

SIEMENS

Ingenuity for life

Dipl.-Ing. Arnd Meyer,
Erlangen

Radsatz- oder Einzelradfahrwerke – von der Theorie zur Praxis

[siemens.com/mobility](https://www.siemens.com/mobility)

Zusammenfassung

Dem Prinzip „Einzelrad“ für Eisenbahnfahrwerke haftet der Vorwurf einer Notlösung an – es sei kein Platz für die Welle da. In diesem Beitrag wird zunächst in der Theorie gezeigt, wie die Spurführung von Einzelradfahrwerken funktioniert und warum dieses Prinzip in den engen Straßennetzen sogar Vorteile gegenüber dem Radsatz hat. Diese Überlegungen werden anschließend mit Felddaten hinterlegt, so dass sich zeigt, Straßenbahnen mit Einzelradfahrwerken haben einen hervorragenden Fahrkomfort und geringen Rad/Schiene-Verschleiß – wenn auf die Besonderheiten dieses Prinzips Rücksicht genommen wird.

1. Einleitung

„Welle oder nicht Welle, das ist hier die Frage!“ So könnte man frei nach Shakespeare zitieren, wenn es um das Spurführungskonzept von Fahrwerken für Straßenbahnen geht. Während bei Vollbahnen fast ausschließlich Drehgestelle mit Radsätzen verwendet werden, ist sich die Branche bei Straßenbahnen uneins. So verlockend die Möglichkeiten der Einzelradfahrwerke für durchgehend niedrige Fußböden im Fahrgastraum sind, so groß ist auch die Skepsis, das fast 200 Jahre alte und bewährte Prinzip der Radsatzwelle aufzugeben.

Der vorliegende Aufsatz soll helfen, auf sachlicher Basis entscheiden zu können, welches Spurführungsprinzip für konkrete Einsatzbedingungen den besten Kompromiss darstellt. Wurde in [1] und [2] die überraschend komplexe Theorie der Bewegung von Einzelrädern beleuchtet, wird im Folgenden der Zusammenhang mit dem Gesamtfahrzeug hergestellt und Ergebnisse aus der Praxis dargestellt. So gut unser theoretisches Verständnis der Spurführung auch ist, ob der Kompromiss aus den unterschiedlichen Anforderungen gelungen ist, zeigt erst die Praxis. Am Beispiel der Fahrzeuge der Siemens AG, München wird aufgezeigt, wie eine erfolgreiche Umsetzung mit hohem Fahrkomfort und geringem Verschleiß in der Praxis aussehen kann.

2. Anforderungen an Fahrwerke

Sollen unterschiedliche Konzepte bewertet werden, sind zunächst die Anforderungen zu klären. Hierbei soll der Fokus auf konzeptdifferenzierende Anforderungen gelegt werden. So ist z. B. die sichere Spurführung eine Grundvoraussetzung und bei jedem zugelassenem Fahrzeug gegeben. Verschleißverhalten und Fahrkomfort werden jedoch stark durch das Spurführungskonzept beeinflusst.

2.1 Geringer Verschleiß

Das Reprofilieren und Austauschen der Radreifen aufgrund von Verschleiß ist eines der teuersten Einzelkosten in der Fahrzeuginstandhaltung. Es ist offensichtlich, dass das Spurführungskonzept hierauf erheblichen Einfluss hat. Diesem Thema wird im Folgenden besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

2.2 Hoher Fahrkomfort

Beeinflusst durch die Randbedingungen der Vollbahnen, stehen bei der Beurteilung des Fahrkomforts die Schwingungen in z-Richtung (Fahrzeughochachse) im Vordergrund. Bei Straßenbahnen ist jedoch durch die Häufigkeit der Krümmungswechsel in der Trassierung der Komfort in y-Richtung (Fahrzeugquerachse) mindestens genauso wichtig. Hier gilt es zu zeigen, wie und in welchem Maße das Spurführungskonzept einfließt.

3. Bewertung der Spurführung von Radsatz- und Einzelradfahrwerken

3.1 Was ist Spurführung?

Spurführung ist die Vorgabe der Bewegungsrichtung von Fahrzeugen durch den Fahrweg. Hierfür müssen die Fahrwerke sich selbsttätig aus Fehlstellungen befreien können. Mögliche Fehlstellungen sind ein Querversatz, eine Verdrehung im Gleis und die Kombination beider (Bild 1). Die für die Rückstellung notwendigen Rad/Schiene-Kräfte können Form- oder Kraftschlusskräfte sein.

Kraftschlusskräfte treten auf, wenn beim rollenden Rad eine Relativbewegung – ein Schlupf – der Berührflächen im Rad/Schiene-Kontakt stattfindet. Dies kann in Längsrichtung erfolgen, wie beim angetriebenen oder gebremsten Rad (Bild 2 rechts) und in Querrichtung. Ein Schlupf in Querrichtung entsteht, wenn das Rad, wie in (Bild 2 links), nicht parallel zur Schiene ausgerichtet ist. Die Bewegung kann im Berührungspunkt nicht vollständig durch Abrollen aufgenommen werden, der Queranteil führt zu Schlupf. Längs- und Querkraftschlusskräfte können für die Spurführung genutzt werden, sind jedoch verschleißbehaftet, da Schlupf und Kraft in die gleiche Richtung weisen und somit Arbeit verrichten – Verschleißarbeit.

Unter Formschlusskraft wird die Normalkraft im Rad/Schiene-Berührungspunkt verstanden. Hat diese Kraft eine Komponente in Querrichtung (in Bild 3 mit S_y bezeichnet), kann diese zur Spurführung genutzt werden. Da die Hauptbewegungsrichtung des Rades in Längsrichtung der Schiene folgt, steht S_y senkrecht darauf und verrichtet somit keine Arbeit. Spurführung mit Formschlusskräften ist also praktisch verschleißfrei.

3.2 Fahrt in der Geraden

3.2.1 Das Radsatzfahrwerk

Die Mechanismen der Spurführung des Radsatzes in der Geraden sind allgemein bekannt. Wird ein Radsatz querverschoben, sind die Radradien im Berührungspunkt der Räder unterschiedlich. Aufgrund der starren Drehzahlkopplung wird dadurch ein Rad zum treibenden, das andere zum bremsenden Rad. Dies führt zu einer „Lenkbewegung“, welche den Radsatz wieder zur Gleismitte führt. Die Bewegung geht über die Mitte hinaus, bis sich eine spiegelgleiche Situation zum Anfang einstellt – der Vorgang beginnt erneut (siehe Bild 4). Die sich so wiederholende Bewegung wird „Sinuslauf“ genannt [3] und wurde von Johannes Klingel 1883 zum ersten Mal beschrieben.

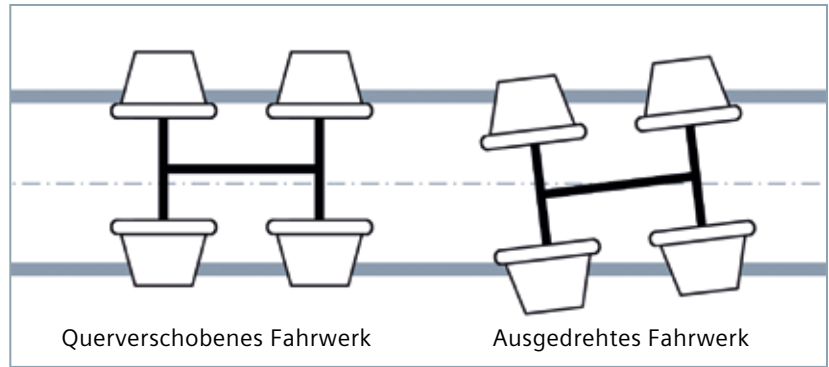


Bild 1: Mögliche Fehlstellungen des Fahrwerks im Gleis

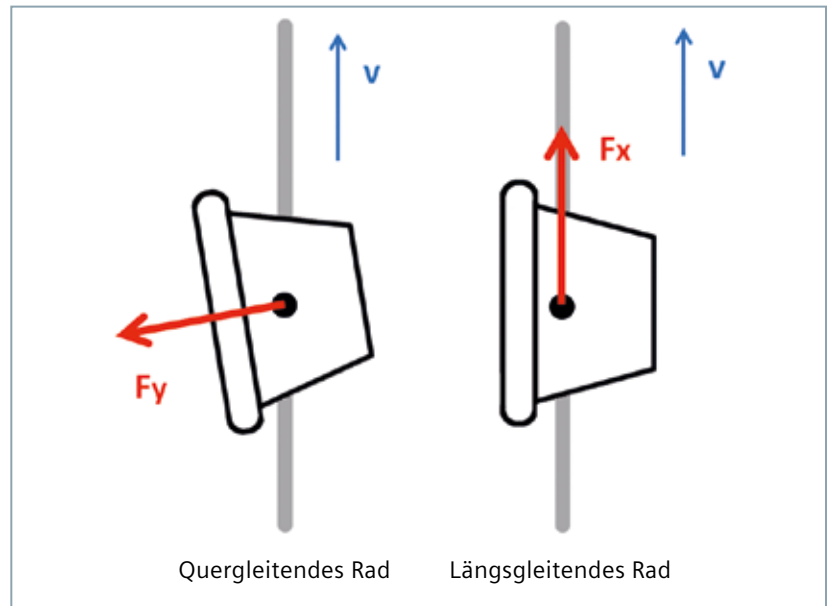


Bild 2: Kraftschlusskraft in Quer- und Längsrichtung im Rad/Schiene-Berührungspunkt
 v : Fahrgeschwindigkeit
 F_x, F_y : Kraftschlusskräfte

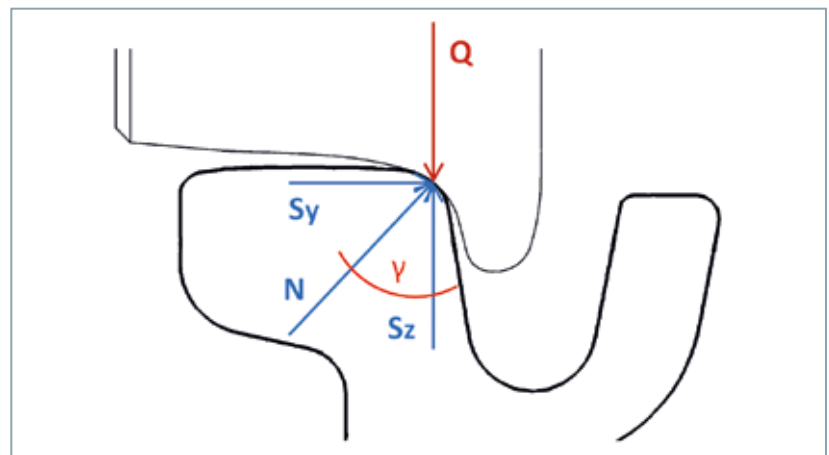


Bild 3: Zerlegung der Formschlusskräfte im Rad/Schiene-Berührungspunkt
 Q : Radlast
 N : Normalkraft in der Berührfläche
 S_y, S_z : Formschlusskräfte in y - und z -Richtung
 γ : Berührflächenneigung

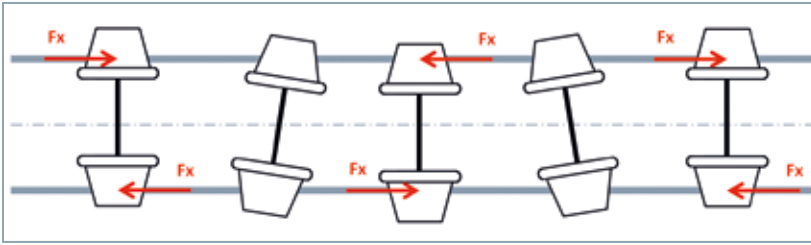


Bild 4: Sinuslauf des Radsatzes
 F_x : Längs-Kraftschlusskraft

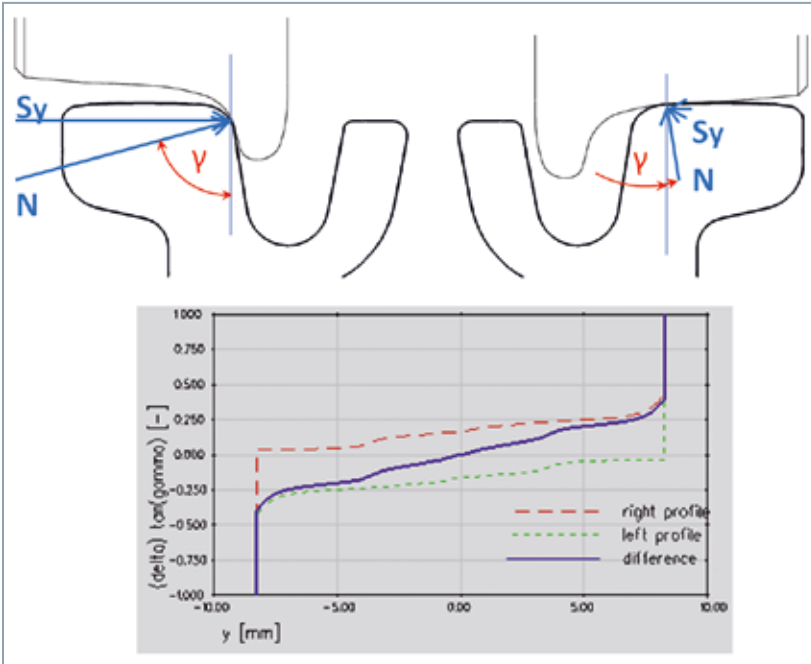


Bild 5: Kräftegleichgewicht am querversetzten Einzelradpaar
 N : Normalkraft in der Berührfläche
 S_y : Formschlusskräfte in y -Richtung
 γ : Berührflächenneigung
 $\delta \tan(\gamma)$: Zentrierfaktor

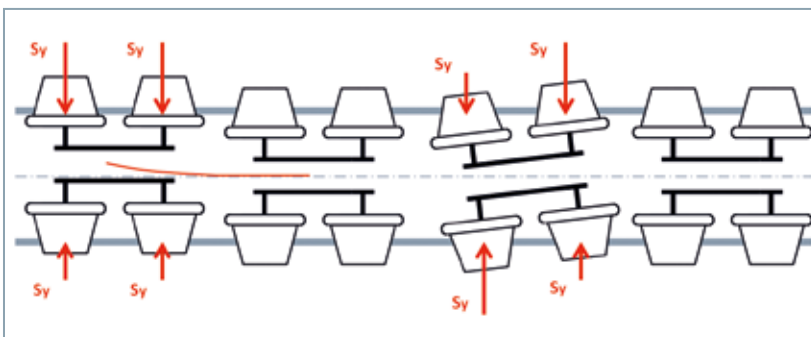


Bild 6: Befreiung des Einzelradfahrwerkes aus Querversatz und Verdrehung durch Formschlusskräfte
 S_y : Formschlusskräfte in y -Richtung

Es ist ersichtlich, dass allein dieser Mechanismus ausreicht, um sowohl einen Querversatz als auch eine Verdrehung im Gleis zu korrigieren. Dies funktioniert für einen einzelnen Radsatz ebenso, wie für zwei zu einem Fahrwerk kombinierte Radsätze.

Der Sinuslauf führt in der Geraden zu einer weitgehend gleichmäßigen Abnutzung der Fahrfläche der Räder, wobei jedoch ausschließlich verschleißbehaftete Längs-Kraftschlusskräfte „verwendet“ werden. Die Wellenbewegung des Radsatzes überträgt sich auf das gesamte Fahrzeug und beeinflusst damit den Fahrkomfort. Zudem ist die Stabilität des Sinuslaufes abhängig von der Fahrgeschwindigkeit. Zu jeder Konstruktion gibt es eine „kritische Geschwindigkeit“ ab der der Lauf instabil wird und das Fahrzeug zwangsläufig entgleist. Die Höhe dieser Geschwindigkeit ist durch vielerlei konstruktive Parameter beeinflussbar, so dass hieraus in der Praxis keine Gefahr entsteht. Der Effekt zwingt in der Konstruktion aber zu Kompromissen, zum Nachteil von Fahrkomfort und Rad/Schiene-Verschleiß.

3.2.2 Das Einzelradfahrwerk

Die Spurführung von Einzelradfahrwerken beruht auf völlig anderen Wirkweisen. Dabei spielt die Radprofilform eine entscheidende Rolle. Ist für den Sinuslauf des Radsatzes ein kegelförmiges Profil ausreichend, muss die Geometrie bei Losrädern eine von der Radstirn zum Radrücken hin größer werdende Steigung aufweisen. Bild 5 zeigt, dass dann ein Querversatz des Radpaares zu ungleich großen S_y -Kräften an linkem und rechtem Rad führt, so dass eine zentrierende Wirkung entsteht. Die Größe der zentrierenden Kraft ist dabei eine Funktion der Querverschiebung. Im Bild ist der Zentrierfaktor „ $\delta \tan(\gamma)$ “ dargestellt. Dieser, multipliziert mit der mittleren Radlast, ergibt die auf das Radpaar wirkende Zentrierkraft. Bei Bahnen mit Einzelradfahrwerken ist die Zentrierkraft sowohl für die Befreiung aus Querversatz wie auch aus einer Verdrehung des Fahrwerkes verantwortlich (siehe Bild 6). Die Formschlusskräfte S_y wirken senkrecht zur Fahrgeschwindigkeit und somit praktisch verschleißfrei.

Die für die Spurführung von Einzelradfahrwerken notwendige gehöhlte Profilform weist noch weitere Vorteile gegenüber kegeligen Profilen auf. Bereits Anfang der 70er Jahre wurde für Vollbahnen das UIC-ORE-Einheitsprofil S1002 [4] entwickelt. Ziel der Entwicklung war, eine über die Laufzeit, trotz des unvermeidlichen Verschleißes, möglichst konstante Profilform zu gewährleisten. Obwohl niemand bei der Entwicklung an Einzelradfahrwerke gedacht hat, wäre das S1002 durchaus geeignet, eine vernünftige Spurführung mit Einzelrädern zu gewährleisten.

Aufgrund der fehlenden starren Drehzahlkopplung der Räder gibt es in der Praxis der Einzelradfahrwerke keinen Sinuslauf und somit keine daraus resultierende „kritische Geschwindigkeit“ oder negative Auswirkung auf den Fahrkomfort. Interessanter Weise zeigen Prof. Dellmann und Dr. Abdelfattah in [1] und [2], dass auch ein Losradpaar einen Wellenlauf, ähnlich dem eines Radsatzes, ausführt. Die Untersuchungen beziehen sich jedoch auf ein einzelnes Losradpaar ohne einen sich darauf abstützenden Wagenkasten. Fügt man dem Modell eine Fahrwerkanbindung und die Masse und Massenträgheit eines Wagenkastens hinzu, verliert sich der Effekt – so wie es in der Praxis zu beobachten ist.

Zu beachten ist, dass die Zentrierwirkung ausschließlich aus den Profil-Formschlusskräften geringer ist, als die eines Radsatzfahrwerkes. Bei der Fahrwerkkonstruktion muss daher großer Wert auf exakte Parallelität der „Achsen“ sowie der Räder gelegt werden. Gelingt dies, stellt sich auch nicht das unerwünschte einseitige Anlaufen von Einzelradfahrwerken ein.

3.2.3 Der Vergleich

Radsatzfahrwerke stellen ein fast 200 Jahre bekanntes, funktionierendes Spurführungskonzept dar, welches jedoch aufgrund des Wellenlaufes unerwünschte Schwingungen in das Fahrzeug einträgt. Einzelradfahrwerke kennen diesen Effekt nicht und ermöglichen so einen sehr ruhigen und verschleißarmen Lauf in der Geraden. Ein geringer Verschleiß setzt aber bei der Konzeption des Fahrwerkes ein besonderes Augenmerk auf Achs- und Radparallelität sowie auf ein geeignetes Radprofil voraus.

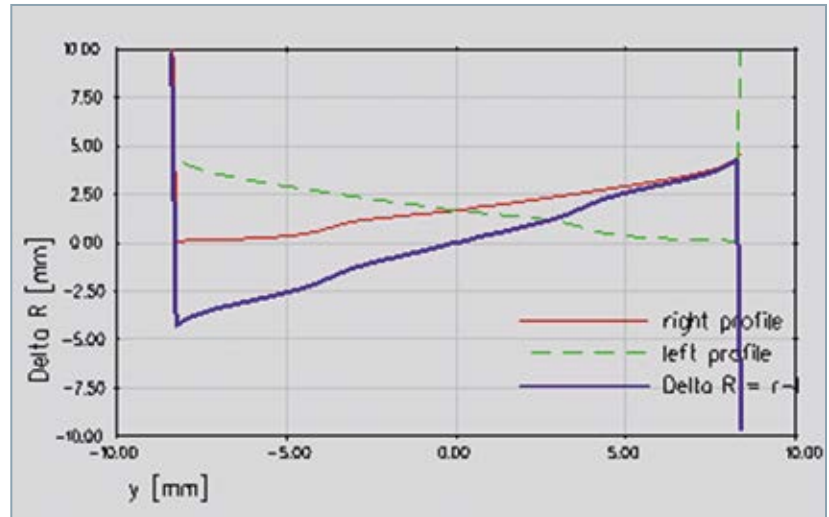


Bild 7: Radradiendifferenz zwischen linkem und rechtem Rad bei Querverschiebung im Gleis

y : Querverschiebung im Gleis

Delta R: Radradiendifferenz der Räder

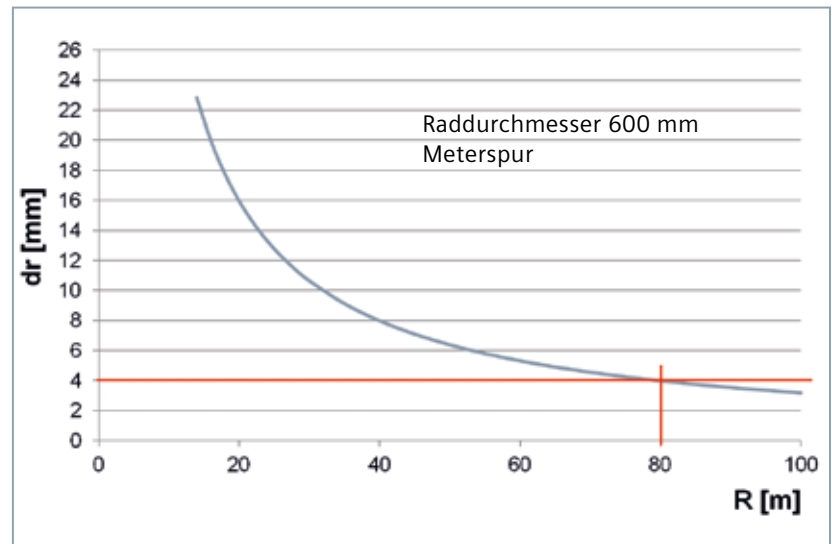


Bild 8: Für ein Längsschlupf-freies Abrollen notwendige Radradiendifferenz in Abhängigkeit vom Bogenradius

dr : Radradiendifferenz

R : Bogenradius

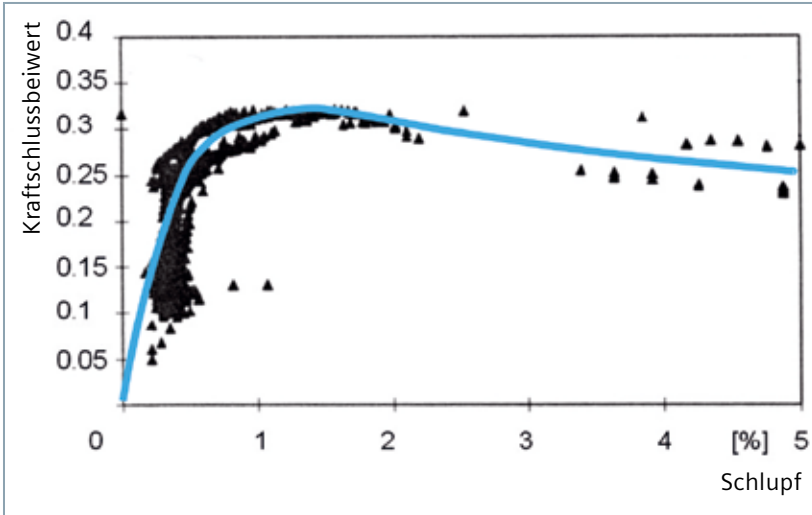


Bild 9: Nach einer Messung der Deutschen Bahn ermittelte Kraftschluss-Schlupf-Funktion für die Längsrichtung (Quelle [5])

3.3 Fahrt im Bogen

3.3.1 Das Radsatzfahrwerk

Radsätze können trotz starrer Drehzahlkoppelung von bogenäußeren und -innerem Rad in weiten Bögen schlupffrei abrollen. Dies ist möglich, da durch Querverschieben nach bogenaußen eine Radradiendifferenz ΔR aufgebaut wird (siehe Bild 7) und somit die Umfangsgeschwindigkeit im Berührungspunkt beim bogenäußeren Rad größer ist, als beim inneren. Diese Eigenschaft – das selbsttätige Einlenken in Bögen – macht den Radsatz

zum (fast) unangefochtenen Spurführungselement bei Vollbahnen. Straßenbahnnetze unterscheiden sich jedoch von denen der Vollbahnen unter anderem in deutlich geringeren Bogenradien. Radien von 20 m sind häufig anzutreffen und auch 15 m sind zu finden. Bei diesen kleinen Bogenradien funktioniert der Mechanismus der Radsätze nicht mehr. In Bild 8 ist für ein typisches Straßenbahnsystem über den Bogenradius aufgetragen, welche Radradiendifferenz notwendig ist, um ein längsschlupffreies Abrollen zu ermöglichen. Bei einer sinnvoll angenommenen Rad/Schiene-Paarung ist die maximal mögliche Differenz 4 mm. An diesem Punkt ist der Spurkranzlauf erreicht. Diese 4 mm ermöglichen aber nur schlupffreies Befahren eines 80 m Bogens. Der „beliebte“ 25 m Bogen benötigt bereits 14 mm Differenz. Offensichtlich ist Längsgleiten beim Befahren von Straßenbahnbögen mit Radsätzen die Regel. Längsgleiten, das unweigerlich zu Verschleiß führt. Dies sei an einem Beispiel quantifiziert:

Beim Befahren eines Bogens mit $R = 30$ m ergibt sich mit den Bedingungen aus Bild 8 geometrisch ein Längsschlupf von 1 %. Die führt nach Bild 9 auf trockener Schiene zu einem Kraftschlussbeiwert von 0,3. Mit einer Radlast von 40 kN (2/3 beladenes Fahrzeug) wirkt somit an jedem Rad eine Reibkraft von 12 kN!

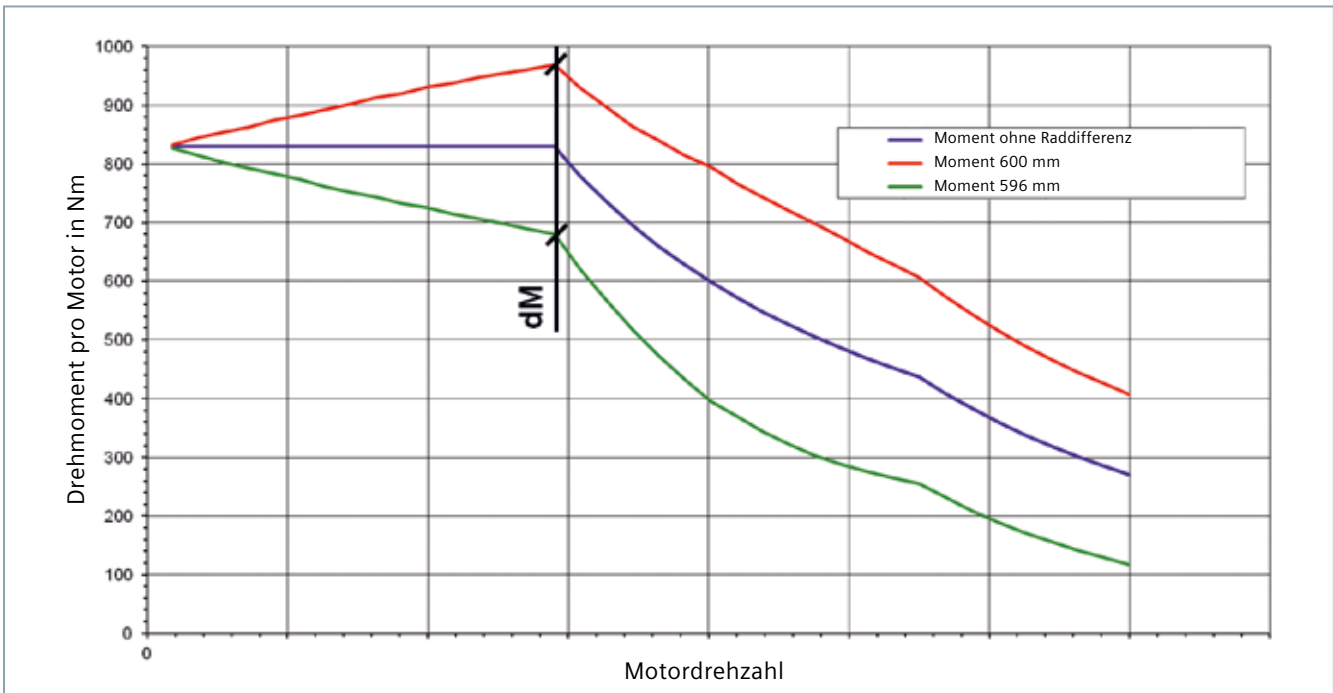


Bild 10: Drehmoment-Drehzahl Kennlinien der Avenio-Motoren bei Ansteuerung über einen gemeinsamen Traktionsumrichter mit und ohne Radradiendifferenzen in den Berührungspunkten
dM: Differenzmoment von rechtem zu linkem Motor

3.3.2 Das Einzelradfahrwerk

Der Mechanismus, der Einzelradfahrwerke selbsttätig in den Bogen einlenken lässt, ist der gleiche, der sie in der Geraden aus einer Verdrehung im Gleis befreit (siehe Bild 6). Ob sich das Fahrwerk über dem Gleis verdreht oder das Gleis unter der Fahrwerk (die Bogeneinfahrt), ist dabei unerheblich. Einzelradfahrwerke haben keine starre, mechanische Drehzahlkopplung und sind daher Prinzip bedingt von dem daraus resultierenden Längsgleiten in engen Bögen nicht betroffen – sofern sie nicht durch eine „elektrische Welle“ verbunden sind. Rechtes und linkes Rad werden bei Einzelradfahrwerken häufig durch den gleichen Traktionsumrichter angesteuert und erhalten daher ein Ständer-Drehfeld mit identischer Drehzahl. Wäre die Raddrehzahl starr an das Drehfeld gekoppelt, ergäben sich die gleichen Verhältnisse, wie bei der mechanischen Kopplung. Durch die üblicherweise verwendeten Asynchronmaschinen existiert diese starre Kopplung nicht, sondern sie verhält sich eher wie ein Drehdämpfer zwischen rechtem und linkem Rad. Die Wirkung dieses „Drehdämpfers“ soll nun quantifiziert werden.

Im Folgenden wird das Losradfahrwerk mit Längsantrieb von Siemens betrachtet. Dies wurde für die Combino-Fahrzeugflotte entwickelt und nahezu unverändert für die Avenio M Plattform (Ulm) übernommen. Auch das Fahrwerk der Avenio Plattform (München, Den Haar, Qatar) hat das bewährte System übernommen, wobei die Fahrwerkanbindung an den Wagenkasten an die unterschiedlichen Anforderungen eines Eingelenk-Fahrzeuges gegenüber denen eines Multigelenkfahrzeuges angepasst wurde. Im Weiteren werden die Fahrwerke aller drei Fahrzeugfamilien der Einfachheit halber „Avenio-Fahrwerke“ genannt. Ist für die Betrachtung der Fahrzeugtyp relevant, wird darauf hingewiesen.

Es werde ein Bogen mit $R = 30 \text{ m}$ mit der nach BOStrab-Trassierungsrichtlinien vorgegebenen Querschleunigung von $a_q = 0,65 \text{ m/s}^2$ und somit einer Fahrgeschwindigkeit von 16 km/h befahren. Nach Bild 8 ist für ein Durchfahren mit gleichen Drehzahlen an rechtem und linken Rad eine Radradiendifferenz von $dr_{\text{notw}} = 10 \text{ mm}$ notwendig. Für die hier betrachtete Rad/Schiene-Paarung ist aber nur eine maximale Differenz von $dr_{\text{mögl}} = 4 \text{ mm}$ möglich. Es ergibt sich also ein Fehlbetrag von $dr_{\text{fehl}} = 6 \text{ mm}$, der zu einem Verspannmoment zwischen den Rädern führt. Bild 10 zeigt wie groß dieses Moment für eine Radiendifferenz von 2 mm

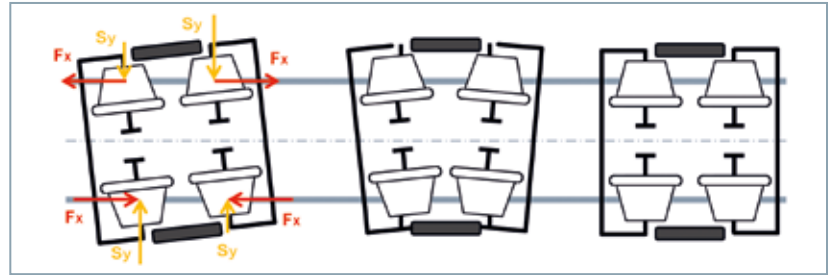


Bild 11: Wirkungsweise des Längsantriebes bei im Gleis verdrehter Fahrwerksstellung
 S_y : Formschlusskräfte in y-Richtung
 F_x : Längs-Kraftschlusskräfte

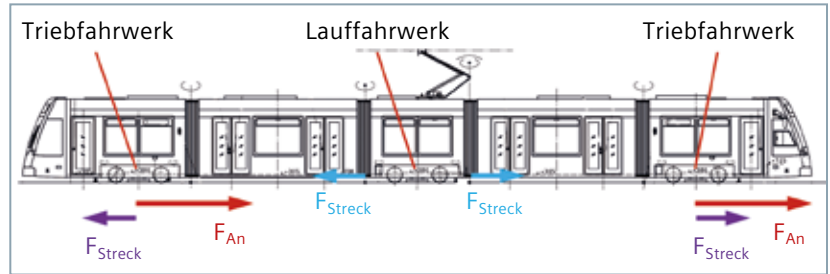


Bild 12: Prinzip der Fahrzeugstreckung zur Unterstützung der Zentrierung des Lauffahrwerkes am Beispiel des Avenio M
 F_{An} : Mittlere Antriebskraft der Triebfahrwerke
 F_{Streck} : Überlagerte Streckkraft

bei maximalem Motormoment ist. Unter Berücksichtigung der Getriebeübersetzung, des Raddurchmessers und der Tatsache, dass zwei Räder von einem Motor angetrieben werden (Längsantrieb des Avenio) ergibt sich eine Längskraft im Rad/Schiene-Berührungspunkt von $F_{x,\text{max},2} = 1,8 \text{ kN}$ pro Rad. In unserem Beispiel ist die wirksame Radiendifferenz 6 mm , so dass der Wert für 2 mm vereinfacht linear auf den dreifachen Wert extrapoliert wird. Bei maximalem Motormoment ergäbe sich so eine Längskraft von $F_{x,\text{max},6} = 5,4 \text{ kN}$ pro Rad. Die Fahrt in der Ebene im Bogen mit $R = 30 \text{ m}$ verlangt jedoch nicht das maximale Motormoment, sondern ca. 20% davon. Den Großteil des Fahrwiderstandes macht dabei der Bogenwiderstand aus. Dieser ergibt sich hauptsächlich aus Quergleiten der Räder aufgrund der Spießgangstellung der Fahrwerke in engen Bögen. Ein Phänomen, das allen Fahrwerken anhaftet, bei denen sich die Räder im Bogen nicht vollständig radial einstellen können – unabhängig ob Radsatz- oder Einzelradfahrwerk. Bei Abruf von 20% des maximalen Momentes reduziert sich die Längskraft – wieder vereinfacht linear interpoliert – ebenfalls auf ein Fünftel und damit auf $F_x = 1,1 \text{ kN}$. Ein Längsschlupf-freies Abrollen in engen Bögen gibt es im Allgemeinen also auch bei angetriebenen oder gebremsten Losradfahrwerken nicht.

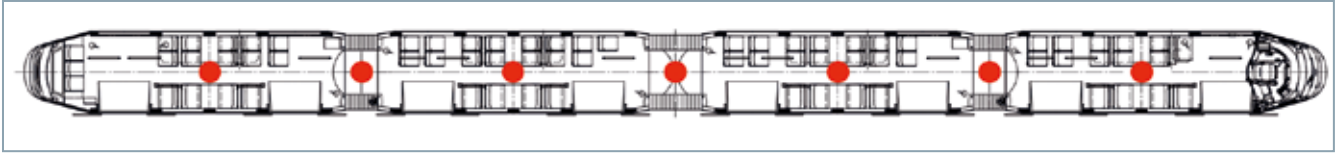


Bild 13: Messstellen (rote Punkte) für die Fahrkomfortmessung des Avenio München

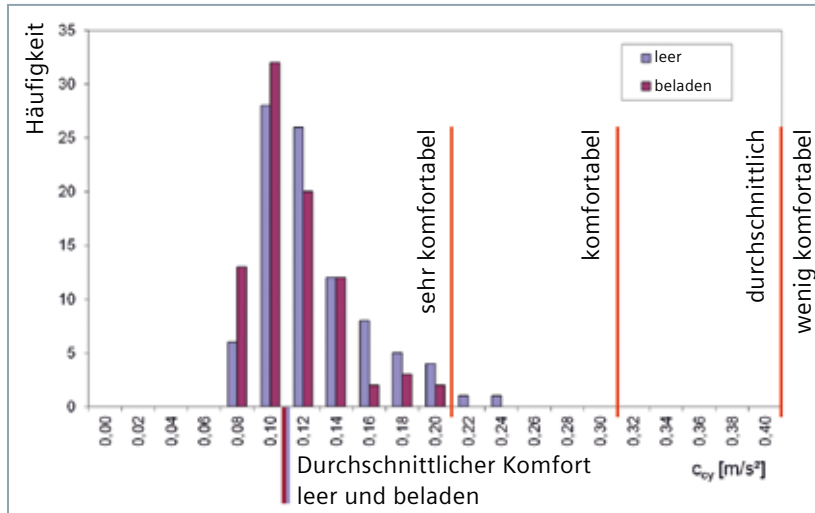


Bild 14: Häufigkeitsverteilung der C_y Kennwerte nach EN 12299 bei den Fahrkomfortmessungen des Avenio München

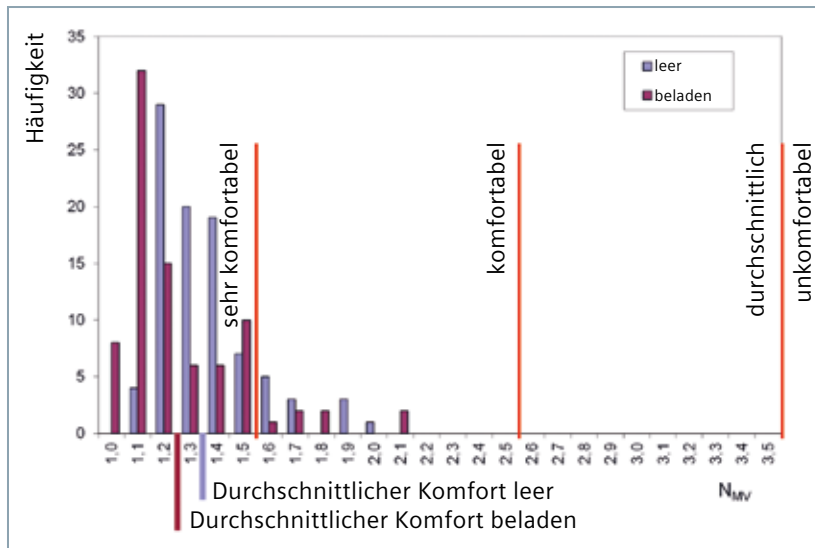


Bild 15: Häufigkeitsverteilung der N_{MV} -Kennwerte nach EN 12299 bei den Fahrkomfortmessungen des Avenio München

3.3.3 Der Vergleich

Das Prinzip Radsatz versagt in für Straßenbahnnetze typischen engen Bogenradien. Der mögliche Radradienunterschied ist bei weitem nicht ausreichend, um ein Abrollen der Räder ohne Längsschlupf zu ermöglichen. Auch unter Berücksichtigung einer „elektrischen Welle“ stellt sich bei Einzelradfahrwerken ein deutlich geringerer Längsschlupf ein. In einem Bogen mit $R = 30$ m ist die Längsschlupfkraft beim Radsatz mit 12 kN um den Faktor 10 größer als beim Einzelradfahrwerk mit 1,1 kN!

4. Maßnahmen zur Fahrwerkszentrierung

Einzelradfahrwerke zeigen eine geringere Zentrierwirkung als Radsatzfahrwerke. Dieser Tatsache muss konzeptionell im Fahrzeug und im Fahrwerk Rechnung getragen werden, sollen die oben genannten Vorteile bezüglich des Verschleißverhaltens nicht negiert werden. Im Folgenden werden drei Maßnahmen erläutert, die bei den Siemens Straßenbahnen Anwendung finden.

4.1 Verzicht auf Gelenkdämpfer

Gelenkdämpfer, die die Gierbewegung zwischen zwei Wagenteilen bedämpfen sollen, sind bei Straßenbahnen häufig anzutreffen. Diese Dämpfer verlangsamen aber das tangential Einstellen der Wagenkästen nach einer Bogenein- oder -ausfahrt und damit auch – insbesondere bei Multigelenkfahrzeugen – das tangential Einstellen des Fahrwerkes. Der unvermeidbare Trockenreibanteil der Dämpfer kann sogar zu einer bleibenden Fehlstellung und damit einseitigem Fahrwerkanlauf führen. Gerade bei Fahrzeugen mit Einzelradfahrwerken sind Gelenkdämpfer also zu vermeiden. Das Fehlen des Sinuslaufes dieser Fahrwerke macht dies – eine gelungene Fahrwerkankbindung vorausgesetzt – einfach möglich. Die Siemens Straßenbahnen zeigen auch ohne Gelenkdämpfer keinerlei Neigung zu Gierschwingungen.

Betreiber	Fahrzeugtyp	Anzahl	ER/ZR	Spurweite [mm]	Standzeit Radreifen [km]	Reprofilierungsintervall [km]
Bernmobil	Combino	36	ER	1000	TFW: 280.000 LFW: 260.000	TFW: 40.000 LFW: 40.000
MPK Poznan	Combino	14	ER	1435	TFW: 217.135 LFW: 209.630	TFW: 25.500 LFW: 38.500
VAG Freiburg	Combino	18	ZR	1000	TFW: 450.000 LFW: 450.000	TFW: 60.000 LFW: 60.000
Rheinbahn Düsseldorf	NFU NF8 NF10	127	ER/ZR	1435	TFW: 260.000 LFW: 260.000	TFW: 35.000 LFW: 35.000
GVB Amsterdam	Combino	155	ER/ZR	1435	TFW: 225.000 LFW: 250.000	TFW: 32.000 LFW: 32.000
AVG Augsburg	Combino	41	ER	1000	TFW: 207.500 LFW: 207.500	TFW: 45.000 LFW: 45.000

Tafel 1: Radreifenstandzeiten der Combino-Fahrwerke verschiedener Betreiber

ER – Einrichtungsfahrzeug TFW – Triebfahrwerk
 ZR – Zweirichtungsfahrzeug LFW – Lauffahrwerk

4.2 Der Längsantrieb

Eine Besonderheit unterstützt bei den Siemens-Straßenbahnen die Zentrierung der angetriebenen Fahrwerke: der Längsantrieb. Beim Längsantrieb sind die beiden Räder einer Fahrwerkseite von nur einem Motor angetrieben und damit – bis auf eine elastische Kupplung – drehzahlstarr gekoppelt. In Bild 11 ist die Wirkung auf die Spurführung dargestellt. Ist das Fahrwerk im Gleis verdreht, laufen die Räder einer Seite auf unterschiedlichen Durchmessern. Aufgrund der Drehzahlkopplung wird damit eins zum treibenden, das andere zum bremsenden Rad. In Bild 11 ist zu erkennen, dass dies zu einer V-Stellung der Achsbrücken führt, sofern die Längssteifigkeit der Primärfederung dies zulässt. Diese V-Stellung führt dazu, dass das Fahrwerk in die tangentialen Stellungen zurück „lenkt“. Die Profilseitenkräfte werden in ihrer zentrierenden Wirkung unterstützt. Somit stellt der Längsantrieb ein wirksames Element in der Spurführung von Einzelradfahrwerken dar.

4.3 Fahrzeugstreckung

Die beschriebene Wirkung des Längsantriebes ist bei nicht angetriebenen Fahrwerken so natürlich nicht vorhanden. Der Aufwand einer „künstlichen“ Drehzahlkopplung ist nicht wirtschaftlich und auch nicht notwendig. Durch eine simple Erweiterung der Antriebssteuerung lässt sich ein zentrierender Effekt ebenso erreichen: Die Strecksoftware. Hierbei wird den in Fahrtrichtung vorne liegenden Antrieben ein etwas größeres Moment aufgegeben als den hinteren (siehe Bild 12). In der Kräftezerlegung ergibt dies eine Kraft F_{Streck} , die den Zug auseinanderzieht und somit eine tangentiale Stellung des Lauffahrwerkes begünstigt. Das optimale Verhältnis von Streckkraft zu Antriebskraft ergibt sich aus dem Kompromiss aus erhöhtem Antriebsschlupf an den Triebfahrwerken und verringertem Quergleiten durch bessere Tangentialstellung des Lauffahrwerkes. Das Prinzip findet nicht nur beim Antreiben sondern auch beim Bremsen Anwendung, dann mit umgekehrten Vorzeichen.

5. Erfahrungen aus der Praxis

Die oben angestellten, theoretischen Überlegungen zeichnen ein Bild, welches Einzelfahrwerke durchaus als die „besseren“ Fahrwerke für Straßenbahnen darstellt, sowohl für den Fahrkomfort (Schwingkomfort), als auch für das Verschleißverhalten. Theoretische Betrachtungen sind jedoch gezwungen, die Realität auf die – hoffentlich richtig erkannten – dominanten Einflussfaktoren zu reduzieren. Diese werden in der Praxis von unzähligen anderen Einflüssen überlagert, die in ihrer Auswirkung oft schwer einzuschätzen sind. Es ist daher immer notwendig, die theoretisch erzielten Erkenntnisse an der Wirklichkeit zu spiegeln.

Im Folgenden werden Praxiswerte für Fahrkomfort und Radverschleiß für den Avenio bzw. Combino aufgezeigt. Beide Fahrzeugfamilien sind bezüglich des Spurführungsprinzips mit identischen Fahrwerken ausgestattet. Beide haben Einzelräder mit Längsantrieb.

5.1 Fahrkomfort

Seit September 2014 sind die Avenio Fahrzeuge in München im Fahrgastbetrieb. Im Rahmen der Inbetriebnahme wurden, unter anderem, ausführliche Messfahrten zur Ermittlung des Fahrkomforts durchgeführt. Auf 13 gemeinsam mit der Abnahmebehörde festgelegten Streckenabschnitten im Münchner Netz wurden insgesamt 13 Fahrten mit leerem und 12 Fahrten mit 3/3 beladenem Fahrzeug absolviert. 7 Positionen im Fahrzeug waren dabei mit Beschleunigungssensoren ausgerüstet (siehe Bild 13), so dass 175 Messungen ($13 \cdot 7 + 12 \cdot 7 = 175$) aufgezeichnet wurden. Diese Messungen wurden nach EN 12299 [6] ausgewertet und jeweils der kontinuierliche Fahrkomfort C_{Cy} und der mittlere Komfort N_{MV} ermittelt. C_{Cy} stellt den Schwingkomfort ausschließlich in Fahrzeugquerrichtung dar und N_{MV} kombiniert die Komfortwerte aller drei Raumrichtungen miteinander. C_{Cy} ist dabei besonders aussagefähig bei der Beurteilung des Spurführungskonzeptes, da dies hauptsächlich Auswirkungen auf die Querbewegungen des Fahrwerkes hat. In der EN 12299 werden die Kennziffern C_{Cy} und N_{MV} mit den Bewertungen „sehr komfortabel“, „komfortabel“, „durchschnittlich“ und „wenig komfortabel“ bzw. „unkomfortabel“ charakterisiert. Die Häufigkeiten der für den Avenio München ermittelten Werte sind in den folgenden Histogrammen (Bilder 14 und 15) dargestellt.

Der über alle Messungen gemittelte C_{Cy} -Wert liegt mit kleiner $0,12 \text{ m/s}^2$ deutlich unterhalb der Grenze für „sehr komfortabel“, die bei $0,2 \text{ m/s}^2$ liegt. Auch die Streuung der Messwerte ist erstaunlich gering. Lediglich 2 der 175 Messungen liegen ganz knapp außerhalb der Bestmarke. Auch die gemittelten N_{MV} -Werte liegen deutlich unter dem Grenzwert für „sehr komfortabel“. Da in diese Kennziffer auch die Schwingungen in vertikaler Richtung eingehen, ist in den Ergebnissen der bekannte Effekt wiederzufinden, dass ein beladenes Fahrzeug einen besseren vertikalen Schwingkomfort aufweist, als ein leeres.

Die Bezeichnung des Fahrkomforts des Avenio Münchens als „sehr komfortabel“ im Sinne der EN 12299 wurde durch die Messungen eindrücklich belegt. Das Fahrwerkskonzept „Einzelräder mit Längsantrieb“ ist nicht der einzige Einflussparameter auf den Schwingkomfort aber es trägt seinen Teil dazu bei.

5.2 Radverschleiß

Die erzielbaren Radreifenstandzeiten einer Fahrzeugflotte sind ein guter Indikator für das Verschleißverhalten der Fahrwerke. Da hier die Trassierung der Netze und die Instandhaltungsstrategie der Betreiber einen erheblichen Einfluss haben, ist nur eine Statistik über möglichst viele Netze aussagefähig. Für diese Statistik (siehe Tafel 1) werden die Fahrzeuge der Combino Flotte herangezogen, da diese in einer ausreichenden Anzahl von Netzen betrieben werden. Die angegebenen Zahlen wurden nicht durch die Siemens AG erhoben, sondern von den Betreibern übermittelt. Die Fahrzeuge des Typs NF8U, NF8 und NF10 verwenden die unveränderten Fahrwerke des Combino in den Fahrwerksmodulen; die Kopfmodule sind mit Kleinradrehgestellen ausgestattet.

Aus den erhobenen Daten ist deutlich zu sehen, dass Einzelradfahrwerke eine lange Standzeit der Radreifen ermöglichen. Der direkte Vergleich mit Radsatzfahrzeugen bleibt dem Leser überlassen. Da die Siemens AG keine Niederflurstraßenbahnen mit Radsätzen vertreibt, sind Angaben hierzu von unserer Seite nicht möglich. Wer die Standzeiten anderer Fahrzeuge kennt, wird jedoch feststellen, dass die der Siemens-Fahrwerke hervorragend sind.

6. Fazit

Am Anfang dieses Beitrages steht die Frage „[Radsatz-] Welle, oder nicht [Radsatz-] Welle?“. Eine eindeutige Antwort können auch die dann folgenden Betrachtungen nicht geben. Was aber gezeigt werden kann ist:

- In der Theorie zeigen sowohl Radsatzfahrwerke als auch Einzelradfahrwerke Prinzip bedingte Stärken und Schwächen, wenn sie den besonderen Randbedingungen von Straßenbahnnetzen ausgesetzt werden.
- Es gibt konstruktive und konzeptionelle Möglichkeiten, sowohl die Schwächen der Einzelrad- als auch die der Radsatzfahrwerke auszugleichen.
- Die Praxis zeigt, dass die Siemens-Fahrzeuge mit Einzelradfahrwerken einen Fahrkomfort und ein Verschleißverhalten aufzeigen, welche Maßstäbe setzen.

Abschließend lässt sich sagen, dass nicht das Spurführungskonzept allein entscheidend für die Qualität eines Fahrwerkes ist, sondern die technische Ausführung – mit oder ohne Welle.

Literatur:

- [1] Dellmann, T.; Abdelfattah, B.: Vergleich der dynamischen Eigenschaften von Radsatz und Losradpaar – Ein theoretischer Beitrag zu einer fast vergessenen Technik. ZEVrail 136 (2012) 10, S. 380-390
- [2] Dellmann, T.; Losradfahrwerke – eine Parameterstudie für das Losradpaar. ZEVrail 139 (2015) 5, S. 183-195
- [3] Knothe, K.; Stiche, S.: Schienenfahrzeugdynamik (VDI-Buch), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003
- [4] DIN EN 13715: Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Räder – Radprofile. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2011.
- [5] Miluczky, A.: Die Gesetzmäßigkeiten des Fahrwerklaufs erprobter Multigelenkniederflur-stadtbahnwagen, Dissertation, RWTH Aachen, Aachen 2008
- [6] DIN EN 12299: Bahnanwendungen – Fahrkomfort für Fahrgäste – Messung und Auswertung. Beuth Verlag GmbH, Berlin August 2009



Dipl.-Ing. Arnd Meyer (47)

Studium des Maschinenbaus mit Vertiefungsrichtung Schienenfahrzeuge an der RWTH Aachen bis 1996. Anschließend wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik der RWTH Aachen mit Schwerpunkt Fahrzeugdynamik und elektronisch unterstützter Spurführung. Seit 2004 bei der Siemens AG, Bereich Schienenfahrzeugtechnik tätig, zunächst im Aufgabengebiet Fahrzeugdynamik, seit 2013 in der technische Projektleitung bei Straßenbahnen.

Anschrift:
Siemens AG, MO UT EN LR TE
Nägelsbachstr. 33
91052 Erlangen, Deutschland
E-Mail: arnd.meyer@siemens.com

Herausgeber
Siemens AG 2016

Siemens AG
Mobility Division
Otto-Hahn-Ring 6
81739 München
Deutschland

contact.mobility@siemens.com

Artikel-Nr. MOUT-T10029-00
Gedruckt in Deutschland
Dispo 21720 SIMC-0000-47757
TH 325-160669 T 08160.5

Änderungen und Irrtümer vorbehalten.
Die Informationen in diesem Dokument enthalten lediglich
allgemeine Beschreibungen bzw. Leistungsmerkmale, welche
im konkreten Anwendungsfall nicht immer in der beschriebenen
Form zutreffen bzw. welche sich durch Weiterentwicklung der
Produkte ändern können. Die gewünschten Leistungsmerkmale
sind nur dann verbindlich, wenn sie bei Vertragsschluss ausdrücklich
vereinbart werden.

Avenio® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Siemens AG.
Jede nicht autorisierte Verwendung ist unzulässig. Alle anderen
Bezeichnungen in diesem Dokument können Marken sein, deren
Verwendung durch Dritte für ihre eigenen Zwecke die Rechte
des Eigentümers verletzen kann.