

Nachweis querbelasteter Verschraubungen an Schienenfahrzeugen

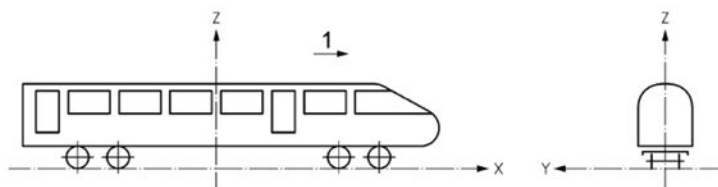
Erweiterter Festigkeitsnachweis von Schraubenverbindungen im Schienenfahrzeugbau unter seltenen sehr hohen Querb Belastungen auf Basis experimenteller Untersuchungen

1. Statische Nachweis-Lasten → außergewöhnliche Belastungen
 2. Ermüdungslastfälle → zyklische Belastungen

Beispiel: Wagenkästen nach DIN EN 12663-1, Kap. 6
 Lastannahmen für Ausrüstungsgegenstände

Richtung	Lokomotiven		Personenfahrzeuge*		Güterwagen	
	x	y	x	y	x	y
Belastung aus Fahrweg (Ermüdungslastfall) [$\pm g$]	0,15	0,2	0,15	0,15	0,3	0,4
Außergewöhnliche Lasten (Statische Nachweis-Lasten) [$\pm g$]	3	1	5	1	5	1

*Bsp.: Kat. P-1



Legende:

- 1 Fahrtrichtung
- X Längsrichtung
- Y Querrichtung
- Z Vertikalrichtung

Abb. 1: Beispiele für Lastannahmen in y-Richtung für die Befestigung von Ausrüstungsgegenständen nach DIN 12663-1

Quelle: [3]

MAX KLÖCKER | KEVIN TEITSCHID |
 TOBIAS HÜBING | RAINER FRANKE

Der vorgestellte Tragfähigkeitsnachweis für Schraubenverbindungen im Schienenfahrzeugbau berücksichtigt die Besonderheiten der Lastannahmen für Wagenkästen und Drehgestelle. Diese unterscheiden zwischen den dauernd wirkenden Betriebsbelastungen und den sehr selten auftretenden außergewöhnlichen Belastungen. Bei diesen wird im Unterschied zu der klassischen Dimensionierungspraxis Gleiten zwischen den verspannten Teilen zugelassen. Der Nachweis ist erweitert auf die Berücksichtigung von Sicherungselementen gegen Losdrehen, die Schaftwechselfbiegung, die axiale Restvorspannkraft nach vorangegangener Querb Belastung und zusätzliches Setzen. Die Vorgehensweise ist im Anhang D der überarbeiteten DIN 25201-4 beschrieben.

Einleitung / Motivation

Die Formate der Festigkeitsberechnung zum Nachweis der Tragfähigkeit sind infolge der Harmonisierung durch die Eurocodes prinzipiell ähnlich aufgebaut. Abzusichern ist gegen das Überschreiten der Festigkeitsgrenzwerte. Erstens ist mit den dauernd im Betrieb auftretenden Lasten die Ermüdungsfestigkeit nachzuweisen, zweitens sind mit den Extremwerten der Lasteinwirkungen durch Absicherung gegen das Überschreiten der Fließgrenze plastische Bauteilverformungen auszuschließen. Die Festlegung der extremen Lasteinwirkungen fällt nach den Eurocodes in die Kategorie der statischen Lasten, die aufgrund ihres zeitlichen Auftretens als ruhend oder vorwiegend ruhend eingeordnet werden. Je nach Anwendungsbereich werden in den Eurocodes bzw. Normen zur Ermittlung der Extremlasten die betrieblichen Lasten mit dynamischen Faktoren beaufschlagt, wie z.B. bei Kranbahnen [1] oder Krantragwerken [2], oder es werden die

Annahmen für die Extremwerte der Einwirkungen unmittelbar vorgeschrieben, wie z.B. im Schienenfahrzeugbau [3, 4].

Erfahrungsgemäß betragen die Extremlasten in den Anwendungsbereichen, in denen ausgehend von den charakteristischen Lasten F_k mithilfe von dynamischen Faktoren Φ und Teilsicherheitsbeiwerten γ_p die statischen Lasten ermittelt werden, wie z.B. bei der Berechnung von Krantragwerken nach DIN EN 13001 [2], i. d. R. nicht mehr als das 2-fache der Betriebslast. Da der Stufensprung der Belastbarkeiten einer Schraubengröße zur nächsten etwa 2,3 beträgt, wird im günstigen Fall eine Schraubengröße sowohl den Anforderungen des Ermüdungslastfalls als auch denen des statischen Lastfalls entsprechen, oder es wird ggf. die nächste Nennggröße erforderlich, sodass die Dimensionierung für beide Nachweise ausgewogen ausfällt.

In den für die Festigkeitsberechnung im Schienenfahrzeugbau geltenden Normen

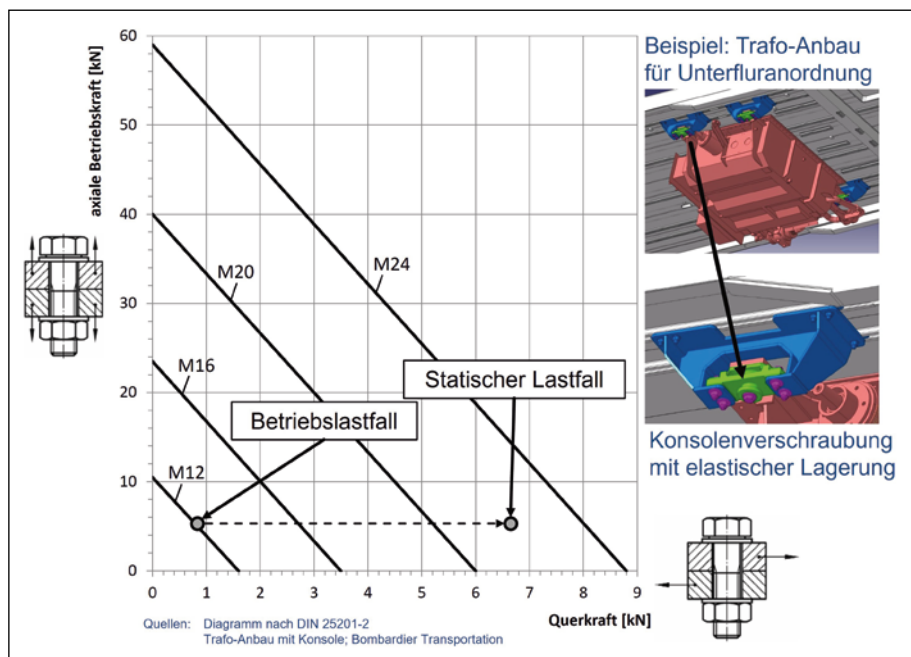


Abb. 2: Auswahldiagramm für Schraubenverbindungen nach DIN 25201-2

Quelle: [5]

ist das Verhältnis der statischen Lasten (außergewöhnliche Lastfälle) zu den betrieblichen Lasten (Betriebslastfälle) weitaus größer bzw. ungünstiger. Für Wagenkästen sind in DIN EN 12663 [3] und für Drehgestelle in DIN EN 13749 [4] die Kategorien betriebliche und außergewöhnliche Lasten durch die zugeordneten Beschleunigungswerte quantitativ festgelegt (Abb. 1). Die betrieblichen Lasten, d. h. zyklisch bzw. regelmäßig auftretende Belastungen, dürfen auf Dauer keine Beeinträchtigung der Struktursicherheit zur Folge haben. Die außergewöhnlichen Belastungen als maximale Belastungen sind als quasistatisch anzunehmen. Auch bei diesen sehr selten (einige 100 bis mehrere 1000 Lastwechsel) auftretenden Belastungen muss die volle Betriebsfähigkeit erhalten bleiben.

Die Auswirkungen der Lastfälle auf die Schraubengrößen zeigt Abb. 2. In dem Diagramm, das auf der einschlägigen Schraubengerechnungsrichtlinie VDI 2230-1 basiert, sind beispielhaft für die Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 die axialen Belastbarkeiten versus den Querbearbeitbarkeiten ausgewiesen (vgl. DIN 25201-2 [5]). Für das Beispiel Wagenkästen mit Lastannahmen quer zur Fahrtrichtung zur Befestigung von Ausrüstungsgegenständen ist das Belastungsverhältnis $6,7=1 \text{ g}/0,15 \text{ g}$ (Abb. 1). Zur Berücksichtigung des außergewöhnlichen Lastfalls ist anstatt einer Schraube M12 die Größe M24 zu wählen. Die unausgewogene Dimensionierung kommt damit zum Ausdruck.

Erweiterter Festigkeitsnachweis und Berechnungsgrundsätze

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde von der Technischen Hochschule Köln und der IMA Materialforschung und Anwendungs-

technik GmbH Dresden im Auftrag der Firmen Alstom Transport, Bombardier Transportation, Knorr-Bremse, Siemens Mobility und Stadler Altenrhein für die Berücksichtigung seltener hoher Belastungen ein erweiterter Festigkeitsnachweis entwickelt. Dieser ist weniger konservativ als die einschlägige Schraubengerechnungsrichtlinie VDI 2230-1. Der Tragfähigkeitsnachweis wurde bei der Überarbeitung der DIN 25201-4 als Anhang D neu aufgenommen. Als „informativ“ gekennzeichnet ist seine Anwendung nicht bindend. Er soll eine optimale Gestaltung von querbelasteten Schraubverbindungen mit Material- und Raumsparnis gestatten.

Die Berechnungsgrundsätze gehen aus Abb. 3 hervor. Im ersten Teil des Tragfähigkeitsnachweises wird „klassisch“ vorgegangen. Die axiale Festigkeitsberechnung der Schraube und der verspannten Bauteile erfolgt mit den axialen Extremlasten nach der VDI 2230-1 [6]. Aufgrund der Elastizität der Schraubenspannung ist die dynamische Zusatzbeanspruchung der Schraube gegenüber der Vorspannkraft gering. Die dynamische Querbearbeitung muss bei voller Vorspannkraft durch Reibschluss in der Trennfuge übertragbar sein. Insofern wird nach dieser Richtlinie die Festigkeitsberechnung der Schraubenspannung auf die Sicherstellung des Reibschlusses erweitert, damit Gleiten in der Trennfuge zwischen den verspannten Teilen sicher auszuschließen ist. Beim Nachweis gegen Gleiten in der Trennfuge durch eine Gegenüberstellung der dynamischen Querlasten und der Kraft an der Grenze der Haftreibung ist gemäß DIN EN 12663-1 [3] mit $S_2 = 1,5$ gegen Versagen abzusichern. Demzufolge würde zur Sicherstellung des Reibschlusses bei statischen, d. h. außergewöhnlichen Lasten eine entsprechend hohe Vorspannkraft der Schraube erforderlich werden. Hier setzt der zweite Teil des Berechnungskonzeptes an. Es wird Gleiten in der Trennfuge, unter Berücksichtigung der durch das wiederholte (wechselnde) Auftreten hervorgerufenen Schädigungsmechanismen, zugelassen. Konsequenz ist, dass die durch die Wechselbiegung des Schraubenschaftes hervorgerufenen Beanspruchungen, die typische Tendenz querbelasteter Schraubverbindungen zum Losdrehen und die durch das Gleiten veränderten Trenneigenschaften der Bauteile zu berücksichtigen sind. Folglich muss die Funktionsfähigkeit der Schraubenspannung für folgende Versagenskriterien nachgewiesen werden (Abb. 4):

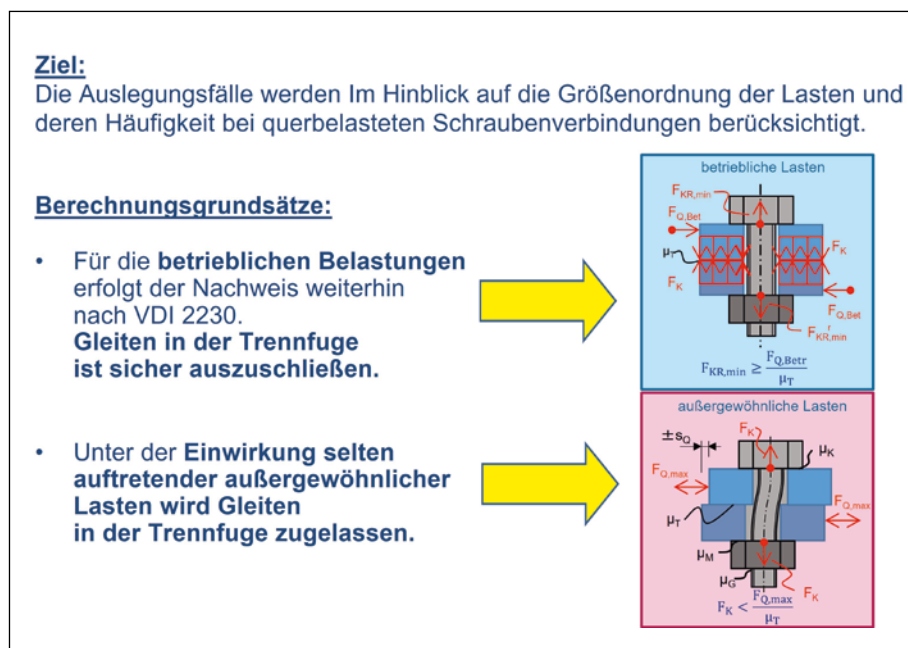


Abb. 3: Auslegungsfälle und Berechnungsgrundsätze

Quelle: [10]

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für
 ABC Umformtechnik GmbH & Co. KG, TU Köln, Heico Befestigungstechnik GmbH, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Zusätzliche Bewertungskriterien bei außergewöhnlichen Lasten quer zur Schraubenachse

- 1 **Festigkeit** der Schraube und der verspannten Teile (Scherfestigkeit, Lochleibung, Bauteilfestigkeit)
- 2 Vorspannkraftverlust durch **selbsttätiges Losdrehen**
- 3 Vorspannkraftverlust infolge **Setzen bzw. Verschleiß** von Oberflächenbeschichtungen
- 4 **Axiale Restdauerfestigkeit** der Schraube nach Vorbelastung

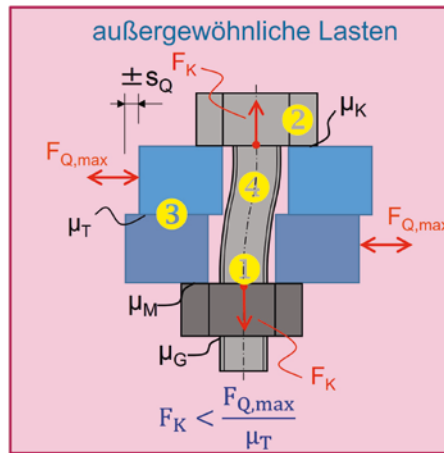


Abb. 4: Betriebliche Versagenskriterien der Schraubenverbindung

Quelle: [10]

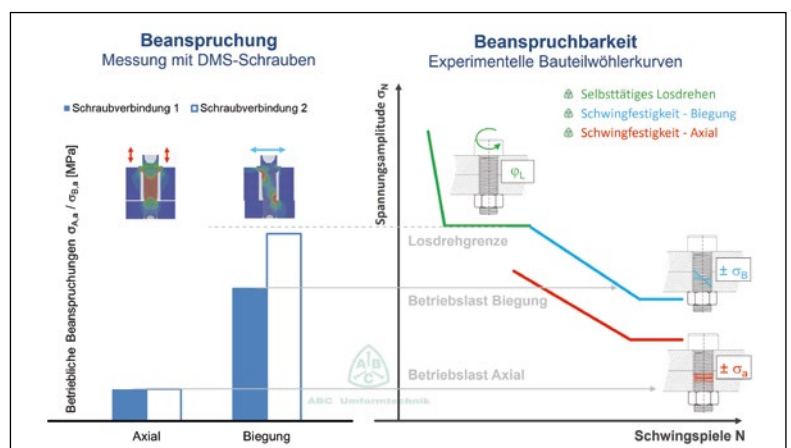
Festigkeit der Schraube und der verspannten Teile

Im ersten Schritt muss der Festigkeitsnachweis der Schraube und der verspannten Teile bei statischer Querbelastung (Scherfestigkeit, Auflagerkräfte bzw. Lochleibung, Bauteilfestigkeit) erfolgen. Neu ist hier die Berücksichtigung der Biegeeinflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit. I.d.R. (VDI 2230-1) wird nur die Biegung infolge exzentrischer Axiallasten berücksichtigt. Speziell für den Fall der betrieblichen Lasten sind diese Biegespannungen nach analytischer Betrachtung im Vergleich zu den Axialspannungen gering und werden daher in der Praxis häufig für eine betriebsfeste Auslegung der Schraubenverbindung vernachlässigt. Aktuelle Untersuchungen aus [7] und [8] zeigen hingegen, dass die Biegespannungen im realen Einbaufall mit größeren Verformungen des Schraubenschafts einen deutlich größeren Anteil ausmachen können als die Axialspannungen (Abb. 5). Bei zugelassenem Gleiten bei außergewöhnlichen Lasten, wie es bei dem vorgestellten Nachweis der Fall ist, ist deshalb die Schraubenbiegung nicht zu vernachlässigen. Grund für die hohen Biegespannungen können auch Leichtbaumaßnahmen an den verspannten Bauteilen sein. Durch die Materialeinsparungen des Leichtbaus werden die Steifigkeiten der verspannten Bauteile herabgesetzt, und die größeren Verformungen an den Bauteilen werden direkt an die Schraube weitergegeben und machen sich in Form von Biegung bemerkbar. Die Lebensdaueruntersuche bei Querbelastung der Schrauben haben gezeigt, dass die bekannten Wöhlerlinien für axiale Lasten nicht auf Biegung übertragbar sind.

In Abb. 5 ist das Ergebnis einer Untersuchung dargestellt, welche die Erfassung der betrieblichen Beanspruchungen (Axial- und Biegespannungen) mittels DMS-Schrauben und den Abgleich mit den zugehörigen Bauteil-

wöhlerkurven beinhaltet. Betrachtet man in diesem Fall nur die betrieblichen Axiallasten, so sind diese unterhalb der Dauerfestigkeitskennlinie der Axial-Bauteilwöhlerkurve. Zusätzlich der betrieblichen Biegebelastungen unterscheiden sich zwei Versagensmechanismen unterschieden werden, das Losdrehen und die Materialermüdung. Wird das Losdrehen abgesichert, also sind die Biegebelastungen unterhalb der Losdrehgrenze, so kann es je nach Lasthöhe zu einem Biegedauerbruch kommen. Die Höhe der betrieblichen Biegebelastungen in dieser Untersuchung zeigt genau diesen Fall. Die Biegespannungen sind hier oberhalb der Dauerfestigkeitskennlinie der Biege-Bauteilwöhlerkurve, jedoch unterhalb der Losdrehgrenze, folglich ist mit einem Versagen infolge eines Biegedauerbruches zu rechnen. Des Weiteren zeigt die Untersuchung, dass die Biegespannungen um größer als Faktor zwei höher sind als die Axialspannungen. Zwar liegt auch die Biege-Bauteilwöhlerkurve aufgrund der Stützwirkungsunterschiede höher als die Axial-Bauteilwöhlerkurve, so ist dennoch die real auftretende betriebliche Bie-

Abb. 5: Beanspruchung und Beanspruchbarkeit einer Schraubenverbindung
Quelle: [8]



gelast aufgrund ihrer Höhe und dem daraus resultierenden Schädigungseinfluss bei dem Nachweis der Ermüdungsfestigkeit nicht zu vernachlässigen. Für eine betriebsfeste Auslegung speziell bei Leichtbauoptimierten Bauteilen ist es daher essenziell, fundierte Kenntnisse über die realen betrieblichen Lasten zu besitzen.

Es muss also auf der einen Seite nachgewiesen werden, dass es unter der Anzahl der angenommenen Lastwechsel für die außergewöhnlichen Lasten nicht zu einem Ermüdungsbruch infolge Biegung der Schraube aufgrund der wechselnden Querbewegung in der Trennfuge kommt. Auf der anderen Seite ist nachzuweisen, dass die betrieblichen Biegebelastungen sich im Bereich der Dauerfestigkeit der Biege-Bauteilwöhlerkurve befinden, um auch hier einen Ermüdungsbruch infolge von Biegung zu verhindern.

Vorspannkraftverlust durch selbsttätiges Losdrehen

Im zweiten Schritt muss der Vorspannkraftverlust nach einer vorgegebenen bzw. angenommenen Anzahl der Gleitzyklen bzw. Lastwechsel bestimmt werden. Weiterhin ist die Querverschiebung, ab welcher ein Vorspannkraftverlust durch partielles Losdrehen eintreten kann, zu ermitteln. Losdrehesicherheit ist gegeben, wenn der maximal mögliche Gleitweg kleiner ist als die zuvor ermittelte Grenzverschiebung. Der Einsatz von Sicherungselementen gegen selbsttätiges Losdrehen ist bei der Überschreitung der Gleitfestigkeit generell erforderlich.

Vorspannkraftverlust infolge Setzens

Im dritten Schritt ist der Vorspannkraftverlust infolge Setzens bzw. Verschleiß von Oberflächenbeschichtungen in der Trennfuge nach einer vorgegebenen bzw. angenommenen Anzahl der Gleitzyklen bzw. Lastwechsel zu bestimmen. Häufig werden Bauteilfügeflächen bereits vor der Montage beschichtet. Insbesondere bei Querbelastungen ist dann mit zusätzlichen Setzbeiträgen zu rechnen. Weiterhin ist ein Abrieb durch die in Kauf genommenen

Relativbewegungen zu berücksichtigen. Die Übertragung der im Rahmen des vorgenannten Entwicklungsprojektes ermittelten Werte ist nur mit großer Vorsicht möglich.

Axiale Restdauerfestigkeit

Der vierte und letzte Schritt beinhaltet die Ermittlung der axialen Restdauerfestigkeit der Schraube unter Betriebsbelastung bei Berücksichtigung statischer Lasten (Wechselbiegung aufgrund des Gleitens in der Trennfuge quer zur Schraubenlängsachse). Dieser Schritt ist erforderlich, damit auch nach der Vorbelastung der Schraube durch die außergewöhnlichen Querbelastungen gewährleistet ist, dass die Schraube über die angesetzte Lebensdauer nicht versagt. Der Nachweis muss mit den experimentell nach Vorbelastung ermittelten Lebensdauerlinien bzw. Restdauerfestigkeiten unter axial schwellender Belastung erfolgen.

Anwendungshinweise

Das dargestellte Nachweisverfahren kann nach DIN 25201-2 [5] bis einschließlich Risikoklasse H angewendet werden, wenn die Ausfallredundanz (Schraubenanzahl ist größer als rechnerisch erforderlich oder ein weiterer Lastpfad übernimmt bei Versagen eine Sicherungsfunktion) bei betrieblichen Belastungen nach DIN EN 12663 und DIN EN 13749 vorhanden ist. Die Verwendung der in der Regel erforderlichen Sicherungselemente bedarf eines Nachweises der Wirksamkeit gegen selbsttätiges Losdrehen nach DIN 25201-4 [9] Anhang B „Prüfvorschrift zum Nachweis der Losdrehsicherheit von gesicherten Schraubenverbindungen“.

Der Tragfähigkeitsnachweis baut im Wesentlichen auf experimentellen Untersuchungsergebnissen auf. Es ist ausreichend, diese für den jeweiligen Anwendungsfall durchzuführen. Es wäre wünschenswert, den bisherigen Datenbestand zu erweitern und damit den Tragfähigkeitsnachweis einer breiten Anwendung zugänglich zu machen. ■

Dieser Beitrag ist die aktualisierte Fassung des auf der DVM-Betriebsfestigkeitstagung 2015 vorgetragenen Beitrags „Festigkeitsnachweis von Schraubenverbindungen des Schienenfahrzeugbaus mit seltenen sehr hohen Querbelastungen“.

QUELLEN

- [1] DIN EN 1993-6: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen; Dezember 2010
 [2] DIN EN 13001-3-1: Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-1: Grenzstände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken; Dezember 2013
 [3] DIN EN 12663-1: Bahnanwendungen – Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen – Teil 1: Lokomotiven und Personenfahrzeuge (und alternatives Verfahren für Güterwagen); März 2015
 [4] DIN EN 13749: Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen; Juni 2011
 [5] DIN 25201-2: Konstruktionsrichtlinie für Schienenfahrzeuge und deren Komponenten – Schraubenverbindungen – Teil 2: Konstruktion – Maschinenbauliche Anwendungen; April 2004

[6] VDI-Richtlinie 2230, Blatt 1: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen – Zylindrische Einschraubverbindungen; Dezember 2014

[7] Teitscheid, K.; Klöcker, M.; Koch, D.; Öngün, Y.: Dynamische Beanspruchbarkeit von querbelasteten Schraubenverbindungen. VDI-Fachtagung Schraubenverbindungen 2018, Tagungsband 2336

[8] Koch, D.; Teitscheid, K.; Hinnecke, L.; Kowalski, T.: Erweiterte Prüfmethode zur sicheren Rad- und Fahrwerksverschraubung der E-Mobilität. DSV Schraubenverbindungen – Neue Ergebnisse aus Forschung und Praxis, Juni 2021

[9] DIN 25201-4: Konstruktionsrichtlinie für Schienenfahrzeuge und deren Komponenten – Schraubenverbindungen – Teil 4: Sichern von Schraubenverbindungen; November 2021

[10] Klöcker, M.; Hübing, T.; Franke, R.; Roth, M.: Festigkeitsnachweis von Schraubenverbindungen des Schienenfahrzeugbaus mit seltenen sehr hohen Querbelastungen, DVM-Tagung Betriebsfestigkeit, Berlin 2015



Zum 80. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Gärtner

Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Gärtner war in leitenden Positionen, zuletzt bei Bombardier Transportation als Chefkonstrukteur, Leiter von Engineering und Qualitätsmanagement sowie als Direktor Standards & Regulations bis zu seinem Ruhestand im Jahr 2007 tätig. Für seine hervorragenden Leistungen bei der Konstruktion richtungsweisender und sehr erfolgreicher Lokomotiv-Baureihen wie auch für sein Engagement für Forschung und Ingenieurausbildung sowie für seine Tätigkeit in zahlreichen Gremien wurde Professor Gärtner mit der Beuth-Ehrenmedaille der DMG ausgezeichnet. Zu seinen vielfältigen Initiativen gehörten auch seine Impulse für die Vorarbeiten für den hier dargestellten Tragfähigkeitsnachweis.



Prof. Dr.-Ing. Max Klöcker

Technische Hochschule Köln und Gesellschaft zur Förderung Angewandter Verbindungstechnik, Köln

max.kloecker@th-koeln.de



M.Sc. Kevin Teitscheid

Entwicklungsingenieur ABC Umformtechnik GmbH & Co. KG, Gevelsberg

kevin.teitscheid

@abc-umformtechnik.com



M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Tobias Hübing

Leiter Labor Heico Befestigungstechnik GmbH, Ense-Höingen

tobias.huebing@heico-group.com



Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Franke

Professur Mechanik der Werkstoffe, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Cottbus

rainer.franke@b-tu.de



InnoTrans 2022

20. – 23. SEPTEMBER · BERLIN

Internationale Fachmesse für Verkehrstechnik



Your. Future.

Karrierestart in der Mobilitätsbranche?

Mehr Informationen unter innotrans.de/campus

Jetzt bewerben – Job abgreifen!

Eurailpress Career Boost nur am 21. September, 14:00 Uhr



RecruitingLAB | Talent Stage | Jobwall | Career Tours | Ermäßigte Studententickets



200 Jahre Gastgeber von Welt

