

Moderne und sicherheitsorientierte Pressverbandsauslegung Rad/Welle

Lehnert, Torben Felix¹, Gerlach, Thomas¹, Dr. Jenne, Sven¹

¹Gutehoffnungshütte Radsatz GmbH

Zusammenfassung

Dieser Beitrag widmet sich der Nachweisführung von Pressverbänden an Radsätzen. Es werden dabei die Erkenntnisse aus theoretischen und experimentellen Untersuchungen diskutiert.

Keywords: Pressverband, Pressverbandsauslegung, Reibwert, Torsionsschwingung, Reibwertermittlung

1 Einleitung

Die Gestaltung von Pressverbänden an Radsätzen – insbesondere der Schnittstelle Vollrad / Radsatzelle – wurde in der näheren Vergangenheit immer stärker in den Blickpunkt von betrieblichen Untersuchungen gerückt. Auslöser hierfür sind im Betrieb detektierte Torsionsschwingungen von Radsätzen und damit verbunden vereinzelt festgestellte Radverdrehungen. Die hochdynamischen betrieblichen Torsionsmomente übersteigen zum Teil deutlich die konstruktiven Bemessungslasten. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die konstruktive Aufgabe, die Übertragungsgrenzen des Verbandes besonders genau zu kennen, um vorhandene Gestaltungsspielräume optimal auszuschöpfen und Optimierungspotentiale aufzudecken.

2 Grundlegende Gedanken

Es gibt eine Reihe an Parametern, die eine Übertragungsoptimierung eines Pressverbandes beeinflussen. Jedoch ist der Konstrukteur in der Gestaltung an Grenzen gebunden. Die Grenzen sind einerseits Ausführungsbestimmungen aus Normen, Regelwerken und

andererseits die physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Die Parameter sind also unter Beachtung der Regelwerksgrenzen zu optimieren. Für die Ausführung der Schnittstelle Vollrad/Radsatzwelle sind dies im Besonderen die Anforderungen aus DIN 7190-1 [1], DIN 7190-2 [2], DIN EN 13260 [3], DIN EN 13261 [4], DIN EN 13262 [5] und DIN EN 13103-1 [6]. Infolge der Regelwerke ergeben sich folgende Haupteinflussfaktoren auf die Übertragbarkeit des Verbandes:

- Reibwert
- Pressübermaß
- Fügemethode
- Abmaße der Schnittstelle
- Materialpaarung

Hervorzuheben sind insbesondere der Reibwert und das Übermaß. Sie fließen proportional in die Übertragbarkeit des Verbandes ein.

Um die Übertragbarkeitsgrenze genauer zu ermitteln, ist der Reibwert von übergeordneter Bedeutung. Auf Grund dessen ist die genaue Kenntnis des Reibwertes unter den üblichen fertigungstechnischen und technologischen Bedingungen zwangsläufig von Nöten, um einen belastbaren Nachweis zu führen.

3 Experimenteller Nachweis des Reibwertes

Vorab ist zu unterscheiden zwischen 1:1-Versuchen an realen Bauteilen und Kleinprobenversuchen. Es sollte möglichst die Art von Versuch gewählt werden, welche folgenden Anforderungen genügt:

1. Robuste Versuchsführung:

- Einfach durchzuführen
- Möglichst wenige Einflussparameter auf Versuchsergebnis

2. Versuch muss reproduzierbar sein

3. Ergebnisse müssen eindeutig und auf reale Bedingungen übertragbar sein:

- Nutzbar für reale Bauteile
- Ergebnisse müssen nachvollziehbar und verständlich sein (→ Anwendungsgrenzen)

Es stellt sich also zunächst die Aufgabe, einen passenden Versuch zur Ermittlung des Reibwertes auszuwählen. Im folgenden Abschnitt werden sowohl 1:1-Versuche aber auch Kleinprobenversuche genannt und vergleichend bewertet.

3.1 1:1-Versuche

Grundsätzlich sind Versuche an 1:1-Probenkörpern oder an realen Bauteilen denkbar z. B. durch reale Verdrehversuche¹ an Radsätzen. Diese Versuche werden jedoch durch eine ganze Reihe von Parametern stark beeinflusst, sodass unter Umständen, nur durch eine sehr große Anzahl von Versuchen aussagekräftige Reibwerte ermittelt werden können.

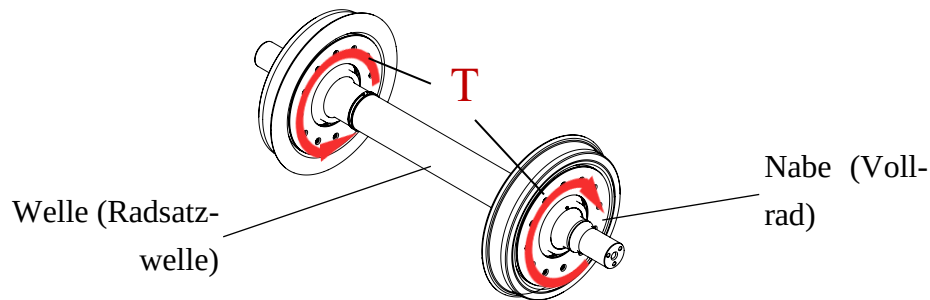


Abbildung 0—1: Radsatz mit Torsionsbelastung T (Rutschmoment)

Nachfolgend eine auszugshafte Auswahl von Einflussparametern auf die Durchführung eines 1:1-Verdrehversuches:

1. Ausführungsgeometrie:

- Abmaße der Schnittstelle (z. B. Kenntnis der genauen Nabengeometrie zur Ermittlung der Fugenpressung an jedem Kontaktpunkt zur Rückrechnung auf Reibwert)
- Oberflächenrauigkeiten der Fügeflächen

2. Fügeprozess:

- Vorbereitung der Fügeflächen (z. B. Reinigung)
- Schmiermittelauftrag
- Fügetemperatur
- Ausrichtungsgenauigkeit/Einrichtungsgenauigkeit der zu fügenden Bauteile
- Fügegeschwindigkeit

3. Versuchsführung:

- Ausreichend genaues Auflösungsvermögen der Messwertaufnahme
- Ausrichtungsgenauigkeit/Einrichtungsgenauigkeit in Prüfstand
- Kraft- und Momentenaufbringung und Regelung ausreichend kleinschrittig

¹ Mit Verdrehversuch wird ein Versuch beschrieben, bei dem ein Torsionsmoment an der Nabe aufgebracht wird und zu einem Rutschen in Umfangsrichtung führt (das Rad rutscht in Umfangsrichtung auf dem Wellensitz).

Insbesondere die genaue Kenntnis der Ausführungsgeometrie in Verbindung mit der Ermittlungsmethodik der Fugenpressung (analytisch, FEM oder DMS-Applikation), haben einen starken Einfluss auf den Reibwert. Der Reibwert μ ist definiert als Quotient aus der wirkenden Umfangskraft (Messung) und der Kontaktkraft (aus Fugenpressung).

$$\mu = \frac{F_{Umfangskraft}}{F_{Kontaktkraft}}$$

Man erkennt, dass je nach Verfahren zur Ermittlung der Fugenpressung, dies einen Einfluss auf den Reibwert hat. Grundsätzlich könnte die Kontaktkraft (aus Fugenpressung) auch indirekt über die Applikation von DMS auf dem Nabenaußendurchmesser gemessen werden. Dies verkompliziert aber die Versuchsdurchführung erheblich, weshalb diese Variante für Versuche über größere Stichprobenumfänge ungeeignet ist. Außerdem ist bei üblichen Vollradausführungen eine erhebliche Menge von DMS zu applizieren, um eine ausreichende Menge an Stützstellen der Fugenpressung zu erhalten.

Aus diesem Grunde ist es vorteilhaft, nur einfache Geometrien wie z. B. eine Nabe mit Hohlyzylinderkontur zu beproben, um die genannten Einflüsse (insbesondere der Geometrie) soweit wie möglich auszuschalten. Nichtsdestoweniger verbleiben noch die Einflüsse aus dem realen Fügeprozess und der Versuchsführung.

Eine weitere einfache Möglichkeit zur Ermittlung von Reibwerten ist die Auswertung von sogenannten Gegendruckprüfungen. Nach dem Fügen der Vollräder mit der Radsatzwelle und einer gewissen Ruhezeit werden die Vollräder mit einer Kraft beaufschlagt (gem. DIN EN 13260 [3] ist dies üblicherweise $F = 4 \cdot \text{kN/mm} \cdot D_{\text{Sitzdurchmesser}}$) und der Festsitz überprüft (Vollrad darf während der Kraftbeaufschlagung nicht gleiten). Dies ist eine reguläre Untersuchung am realen Produkt, die jedoch auch den bereits oben geschilderten Schwierigkeiten unterliegt (Reibwert abhängig von genauer Konturkenntnis und Ermittlungsmethodik der Fugenpressung) und nur den Festsitz dokumentiert bis zum Erreichen der Kraft $F = 4 \cdot \text{kN/mm} \cdot D_{\text{Sitzdurchmesser}}$.

Daher scheinen diese Versuche nur sehr bedingt geeignet für die Ermittlung von belastbaren Reibwerten.

3.2 Quasi-statischer Verdrehversuch an Kleinproben

Die zuvor geschilderten Einschränkungen mit Versuchen an 1:1-Proben können durch die geeignete Wahl eines Kleinprobenversuches ggf. abgemildert oder teilweise sogar vollständig vermieden werden. Ein Versuchsaufbau der diese Anforderungen erfüllt, ist ein quasi-statischer Verdrehversuch an Kleinproben.

Um einen konservativen Reibwert experimentell an Kleinproben zu bestimmen, ist im Vorfeld zu analysieren, welche Situation kritisch für die Übertragbarkeit ist. Eine maßgebliche Situation ergibt sich für einen längsgefügtten Radsatz nach dem Fügevorgang. Diese Situation kann aufgrund der verbleibenden Bestände des Fugeschmierstoffes in der Pressfuge als maßgeblich eingestuft werden, denn es ist davon auszugehen, dass der Schmierstoff einen geringeren Haftreibwert besitzt als der Festkörperreibwert, und der Schmierstoff – wenn überhaupt – erst während der betrieblichen Belastungen vollständig aus der Fuge gepresst wird. Infolgedessen ist die Übertragbarkeit bis zur vollkommenen Schmierstoffabscheidung aus der Fuge abgeschwächt. Zur konservativen Absicherung, sollte daher angenommen werden, dass die Pressfuge vollständig mit Fugeschmierstoff benetzt ist, um stets auf der sicheren Seite zu liegen.

Für das zuvor abgeleitete Szenario wurden von der GHH-Radsatz GmbH verschiedene standardisierte Verdrehversuche zur Ermittlung eines belastbaren Reibwertes [7] an einem Prüfinstitut beauftragt. Die Versuche wurden an Kleinproben mit fertigungsüblichen Bearbeitungsprogrammen und unter Einhaltung der Regelwerksgrenzen (zur Übertragbarkeit auf reale Bauteile) und auf für diesen Zweck entwickelten Versuchsständen nach einem standardisierten Prüfverfahren für Reibungszahlen [7] durchgeführt. Diese quasi-statischen Versuche der GHH-Radsatz GmbH zeigten, dass sich größere Reibwerte einstellen als vom Schmierstoffhersteller angegeben. Für den üblichen Fugeschmierstoff Molykote (MoS₂-Paste) lagen die Werte ca. 15 % über denen der Herstellerangaben. Dies bedeutet, wegen der Proportionalität auf die Übertragbarkeit, eine Steigerung der Übertragbarkeit von 15 %. Eine weitere Untersuchung zeigte für molybdänbeschichtete Teile gepaart mit Stahlteilen eine noch größere Steigerung (ca. 25 %). Darüber hinaus wurde eine Variation des Fugendrucks vorgenommen um den Einfluss der Übermaße auf die Reibwertausbildung zu erfassen. Die Variation brachte die Erkenntnis, dass es keinen signifikanten Einfluss auf den Reibwert gibt. Zur weiteren Absicherung der quasi-statischen Versuche wurden zusätzlich noch dynamische Versuche mit Kleinproben durchgeführt. Die dynamischen Versuche zeigten eine nochmalige Steigerung der Reibwerte gegenüber den quasi-statischen Versuchen und unterstrichen den konservativen Charakter.

4 Rechnerischer Nachweis

Die europäischen Regelwerke ([5], [4], [3] und [6]) sehen für die Konstruktion und Ausführung der Schnittstelle Vollrad/Radsatzwelle keine weiterführenden Übertragungsnachweise vor. Eine zusätzliche Berechnung der Übertragungsfähigkeit des Verbandes, z. B. im Sinne der DIN 7190-1 [1] und DIN 7190-2 [2] ist demgemäß nicht vorgesehen. Anstelle einer Übertragungsfähigkeitsermittlung werden in den Regelwerken Bemessungsgrenzwerte definiert (zulässige Übermaße, Aufpresskräfte etc.). Bei Einhaltung dieser Grenzwerte wird unterstellt, dass eine ausreichende Bemessung gegeben ist. Nichtsdestotrotz haben sich in Deutschland weiterführende Betrachtungen etabliert. Ein üblicher Standardnachweis ist inzwischen eine Verbandsberechnung nach DIN 7190-1 [1] und DIN 7190-2 [2]. Die Torsionsschwingungen und die Konsolidierung der Norm DIN 7190 [8] im Jahre 2017 (Ersetzung durch DIN 7190-1 [1] und DIN 7190-2 [2]) beflößigten die GHH-Radsatz GmbH besonders, die Normen DIN 7190-1 [1] und DIN 7190-2 [2] auf die genauen Anwendungsgrenzen für Radsatzpressverbände zu untersuchen. Vorzugsweise sollte die analytische Konturerfassung überprüft und vereinfacht werden. Dies konnte durch eine Ergänzung der Berechnungsmethodik erreicht werden, welche die DIN 7190 [1], [2] erweitert und bereits im alltäglichen Konstruktionsprozess implementiert ist.

Darüber hinaus enthält die konsolidierte Norm DIN 7190 [1], [2] weitere Anforderungen, insbesondere für kegelige Pressverbände. Folgende Anforderungen sind durch die neue Fassung hinzugekommen:

1. Berücksichtigung von Winkelfehlern an kegeligen Pressverbänden
2. Lösekraft bei verschiedenen Kegelöffnungswinkeln
3. Berücksichtigung von Verbandsschwächungen (z. B. Bohrungen in Nabe etc.)
4. Berechnung der Grenzbelastungen von selbsthemmenden Kegelpressverbänden

Diese zusätzlichen Anforderungen sind aktueller Gegenstand von Untersuchungen der GHH-Radsatz GmbH. Eine erste Analyse ergibt folgende Einschätzung:

1. Berücksichtigung von Winkelfehlern an kegeligen Pressverbänden:
 - Einfluss von Winkelfehler im Rahmen der üblichen Fertigungstoleranzen hat keinen signifikanten Einfluss auf Übertragbarkeit des Pressverbandes.
2. Lösekraft bei verschiedenen Kegelöffnungswinkeln:
 - Einfluss ist bei Auslegung zu berücksichtigen.
3. Berücksichtigung von Verbandsschwächungen (z. B. Bohrungen in Nabe etc.):

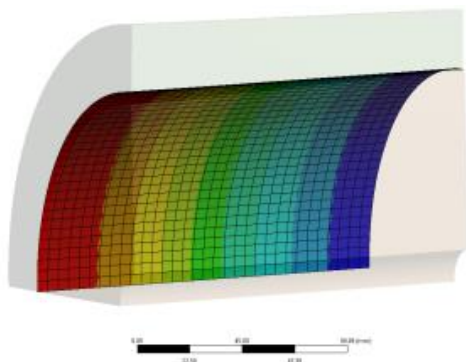
- Die in der Norm angegebenen Verhältnisse zur Berücksichtigung der Verbandschwächung passen in der Regel nicht zu den realen Bauteil-Abmessungen für Vollräder, sodass die realen Verhältnisse für die übliche Anwendung aus den Diagrammen nicht abgelesen werden können und damit nicht anwendbar sind.

4. Berechnung der Grenzbelastungen von selbsthemmenden Kegelpressverbänden:

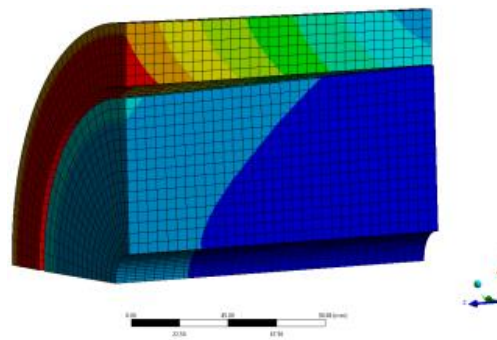
- Anwendbarkeit auf Vollräder ist zu prüfen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die neuen Anforderungen auch neue Aspekte in der Auslegung von Pressverbänden enthalten. Diese sind fast ausschließlich auf kegelige Pressverbände beschränkt und es sind weitere Untersuchungen dazu notwendig.

Bei der Auslegung von zylindrischen Pressverbänden kommt als neuester Punkt die Verbandsschwächung hinzu. Erste Untersuchungen für Vollräder mit Schwächung des Rads-tes durch Axialbohrungen (Vollrad mit Anbindungsmöglichkeit einer Radbrems-scheibe) zeigten keinen signifikanten Einfluss oder Minderung auf den Pressverband.



Plot: Fugenpressung entlang Fugendurchmesser (blaue Bereiche niedrige Pressung, rote Bereiche große Pressung)



Plot: Verschiebung Nabe und Welle infolge Fugenpressung mit Winkelfehler (Verformung stark vergrößert)

Abbildung 0—2: Simulation Pressverband mittels FEM mit großem Winkelfehler zwischen Nabenbohrung und Wellensitz

5 Ausblick

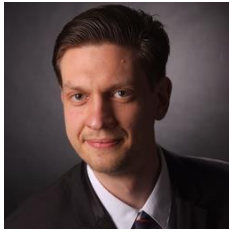
Die Testierung eines konservativen Reibwertes mittels Kleinprobenversuchen für den Schmierstoff Molykote (MoS₂-Paste) zur Auslegung von Pressverbindungen ist der GHH-Radsatz GmbH erfolgreich gelungen. In Verbindung mit der aktuellsten Regelwerksfassung der Norm DIN 7190 [1], [2] gibt es darüber hinaus zusätzliche Fragestellungen und weiteres abschöpfbares Wissen, welches es für den Auslegungsprozess von Pressverbänden zu erschließen gilt.

Ziel der GHH-Radsatz GmbH ist es, das Verständnis über den Pressverband weiter zu vertiefen und neuste Erkenntnisse in den Auslegungsprozess einfließen zu lassen, auch über die üblichen Normanforderungen hinaus.

Literatur

- [1] "DIN 7190-1 Pressverbände – Teil 1: Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln für zylindrische Pressverbände," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Deutsche Norm DIN 7190-1, Feb. 2017.
- [2] "DIN 7190-2 Pressverbände – Teil 2: Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln für kegelige, selbsthemmende Pressverbände," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Deutsche Norm DIN 7190-2, Feb. 2017.
- [3] "DIN EN 13260 Bahnanwendungen - Radsätze und DIN EN 13260 Drehgestelle - Radsätze - Produktanforderungen; Deutsche Fassung EN 13260:2009+A1:2010," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Deutsche Norm DIN EN 13260, 2011.
- [4] "DIN EN 13261 Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Radsatzwellen - Produktanforderungen; Deutsche Fassung EN 13261:2009+A1:2010," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Deutsche Norm DIN EN 13261, 2011.
- [5] "DIN EN 13262 Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Räder - Produktanforderungen; Deutsche Fassung EN 13262:2004+A2:2011; Berichtigung zu DIN EN 13262:2011-06," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Deutsche Norm DIN EN 13262, 2013.
- [6] "DIN EN 13103-1 Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Teil 1: Konstruktionsleitfaden für außengelagerte Radsatzwellen; Deutsche Fassung EN 13103-1:2017," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Deutsche Norm DIN EN 13103-1, 2019.
- [7] E. Leidich, J. Vidner, and M. Gräfensteiner, "Endlich vergleichbare Werte - Standardisiertes Prüfverfahren für Reibungszahlen," *Antriebstechnik*, no. 1 - 2/2012, 2012.
- [8] "DIN 7190 Pressverbände – Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Deutsche Norm DIN 7190, Feb. 2001.

Autoren



Lehnert, Torben Felix, M.Eng.

Gartenstr. 40,
46145 Oberhausen,
Germany

Position: Forschung und Entwicklung / Research and Development



Gerlach, Thomas, Dipl.-Ing.

Gartenstr. 40,
46145 Oberhausen,
Germany

Position: Leiter Forschung und Entwicklung / Manager Research and Development



Jenne, Sven, Dr.-Ing.

Gartenstr. 40,
46145 Oberhausen,
Germany

Position: Direktor Konstruktion & Entwicklung / Director Engineering & Development