Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen DIN EN 13749 muss überarbeitet werden

Themenbereich: Neuartige Fahrzeuge und Komponenten, Fahrwerke

Dipl. Ing. (FH) M. Eng. Eberle Lucas, Stadler Altenrhein AG

MSc (FHO) Coray Raphael, Stadler Altenrhein AG

Zusammenfassung

Der Festigkeitsnachweis von Fahrwerkrahmen für S-Bahnfahrzeuge erfolgt heute durch rechnerische Nachweise in Kombination mit statischen und dynamischen Prüfstandversuchen und Prüfungen auf der Strecke. Basis für diese Nachweise sind die gültigen Regelwerke, die pauschalisierte Lasten zur Verfügung stellen. Die heute gültigen Grenzwerte für Trassierungselemente, Gleislagestörungen und das Verhalten des Fahrzeugs auf der Strecke werden für die Auslegung grundsätzlich nicht berücksichtigt. Der rechnerische Nachweis wird hiermit auf einen klassischen Dauerfestigkeitsnachweis unter Verwendung von pauschalisierten Lasten (Maximal- und Minimalwerte) reduziert und enthält nicht die komplexen Belastungsüberlagerungen die im realen Betrieb auftreten. Um dem „Stand der Technik“ entsprechende Belastungen des Fahrwerkrahmens zu erhalten und daraus einen wirtschaftlichen und konstruktiv sinnvollen Fahrwerkrahmen zu bauen, ist eine Überarbeitung der DIN EN 13749 dringend erforderlich, da die Abweichungen zwischen den auf der Strecke tatsächlich auftretenden und den nach der DIN EN 13749 definierten Belastungen zu groß sind.

1 Einleitung

Basis für den Nachweise von Drehgestellen speziell Drehgestellrahmen sind die gültigen Regelwerke, für Vollbahnfahrzeugen speziell die DIN EN 13749 [1], die pauschalisierte Lasten zur Verfügung stellt. Eine Definition der anzuwendenden Überlagerungen der einzelnen Kraft- und/oder Beschleunigungskomponenten wird nicht vorgeschlagen, außer den neun Lastkombinationen für den Prüfstandversuch für Vertikal- und Querkräfte mit Überlagerung der Verwindung bzw. drei Lastkombinationen für Vertikal- und Längskräfte. Diese Lastfallkombinationen sind eine Folge der zum Zeitpunkt der Erstellung der UIC-Merkblätter verfügbaren Prüfstände hinsichtlich Zylinderanzahl und Regelungsmöglichkeiten. Ein wesentlicher Nachteil der Lastannahmen mittels pauschalisierten Lasten ist die korrekte Berücksichtigung der Phasenlagen der einzelnen Beschleunigungen und Kräften, d.h. bei maximaler Querkraft muss nicht die maximale Wankkraft auftreten. Die Kombination von Maximalwert mit Maximalwert bzw. Minimalwert mit Minimalwert ist nicht nötig, da diese selten auftreten und zu einer Überdimensionierung der Struktur führen. Fahrzeuge, speziell Fahrwerke, sind nur dann wirtschaftlich dimensioniert, wenn die verwendeten Bauteile mit möglichst geringem Materialaufwand, die erforderliche Lebensdauer mit einer ausreichenden Funktionssicherheit knapp noch erreichen.

Der Ansatz nach DIN EN 13749 ist für heutige Triebfahrzeuge für den S-Bahnverkehr zu ungenau da mit den pauschalisierten Lasten die komplexen Spannungszustände nicht genügend genau erfasst werden können. Bei einem Abgleich der Dehnungen und Spannungen, resultierend aus den pauschalisierten Lasten, mit den gemessenen Dehnungen auf der Strecken wird eine mangelnde Korrelation der Werte festgestellt.

Eine neue Strategie zur Generierung von Lastannahmen für Fahrwerke ist erforderlich.

2 Grundlage der DIN EN 13749

Für die Fahrzeugkategorien B-I und B-II werden die statischen Versuche für Längs-, Quer-, Vertikalkraft und Verwindung unter im Betrieb auftretenden Kräften aus der UIC 515-4 [2] und UIC 615-4 [3] unverändert in die DIN EN 13749:2005 bzw. die Fassung von 2011 übernommen. Eine Definition der anzuwendenden Überlagerungen wird lediglich durch die neun Lastkombinationen für gleichzeitiges Tauchen und Wanken mit Überlagerung der Querkraft und Verwindung angegeben.

Die Wirkung der Kurven wird durch eine Querkraft und eine Wankbewegung berücksichtigt, die mit einem Anteil $\alpha = 0.1$ der Vertikalkraft definiert wird. Die dynamischen Kraftänderungen werden durch das Tauchen berücksichtigt, die mit einem Anteil $\beta = 0.2$ der Vertikalkraft definiert wurde, wobei für europäische Bahnen die Summe $\alpha + \beta = 0.3$ beträgt.

Für die Fahrzeugkategorie B-III und B-IV wurden die Beschleunigungsdefinition aus der VDV 152 (9/92) [4] übernommen. Diese Lastfälle sind gegenüber der Fahrzeugkategorie B-I und B-II beschleunigungsbasiert. Rechnet man, für ein Triebfahrzeug heutiger Bauart, über die definierten Querbeschleunigungen, Schwerpunkthöhen und Windlast der Kategorie B-III auf den Wankfaktor zurück, so decken sich die Ergebnisse nicht mit dem definierten Wankfaktor $\alpha = 0.1$ der Kategorie B-I/B-II.

3 Ansätze für Lastannahmen nach DIN EN 13749 für die rechnerische Nachweisführung

Zur Erstellung der Lastannahmen für Drehgestellrahmen ist es notwendig das Fahrzeug in die, in der DIN EN 13749, definierten Kategorien einzuteilen. Ein S-Bahnfahrzeug wie z.B. ein KISS (Doppelstocktriebzug) kann in die Kategorie B-II und/oder Kategorie B-III eingeteilt werden. Anhand dieser Einteilung resultieren kräfte- oder beschleunigungsbasierte Lastannahmen, die dann auch unterschiedliche Nachweisergebnisse liefern.

Ansatz 1: Für den einfachsten und überschaubarsten Weg teilt man das Fahrzeug in die Kategorie B-II ein. So werden die Lastannahmen basierend auf den Prüfstandlasten rein kräftebasiert erstellt. Die Lastkombinationen reduziert sich auf die neun Kombinationslastfälle mit $\alpha=0.1$ und $\beta=0.2$ mit Überlagerung der Querkraft und Verwindung.

Ansatz 2: Entspricht dem gleichen Ansatz wie Ansatz 1 wobei die neun Lastfallkombinationen für den Prüfstandversuch mit weiteren acht Lastfallkombinationen, mit dem für das Fahrwerk korrekte Wankfaktor, ergänzt werden. So ergeben sich Lastkombinationen mit $\alpha=0.1$, $\beta=0.2$ und $\alpha=max$, $\beta=min$ (wobei $max \leq 0.2$ und $min \geq 0.1$ ist).

Ansatz 3: Für den etwas aufwendigeren Ansatz teilt man das Fahrzeug in die Kategorie B-III ein. Diese Lastannahmen sind mehrheitlich beschleunigungsbasiert und mit Fahrszenarien Weiche, Gerade und Kurve erweitert. Im Weiteren wird auch die Schwerpunkthöhe und Windlast berücksichtigt.

Ansatz 4: Für den aufwendigsten Weg, welcher die DIN EN 13749 für ein S-Bahnfahrzeug bereitstellt, teilt man das Fahrzeug in die Kategorie B-II und B-III ein. Somit hat man die kräftebasierten Prüfstandlasten nach Kategorie B-II und die beschleunigungsbasierten Lastannahmen nach Kategorie B-III berücksichtigt.

4 Ergebnisse und Interpretation

In Figure 52 sind die Auslastungen an den einzelnen Messstellen des Motor- und Laufwerkes eines Doppelstocktriebzuges dargestellt. Die Streuungen bzw. die Abweichungen zwischen den Lastannahmen mit pauschalisierten Lasten nach Norm und den tatsächlich auftretenden resultierenden Dehnungen auf der Strecke sind zu groß. Alle vier

definierten Ansätze zur Erstellung der Lastannahmen zeigen, dass mit den pauschalisierten Lasten die komplexen Spannungszustände nicht genügen genau dargestellt werden können.

Aus den einzelnen Messpositionen lassen sich folgende Erkenntnisse schließen:

Die Messstellen M.E01.1 und M.E01.2 beschreiben das globale Tauch- und Wankverhalten. Aus den relativ geringen Abweichungen zwischen Betriebsfestigkeitsmessungen und den rechnerischen Nachweisen lässt sich erkennen, dass die in der DIN EN 13749 definierte Summe Tauchen + Wanken = 0.3 in Ordnung ist.

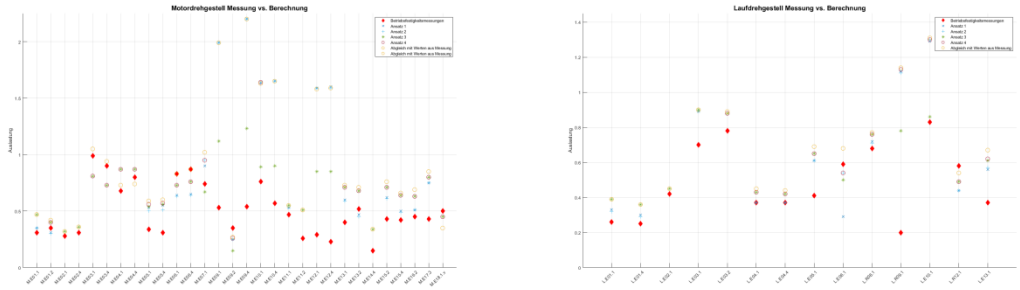


Figure 52: Vergleich der Auslastungen zwischen Berechnung und Messung

Aus den Messstellen M.E05.1 und M.E05.4 beim Motordrehgestell wie auch bei den Messstellen des Laufdrehgestells L.E01.1 und L.E01.4 lässt sich das Tauchverhalten erkennen. Die Auslastungen der rechnerischen Festigkeitsnachweise sind für alle Ansätze höher als die Auslastungen der Betriebsfestigkeitsmessung. Da nach der DIN EN 13749 ein Tauchfaktor von $\beta = 0.2$ definiert ist, ist anzunehmen dass dieser zu hoch definiert ist. Es muss angenommen werden, auch unter der Berücksichtigung an die heutigen Anforderungen an Trassierung und Gleislage, dass das Tauchverhalten überschätzt wird und zu hoch angenommen wird.

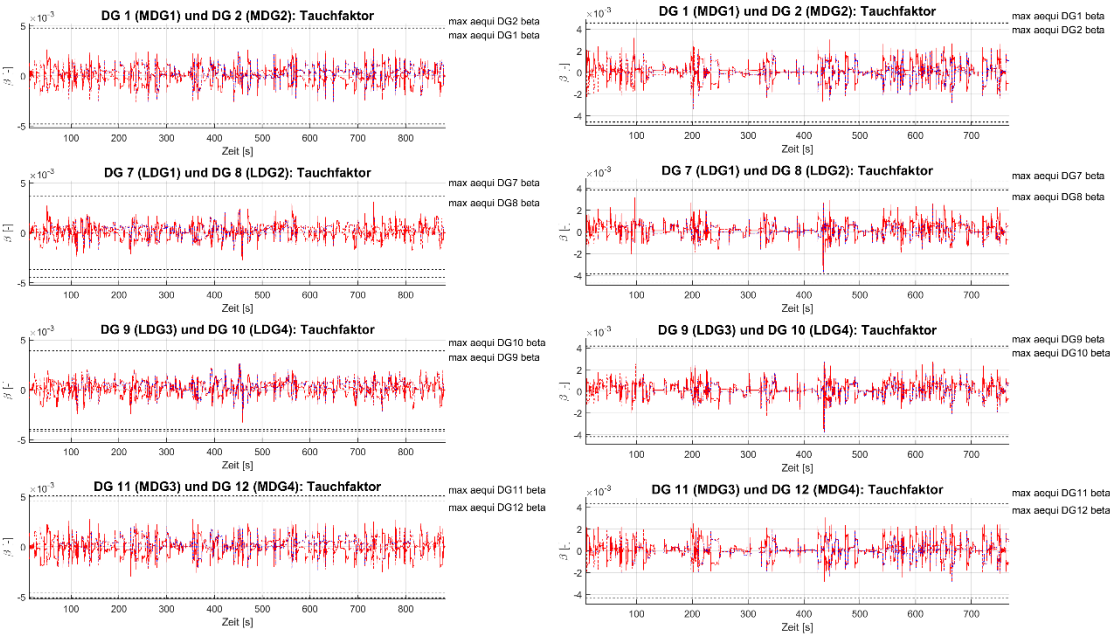


Figure 53: Tauchfaktoren für die SBB-Strecken Bern-Schwarzenburg (links) und Wil-Weinfelden (rechts)

Diese Annahmen wird durch Mehrkörpersimulationen mittels realen und repräsentativen Trassierungen, für Prüfbereich 1 bis 5, aus dem SBB-Streckennetz bestätigt. Figure 53 zeigt, dass die Tauchfaktoren (Minimum-, Maximum- und Äquivalentwerte) deutlich unter dem in der Norm definierten Wert von 0.2 liegen.

Die Messpositionen am Motordrehgestell M.E09.1, M.E09.4, M.E10.1, M.E10.4, M.E12.1 und M.E12.4 wie auch am Laufdrehgestell L.E10.1 geben Auskunft über die Querkraft die auf den Queranschlag wirkt. Die Abweichungen zwischen rechnersicher Auslastung und Betriebsfestigkeitsmessungen sind hoch. Es ist anzunehmen, dass die angenommene Querkraft aus der Norm gegenüber den auf der Strecke auftretenden Querkräften zu hoch ist. Diese Annahme kann über einen Vergleich der Querkräfte aus der Norm und den berechneten Querkräften aus den Mehrkörpersimulationen bestätigt werden.

Die in Figure 54 dargestellten Querkräfte entsprechen der Querkraft die auf den Queranschlag wirken und sind tiefer als die gesamt wirkende Querkraft auf das Fahrwerkt. Die der DIN EN 13749 (Ansatz 1 bis 4) definierten Querkräfte sind sehr viel höher als die auf den repräsentativen SBB-Strecken auftretenden Querkräfte. Die nach der Norm definierten Querkräfte auf den Queranschlag sind oft höher als die nach DIN EN 14363 oder AB-EBV definierten Summen Y-Kräfte. Demnach hat man für den rechnerischen Ermüdungsfestigkeitsnachweis Querkräfte nachzuweisen die mehrheitlich über den zulässigen Grenzwerten liegen. Obwohl die Summe Y-Kräfte nach DIN EN 14363 oder AB-EBV

der Strecken 1 bis 4 oft nahe oder gar über dem Grenzwert liegen, liegen die Querkräfte am Queranschlag sehr viel tiefer.

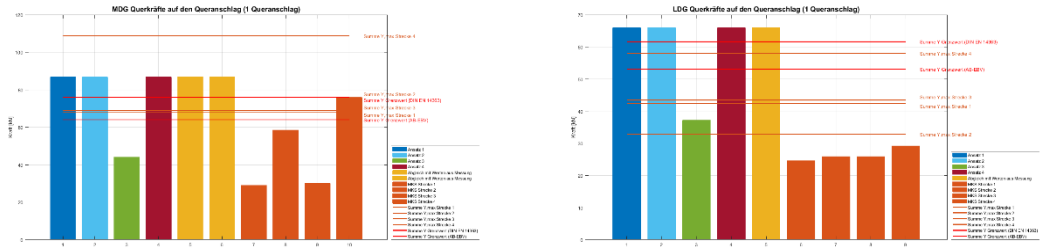


Figure 54: Querkräfte am Motor- und Lauffahrwerk

Bei der Beurteilung des Tauchanteils wurde festgestellt, dass dieser nach der DIN EN 13749 zu hoch berücksichtig wird. Bei den Wankkräften zeigt sich hingegen das gegenteilige Phänomen. Der Wankanteil wird oft unterschätzt und mit zu geringen Kräften berücksichtigt. Die Ansätze 1 bis 4 liefern, verglichen mit den Betriebsfestigkeitsmessungen, alle zu tiefe Wankkräfte.

Da der Tauchanteil β zu hoch und der Wankanteil α zu tief in der DIN EN 13749 definiert sind, resultiert an den tauch- und wankdominanten Stellen nahezu die richtigen Dehnung bzw. Auslastungen.

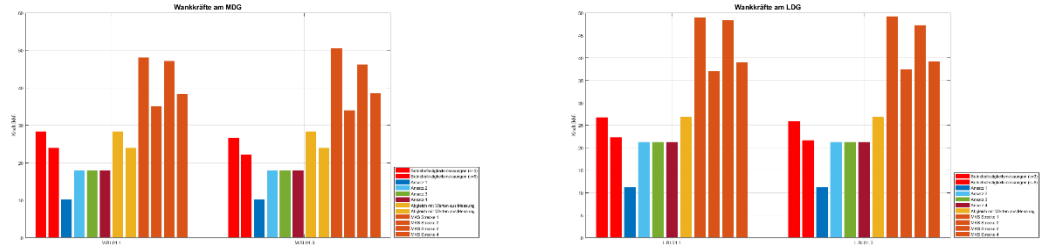


Figure 55: Wankkräfte an den Gelenkstangen vom MDG (links) und LDG (rechts)

Bei einer Betrachtung der Summe von Tauch- und Wankanteil lässt sich aus Figure 56 erkennen, dass dies Summe, wie in der DIN EN 13749 definiert, bei 0.3 liegt, wobei der Wankanteil um den Faktor 3 bis 4 höher ist als der Tauchanteil. Die Unterschätzung des Wankanteils ist ebenfalls in Figure 55 sichtbar, da die Wankkräfte aus der Norm deutlich zu tief sind.

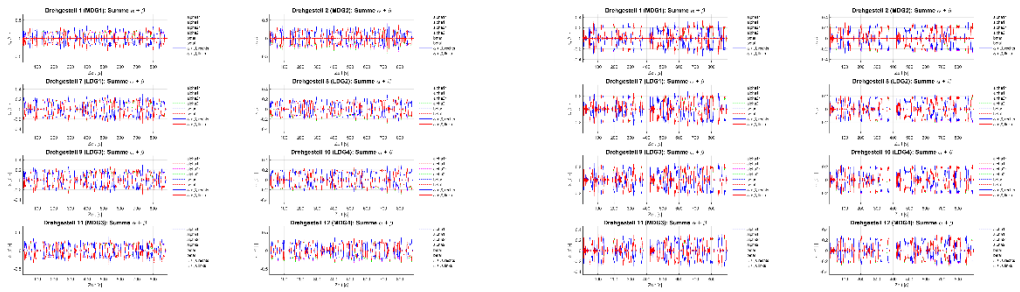


Figure 56: Summe α + β für die SBB-Strecken Bern-Schwarzenburg (links) und S12 der S-Bahn Zürich (rechts)

Folgende Schwachpunkte lassen sich aus den pauschalisierten Lasten nach DIN EN 13749 ableiten:

(-) Die definierten Faktoren für Tauchen $\beta = 0.2$ und Wanken $\alpha = 0.1$ sind nicht charakteristisch für das Verhalten der heutigen Triebfahrzeuge mit wesentlich höheren Schwerpunkten. Die Forderung von „sicheren Lasten“ ist nicht mehr gegeben. Tendenz: Tauchen wird über- und Wanken unterschätzt.

(-) Mit einem Wankfaktor $\alpha = 0.1$ wird eine deutlich zu tiefe Wankkraft nachgewiesen.

(-) Die aufzubringenden Querkräfte sind zu hoch, speziell für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis.

(-) Der rechnerische Nachweis wird auf einen klassischen Dauerfestigkeitsnachweis unter Verwendung von pauschalisierten Lasten (Maximal- und Minimalwerte) reduziert und enthält nicht die komplexen Belastungsüberlagerungen bzw. Phasenlagen, die im realen Betrieb auftreten.

(-) Viele Lastgrößen werden durch pauschale Stoßzuschläge/Überhöhungsfaktoren beschrieben oder durch konstante Faktoren in Anhängigkeit verwandter Lastgrößen vereinfacht.

Bei einem Abgleich der Dehnungen und Spannungen, resultierend aus den pauschalisierten Lasten, mit den gemessenen Dehnungen auf der Strecken wird eine mangelnde Korrelation der Werte festgestellt. Der Ansatz nach DIN EN 13749 ist für heutige Triebfahrzeuge für den S-Bahnverkehr zu ungenau und stellt den realen im Fahrwerkrahmen auftretenden Spannungszustand nicht genügend genau dar.

Mit den vier vorgestellten Ansätzen kann kein wirtschaftliches, leichtes und innovatives Fahrwerk entwickelt werden. Die DIN EN 13749 muss überarbeitet werden und andere Wege zur Erstellung von Lastannahmen für Fahrwerke zulassen und ermöglichen.

Um dem heutigen Stand der Technik entsprechende Belastungen des Fahrwerkrahmens zu erhalten und daraus einen wirtschaftlichen und konstruktiv sinnvollen Fahrwerkrahmen zu bauen, ist eine neue Strategie zur Generierung von Lastannahmen für Fahrwerke erforderlich.

Literatur

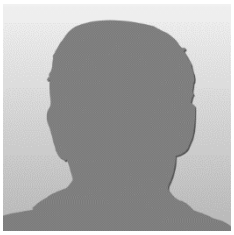
[1] UIC-Kodex 515-4, *Laufdrehgestelle - Laufwerke, Festigkeitsprüfung am Rahmen von Drehgestellen*, ETF, 1993.

[2] UIC-Kodex 615-4, *Triebfahrzeuge - Drehgestelle und Laufwerke - Festigkeitsprüfung an Strukturen von Drehgestellrahmen*, ETF, 2003.

[3] DIN EN 13749, *Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen*, Beuth Verlag, 2005.

[4] VDV. (9/92), *Empfehlungen für die Festigkeitsauslegung von Personenfahrzeugen*, 1992.

Autor



Eberle, Lucas

An der Interstaatlichen Fachhochschule für Technik Buchs NTB studierte ich Systemtechnik (2001-2004). Neben den Grundlagenfächern wählte ich die Vertiefungsrichtung Mechanik und Produktionstechnik.

Im Dezember 2004 schloss ich das Studium als Dipl. Ing. in Systemtechnik ab. An der Technischen Fachhochschule Berlin (neu Beuth Hochschule für Technik Berlin) studierte ich den Masterstudiengang Computational Engineering, den ich im Frühling 2007 als Master of Engineering abschloss.

Berechnungsingenieur (Stadler Altenrhein) April 2007 – November 2014

Zulassungsingenieur (Stadler Altenrhein) Februar 2015 – Dezember 2015

Berechnungsingenieur im Bereich Lastannahmen von Fahrwerken (Stadler Altenrhein) seit Januar 2016