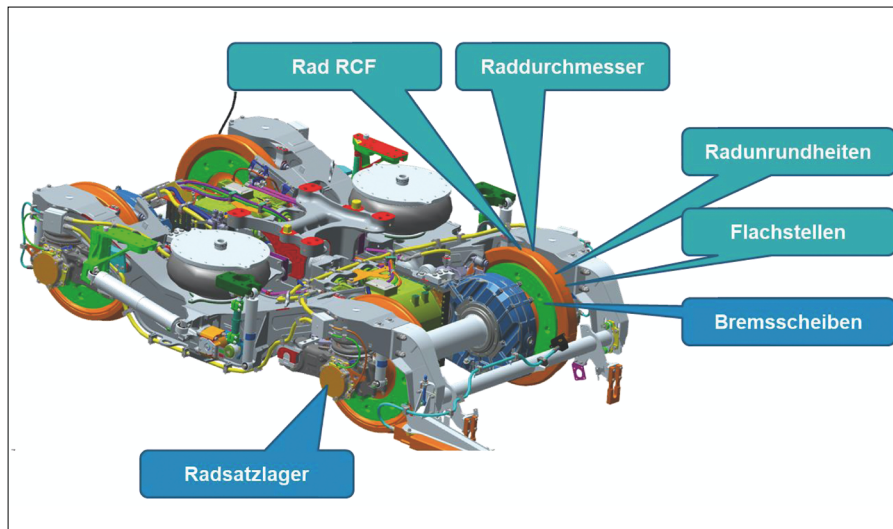


Bild 14: Fahrwerksdiagnose-Informationen rund um den Radsatz

Durch die Trennung der beiden Funktionen Korrosionsschutz und Schutz vor mechanischer Beschädigung ergibt sich mit dem Schlagschutzsystem SICAP® eine hocheffiziente Lösung zur Kostenreduktion bei korrekativer Instandhaltung und zur Erhöhung der Verfügbarkeit der Fahrzeuge für Geschwindigkeiten bis zu 400 km/h.

Die einzigartige Kombination eines verschleißbeständigen Gusswerkstoffs mit einer steifen Speichenkonstruktion reduziert bei Rädern Verschleiß und Neigung zu Unrundheiten, aber auch Gewicht und Schallabstrahlung.

Ein einfach montierbarer und kostengünstiger Schallabsorber reduziert Kur-

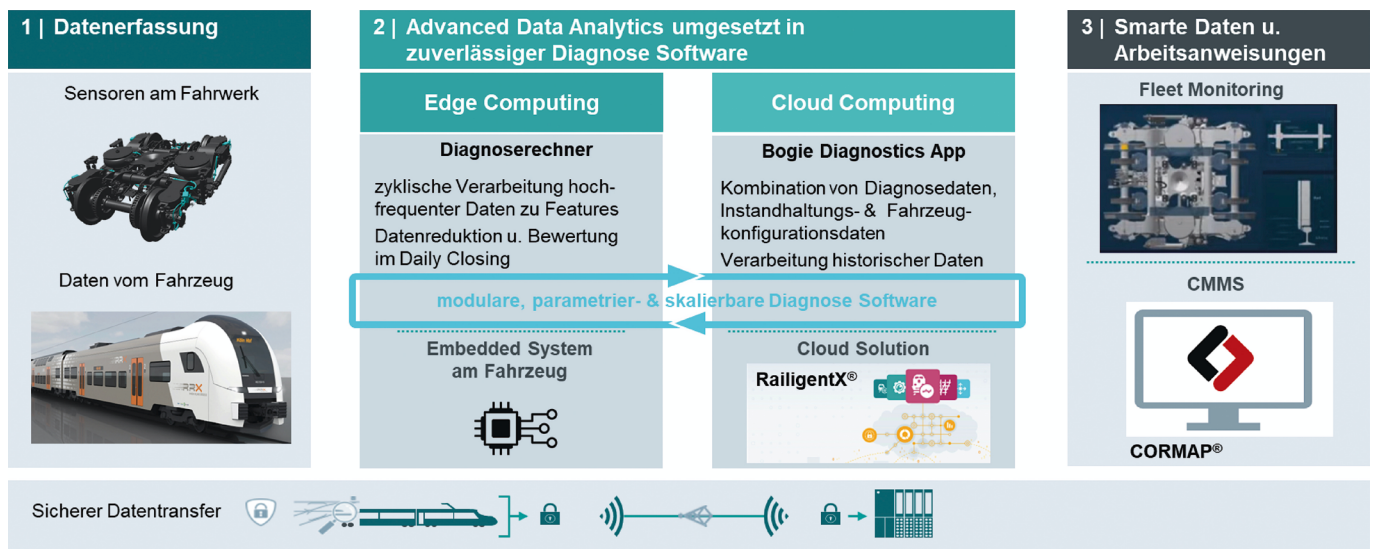


Bild 15: Architektur der Fahrwerksdiagnose

er z. B. der Komponente Radsatz werden die Reprofilierungen bedarfsgerecht durchgeführt, was zu einer Einsparung eines Radsatzwechsels im Lifecycle führen kann.

Durch die Sensorik auf Achslager- und Fahrwerkebene kann die Fahrwerksdiagnose aber auch mit Algorithmen zur Bewertung des Fahrwegzustands erweitert werden. Damit wird es für den Infrastrukturmanager möglich, den Streckenzustand kontinuierlich zu erfassen. Fehler, die sich zwischen Messfahrzeugfahrten entwickeln, können frühzeitig erkannt werden. Das erhöht die Planbarkeit der Fahrweginstandhaltungsmaßnahmen und die Streckenverfügbarkeit. Gegebenenfalls können dadurch auch die Intervalle der Messfahrzeugfahrten vergrößert werden, was zu weiteren Kostensenkungen führen würde.

3 Zusammenfassung

Eine nachhaltige Bewertung von technischen Lösungen in Schienenfahrzeugen muss auf Basis einer Lebenszyklusbeurteilung getroffen werden. D. h., höhere Kosten in Entwicklung oder Beschaffung können sich durchaus positiv auf die Gesamtkosten auswirken. Die isolierte Optimierung einzelner Komponenten oder Funktionen führt in der Regel nicht zu einem optimalen Fahrzeug.

Folgende Möglichkeiten bieten die vorgestellten Lösungsvorschläge:

Die Siemens Light-Weight Axle (LWA) ermöglicht neben Gewichtseinsparungen und der vereinfachten Instandhaltung ohne Radsatzpresse eine Verlängerung der Inspektionsintervalle bzw. in Kombination mit einer Drucküberwachung eine zustandsbasierte Instandhaltung.

venquietschen und Rollgeräusch und ist daher ein wichtiger Beitrag zur Umweltfreundlichkeit und Akzeptanz von neuen Schienenfahrzeugen.

Durch eine geometrische Anpassung des Designs der Kühlkanäle können Gewicht bzw. Energieverbrauch (beschleunigte Massen und Ventilationsverluste) bei Bremsscheiben deutlich reduziert werden. Radbremsscheiben mit optimierten Ventilationsverlusten zeigen bei Stoppbremsungen lediglich minimale Unterschiede im Auskühlverhalten und bei Dauerbremsungen nur leichte Temperaturerhöhungen in einem unkritischen Bereich.

Die Digitalisierung des Radsatzes durch Fahrwerksdiagnosesysteme erlaubt es Radsatzkomponentenlebensdauern für z. B. Radscheiben und Radsatzlager optimal auszunutzen und die Planbarkeit von Instandhaltungsmaßnahmen zu er-

höhen. Vermeintliche Ad-hoc-Ausfälle und Schäden können durch das kontinuierliche Beobachten und Bewerten der Komponentenzustände reduziert werden. Dadurch können die Lebenszykluskosten reduziert und die Verfügbarkeit der Fahrzeuge erhöht werden. Das führt darüber hinaus zu einer weiteren Verbesserung des ökologischen Fußabdrucks des Systems Bahn und zu einer Erhöhung der Kundenakzeptanz.

#25_16_A3

(Bildnachweis: 1 bis 15, Siemens)

Literatur

- [1] Kammler, M.; Küter, C.: Mireo – Die neue S-Bahn und Regionalbahn von Siemens – Innovative Transportlösungen für Megacities am Beispiel von Fahrzeug- und Subsystemkonzepten. Vortragsreihe Innovationen in der Fahrzeugtechnik, Graz, A, (2018).
- [2] IEA: The Future of Rail, IEA, Paris, aufgerufen am 20.11.2024. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>.
- [3] Research Briefing: Rise of new megacities will drive global urban growth | Oxford Economics, Jan 26, 2024.
- [4] Bobsien, S.: Disruptive Trends in der Schie-

nenfahrzeugindustrie – Emissionsfreie Antriebe & Digitalisierung. 20. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden, (2024).

- [5] Arnold, H.; Henrich-Köhler, C.: Studie zur Gestaltung und Entwicklung der Eisenbahninfrastrukturpreise in Europa, PricewaterhouseCoopers GmbH für Deutsche Bahn AG, www.pwc.de (2018).
- [6] Kömer, O.; Weber, F.-J.; Ebert, F.; Pahlke, H.; Rieger, M.; Stine, G.; Strommer, K.; Trantin, H.: Schnellaufende Antriebe mit integrierter Bremse und Leichtbauradsatz, ZEVrail 146, Tagungsband SFT Graz (2022).
- [7] Strommer, K.; Weber, F.-J.: The ADI spoke wheel – new developments to meet new requirements, XIX International Wheelset Congress, Venice, I (2019).



Dr. Johann Blaha (52). Studium Werkstoffwissenschaften an der Montanuniversität Leoben, Promotion an der TU München, Fakultät für Maschinenbau. Seit 2013 bei Siemens Mobility Austria GmbH im Bereich Fahrwerksentwicklung als Leiter

Radsatzentwicklung.

Anschrift: Siemens Mobility Austria GmbH, SMO RS CP BG&P EN SDE WS, Eggenberger Str. 31, 8020 Graz, Österreich.

E-Mail: johann.blaha@siemens.com

Dr. László Boronkai (50). Studium Maschinenbau und PhD in der Fachrichtung Schienenfahrzeuge an der TU Budapest, Lehrstuhl für Schienenfahrzeuge; Studium Wirtschaftsingenieur, Fachrichtung Verkehr, TU Budapest. 1998-2004 Kons-

trukteur, Leiter Technik bei der Ganz-David Brown GmbH, Budapest. Seit 2004 Komponentenverantwortlicher bei Siemens Mobility Austria GmbH. Jetzige Tätigkeit: Principal Key Expert, Fachgebiet Radsätze, Mitglied des europäischen Normungsgremiums CEN TC256 SC2 WG11.

Anschrift: Siemens Mobility Austria GmbH, SMO RS CP BG&P EN SDE WS, Eggenberger Straße 31, 8020 Graz, Österreich.

E-Mail: laszlo.boronkai@siemens.com

Ing. Dschambul Huber (32). Studium an der Höheren Technischen Bundeslehranstalt für Maschinenbau. Seit 2015 bei Siemens Mobility Austria GmbH im Bereich Fahrwerksentwicklung zuerst als Baugruppenkonstrukteur und in weiterer Folge als

Komponentenverantwortlicher im Fachbereich Radsatz tätig.

Anschrift: Siemens Mobility Austria GmbH, SMO RS CP BG&P EN SDE WS, Eggenberger Str. 31, 8020 Graz, Österreich.

E-Mail: dschambul.huber@siemens.com

Dr. Martin Rosenberger (48). Studium Maschinenbau und Mechatronik sowie Promotion an der TU Graz. Seit 2016 bei der Siemens Mobility Austria GmbH im Bereich Fahrwerksentwicklung tätig, Head of Department Vehicle Dynamics, Acoustics & Analytics

und Area Manager Innovation Area Digitalization in Products. Leiter Arbeitskreis Schienenfahrzeuge bei der Österreichischen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft (ÖVG).

Anschrift: Siemens Mobility Austria GmbH, SMO RS CP BG&P EN VDA, Eggenberger Str. 31, 8020 Graz, Österreich.

E-Mail: martin.rosenberger@siemens.com

Dipl.-Ing. Gerhard Stine (48). Studium Maschinenbau Verkehrstechnik an der TU Graz. Seit 2010 bei der Siemens Mobility Austria GmbH im Bereich Fahrwerksentwicklung als Komponentenverantwortlicher im Fachbereich Radsatz tätig. Key

Expert Radsatzentwicklung, Mitglied des europäischen Normungsgremiums CEN TC256 SC2 WG11.

Anschrift: Siemens Mobility Austria GmbH, SMO RS CP BG&P EN SDE WS, Eggenberger Str. 31, 8020 Graz, Österreich.

E-Mail: gerhard.stine@siemens.com

Dr. Franz-Josef Weber (58). Studium Maschinenbau an der RWTH Aachen, Promotion an der TU Budapest. Seit 1997 bei Siemens Mobility Austria GmbH im Bereich für Fahrwerksentwicklung tätig, seit 2012 als Leiter Systems Development, seit 2021

zusätzlich Innovation Area Manager Components & Alternative Materials.

Anschrift: Siemens Mobility Austria GmbH, SMO RS CP BG&P EN SDE, Eggenberger Str. 31, 8020 Graz, Österreich.

E-Mail: franz-josef.weber@siemens.com

Dr. Gerald Schleinzer (55). Studium Physik an der Technischen Universität Graz sowie der Werkstoffwissenschaften an der Montanuniversität Leoben. Seit 2000 bei der Siemens Mobility Austria GmbH im Bereich Fahrwerksentwicklung zuständig für Fahrwerkakustik. Mitglied bei der TSI-Noise Working Group (ERA) sowie Mitglied des europäischen Normungsgremiums CEN TC256 WG03.

Anschrift: Siemens Mobility Austria GmbH, SMO RS CP BG&P EN VDA AC, Eggenberger Str. 31, 8020 Graz, Österreich.

E-Mail: gerald.schleinzer@siemens.com

Dipl.-Ing. Helmut Trantin (56). Studium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau an der TU Graz. Seit 2014 bei der Siemens Mobility Austria GmbH Leiter der Gruppe für Fahrwerksbremssysteme.

Anschrift: Siemens Mobility Austria GmbH, SMO RS CP B BEN, Eggenberger Str. 31, 8020 Graz, Österreich.

E-Mail: helmut.trantin@siemens.com

Dipl.-Ing. Rüdiger Zenz (62). Studium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau an der TU Graz. Senior Ingenieur für Bremssysteme im Fahrwerk bei der Siemens Mobility Austria GmbH.

Anschrift: Siemens Mobility Austria GmbH, SMO RS CP B BEN, Eggenberger Str. 31, 8020 Graz, Österreich.

E-Mail: ruediger.zenz@siemens.com