Forschungsprojekt für BAFU, Vertragsnummer 1337000317

Neuartige Radsätze zur Lärm- und Gewichtsreduktion bei Schienengüterwagen aus faserverstärktem Kunststoff

Schlussbericht

Auftragnehmerin:

Empa, Structural Engineering Research Laboratory, Dübendorf

Dr. Christoph Czaderski und Dr. Moslem Shahverdi

Unterauftragnehmer:

PROSE AG, Winterthur

Carbo-Link, Fehraltorf

Empa, Laboratory Acoustics/noise control

24. August 2018

Organisatorisches

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) erteilt der Empa, Structural Engineering Research Laboratory, den Auftrag, eine Machbarkeitsstudie zur Entwicklung und Herstellung eines Faserverbund (FVK) Radsatzes für Güterwagen durchzuführen. Daraufhin hat die Empa die Firma PROSE AG, Winterthur, damit beauftragt, bei der Studie mitzuarbeiten und Ihre Erfahrung und Wissen im Eisenbahnbau und deren Zertifizierungen einzubringen. Weiter wurde die Firma Carbo-Link, Fehraltorf, als Hersteller von Faserverbund Werkstoffen beauftragt, sich an der Machbarkeitsstudie zu beteiligen. Die Auswirkungen des neuartigen Radsatzes auf den Lärm wird ausserdem von der Empa Abteilung Akustik/Lärm untersucht. Somit sind vier verschiedene Firmen bzw. Gruppen an der Arbeit beteiligt und werden nachfolgend als die vier Partner bezeichnet.

Vorgehen

Zu Beginn des Projektes wurden verschiedene Varianten für ein Kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK) -Radsatz besprochen und bewertet. Schliesslich wählten die vier Partner eine Bestlösung zur Weiterbearbeitung aus. Carbo-Link führte mit dieser Bestlösung ein erstes Design eines CFK-Radsatzes durch (Carbo-Link Design D1), im späteren Verlauf des Projektes gab es noch eine Anpassung, die dann mit Carbo-Link Design D2 bezeichnet wurde. Das Design, die Materialwahl und ein provisorisches Konzept zur Herstellung wird im Schlussbericht Task 1-2 dargestellt.

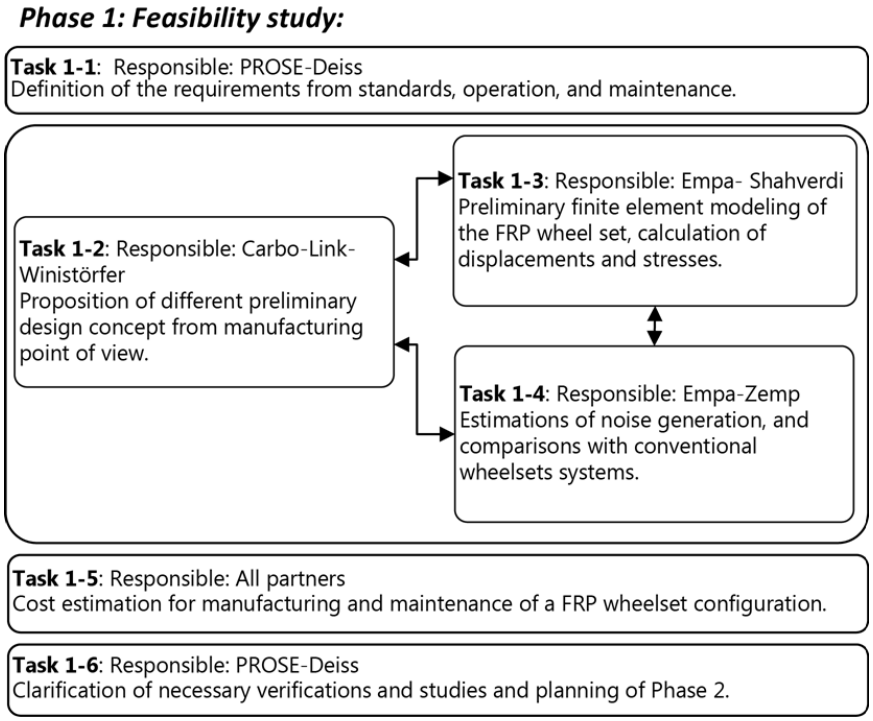
Die Firma PROSE stellte aus den Normen die massgebenden Lastfälle für den zu untersuchenden Radsatz zusammen, erarbeitete eine Radsatzspezifikation für einen möglichen CFK-Radsatz, berechnete eine CFK-Radsatzwelle nach EN13103 und führte eine Patentrecherche durch. Ausserdem führte sie eine Simulation der Wärmeentwicklung an der Wellenbremsscheibe beim CFK Radsatz durch und machte eine Nachweisplanung zum Betrieb eines CFK Radsatz Prototypen. Siehe dazu den Schlussbericht Task 1-1.

Die Empa, Structural Engineering Research Laboratory, berechnete mittels Finite Elemente (FE) Modellierungen die Zug- Druck und Schubspannungen im CFK-Radsatz gemäss erstem Design und als Vergleich auch in einem konventionellen Stahl-Radsatz. Da die Steifigkeiten des ersten Designs nicht genügend war, wurde die Konfiguration nochmals angepasst, d.h. die Wandstärken wurden vergrössert und die Berechnungen wurden nochmals durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen des ersten Designs sind im Zwischenbericht Task 1-3, die Ergebnisse der Berechnungen des zweiten Designs sind im vorliegenden Schlussbericht Task 1-3 beschrieben.

Die Empa Abteilung Acoustics/noise control berechnete mittels Finite Elemente (FE) Modellierungen den Lärm des CFK-Radsatzes im Vergleich zu einem konventionellen Stahl-Radsatz. Im

Schlussbericht Task 1-4 wird die gesamte Modellierungskette und die Ergebnisse der Berechnungen beschrieben.

Die Arbeitspakete Task 1-5 und 1-6 wurden gemeinsam in der Arbeitsgemeinschaft erarbeitet. Im ersten Teil des Schlussberichtes Task 1-5 und 1-6 wird die Kostenabschätzung eines CFK-Radsatzes im Vergleich zu einem konventionellen Stahl Radsatz (Task 1-5) beschrieben und im zweiten Teil verschiedene Möglichkeiten für ein weiteres Vorgehen nach Abschluss des vorliegenden Projektes skizziert.



Figur 3 der Beilage 1 des BAFU Vertrages.

Der vorliegende Schlussbericht beschreibt die Ergebnisse der sechs Arbeitspaket (siehe Figur 3) wobei jeder Partner für seinen Arbeitsbereich einen separaten Bericht erarbeitet hat. Die Arbeitspaket 5 und 6 wurden wie bereits erwähnt, gemeinsam erarbeitet. Im vorliegenden Bericht wurden die Teilberichte gemäss der Reihenfolge der Arbeitsbereiche zusammengestellt:

Task 1-1: PROSE, Normen, Lastfälle, Patente

Task 1-2: Carbo-Link, erstes Design CFK-Radsatz

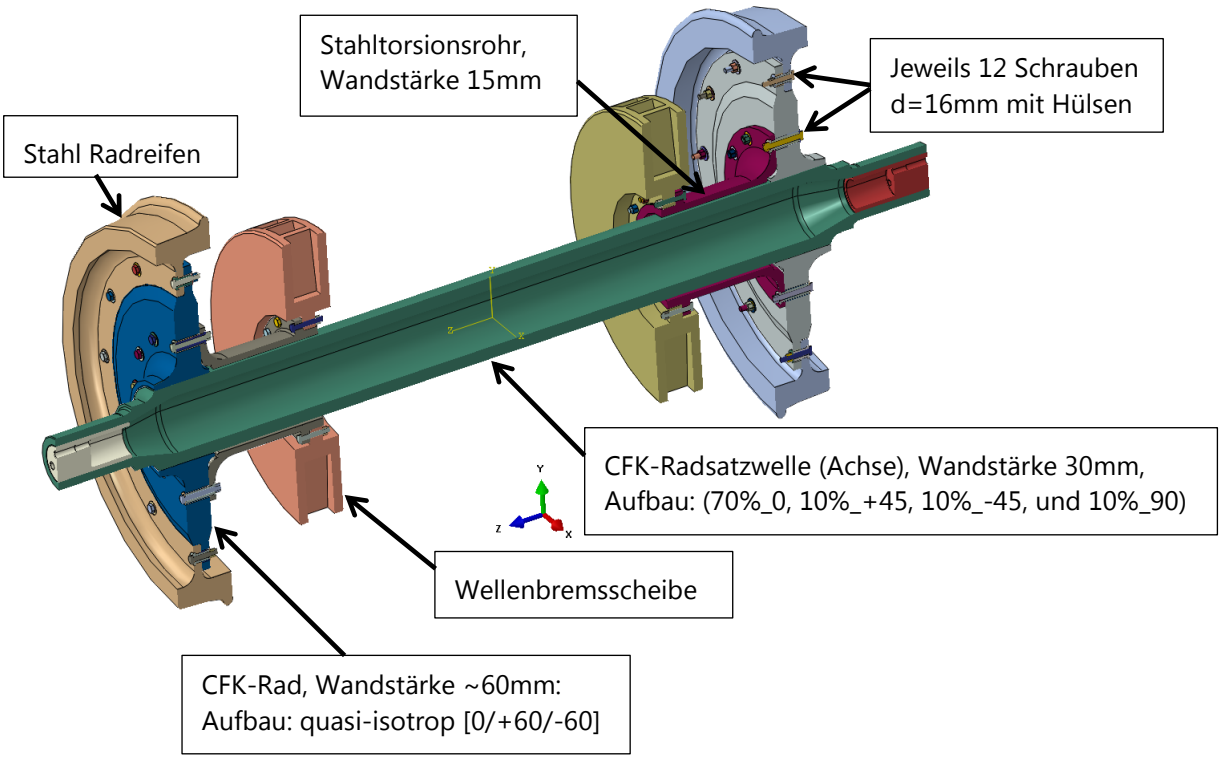
Task 1-3: Empa, Structural Engineering Research Laboratory, FE-Modellierung der Struktur

Task 1-4: Empa Abteilung Acoustics/noise control, FE- Modellierung des Lärms

Task 1-5 und 1-6: Kosten und Phase 2

Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Aufgrund der Anforderungen an den Betrieb eines Radsatzes für Güterwagen mit einer Achslast 25t wurde ein machbares Konzept für einen CFK-Radsatzes erarbeitet. Es wird folgende Konfiguration des CFK-Radsatzes vorgeschlagen:



Das Gewicht dieses CFK-Radsatzes ohne Wellenbremsscheibe beträgt 632 kg. Ein vergleichbarer Stahl Radsatz hat dagegen ein Gewicht von 1002 kg. Somit beträgt die Gewichtsersparnis 370 kg.

Der CFK-Radsatz führt zu einer beachtlichen Reduktion des abgestrahlten Luftschalls (Lärm) von ca. 23 dB(A), berücksichtigt man die Beiträge von Schiene und Schwelle zum gesamten Immissionspegel während einer Vorbeifahrt ist die Reduktion immerhin noch ca. 3 dB(A) im Vergleich zu einem Stahl Radsatz.

Die Herstellung eines CFK-Radsatzes kostet etwa 6 mal mehr als die Herstellung eines konventioneller Stahl Radsatzes. Wenn die Kostenreduktion durch das tiefere Gewicht berücksichtigt wird, reduziert sich der Faktor auf 4.2.

Zusammenfassungen der Schlussberichte der einzelnen Arbeitspakete

(aus den Teilberichten entnommen)

Task 1-1: Eisenbahn Engineering

Die Arbeiten seitens PROSE bis Mitte Januar 2018 entsprechen den im Projektplan geplanten Tätigkeiten. Dies sind die Betreuung der Projektpartner hinsichtlich eisenbahn- und radsatzspezifischer Fragestellungen und die Durchführung einer Patentrecherche zu Faserverbundradsätzen. Zudem wurden auf Grundlage der zum Zeitpunkt der Untersuchung zur Verfügung stehenden Informationen ein Teil der für eine mögliche Zulassung erforderlichen Unterlagen soweit als möglich vorbereitet.

Die Arbeiten seitens PROSE seit Mitte Januar 2018 entsprechen weitgehend den im Projektplan geplanten Tätigkeiten. Dies ist einerseits die Betreuung der Projektpartner hinsichtlich eisenbahn- und radsatzspezifischer Fragestellungen und die Unterstützung in zulassungsrelevanten Fragestellungen sowie andererseits die Ausarbeitung des Zulassungskonzeptes für einen Prototypen. Zudem wurden auf Grundlage der aktualisierten Informationen die bereits erstellten Unterlagen angepasst. Darüber hinaus wurden diverse thermischen Untersuchungen durchgeführt.

Task 1-2: Herstellung

Das vorliegende Dokument beschreibt das Design-Konzept eines Lauf-Radsatzes aus faserverstärktem Kunststoff (FVK). Ziel des neuen Designs ist in erster Linie die Reduktion der Lärmemissionen. Weiter wird mit dem Einsatz von FVK eine erhebliche Massenreduktion erwartet.

Das Design basiert auf normativen geometrischen sowie festigkeits- und steifigkeitsmässigen Anforderungen für Eisenbahn-Güterwagen und wurde durch erste Strukturanalysen mittels FEM auf seine Tauglichkeit untersucht.

Das Konzept besteht aus einer Radsatzwelle sowie einem Radkörper aus CFK, wobei letzterer durch einen Radreifen aus Stahl ergänzt wird. Die Verbindung zwischen den Wellen-Bremsscheiben und den Rädern erfolgt direkt mittels eines Torsionsrohrs.

Weiter wird die Materialwahl und das provisorische Fertigungskonzept für alle Komponenten erläutert. Den Abschluss bilden eine Zusammenstellung der erwarteten Massen sowie weitere konzeptionelle Überlegungen.

Task 1-3: Struktur

Im vorliegenden Schlussbericht des Arbeitspaketes 1-3 wird zu Beginn die Arbeitssitzung vom 30.10.2017 der vier Projektpartner PROSE, Carbo-Link, Empa Structural Engineering Research Laboratory und Empa Acoustics zusammengefasst. Im Rahmen dieser Sitzung wurden verschiedene mögliche Konzepte für einen kohlefaserverstärkten Kunststoff (CFK) Radsatz erarbeitet und eine Bestvariante zur Weiterbearbeitung ausgewählt. Carbo-Link konstruierte daraufhin auf dieser Grundlage eine erste CFK Radsatz Konfiguration (Carbo-Link Design D1).

Anschliessend wird im vorliegenden Bericht beschrieben, wie die Empa Abteilung Ingenieur-Strukturen Finite Elemente (FE) Modellierungen dieser Konfiguration mit Hilfe der Abaqus FE-Software durchführte. Die Empa Abteilung Acoustic generierte die FE Elemente (meshing) der Strukturen für die Berechnungen (siehe Teilbericht 1-4). Die entwickelten Abaqus Modelle wurden von der Empa Akustik Abteilung auch für die Lärmmodellierung benutzt.

Total wurden vier verschiedene Hauptmodelle des CFK Radsatzes und ein Modell für einen konventionellen Stahl-Radsatz entwickelt, untersucht und miteinander verglichen. Die im Arbeitspaket 1-1 definierten Lastfälle wurden verwendet (siehe den entsprechenden Bericht). Mit Hilfe dieser Modelle konnten die Verschiebungen und Spannungen in den kritischen Bereichen des Radsatzes ermittelt werden. Die zulässigen Spannungen in den CFK-Teilen wurden aus in der Literatur vorhandenen Versuchsergebnissen von CFK unter quasi-statischer und Ermüdungsbeanspruchung festgelegt. Wo Angaben fehlten wurden begründete Annahmen getroffen. Die zwei Versagenskriterien „maximum Spannung“ und „Tsai-Wu“ wurden zuerst für die quasi-statische Belastung eingeführt und anschliessend für die Ermüdungsbeanspruchung angepasst.

Die Berechnungsresultate des ersten CFK Radsatz Designs ergab eine ungenügende Steifigkeit des CFK Radsatzes. Deshalb wurde anschliessend eine zweite CFK Radsatz Konfiguration mit einer grösseren Wandstärke der Achse (30 anstatt 20mm) und eine verstärkten Dicke des Rades (60 anstatt 40mm) untersucht (Carbo-Link Design D2).

Die wichtigsten Ergebnisse der im vorliegenden Bericht beschriebenen Berechnungen, sind: Die Spannungen liegen unter den zulässigen Spannungen die zu Ermüdungsversagens führen können und auch die Verformungen liegen innerhalb der Toleranzgrenzen. Die Bemessung der Schraubenverbindungen zwischen dem CFK-Rad und dem Stahlring und zwischen dem Torsionsrohr und dem CFK Rad ergab, dass 12 Schrauben mit einem Durchmesser von 16mm verwendet werden müssen um eine robuste und steife Verbindung zu garantieren. Die Bemessung des Torsionsrohrs ergab, dass eine Wandstärke von 15mm aus normalem Stahl genügt, um die massgebenden Lastfälle zu übertragen.

Task 1-4: Lärm

In vorliegendem Bericht wird die komplett entwickelte Modellierungskette erklärt, ausgehend von der Geometrie der Radsätze bis hin zur Berechnung des abgestrahlten Schallfeldes.

Der Vernetzungs-Strategie wird zu Beginn der Simulationskette besonderes Augenmerk gewidmet, da hier ein grosses Potential zur Effizienzsteigerung und Minimierung numerischer Ungenauigkeiten ausgeschöpft werden soll. Deshalb wurden sämtliche räumlichen Diskretisierungen am Laboratory for Acoustics/Noise Control durchgeführt und für die Prüfung der strukturellen Integrität zur Verfügung gestellt.

Parallel zur Prüfung der strukturellen Integrität (statisch) wurde aus dem Arbeitspaket T.1-3 des Structural Engineering Laboratories die strukturdynamische Analyse vom Laboratory for Acoustics /Noise Control übernommen. Der Ansatz zur Berechnung der erforderlichen Oberflächen-Schwinggeschwindigkeiten, welche zur Berechnung des abgestrahlten Luftschallfeldes benötigt werden, umfasst drei Analyseschritte. In einem ersten Schritt wird eine statische Strukturanalyse für den Lastfall mit gerader Strecke durchgeführt, um die Vorspannung auf die Radsätze miteinbeziehen zu können. In einem nachfolgenden Schritt wird eine Modalanalyse durchgeführt, um die Resonanzfrequenzen zu identifizieren. Schliesslich wird als letzter Schritt in der dynamischen Analysekette eine harmonische Analyse des Radsatzes ausgeführt. Um die Oberflächen-Schwinggeschwindigkeiten über den gesamten Frequenzbereich (200-5000 Hz) effizient zu berechnen, werden zusätzlich zu den aus der Modalanalyse erhaltenen Eigenfrequenzen fünf Stützpunkte pro Terzband verwendet. Basierend auf dem SonRAIL-Projekt wurde eine verbesserte frequenzabhängige Kontaktkraft (Rad/Schiene) abgeleitet. Die resultierende spektrale Leistungsdichte (PSD) der Verschiebung am Kontaktpunkt basiert auf den Rauhigkeitsspektren und der Fahrzeuggeschwindigkeit und wird als frequenzabhängige Verschiebung am Rad/Schiene-Kontaktpunkt verwendet. Schliesslich werden die Oberflächen-Schwinggeschwindigkeiten extrahiert und weiter als Eingangsdaten für die Schallstrahlungsberechnung verwendet (Arbeitspaket T.1-4).

Das abgestrahlte Luftschallfeld wird in der Workbench von ANSYS als frequenzabhängige harmonische Systemantwort berechnet. Das Finite Elemente Modell verwendet die vorgängig berechneten Oberflächen-Schwinggeschwindigkeiten als Eingangsgrössen in jedem Knotenpunkt. Somit kann der Schalldruckpegel im Abstand von 3.7 m als Schmalband-, Terzbandspektrum und schliesslich als Einzahlwert ermittelt werden.

Was schon aus der strukturdynamischen Analyse hervorgegangen ist hat sich in der Berechnung der Schalldruckpegel bestätigt – die Terzbandpegel werden durch die für die Luftschallabstrahlung relevanten Eigenmoden dominiert. Der FRP Radsatz D2 führt zu einer beachtlichen Reduktion des abgestrahlten Luftschalls von ca. 23 dB(A) im Vergleich zum konventionellen Stahl-Radsatz. Allerdings, berücksichtigt man die Beiträge von Schiene und Schwelle zum gesamten Immissionspegel

während einer Vorbeifahrt, reduziert sich der Effekt des FRP D2 Radsatzes auf eine Minderung von ca. 3 dB(A).

Da die Unsicherheit des numerischen Modells nicht quantifiziert werden kann – es fehlen Validierungsdaten – wurden beim Erstellen der Modellierungskette durchwegs konservative Annahmen getroffen. Beispielsweise wurde bei der Generierung des Verschiebungsspektrums am Rad/Schiene Kontaktpunkt die Reduktion der ungefederten Masse nicht kompensiert. Auch wurden die Materialdämpfungseigenschaften unverändert von Stahl auf den Faserverbund-Werkstoff übertragen. Insgesamt darf also davon ausgegangen werden, dass die prognostizierte Reduktion des Vorbeifahrtspegels von ca. 3 dB(A) als eher konservativ zu betrachten ist.

Task 1-5: Kosten und Task 1-6: Planung Phase 2

Im vorliegenden Bericht wird die Abschätzung der Kosten für die Herstellung und den Unterhalts des vorgeschlagenen CFK-Radsatzes beschrieben. Die Kosten über die ganze Lebensdauer für 1'500'000 km wurden aus den Herstellungs- und Unterhaltskosten und allfälligen Kostenreduktionen wegen des reduzierten Lärms und tieferem Gewicht abgeschätzt. Der Faktor der totalen Kosten des neuartigen CFK-Radsatzes im Verhältnis zum konventionellen Stahl Radsatzes (beide mit Bremsscheiben) beträgt ***4.17*** (i.e. 18'420/4'420).

Für die Einführung von neuen Materialien und Verbindungselementen müssen viele Bauteilversuche und auch Fahrversuche durchgeführt werden, siehe dazu die detaillierten Angaben im Teilbericht 1-1. Es muss beachtet werden, dass Fahrversuche nur in Zusammenarbeit mit einer Firma, wie z.B. SBB Cargo, möglich sind, da nur diese Zugang zu den nötigen Schienenfahrzeuge haben und zudem auch solche Versuche beim BAV und den zuständigen Behörden beantragen können.

Die Machbarkeitsstudie ergab, dass die Kriterien zum Starten der Phase 2 (wie im Projektantrag definiert) erfüllt sind. Davon ausgenommen ist der Kostenfaktor der relativ hoch ist und vom BAFU beurteilt werden muss.

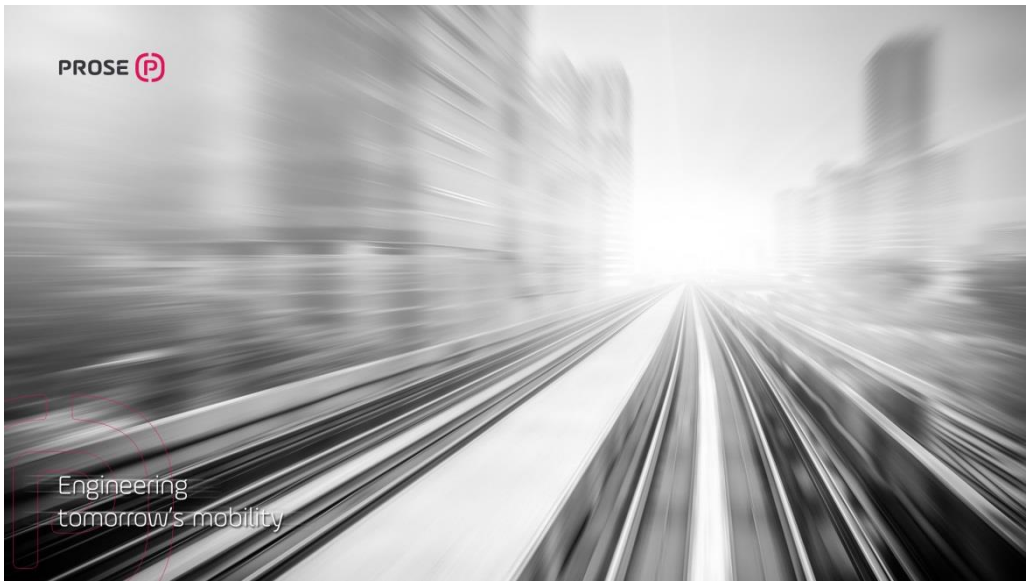
Für Phase 2 des Projektes schlagen wir zwei mögliche Szenarios vor; **Plan A** (wie im ursprünglichen Projektantrag vorgesehen) und **Plan B** (eine neue Idee einer Machbarkeitsstudie eines selbstlenkenden Drehgestells aus faserverstärktem Kunststoff). Im vorliegenden Bericht wird nur eine kurze Beschreibung der beiden Szenarios gegeben. Aufgrund der Rückmeldung des BAFU kann eine detaillierte Beschreibung in Form eines Projektantrages zur möglichen Weiterführung des Projektes mit Plan A und/oder Plan B ausgearbeitet werden.

PROSE

Engineering
tomorrow's
mobility

Abschlussbericht

Bericht



17.133.00 – EMPA Eidg.Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf
BAFU FRP wheelset

Erstellt	Geprüft	Freigegeben
Dr. R. Paradies	P. Hüberli	C. Deiss

Dokumentnummer	Ausgabedatum	Revision	Revisionsdatum	Status
04-03-01808	22.08.2018	0.00	22.08.2018	Released

PROSE AG
Zürcherstrasse 41
8400 Winterthur
Schweiz

www.prose.one

Tel +41 52 262 74 00
Fax +41 52 262 74 01
info.winterthur@prose.one

Verteiler

Firma/Abteilung/Name	Bemerkungen
BAFU Empa Carbo-Link AG PROSE AG Archiv	

Revisionsindex

	Ersteller	Prüfer	Freigebender	Datum
04-03-01808	R. Paradies	P. Hüberli	C. Deiss	22.08.2018
Rev.				
Rev.				
Rev.				
Rev.				
Rev.				

Modifikationen

Revision	Beschreibung

Dieses Dokument gibt Kenntnis von Gegenständen, an denen die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz), oder eines ihrer Tochterunternehmen Eigentumsrechte hat. Weder Erhalt noch Besitz dieses Dokuments verleihen oder übertragen das Recht, seinen Inhalt als Ganzes, einen Teil davon, eine darin enthaltene Information, oder irgendwelche Gegenstände oder Vorrichtungen zu kopieren oder bekannt zu machen oder irgendwelche Methoden oder Prozesse anzuwenden, ausser nach schriftlicher Genehmigung durch die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz) oder schriftlicher Vereinbarung mit dieser Firma.

Dieses Schreiben wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

1 Allgemeines 4
2 Untersuchungsergebnisse bis Mitte Januar 2018 4
3 Untersuchungsergebnisse von Mitte Januar 2018 bis Projektende 4
3.1 Aktualisierung der Normenliste, Radsatzspezifikation und EN 13103-Berechnung 4
3.2 Nachweisplanung zum Betrieb eines Prototypens des Verbundradsatzes 5
3.3 Wärmeentwicklung im Bereich der Radsatzwellenbremsscheibe 5
3.4 Task 1- 5: "Cost estimation for manufacturing and maintenance of a FRP wheelset configuration" 5
3.5 Task 1-6: "Clarification of necessary verifications and studies on a selected FRP wheelset for Phase 2" 5
4 Unterschiede zum Zeitplan und diesbezügliche Massnahmen 5
5 Ausstehende Arbeitspunkte 6
6 Zusammenfassung der Untersuchung bis Mitte Januar 2018 [8] 6
6.1 Summary of the investigation until mid-January 2018 [8] 6
7 Zusammenfassung der Untersuchung ab Mitte Januar 2018 6
7.1 Summary of the investigation since mid-January 2018 6
8 Literatur 6

1 Allgemeines

Gegenstand dieses Abschlussberichtes sind die Arbeiten zum Projekt "Neuartige Radsätze zur Lärm- und Gewichtsreduktion bei Schienengüterwagen aus faserverstärktem Kunststoff (Towards noise and weight reduction by application of FRP wheelsets for freight wagons)". Aufbauend auf den Zwischenbericht zum gleichnamigen Projekt [8] wird dabei besonders auf die Tätigkeiten im Zeitraum von Mitte Januar 2018 bis zum Projektende eingegangen.

Die Aufgaben der PROSE in dieser Phase der Machbarkeitsstudie sind gemäss dem eingereichten Antrag wie folgt definiert:

Task 1-1: Definition and control of the requirements from standards, operation, and maintenance
All the requirements which need to be satisfied that a wheelset can be used in real traffic will be gathered and documented by PROSE. This does include the preparation of a possible homologation approach for such a component and a patent research for providing the current status in this field of application. With its proven expertise PROSE will accompany the structural assessment and noise investigation as well as the compatibility of the design with its possible integration to freight car bogies elaborated in Tasks 1-2 to 1-4 and support with its knowledge the other project partners. PROSE will elaborate at least a wheelset specification and patent research report in Task 1.

Task 1- 5: Cost estimation for manufacturing and maintenance of a FRP wheelset configuration
Cost estimation for the manufacturing and maintenance of the proposed FRP wheelset configurations is presented in this section.

Task 1-6: Clarification of necessary verifications and studies on a selected FRP wheelset for Phase 2
The contribution of PROSE is to be extended with supervision of the complete design tasks as railway assessor regarding structure and noise. Furthermore, PROSE will provide a possible homologation approach.

2 Untersuchungsergebnisse bis Mitte Januar 2018

Die Untersuchungsergebnisse bis Mitte Januar 2018 wurden bereits im Zwischenbericht [8] dokumentiert und sind in diesem Bericht nur im Rahmen der Zusammenfassung aufgeführt.

3 Untersuchungsergebnisse von Mitte Januar 2018 bis Projektende

Ab Mitte Januar 2018 wurden gemäss Projektplan neben der weiteren Betreuung der Projektpartner Empa und Carbo-Link AG hinsichtlich eisenbahn- und radsatzspezifischer Fragestellungen insbesondere die Themen thermische Berechnung der Wärmeentwicklung an einer Wellenbremsscheibe und mögliche Zulassungswege sowie detailliertere Anforderungen an einen FRP-Radsatz bearbeitet. In diesem Zusammenhang wurden auf Grundlage der neueren Ergebnisse bereits erstellte Unterlagen überarbeitet bzw. aktualisiert. Die einzelnen Ergebnisse werden in eigenständigen Berichten dokumentiert und daher in den folgenden Kapiteln nur kurz beschrieben.

3.1 Aktualisierung der Normenliste, Radsatzspezifikation und EN 13103-Berechnung

Die bereits in der ersten Projekthälfte eingereichten Unterlagen wurden auf Grundlage aktuellerer Informationen angepasst bzw. ergänzt. Die Anpassungen in diesen Unterlagen [2], [3] und [4] sind im jeweiligen Dokument in der Historienliste ausgewiesen. Diese Anpassungen haben keine negativen Einflüsse auf die bisher dokumentierte Untersuchung.

3.2 Nachweisplanung zum Betrieb eines Prototypens des Verbundradsatzes

Auf Grundlage des Informationsstandes zum Ende der Machbarkeitsstudie hat sich die Notwendigkeit ergeben, gewisse Informationen wie z.B. die Wärmeentwicklung am Ort der Wellenbremsscheibe aus Betriebsmessungen zu ermitteln. Zudem können hochdynamische Effekte wie z.B. Radsatztorsionsschwingungen nur auf der Strecke ermittelt bzw. überprüft werden. Dabei ist nur für letztere Messung ein Prototyp des FRP-Radsatzes erforderlich, während die anderen Informationen wie Temperatur und/oder mechanische Lasten auch aus Messungen an anderen, vergleichbaren Güterwagenradsätzen ermittelt und auf den FRP-Radsatz übertragen werden können. Im Fall der Realisierung eines FRP-Radsatzes werden mit sehr grosser Wahrscheinlichkeit im Rahmen der Betriebserprobung alle in dem genannten Dokument [5] aufgeführten Betriebsmessungen gefordert. In Ergänzung zu diesen Betriebsmessungen, welche auf Grundlage der aktualisierten Radsatzspezifikation [2] definiert sind, sind in [5] ebenfalls die Nachweise aufgeführt, welche voraussichtlich zur Bewilligung eines Streckentests einzureichenden sind.

3.3 Wärmeentwicklung im Bereich der Radsatzwellenbremsscheibe

Diese Untersuchung zeigt, dass die in der Nähe der Wellenbremsscheibe auftretenden Temperaturen infolge normativer Beharrungsbremsung lokal weit über den zulässigen Temperaturwert des Faserverbundwerkstoffes liegen, während diese an der Schnittstelle zum Rad unterhalb der kritischen Temperaturen für den Faserverbundwerkstoff sind. Aus diesem Grund ist im Minimum eine lokale Isolation des Faserverbundkörpers erforderlich, mit der die Temperaturen im Faserverbundkörper auf die zulässigen Anwendungstemperaturen zu begrenzen sind. Aufgrund der klaren Tendenzen der Untersuchungsergebnisse werden zudem Alternativen bzgl. Anwendung und Konstruktion der Faserverbundwelle gegeben, mit der diese Situation ggf. entschärft werden könnte. Sowohl die Machbarkeit der Isolation als auch der anderen Ansätze ist noch zu erbringen.

3.4 Task 1- 5: "Cost estimation for manufacturing and maintenance of a FRP wheelset configuration"

Die Beiträge zur vergleichenden Kostenabklärung bei der Wartung eines FRP-Radsatzes wurden in Form von einer Präsentation [12] bzw. in EXCEL [13] den Projektpartner zur Verfügung gestellt sowie in den gemeinsam erstellten Bericht direkt integriert.

3.5 Task 1-6: "Clarification of necessary verifications and studies on a selected FRP wheelset for Phase 2"

Eine detaillierte Auflistung der erforderlichen Untersuchungen und Unterlagen ist in den Kapiteln der aktualisierten "Lieferspezifikation Verbundradsatz" [2] dokumentiert. Die Beiträge wurden zudem in Form von Präsentationen [10] bis [12] den Projektpartner zur Verfügung gestellt sowie in den gemeinsam erstellten Bericht direkt integriert.

4 Unterschiede zum Zeitplan und diesbezügliche Massnahmen

Gegenüber dem ursprünglichen Projektantrag hat sich die Notwendigkeit ergeben den Temperatureinfluss am Ort der Wellenbremsscheibe auf den Faserverbundkörper genauer zu untersuchen ist. Diese so nicht geplanten Arbeiten wurden zu Lasten anderer Untersuchungspunkte vorwiegend in der zweiten Projekthälfte durchgeführt, konnten aber aufgrund ungenauer bzw. fehlender Angaben nicht abschliessend fertiggestellt werden.

5 Ausstehende Arbeitspunkte

Das aktuelle Design ist grundsätzlich um eine thermische Isolation gegenüber der Wellenbremsscheibe zu ergänzen und ein entsprechender Nachweis beizustellen.
Aufgrund der erforderlichen Priorisierung innerhalb einer Machbarkeitsstufe entspricht die Nachweisführung derzeit verständlicherweise nicht den Kriterien, welche im Fall einer Zulassung beizustellen sind. So wurde z.B. der metallische Radreifen aus oben genannten Gründen nicht untersucht. Für den Fall, dass in weiteren Projektphasen ein Probebetrieb anstehen sollte, ist davon auszugehen, dass derartige zulassungsfähige Nachweise einzureichen sind.

6 Zusammenfassung der Untersuchung bis Mitte Januar 2018 [8]

Die Arbeiten seitens PROSE bis Mitte Januar 2018 entsprechen den im Projektplan geplanten Tätigkeiten. Dies sind die Betreuung der Projektpartner hinsichtlich eisenbahn- und radsatzspezifischer Fragestellungen und die Durchführung einer Patentrecherche zu Faserverbundradsätzen. Zudem wurden auf Grundlage der zum Zeitpunkt der Untersuchung zur Verfügung stehenden Informationen ein Teil der für eine mögliche Zulassung erforderlichen Unterlagen soweit als möglich vorbereitet.

6.1 Summary of the investigation until mid-January 2018 [8]

The work of PROSE until mid-January 2018 corresponds to the activities planned in the project plan. These are the support of the project partners with regard to railway and wheelset-specific questions and the elaboration of a patent search on fiber composite wheelsets. In addition, part of the documents required for a possible authorization were prepared as far as possible based on the of the information available at the time of investigation.

7 Zusammenfassung der Untersuchung ab Mitte Januar 2018

Die Arbeiten seitens PROSE seit Mitte Januar 2018 entsprechen weitgehend den im Projektplan geplanten Tätigkeiten. Dies ist einerseits die Betreuung der Projektpartner hinsichtlich eisenbahn- und radsatzspezifischer Fragestellungen und die Unterstützung in zulassungsrelevanten Fragestellungen sowie andererseits die Ausarbeitung des Zulassungskonzeptes für einen Prototypen. Zudem wurden auf Grundlage der aktualisierten Informationen die bereits erstellten Unterlagen angepasst. Darüber hinaus wurden diverse thermischen Untersuchungen durchgeführt.

7.1 Summary of the investigation since mid-January 2018

The work of PROSE since mid-January 2018 largely corresponds to the activities planned in the project plan. On the one hand it includes the support of the project partners with regard to railway and wheel-set specific questions and on the other hand includes the support in approval-relevant questions as well as the elaboration of the approval concept for a prototype. In addition, based on the updated information, the documents already prepared have been adapted. Moreover, various thermal analyses were carried out.

8 Literatur

[1] *Patentrecherche CFK Radsätze, 04-03-01687, PROSE AG, F. Denisow, 15.01.2018*

[2] *Lieferspezifikation Verbundradsatz, 04-02-00517 Rev. 1.00, PROSE AG, R. Paradies, 14.08.2018*

[3] *Radsatzwellendimensionierung nach EN 13103, 04-12-01269 Rev. 1.00, PROSE AG, R. Paradies, 14.08.2018*

[4] *Normenliste Verbundradsatz, 04-02-00529 Rev. 1.00, PROSE AG, R. Paradies, 13.08.2018*

[5] *Nachweisplanung zum Betrieb eines Prototypens des Verbundradsatzes, 04-02-00500, PROSE AG, R. Paradies, 15.08.2018*

[6] *Simulation der Wärmeentwicklung an der Wellenbremsscheibe beim FRP-Verbundradsatz, 04-03-01719, PROSE AG, R. Paradies, 22.08.2018*

[7] *(Zeichnung) Radsatz kpl für Design 2 FRP-Radsatz, FRPRS_2_RSWelle -A, Carbo-Link AG, T. Good, 19.02.2018*

[8] *Zwischenbericht zum BAFU-Forschungsprojekt, Vertragsnummer 1337000317 - Neuartige Radsätze zur Lärm- und Gewichtsreduktion bei Schienengüterwagen aus faserverstärktem Kunststoff Zwischenbericht, 25. Januar 2018*

[9] *(Präsentation) Überlegungen zu einem Faserverbundradsatz aus Sicht der Anwendung/Zulassung, 04-05-02381, PROSE AG, R. Paradies, präsentiert am 10.10.2017*

[10] *(Präsentation) Intermediate report: Requirements, specifications, patent research, possible homologation approach for a wheelset, 04-05-02472, PROSE AG, R. Paradies, präsentiert am 01.02.2018*

[11] *(Präsentation) Weitergehende Überlegungen zu einem Faserverbundradsatz aus Sicht der Anwendung/Zulassung, 04-05-02561, PROSE AG, R. Paradies, präsentiert am 05.06.2018*

[12] *(Präsentation) Kostensituation bei einem Faserverbundradsatz im Vergleich zu einem Standradradsatz, 04-05-02580 PROSE AG, R. Paradies, präsentiert am 02.07.2018*

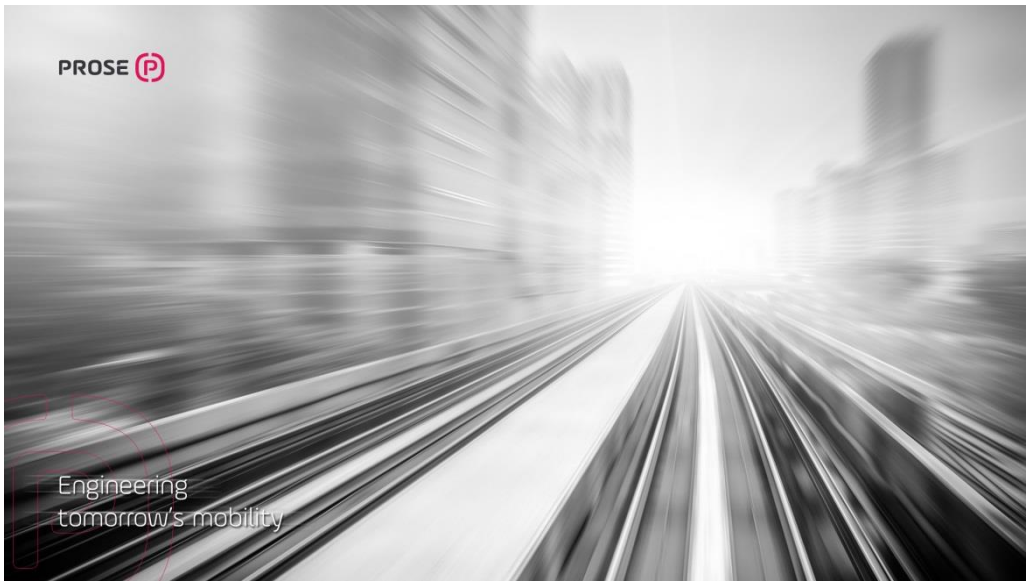
[13] *(EXCEL-Arbeitsblatt) Unterhaltkostenvergleich, 04-12-01433-E00_update, PROSE AG, R. Paradies, übermittelt an Projektpartner am 30.07.2018*

PROSE

Engineering
tomorrow's
mobility

Lieferspezifikation Verbundradsatz

Spezifikation



17.133.00 – EMPA Eidg.Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf
BAFU FRP wheelset

Erstellt	Geprüft	Freigegeben
Dr. R. Paradies	P. Hüberli	C. Deiss

Dokumentnummer	Ausgabedatum	Revision	Revisionsdatum	Status
04-02-00517	19.01.2018	1.00	14.08.2018	Released

PROSE AG
Zürcherstrasse 41
8400 Winterthur
Schweiz

www.prose.one

Tel +41 52 262 74 00
Fax +41 52 262 74 01
info.winterthur@prose.one

Verteiler

Firma/Abteilung/Name	Bemerkungen
BAFU Empa Carbo-Link AG PROSE Archiv	

Revisionsindex

	Ersteller	Prüfer	Freigebender	Datum
04-02-00517	R. Paradies	P. Hüberli	C. Deiss	19.01.2018
Rev. 1.00	R. Paradies	P. Hüberli	C. Deiss	14.08.2018
Rev.				
Rev.				
Rev.				
Rev.				

Modifikationen

Revision	Beschreibung
1.00	Kap. 2.3 Tabelle 2-5 und Tabelle 2-6 konkretisiert bzw. geändert, Kap. 3.3 (Tabelle 3-2) und 3.7.1, 3.7.2 und 3.7.3 bzgl. Lastwechselzahl konkretisiert, weitere Referenz, Aktualisierung von Anhang A, kleinere redaktionelle Anpassungen

Dieses Dokument gibt Kenntnis von Gegenständen, an denen die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz), oder eines ihrer Tochterunternehmen Eigentumsrechte hat. Weder Erhalt noch Besitz dieses Dokuments verleihen oder übertragen das Recht, seinen Inhalt als Ganzes, einen Teil davon, eine darin enthaltene Information, oder irgendwelche Gegenstände oder Vorrichtungen zu kopieren oder bekannt zu machen oder irgendwelche Methoden oder Prozesse anzuwenden, ausser nach schriftlicher Genehmigung durch die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz) oder schriftlicher Vereinbarung mit dieser Firma.

Dieses Schreiben wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig

1 Allgemeines ... 5
1.1 Beschreibung ... 5
1.2 Verwendete Abkürzungen ... 5
1.3 Anzuwendende Unterlagen ... 6
1.4 Funktions- und Bauteilbeschreibung ... 6
2 Anforderungen an den Radsatz ... 6
2.1 Allgemein ... 6
2.2 Schnittstellen des Radsatzes ... 7
2.3 Technische Anforderungen an den Radsatz ... 8
2.4 Allgemeine Anforderungen an die Radsatzkomponenten ... 9
2.4.1 Radsatzwelle ... 9
2.4.2 Rad ... 10
2.4.3 Verbindung zwischen Radscheibe und Radreifen ... 12
2.5 Anforderungen auf der Radsatzebene ... 12
2.5.1 Maximales Gewicht des Radsatzes ... 12
2.5.2 Abmessungen und Toleranzen ... 12
2.5.3 Oberflächenschutz ... 12
2.5.4 Kennzeichnung des Radsatzes ... 13
2.5.5 Wellen – Nabenverbindung zwischen Rad und Radsatzwelle ... 13
2.5.6 Elektrische Leitfähigkeit ... 13
2.5.7 Unwucht ... 13
2.5.8 Thermische Beanspruchung ... 13
2.5.9 Akustische Eigenschaften ... 13
2.5.10 Beständigkeit gegen Umgebungsbedingungen ... 14
2.5.11 Brandschutzanforderungen ... 14
2.5.12 Zuverlässigkeit, Wartbarkeit und Sicherheit ... 14
3 Technischer Nachweis ... 14
3.1 Allgemein ... 14
3.2 Festigkeitsnachweis zur Radsatzwelle ... 14
3.3 Festigkeitsnachweis zum Rad ... 15
3.4 Verbindung zwischen Radscheibe und Radreifen ... 16
3.5 Verbindung zwischen Rad und Radsatzwelle ... 16
3.6 Verbindung zwischen Bremsscheibe und Rad bzw. Radsatzwelle ... 16
3.7 Experimentelle Nachweise ... 16
3.7.1 Radsatzwelle ... 17
3.7.2 Rad ... 17
3.7.3 Dauerfestigkeit des gefügten Radsatzes ... 17
4 Erstmusterprüfungen ... 17
5 Typentests ... 17
6 Qualitätsanforderung ... 18
6.1 Warenausgangsprüfungen ... 18
6.2 Kennzeichnung ... 18
6.3 Qualitätsdokumente ... 18
7 Dokumentation ... 18

8 Referenzen 19
8.1 Administrative Unterlagen und übergeordnete Dokumente 19
8.2 Technische Unterlagen 21

Anhang

A Technischer Anhang 22
A.1 Zeichnung des Radsatzes 22

1 Allgemeines

Aufgrund des hohen Neuigkeitsgrades eines Faserverbundradsatzes bei Bahnanwendungen sind keine diesbezüglichen Lieferspezifikationen bekannt. Daher ist das vorrangige Ziel dieses Dokuments die Grundlage für mögliche zukünftige Lieferspezifikationen zu bilden.

1.1 Beschreibung

Gegenstand dieser Radsatzspezifikation sind Laufradsätze aus Faserverbundmaterialien für den Einsatz in zweiachsigen Güterwagendrehgestellen mit einer nominellen Radsatzlast von 25 t und einer Spurweite von 1435 mm (Normalspurweite), wie dieser in [27] konzeptionell dargestellt ist.

Die in diesem Dokument spezifizierten Radsätze sollen in Laufdrehgestellen, die mit Wellenbremsscheiben gemäss den Vereinheitlichungsbestrebungen in [26] versehen sind, eingesetzt werden können[1].

Diese Spezifikation ist so aufgebaut, dass sie sowohl für Hersteller von Rädern und Radsatzwellen, wie auch von Herstellern von Radsätzen verwendet werden kann. Dabei ist zu beachten, dass jeweils die Einheit Radsatz bestehend aus den Komponenten: Radsatzwelle, Räder und Bremsscheiben zu ersetzen ist. Die Schnittstellen zum Radsatzlager und den Bremsscheiben sind bei einem Wechsel auf einen Faserverbundradsatz beizubehalten.

Die im Radsatz verwendeten Bremsscheiben werden als Standardkomponenten betrachtet. Sie sind daher nicht Gegenstand dieser Spezifikation.

1.2 Verwendete Abkürzungen

Tabelle 1-1 listet die in dieser Spezifikation verwendeten Abkürzungen und deren Bedeutung auf.

Abkürzung	Bedeutung
AB-EBV	Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung
BAV	Bundesamt für Verkehr
DG	Drehgestell
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EN	Europäische Norm
FAI	Erstmusterprüfung = Fist article inspection
FRP	Faserverbundwerkstoff = Fibre reinforced plastic
FRP wheelset	Faserverbundradsatz
GL	Germanischer Lloyd
RBS	Radbremsscheibe
RS	Radsatz
RSL	Radsatzlager
RSW	Radsatzwelle
SN	Schweizer Norm
SOK	Schienenoberkante
tbc	to be confirmed (= zu bestätigen)
tbd	to be defined (= zu definieren)
UIC	International Union of Railway (Internationaler Eisenbahnverband)
WBS	Wellenbremsscheibe
ZfP	zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

Tabelle 1-1 **Verwendete Abkürzungen**

[1] Der Radsatz kann ggf. durch vergleichsweise geringfügige Anpassungen ebenfalls für Radsätze mit Radbremsscheiben verwendet werden. Aufgrund grundlegender Unterschiede (u.a. in der thermischen Belastung) ist dieser Radsatz dagegen weder für klotzgebremste Räder noch für einachsige Anwendungen geeignet.

1.3 Anzuwendende Unterlagen

Im Kapitel 8 *Referenzen* (S. 19ff.) sind die in dieser Spezifikation herangezogenen Quellen zusammengefasst. Generell sind die allgemeinen Normen und die Fachnormen für Schienenfahrzeuge, also die aktuell gültigen technischen Regeln der UIC, SN, EN, und der DIN zu beachten. Es ist generell jeweils die neueste gültige Ausgabe zu verwenden. Dabei ist zu unterscheiden, ob das jeweilige Dokument komplett auf das Teilsystem anzuwenden ist, in einzelnen Punkten angewendet wird oder zur Information dient.

Der Radsatz gehört gemäss dem Bundesamt für Verkehr (BAV) zu den Zulassungsgegenständen bei einer Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen [1]. Aus diesem Grund sind die Schweizer Normen und Ausführungsbestimmungen (AB-EBV [2]) den weiteren Normen übergeordnet.

1.4 Funktions- und Bauteilbeschreibung

Der Radsatz ist für zukünftige Güterwagenlaufdrehgestelle mit Bremsscheiben vorgesehen. Es werden grundsätzlich nur Radsätze mit Bremsscheiben betrachtet. Dabei können grundsätzlich sowohl auf der Welle befestigte Bremsscheiben (WBS) als auch am Rad befestigte Bremsscheiben (RBS) eingesetzt werden, sofern sichergestellt ist, dass dort die infolge Bremsung auftretende Erwärmung nicht die mechanischen Eigenschaften des Verbundradsatzes (FRP-wheelset) negativ beeinflussen.

2 Anforderungen an den Radsatz

2.1 Allgemein

Der Radsatz muss im Anlieferungszustand in allen Punkten den vom Auftraggeber bzw. vom Kunden freigegebenen Fertigungszeichnungen bzw. Angebotszeichnungen entsprechen. Jede Änderung bzw. Abweichung von den Vorgaben muss an den Auftraggeber kommuniziert werden. Dabei sind die Ergänzungen und Präzisierungen bezüglich den zu verwendenden Normen und technischen Lieferbedingungen einzuhalten. Folgende Tabelle 2-1 fasst die wesentlichen Anforderungen an den Faserverbundradsatz zusammen. In den folgenden Kapiteln werden die Anforderungen genauer beschrieben und um weitere Punkte ergänzt.

1	Die Räder sind Verbundräder mit vergütetem Radkranz gemäss EN 13262 [9]
2	Das Radprofil (S1002) soll in Übereinstimmung mit EN 13715 [11] sein
3	Die Räder sind gemäss EN 13262 [9] ausgewuchtet.
4	Der Fertigungsprozess der Räder ist so zu wählen und zu kontrollieren, dass die Entstehung von Unrundheiten als Folge von Materialinhomogenitäten oder Montageeinflüssen ausgeschlossen ist.
5	Radsatzwelle und die Räder sind so auszulegen, dass sie der EN 13103 [6] und EN 13979-1 [10] inklusive der quasi-statischen Anforderung aus der UIC 510-5 [14] genügen.
6	Die Auswuchtung der Radsätze muss EN 13260 [7] genügen
7	Sofern es sich bei den Rädern und/oder Radsatzwelle um eine Neukonstruktion handelt, sind Dauerfestigkeitsprüfungen in Übereinstimmung mit EN 13979-1 [10] und/oder EN 13261 [8] durchzuführen.

Tabelle 2-1 **Kurzzusammenfassung der Merkmale/Anforderungen an den Faserverbundradsatz**

2.2 Schnittstellen des Radsatzes

Der Radsatz soll in Güterwagendrehgestellen eingesetzt werden können, die entweder mit zwei Wellenbremsscheiben (oder ggf. zwei Radbremsscheiben) je Achse gebremst werden.

Für die Gestaltung der Schnittstelle zwischen der Radsatzwelle und dem Radsatzlager ist die Geometrie der Radsatzwelle gemäss Abbildung 2-1 zu berücksichtigen. Der dort abgebildete Bereich Y (siehe Abbildung 2-2) entspricht dabei dem Bild 8 der EN 13103 [6].

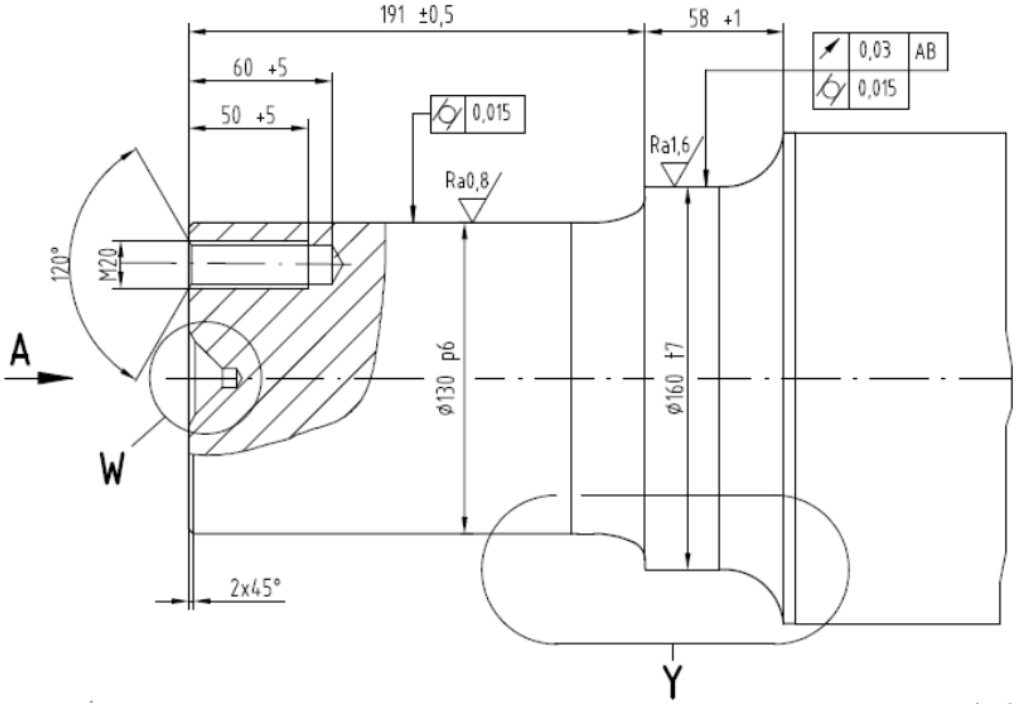


Abbildung 2-1 **Schnittstelle des Radsatzes zum Radsatzlager [26]**

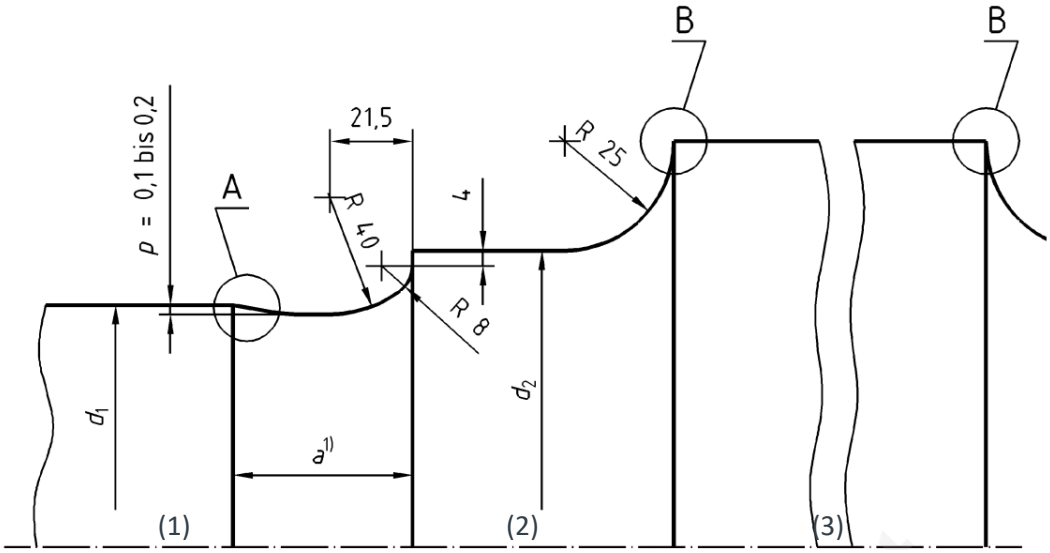


Abbildung 2-2 **Übergangsform zwischen Radsatzwellenschenkel (1) und Dichtringsitz (2) sowie Dichtringsitz und Radsitz (3) [6]**

Der Hersteller ist für die Realisierung und Dimensionierung der in Tabelle 2-2 aufgeführten Schnittstellen verantwortlich.

Nummer	Verbindung/Schnittstelle
1	Verbindung zwischen Radreifen und Rad
2	Verbindung zwischen Rad und Radsatzwelle
4	Verbindung zwischen Radsatzwellen und Wellenbremsscheibe

Tabelle 2-2 **Liste der Schnittstellen, die in der Verantwortung des Radsatzherstellers sind**

2.3 Technische Anforderungen an den Radsatz

Die folgende Tabelle 2-3 enthält die technischen Daten des Radsatzes, während die geometrischen Daten des Radsatzes in Tabelle 2-4 zusammengefasst sind. Die zu ertragende Laufleistung beträgt 1'500'000km.

Beschreibung	Mass
Radsatzlast	25000 kg
Schwerpunkthöhe brutto (SOK)	2600 mm
Betriebliche Höchstgeschwindigkeit	120* km/h
Maximale Radsatzmasse	1000 kg (tbc)

Tabelle 2-3 **Relevante Massen und Masse zur Radsatzauslegung**
(* Für die Zulassung ist eine um 10% höhere Geschwindigkeit nachzuweisen.)

Beschreibung	Abmessung [mm]
Raddurchmesser neu / abgenutzt	920 / 840
Spurweite	1435
Radkranzbreite	135
Radrückenabstand (unbelastet)	1360
Abstand zwischen den Messkreisebenen	1500
Radsatzlagermittenabstand	2000
Abstand der Primärfedern	2000 (tbc)
Mittenabstand der Bremsscheiben	900
Breite der Bremsscheibe im Neuzustand	110
Länge der Radsatzwelle	2200 (tbc)
Achsdurchmesser am Wälzlager (Lagersitz-Ø)	130
Achsdurchmesser am Dichtringsitz	160

Tabelle 2-4 **Geometrische Daten des Radsatzes**

Die folgende Tabelle 2-5 zeigt die Lasten durch die am Radsatz befestigten Wellen- bzw. Radbremsscheiben. Die Verzögerung infolge des Bremsmomentes wird gleichmässig auf beide Bremsen verteilt. Es wird empfohlen, im Rahmen einer Vordimensionierung der Radsatzwelle mit dem (konservativen) Bremsmoment von 25 kNm auszulegen. Dieser Wert ist in der Nachweisführung durch genauere Angaben anzupassen. Der Nachweis der Radsatzwelle erfolgt gemäss EN 13103 [6] (siehe Kapitel 3.2 Festigkeitsnachweis zur Radsatzwelle S. 14).

Beschreibung	Zeichen	Wert	Anmerkung
Anzahl der Bremsscheiben	n_{BS} [-]	2	
Abstand der Wellenbremsscheiben zueinander	y_{BS} [mm]	900	
Reibwert zwischen Bremsscheibe und Bremsbelag	μ [-]	≥ 0.35[2]	[6]
Wirksamer Bremsdurchmesser	$ø_{BR}$ [mm]	460	tbc
Masse einer Bremsscheibe	M_{BS} [kg]	130	tbc
Max. Anpresskraft der Bremszange	F_f [kN]		tbd

Tabelle 2-5 **Lasten durch die Bremsscheiben**

Das Bremsvermögen des Radsatzes soll in der Summe den Vorgaben der TSI-Wag Kap. 4.2.4.3.3 resp. 6.2.2.6 [4] gemäss folgender Tabelle 2-6 entsprechen. Diese Anforderung ist je Rad definiert. Zusätzliche nationale Anforderungen, beispielsweise [1] - [3], und Anforderungen seitens des Betreibers sind ebenfalls zu berücksichtigen. Letztere beinhalten in der Regel eine Stoppbremsung im Anschluss an die Beharrungsbremsung.

Angabe	Wert
Raddurchmesser	920 – 840 mm
Standardleistungswert	45 kW
Betätigungsdauer	34 min
Betriebsgeschwindigkeit	70 km/h

Tabelle 2-6 **Bedingungen für die thermomechanische Baumusterprüfung für Räder eines gebremsten Radsatzes**

2.4 Allgemeine Anforderungen an die Radsatzkomponenten

2.4.1 Radsatzwelle

Die Radsatzwelle kann eine Bohrung für ZfP aufweisen. Es sind die allgemeinen Anforderungen bezüglich der Montage stirnseitig befestigter Komponenten zu gewährleisten.

Es sind im Bereich der Radsatzlager soweit konstruktiv möglich die in der EN 13103 [6] definierten geometrischen Anforderungen zur Vereinheitlichung von Radsatzwellen einzuhalten (siehe Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2, S. 7).

Der Oberflächenzustand der Radsatzwelle muss an den Schnittstellen des Radsatzes (Radsatzwellenende, Wellenschenkel und Dichtringsitz) den in EN 13261 [8] Tabelle 7 - Oberflächenzustände definierten Ansprüchen genügen.

Die Form- und Masstoleranzen der Radsatzwelle müssen an den Schnittstellen des Radsatzes (Radsatzwellenende, Wellenschenkel und Dichtringsitz) den in EN 13261 [8] Tabelle 9 - Formtoleranzen und Tabelle 10 - Maßtoleranzen genügen.

Die Radsatzwelle ist vor Korrosion und mechanischen Angriffen zu schützen. D.h. alle Stellen, auf denen sich im Betrieb keine Fügeteile befinden sind gegen Korrosion zu schützen. Die Radfläche ist davon ausgenommen. In Abhängigkeit der Schutzklasse ist ein Schutz gegen mechanische Angriffe, wie diese z.B. durch Stösse und Strahlmittel auftreten können, zu gewährleisten. Es wird eine Stossbeständigkeit der Schutzschicht gemäss Klasse 1 Tabelle 11 – Schutzschichtungen der EN 13261 gefordert. Die Beständigkeit dieser Schutzschicht u.a. bzgl. Stoss, Abrieb und zyklischen mechanischen Belastungen ist gemäss Anhang C der EN 13261 [8] zu erbringen[3]. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass die Anforderungen der EN 13261 [8] in Bezug auf stählerne Radsatzwellen gelten. Diese haben senkrecht zur Laminatebene von Faserverbundstrukturen wesentlich höhere Festigkeitseigenschaften. Daher ist durch geeig-

[2] Diese Wert der Norm bildet die untere Grenze und ist durch die Werte aus den Validierungsmessungen zu ersetzen. Letztere sind je nach Bremsbelag in der Grössenordnung von 0.4 – 0.45.
[3] Beschuss der Radsatzwelle mit einem gehärteten Stahlprojektil (Durchmesser: 32 mm, Masse: 60 g, Vickers-Härte: 400 und konischem Ende, d.h. Spitzenwinkel: 105°) bei einer Geschwindigkeit von 19,4 m/s (ca. 70km/h) und einer Raumtemperatur von -25 °C.

nete Nachweismethoden/Quellen die Anwendbarkeit dieser Nachweismethoden für Faserverbundradsatzwellen zu verifizieren. Kann die Beständigkeit nicht nachgewiesen werden, so ist ein geeigneter Schutz vorzusehen, der durch den Kunden akzeptiert werden muss.

Die Radsatzwelle ist gemäss den Angaben in EN 13261 [8] an einem Radsatzwellenende (nur in einer Hälfte) zu kennzeichnen.

Die Radsatzwelle muss gegenüber Strahlmitteln, die dem wiederholten Auftreffen von Kies und/oder Sand entsprechen, beständig sein. Die Beständigkeit ist analog zu Anhang D der EN 13261 [8] zu erbringen[4], wobei die Norm für stählerne RSW definiert ist, die im Allgemeinen über ein wesentlich besseres Impaktverhalten (keine interlaminare Delaminationen) als CFK-Strukturen verfügen. Kann die Beständigkeit nicht nachgewiesen werden, so ist ein geeigneter Schlagschutz vorzusehen. Dieser muss durch den Kunden akzeptiert werden.

2.4.2 Rad

Das Rad besteht aus einem Faserverbundkörper, einem umschliessenden, metallischen Radreifen und den zwischen diesen beiden Volumina angeordneten, geeigneten Verbindungselementen (siehe Abbildung 2-3). Der Radreifen soll aus ER7 oder ER8 in Übereinstimmung mit EN 13262 [9], EN 13979-1 [10] bestehen.

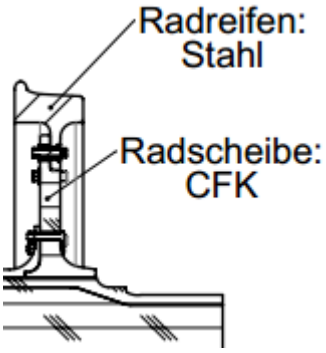


Abbildung 2-3 **Prinzipskizze eines auf einer Welle befestigten Faserverbundrades mit CFK-Radscheibe, metallischen Radreifen und dazwischen angeordneten Verbindungselementen**

Die generellen und geometrischen Randbedingungen zum Rad sind Tabelle 2-1 (S.6) und Tabelle 2-4 (S. 8) zu entnehmen.

Bei allen radspezifischen Normen sind die Vorgaben für Räder der Kategorie 2[5] gemäss EN 13262 [9] zu verwenden.

Die maximale statische Unwucht des fertig bearbeiteten Rads (d.h. Faserverbundteil mit montiertem metallischen Radreifen) im Lieferzustand muss ≤ 125 g . m (E3) sein[6].

Der Oberfläche der Räder müssen an den Schnitt- bzw. Funktionsstellen des Radsatzes (Lauffläche und Radkranz) folgende Anforderung erfüllen: Oberflächenrauhigkeit ≤ 12.5 µm im bearbeiteten Zustand[7]. Die Schnittstellen innerhalb des Rads sind in der Verantwortung des Herstellers. Es muss jedoch die Möglichkeit bestehen im Rahmen einer möglichen Instandhaltung beliebige unterschiedliche Radreifen und Radkörper miteinander zu einem einsatzfähigen Rad fügen zu können.

Die Masstoleranzen der Räder müssen am Radkranz den in EN 13262 [9] Tabelle 9 – Masstoleranzen definierten Werten genügen (siehe Tabelle 2-7). Die Masstoleranzen im Naben- und Stegbereich in

[4] Aus 5 m Höhe 1 kg Stahlmuttern HM6, Klasse 8.8, nach EN ISO 20898-2:1993 unter 45° auf die Welle auftreffen lassen und prozentuale Anteil der beschädigten Lackoberfläche bewerten.
[5] Bei Güterfahrzeugen mit einer Betriebsgeschwindigkeit unter 200 km/h werden generell Räder der Kategorie 2 gewählt.
[6] Tabelle 10 - Statische maximale Unwucht fertig bearbeiteter Räder, im Lieferzustand oder zusammenbaufertig in EN 13262 [9]
[7] Tabelle 8 - Oberflächenrauhigkeit der Räder (Ra) bei Lieferzustand für bearbeitete Lauffläche und Radkränze in EN 13262 [9]

Tabelle 9 der EN 13262 [9] gelten für zu fügende Räder und Wellen. Sie dienen in Abhängigkeit der Verbindungstechnik zwischen Rad und Radsatzwelle beim Faserverbundradsatz zur Orientierung. Der Hersteller muss grundsätzlich ein geeignetes Konzept der Masstoleranzen vom Rad zur Radsatzwelle und im Stegbereich unterbreiten, durch das die Kompatibilität von Radsatzwelle und Rad seines Faserverbundradsatzes gegeben ist, wie auch Qualitäts- und Fertigungskontrollen ermöglichen.

Toleranzen				
Bezeichnungen			Werte Kat. 2	
			unbearbeitet	bearbeitet
Rad-kranz	Außendurchmesser			0/+4 [b]
	Innendurchmesser (Laufkreisseite)			0 /–4
	Innendurchmesser (Messkreisseite)		0/–6	0/–4
	Radkranzbreite			± 1
	Laufflächenprofil[e]			≤ 0,5
	Rundheit der Lauffläche			≤ 0,2
	Seitenschlag			≤ 0,3
	Höhenschlag			≤ 0,2
	Außendurchmesser der Ablaufnut			0/+2

Tabelle 2-7 **Masstoleranzen für Räder der Kategorie 2 gemäss EN 13261 [8] Tabelle 9**

Die Räder sind mit Ausnahme der Oberflächen des Radkranzes mit Korrosionsschutz zu versehen.

Jedes Rad ist kennzeichnungspflichtig. Die Herstellerkennzeichen müssen im Fall der Radreifen die Forderungen der EN 13262 [9] Kapitel 3.10 abdecken (siehe Tabelle 2-8) und im Fall der Faserverbundanteile sinngemäss die gleichen Angaben enthalten (siehe Tabelle 2-9).

Herstellerzeichen
Schmelzennummer
Stahlgüte
Monat und zwei letzte Ziffern des Herstellungsjahres
Lage und Symbol der Unwucht
Seriennummer nach der Wärmebehandlung

Tabelle 2-8 **Herstellerkennzeichnung des metallischen Radreifens des Faserverbundrads nach EN 13262 [9] Kapitel 3.10**

Herstellerzeichen
Faserverbundinformation (Fasertyp, Matrix, Faservolumenanteil, tbd)
Informationen zum Verarbeitungsprozess (Tempern tbd)
Monat und zwei letzte Ziffern des Herstellungsjahres
Lage und Symbol der Unwucht
Seriennummer (nach Wärmebehandlung/Tempern)

Tabelle 2-9 **Herstellerkennzeichnung des Faserverbundanteils des Faserverbundrads in Anlehnung an EN 13262 [9] Kapitel 3.10**

Diese Herstellerkennzeichnung wird vorzugsweise auf den Übergang der Nabe mit dem Steg eingebracht (z.B. einlaminierte Stempelmarke). In Abstimmung mit dem Kunden kann dies auch an einer anderen gut einsehbaren Stelle erfolgen.

Die Nachweisführung wird in Kapitel 3.3 Festigkeitsnachweis zum Rad S. 15 beschrieben.

2.4.3 Verbindung zwischen Radscheibe und Radreifen

Die Verbindung zwischen Radscheibe und Radreifen muss in der Lage sein, alle im Rahmen der Nachweisführung des Rades zu bewertenden Lasten (siehe Kapitel 2.4.2 Rad, S. 10) dauerhaft zu übertragen. Sie ermöglicht generell die Kombination des Faserverbundradkörpers mit unterschiedlichen metallischen Radreifen und kann somit die Einsatzdauer des Faserverbundradsatzes erhöhen.

Die Verbindung ist so zu gestalten, dass ein Wechsel des Radreifens mit möglichst geringem Aufwand möglich ist.

Es sind sinngemäss alle Anforderungen an das Rad bzgl. Toleranzen und Oberflächenschutz auf die Verbindung zu übertragen.

Die Nachweisführung dieser Verbindung wird in Kapitel 3.4 Verbindung zwischen Radscheibe und Radreifen (S. 16) beschrieben.

2.5 Anforderungen auf der Radsatzebene

2.5.1 Maximales Gewicht des Radsatzes

In der folgenden Tabelle sind die Gewichte der Hauptkomponenten aufgelistet:

Bezeichnung	Gewicht [kg]
Radsatzwelle	tbd
Radscheibe	tbd
Radreifen	tbd
Bremsscheibe	tbd
Bremsscheibenbefestigung / Torsionsrohr	tbd
Verbindungselemente im Radsatz	tbd

Tabelle 2-10 **Gewichte der Einzelkomponenten**

Das Gewicht von 2 Rädern, einer Radsatzwelle, 2 Radsatzlagern und 2 Bremsscheiben mit allen erforderlichen Verbindungselementen darf in der Summe den Wert von 1000 kg tbc nicht überschreiten.

2.5.2 Abmessungen und Toleranzen

Die Abmessungen des Radsatzes müssen mit den Konstruktionszeichnungen übereinstimmen. Die Mass- und Formtoleranzen der aus den verschiedenen Komponenten zusammengesetzten Einheit muss die Anforderungen aus der EN 13260 [7] erfüllen. Die dabei angegebenen Werte beziehen sich auf Messungen am unbelasteten Radsatz. Es gelten die Angaben der Kategorie 2b. Aufgrund der Vielzahl der zu erfüllenden Toleranzen wird an dieser Stelle auf weitere Angaben verzichtet und auf das Kapitel 3.2.5 der EN 13260 [7] verwiesen. In Bezug auf die Tabelle 1 der TSI Loc&Pas [5] müssen das Spurmass und der Radrückenabstand die Grenzwerte aus Tabelle 2-11 einhalten. Der Nachweis ist für den unbelasteten und belasteten Radsatz zu erbringen.

Bezeichnung	Mindest- / Höchstwert [mm]
Spurmass	1410 / 1426
Radrückenabstand	1357 / 1363

Tabelle 2-11 **Betriebsgrenzmasse für die geometrischen Abmessungen der Radsätze**

2.5.3 Oberflächenschutz

Die Radsätze sollen einen hochwertigen Schutz gegen Korrosion aufweisen. In Bezug auf die Anforderungen an die einzelnen Komponenten in Kapitel 2.4.1 und 2.4.2 ist sicherzustellen, dass sich an der Schnittstelle zwischen Radsatzwelle und Rad keine Kontaktkorrosion ausbilden kann (siehe auch Kapitel 3.2.7 in der EN 13260 [7]. In diesem Zusammenhang wird auch auf die Forderung nach einem geeigne-

ten Oberflächenschutz auch bei den nichtmetallischen Komponenten (z.B. Faserverbundoberflächen und Verklebungsoberflächen) hingewiesen (siehe auch Kapitel 2.5.10 Beständigkeit gegen Umgebungsbedingungen, S. 14).

2.5.4 Kennzeichnung des Radsatzes

Neben der Kennzeichnung der einzelnen Radsatzkomponenten ist zudem der gefügte Radsatz am gleichen Ende des Wellenschenkels zu kennzeichnen, an dem sich bereits die Markierungen der Radsatzwellen nach EN 13261 [8] befinden (siehe Kapitel 3.2.8 der EN 13260).

2.5.5 Wellen – Nabenverbindung zwischen Rad und Radsatzwelle

Die Wellen - Nabenverbindung zwischen Rad und Radsatzwelle ist unter Berücksichtigung der Belastungen in EN 13260 [7] zu dimensionieren. Aus diesem Grund ist die Axialkraft gemäss Gleichung 2-1 in einem Test nachzuweisen.

$$F = 4.10^{-3} \cdot dm \qquad \text{Gleichung 2-1}$$

Der Wert der berechneten Kraft F hat die Einheit MN und ist abhängig vom mittleren Sitzdurchmesser dm und der Länge L des Passsitzes in Millimetern. Der Wert gilt für 0.8 $dm < L <$ 1.1 dm. Weitere Angaben können dem Kapitel 3.2.1 Gegendruck der zusammengefügten Teile der EN 13260 [7] entnommen werden.

2.5.6 Elektrische Leitfähigkeit

Der elektrische Widerstand zwischen den Radaufstandsflächen (bzw. zwischen den beiden Laufflächen gemessen) muss gemäss EN 13260 [7] < 0.01 Ω sein. Die Prüfspannung beträgt dabei zwischen 1.8 V und 2.0 V Gleichstrom.

2.5.7 Unwucht

Die maximale statische Unwucht des fertig bearbeiteten Radsatzes im Lieferzustand muss in der Messkreisebene ≤ 75 g . m betragen.

2.5.8 Thermische Beanspruchung

Der Verbundradsatz muss die im Rahmen einer mechanischen Bremsung eingeleiteten Kräfte schadlos ertragen können. Dies gilt ebenfalls unter Berücksichtigung der möglichen thermischen Beanspruchungen am Ort der Bremsscheiben. Der Radsatz als solches muss dabei die Belastungen infolge der Dauerbremsleistung gemäss Tabelle 2-5 und Tabelle 2-6 auf Seite 9 schadlos aufnehmen können. Die Nachweisführung muss dabei dem Nachweisweg gemäss Kapitel 6 "Bewertung des thermomechanischen Verhaltens" der EN 13979-1 [10] entsprechen.

2.5.9 Akustische Eigenschaften

Die akustischen Eigenschaften des Faserverbundradsatzes müssen besser als die des Vergleichsradsatzes sein. Der Durchfahrtspegel eines Güterwagens mit FRP-Radsatz (LpAeq,T) soll mindestens um 1 dB(A) reduziert werden. Dieser Vergleichsradsatz wird durch den sogenannten Laufradsatz BA004 bzw. das Vollrad BA 004 beschrieben. Die Nachweisführung muss dabei dem Nachweisweg gemäss Kapitel 8 "Bewertung des akustischen Verfahrens" der EN 13979-1 [10] entsprechen. D.h. es muss im Minimum ein rechnerischer Nachweis mit dem TWINS-Modell erfolgen und ist in Abhängigkeit der Radkonstruktion um experimentelle Modalanalysen des Rades und/oder Messreihen zu ergänzen. Genaue-

re Informationen sind dem entsprechenden Kapitel der EN 13979-1 [10] und deren Anhang E zu entnehmen.

2.5.10 Beständigkeit gegen Umgebungsbedingungen

Die Radsätze müssen beständig sein gegenüber Spritzwasser, bahnüblichen Reinigungsmitteln, Staub, Schmutz, Regen, Schnee, Eis und Sonneneinstrahlung gemäss EN 50125-1 [12]. Der Temperatureinsatzbereich ohne Einflüsse infolge thermischer Bremslasten ist -40 bis +50°C gemäss Zone TX nach EN 50125-1 [12].

2.5.11 Brandschutzanforderungen

Gemäss der EN 45545-1 [13] werden Güterwagen durch die EN 45545 nicht abgedeckt. Im Fall des Faserverbundradsatzes wird jedoch empfohlen, den Radsatz als Bestandteil eines Fahrzeuges der niedrigsten Betriebsklasse 1[8] zu bewerten.

2.5.12 Zuverlässigkeit, Wartbarkeit und Sicherheit

Die Instandhaltung von Radsätzen unterliegt generell dem Fahrzeughalter. Auf Grundlage der Forderungen im Kapitel 4.2.3.6.2 bis 4.2.3.6.4 der TSI [4] sind neben der EN 15313 [18] in der RTE 41000 [19] nationale und in der VPI 04 [20] internationale Regelwerke zur Radsatzwartung definiert, wobei in der Schweiz die Vorgabe der AB 13.3 Fahrzeuge der AB-EBV [2] zu berücksichtigen sind. Die kundenspezifischen Wartungsrichtlinien sind vor der Erstellung der Radsatzspezifikation zu ermitteln und mit in die Spezifikation aufzunehmen. Aufgrund des neuartigen Produktes stellt der Lieferant neben geeigneten Wartungsunterlagen auch einen Vorschlag mit Angaben zu Prüfmethoden und Prüfintervallen zur Verfügung. Dies umfasst ebenfalls zulässige Nacharbeiten am Radsatz, wie diese im Anhang F der EN 13260 [7] definiert sind.

3 Technischer Nachweis

3.1 Allgemein

Der Lieferant stellt ein geeignetes Nachweiskonzept zur Auslegung des Faserverbundkörpers zur Verfügung und erbringt gemäss diesem einen zulassungsfähigen Nachweis, der für eine mögliche Zulassung beim BAV eingereicht werden kann. Es sind alle notwendigen Berichte für die Zulassung des Radsatzes in Übereinstimmung mit den geltenden Normen beizustellen. Im Rahmen der Nachweisführung der Faserverbundanteile sind in Abwesenheit bahnspezifischer Faserverbundzertifizierungen die Klassifikations- und Bauschriften 2 Nichtmetallische Werkstoffe des Germanischen Lloyd (GL) [24] und diesbezüglichen Vorgaben der Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanalagen des GL [25] zu befolgen. Es sind insbesondere die Vorgaben im Abschnitt 2 Abnahme und Prüfung von Faserverbundwerkstoffen aus [24] und zu den Teilsicherheitsbeiwerten in Kapitel 4 in [25] zu beachten.

3.2 Festigkeitsnachweis zur Radsatzwelle

Die Nachweisführung der Radsatzwelle ist gemäss der EN 13103 [6] für einen nicht führenden Radsatz zu erbringen. Der Lieferant stellt ein geeignetes Nachweiskonzept für den Faserverbundkörper zur Verfügung und erbringt gemäss diesem einen zulassungsfähigen Nachweis, der für eine mögliche Zulassung beim BAV eingereicht werden kann. Die rechnerische Nachweisführung beinhaltet im Minimum

[8] Fahrzeuge für den Betrieb auf Infrastrukturen auf denen Schienenfahrzeuge mit minimaler Zeitverzögerung gestoppt werden können und ein sicherer Bereich immer unmittelbar erreicht werden kann.

die Positionen aus Tabelle 3-1. Es wird empfohlen, die Nachweisführung möglichst an die Vorgehensweise in die EN 13103 [6] anzulehnen.

Nachweisführung Faserverbundwelle
Versagenshypothese (Pauschalkriterium z.B. Tsai-Wu oder differenzierendes Kriterium wie z.B. Puck, Hashin)
Materialkennwerte des Faserverbundmaterials (Steifigkeiten und Festigkeitswerte für die unterschiedlichen Zonen der Radsatzwelle) z.B. gemäss [24]
Sicherheitswerte z.B. gemäss [25]

Tabelle 3-1 **Minimalanforderungen an die rechnerische Nachweisführung der Faserverbundwelle**

In Abhängigkeit der Radsatzlagerung bzw. -anlenkung ist der Einfluss der Radsatzlagerung auf die Belastung der Radsatzwelle (Moment infolge H-Kraft) bei dessen Auslegung nach EN 13103 [6] mit zu berücksichtigen.

3.3 Festigkeitsnachweis zum Rad

Die Nachweisführung des Rades hat sich am Kapitel 7 "Bewertung des mechanischen Verhaltens" der EN 13979-1 [10] und Kapitel 7.2.1.1 "Aussergewöhnliche Belastung" der UIC 510-5 [14] zu orientieren. Es ist der Zustand mit neuem Radkranz (Lauffläche mit Nenndurchmesser) und mit einem Rad mit abgenutzten Radkranz (Lauffläche an der Verschleissgrenze) nachzuweisen. Es sind die Belastungswerte für nicht führende Radsätze und die Lasteinleitungspositionen gemäss Norm (siehe auch Abbildung 3-1) zu verwenden (F_{y2} = 0.6P, F_{y3} = 0.6 F_{y2} = 0.36P und F_{z3} = F_{z2} = F_{z1} =1.25P mit P = 25/2 t · g). Um den Einfluss von Strukturinhomogenitäten beurteilen zu können, sind bei Rädern bzw. Radscheiben mit Bohrungen unterschiedliche Lasteinleitungsebenen zu analysieren.

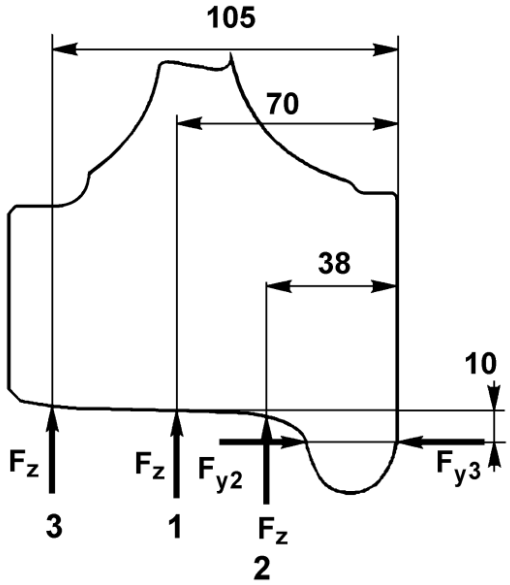


Abbildung 3-1 **Generelle Lasteinleitungspositionen am Radumfang gemäss EN 13979-1 [10]**

Für den metallischen Radreifen ist der Festigkeitsnachweis gemäss dem Kapitel 7 "Bewertung des mechanischen Verhaltens" der EN 13979-1 [10] und Kapitel 7.2.1.1 "Aussergewöhnliche Belastung" der UIC 510-5 [14] für den Zustand mit neuem Radkranz (Lauffläche mit Nenndurchmesser) und mit einem Rad mit abgenutztem Radkranz (Lauffläche an der Verschleissgrenze) zu erbringen. Es sind die in der EN 13979-1 [10] definierten Festigkeitskriterien zu verwenden.

Für den Faserverbundkörper des Rades ist ein Festigkeitsnachweis in Anlehnung an Kapitel 7 "Bewertung des mechanischen Verhaltens" der EN 13979-1 [10] und Kapitel 7.2.1.1 "Aussergewöhnliche Belastung" der UIC 510-5 [14] für den Zustand mit neuem Radkranz (Lauffläche mit Nenndurchmesser) und mit einem Rad mit abgenutzten Radkranz (Lauffläche an der Verschleissgrenze) zu erbringen, der unter

Berücksichtigung des spezifischen Materialverhaltens von Faserverbundwerkstoffen den gleichen Festigkeitsnachweis erbringt, wie das entsprechende Kapitel für einen metallischen Werkstoff. Dieser Nachweis umfasst im Minimum die in Tabelle 3-2 aufgelisteten Positionen, wie auch die lokalen Effekte im unmittelbaren Bereich der Verbindungszone zum metallischen Radreifen (z.B. Lochleibungseffekte).

Nachweisführung Faserverbundradkörper
Versagenshypothese (Pauschalkriterium z.B. Tsai-Wu oder differenzierendes Kriterium wie z.B. Puck, Hashin)
Materialkennwerte des Faserverbundmaterials (Steifigkeiten und Festigkeitswerte für die unterschiedlichen Zonen der Radsatzwelle) z.B. gemäss [24], welche die ganze Lebensdauer des Rades abdecken müssen.
Sicherheitswerte z.B. gemäss [25]

Tabelle 3-2 **Minimalanforderungen an die rechnerische Nachweisführung des Faserverbundradanteils**

3.4 Verbindung zwischen Radscheibe und Radreifen

Für die Verbindung zwischen Faserverbundkörper des Rades und metallischem Radreifen ist ein Festigkeitsnachweis zu erbringen. In diesem sind neben den montagebedingten Lasten die Belastungen in Kapitel 7 der EN 13979-1 [10] und Kapitel 7.2.1.1 der UIC 510-5 [14] für den Zustand mit neuem Radkranz und mit einem Rad mit abgenutzten Radkranz zu berücksichtigen.

Im Fall einer Schraubverbindung ist diese gemäss DIN 25201 [21] und VDI 2230 [22], [23] auszulegen. Im Fall von Scherstiften/Bolzen sind diese durch geeignete, anerkannte Verfahren der Nachweisführung nachzuweisen (z.B. FKM-Richtlinie [17]). Die Nachweisverfahren müssen zu Beginn der Untersuchung vom Kunden akzeptiert werden.

3.5 Verbindung zwischen Rad und Radsatzwelle

Für die Verbindung zwischen dem Rad und der Radsatzwelle ist für alle möglichen Betriebslasten ein Dauerfestigkeitsnachweis beizustellen. In Ergänzung wird empfohlen, als Beurteilungsreferenz eine Berechnung der nach EN 13260 [7] geforderten Querkraftbelastung vgl. Kapitel 2.5.5 Wellen – Nabenverbindung zwischen Rad und Radsatzwelle (S. 13) beizustellen. Es sind die in der EN 13979-1 [10] definierten Festigkeitskriterien zu verwenden.

3.6 Verbindung zwischen Bremsscheibe und Rad bzw. Radsatzwelle

Für die Verbindung zwischen der Bremsscheibe und Rad bzw. der Radsatzwelle ist für alle möglichen Betriebslasten[9] ein Dauerfestigkeitsnachweis beizustellen[10]. Im Rahmen dieses Festigkeitsnachweises sind für die Faserverbundanteile des Radsatzes ins Besonderes die Richtlinien des GL z.B. [24] und [25] zu beachten. Diese sind ebenfalls zur Bewertung von möglichen Klebeverbindungen beizuziehen. Die Bewertung von Bolzen und Schrauben müssen analog zum Punkt 3.4 Verbindung zwischen Radscheibe und Radreifen (S. 16) mit den entsprechenden Bewertungen nach DIN 25201 [21], VDI 2230 [22], [23] und FKM-Richtlinie [17] erfolgen.

3.7 Experimentelle Nachweise

Aufgrund des hohen Neuigkeitsgrades bei der Konstruktion eines Faserverbundradsatzes sind in Ergänzung zu Materialproben generell Prüfstandversuche im Rahmen der Nachweisführung gefordert. Diese sind für die Faserverbundanteile komponentenspezifisch als auch im Verbund gefordert.

[9] Es sind alle möglichen Kombinationen der mechanisch und thermisch wirkenden Belastungen zu berücksichtigen.
[10] Wellenbremsscheiben werden in der Regel auf die Welle geschrumpft oder gepresst EN 14535-1 [15]. Aufgrund der spezifischen Faserverbundeigenschaften wird in dieser Spezifikation von alternativen Verbindungstechniken zwischen WBS und RSW bzw. Torsionsrohr ausgegangen.

3.7.1 Radsatzwelle

Mit Proben im Maßstab 1:1 muss in Übereinstimmung mit EN 13261 [8] der in der Berechnung verwendete Festigkeitswert an der Schaftoberfläche und bei einer Hohlwelle ebenso der an der inneren Laminatoberfläche verwendete Festigkeitswert bestätigt werden. Der Nachweis ist an mindestens 3 Proben durch eine geeignete Anzahl Lastwechsel zu erbringen[11]. Die Prüflasten, d.h. Belastungshöhe und Zyklenzahl sind so zu wählen, dass diese der gesamten Lebensdauer der Radsatzwelle entsprechen. Nur im Fall, dass der Werkstoff über eine ausgewiesene Dauerfestigkeit verfügt, dürfen weniger Lastwechsel (aber analog zu metallischen Radsätzen im Minimum 10^7 Lastspiele) angesetzt werden. Ansonsten sind immer entsprechend grössere Lastwechselzahlen zu verwenden.

3.7.2 Rad

Mit Proben im Maßstab 1 : 1 sind Prüfstandversuche zur Validierung des mechanischen Verhaltens des Rads durchzuführen. Diese müssen gemäss EN 13979-1 [10] erfolgen. D.h. es sind vier Räder zu prüfen. Die Prüflasten, d.h. Belastungshöhe und Zyklenzahl sind so zu wählen, dass diese der gesamten Lebensdauer des Rades entsprechen. Im Anhang D "Prinzip der Prüfstandsbelastungen und des Prüfverfahrens" der EN 13979-1 [10]sind diesbezügliche Vorgaben definiert.
Zur Bewertung des akustischen Verhaltens sind Typentest gemäss dem Vorgehen in EN 13979-1 [10] erforderlich, sofern für die vergleichende Bewertung kein rechnerisch validierter Bewertungsansatz verwendet werden kann.

3.7.3 Dauerfestigkeit des gefügten Radsatzes

Es sind Dauerfestigkeitsversuche des gefügten Radsatzes zur Validierung der kritischen Region in der gefügten Zone durchzuführen. Diese erfolgen gemäss EN 13260 [7], demnach im Bereich des Fügungssitzes des Rades ein Rad oder ein Prüfstück mit gleichen Abmessungen (insbesondere die Nabe) befestigt werden muss. Zudem ist für den Versuch im Bereich des Wellenschenkels ein Lagerdichtring zu montieren. Es sind Versuche zur Validierung der Umlaufbiegewechselfestigkeit an mindestens 3 Proben durchzuführen[12]. Die Zyklenzahl muss dabei mit denen der Einsatzdauer des Radsatzes bzw. mit denen des Rades und der Radsatzwelle abgestimmt sein und beträgt im Minimum 10^7 Zyklen.

4 Erstmusterprüfungen

Der Lieferant führt Erstmusterprüfungen (FAI) durch. Diese erfolgen komponentenspezifisch, soweit anwendbar wie folgt: Für die Radsatzwelle gemäss EN 13261 [8], für die Räder gemäss EN 13262 [9] und für den Radsatz gemäss EN 13260 [7] mit den ergänzenden Prüfungen zur Berücksichtigung der Faserverbundanteile des Radsatzes und der Verbindungselemente zwischen den unterschiedlichen Komponenten. Der Hersteller hat zu jeder Komponente Abweichungen gegenüber den genannten Normen auszuweisen und vom Kunden zu Beginn des Projektes genehmigen zu lassen.

5 Typentests

Es wird auf die generellen Typentests zu den unterschiedlichen Komponenten in EN 13260 [7], EN 13261 [8] und EN 13262 [9] sowie auf die diesbezüglichen Ausführungen in dieser Spezifikation verwiesen.

[11] Der Nachweis ist bei drei Durchläufer erbracht.
[12] Der Nachweis ist bei drei Durchläufer erbracht.

6 Qualitätsanforderung

Es wird auf die generellen Qualitätsanforderungen zu den unterschiedlichen Komponenten gemäss Tabelle 6-1 verwiesen. Der Hersteller kann diese in Absprache mit dem Kunden um weitere ergänzen bzw. im Fall der nichtmetallischen Standardkomponenten ersetzen, sofern diese eine Produktqualifizierung gewährleisten.

Komponente	Anzuwendende Richtlinie
Radsatz	Anhang E Produktqualifizierung der EN 13260 [7]
Radsatzwelle	Anhang I Produktqualifizierung der EN 13261 [8]
Rad	Anhang E Produktqualifizierung der EN 13262 [9]
Faserverbundanteile	Abschnitt 2 des GL Klassifikations- und Bauvorschriften, II – Werkstoffe und Schweißtechnik, Teil 2 – Nichtmetallische Werkstoffe, Kapitel 1 – Faserverbundwerkstoffe und Kleben [24]

Tabelle 6-1 **Anzuwendende Qualitätssicherung für einen Faserverbundradsatz**

6.1 Warenausgangsprüfungen

Die Warenausgangsprüfungen der Komponenten sollen für die Radsatzwellen in Übereinstimmung mit EN 13261 [8], für die Räder in Übereinstimmung mit EN 13262 [9] und für die Radsätze in Übereinstimmung mit EN 13260 [7] erfolgen. Bei der Prüfung der Faserverbundanteile sind die Vorgaben gemäss GL Klassifikations- und Bauvorschriften [24] zu berücksichtigen.

6.2 Kennzeichnung

Der Hersteller der Radsätze muss die Rückverfolgbarkeit gewährleisten. Die Bauteile der Radsätze (Radsatzwellen und Räder) sind gemäss EN 13260 [7] eindeutig zu kennzeichnen (siehe auch spez. Hinweise in den entsprechenden Kapiteln dieser Spezifikation).

6.3 Qualitätsdokumente

Der Hersteller muss für die metallischen Komponenten ein Abnahmeprüfzeugnis nach EN 10204 [16] ausstellen und mit den entsprechenden Prüfergebnissen ergänzen. Die entsprechenden Zertifikate müssen mit jeder Lieferung an den Besteller abgegeben werden.

Der Hersteller muss für die nichtmetallischen Komponenten ein Abnahmeprüfzeugnis gemäss den Vorgaben in GL Klassifikations- und Bauvorschriften [24] ausstellen und mit den entsprechenden Prüfergebnissen ergänzen. Die entsprechenden Zertifikate müssen mit jeder Lieferung an den Besteller abgegeben werden.

7 Dokumentation

Der Hersteller stellt dem Kunden alle Unterlagen, die im Rahmen der Zulassung gefordert sind, in geeigneter Form zur Verfügung.

8 Referenzen

8.1 Administrative Unterlagen und übergeordnete Dokumente

[1] *Richtlinie - Zulassung Eisenbahnfahrzeuge (Typenzulassung/Betriebsbewilligung) V2.3 de, 1. Januar 2016, Aktenzeichen: BAV / BAV-511.5-00010/00010, Bundesamt für Verkehr, 3003 Bern, Abteilungen Infrastruktur und Sicherheit*

[2] *AUSFÜHRUNGSBESTIMMUNGEN ZUR EISENBAHNVERORDNUNG (A B - E B V) Stand am 1. Juli 2016, Bundesamt für Verkehr (BAV), 3003 Bern*

[3] *Richtlinie Strukturnachweise Meter- und Spezialspurbahnen V 1.0, 7. Oktober 2014, Aktenzeichen: BAV / BAV-041.4-00003/00009/00002/00004/00002, Bundesamt für Verkehr BAV, Infrastruktur und Sicherheit*

[4] *VERORDNUNG (EU) Nr. 321/2013 DER KOMMISSION vom 13. März 2013 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge - Güterwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union und zur Aufhebung der Entscheidung 2006/861/EG der Kommission*

[5] *VERORDNUNG (EU) Nr. 1302/2014 DER KOMMISSION vom 18. November 2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge - Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union*

[6] *EN 13103:2009+A2:2012 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Laufradsatzwellen – Konstruktions- und Berechnungsrichtlinie*

[7] *EN 13260:2009+A1:2010 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Radsätze – Produktanforderungen*

[8] *EN 13261:2009+A1:2010 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Radsatzwellen – Produktanforderungen*

[9] *EN 13262:2004+A2:2011 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Räder – Produktanforderungen*

[10] *EN 13979-1:2003+A2:2011 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Vollräder – Technische Zulassungsverfahren – Teil 1: Geschmiedete und gewalzte Räder*

[11] *EN 13715:2006+A1:2010 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Räder – Radprofile*

[12] *EN 50125-1:2014 Bahnanwendungen - Umweltbedingungen für Betriebsmittel - Teil 1: Betriebsmittel auf Bahnfahrzeugen*

[13] *EN 45545-1:2013 Bahnanwendungen - Brandschutz in Schienenfahrzeugen - Teil 1: Allgemeine Regeln*

[14] *UIC 510-5 Technische Zulassung von Vollrädern – Anwendungsdokument für die EN 13979-1*

[15] *EN 14535-1:2005+A1:2011, Bahnanwendungen - Bremsscheiben für Schienenfahrzeuge - Teil 1: Wellenbremsscheiben, aufgepresst oder geschrumpft, Abmessungen und Qualitätsanforderungen*

[16] *EN 10204:2004 Metallische Erzeugnisse - Arten von Prüfbescheinigungen*

[17] *FKM-Richtlinie - Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 6. Auflage VDMA Verlag*

[18] *EN 15313:2016 Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle – Radsatzinstandhaltung*

[19] *R RTE 41000 – Instandhaltung Radsätze – Normalspur*
RTE – Regelwerk Technik Eisenbahn gültig ab 01.11.2016, VÖV Verband öffentlicher Verkehr

[20] *VPI 04 - Instandhaltung von Güterwagen Radsätze – Radsätze, Ausgabe 3.1 gültig ab 15.11.2017, VPI – Verband der Güterwagenhalter in Deutschland e.V.*

[21] *DIN 25201 Teil 1-7:2015 Konstruktionsrichtlinie für Schienenfahrzeuge und deren Komponenten – Schraubenverbindungen*

[22] *VDI 2230 Blatt 1:2015 Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen*

[23] *VDI 2230 Blatt 2:2014 Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Mehrschraubenverbindungen*

[24] *Germanischer Lloyd Klassifikations- und Bauvorschriften, II – Werkstoffe und Schweißtechnik, Teil 2 – Nichtmetallische Werkstoffe, Kapitel 1 – Faserverbundwerkstoffe und Kleben*

[25] *Zertifizierung von Windenergieanlagen Richtlinie Germanischer Lloyd, Ausgabe 2010*

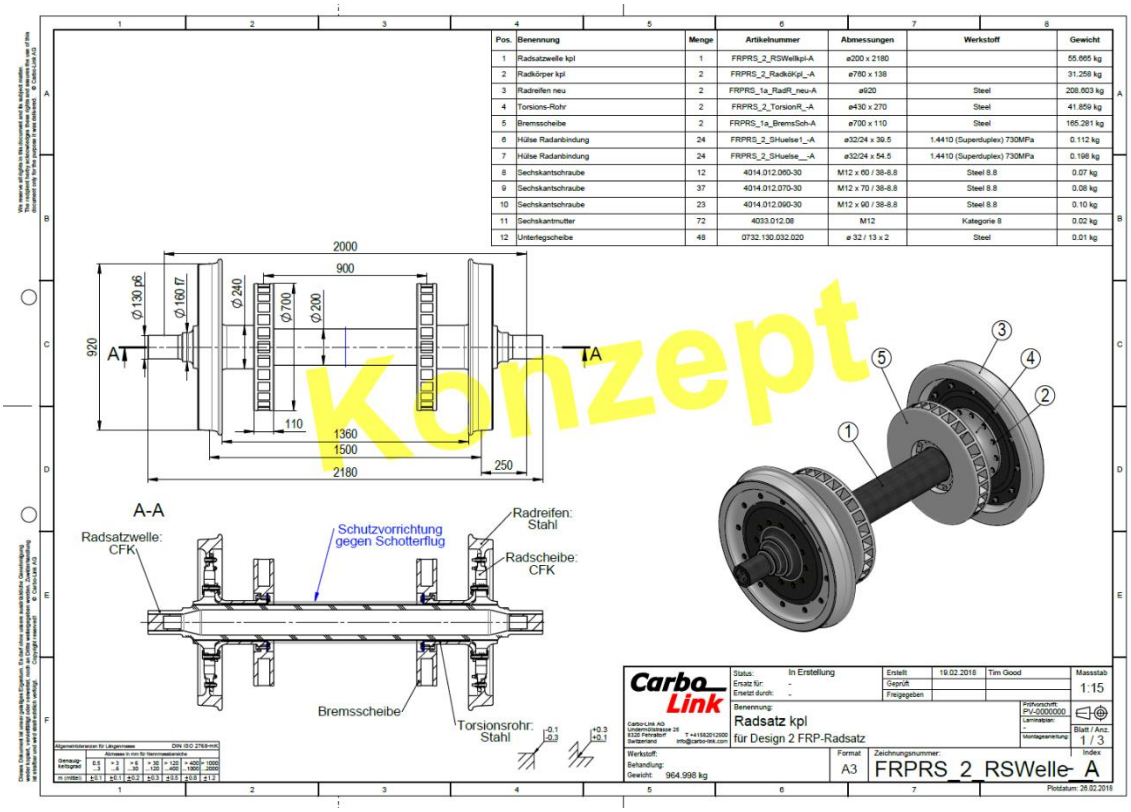
[26] *Anforderungskatalog für eine neue Standard Güterwagen Radsatzwellen - European Standard Freight Axle (ESFA), Dirk Müller, DB Systemtechnik GmbH, Minden, 13. VPI Informationsveranstaltung 26.06.2014 Hannover*

8.2 Technische Unterlagen

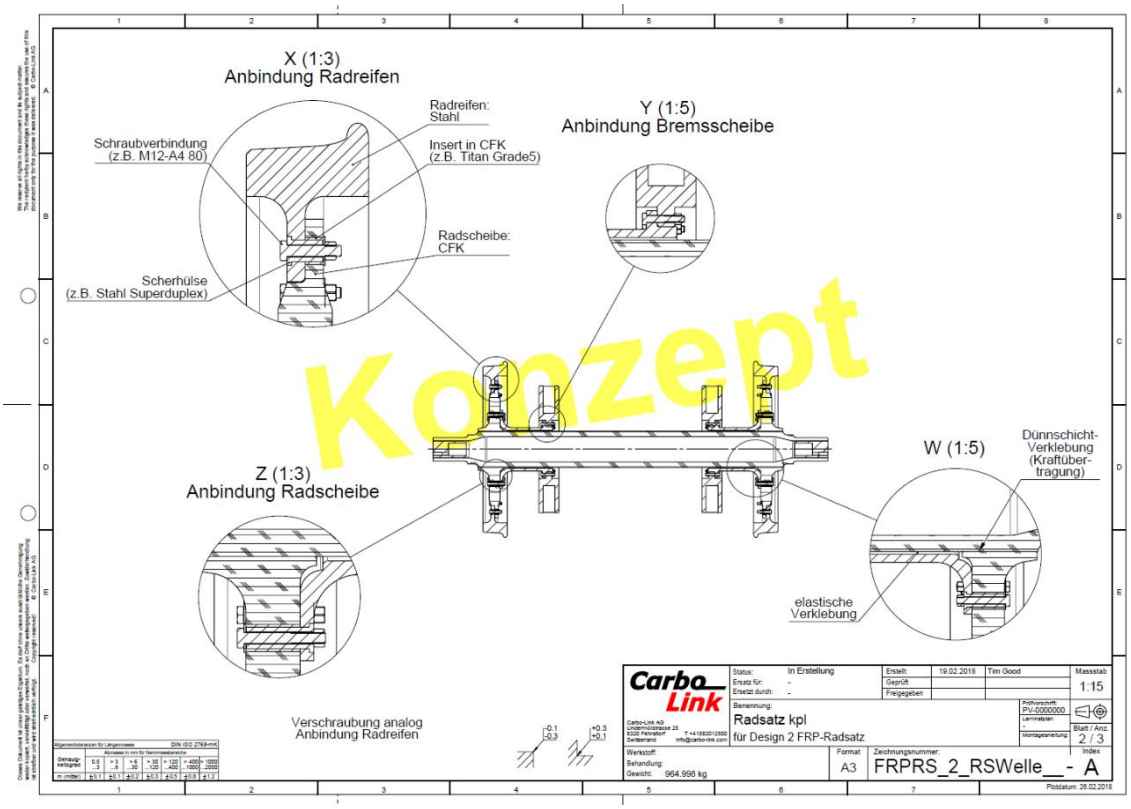
[27] *(Zeichnung) Radsatz kpl für Design 2 FRP-Radsatz, FRPRS_2_RSWelle -A, Carbo-Link AG, T. Good, 19.02.2018*

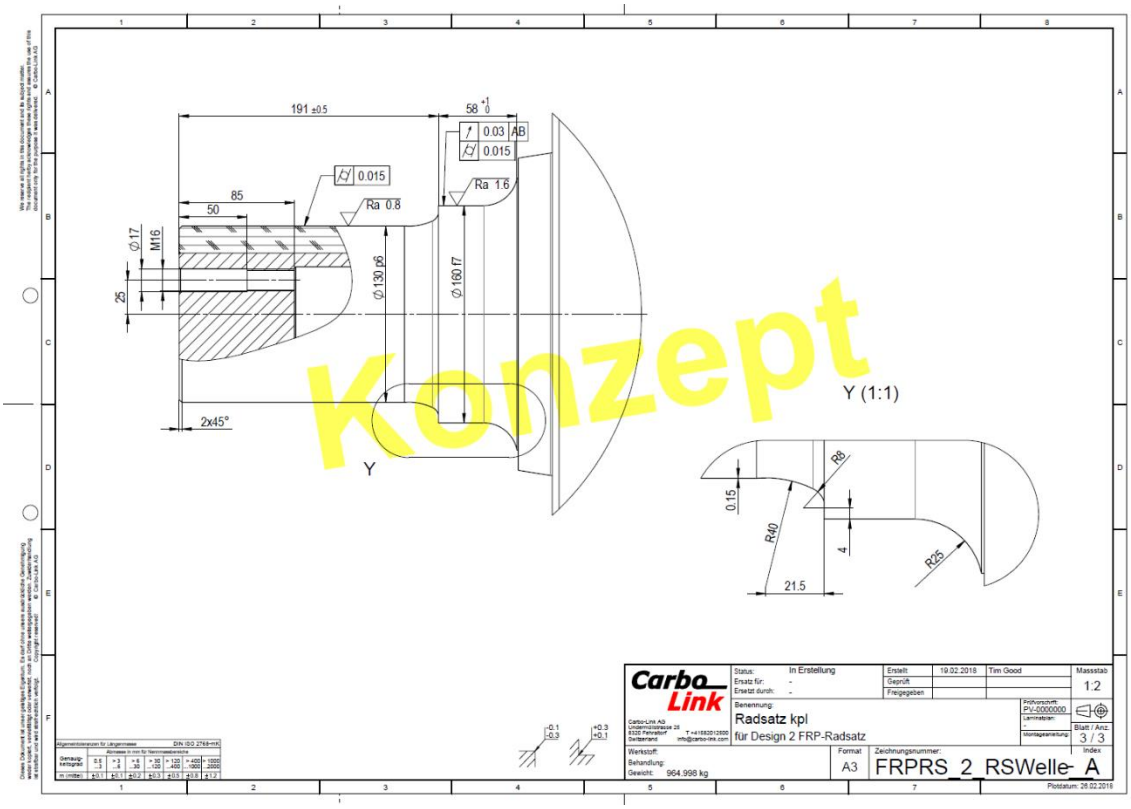
A Technischer Anhang

A.1 Zeichnung des Radsatzes



Pos.	Benennung	Menge	Artikelnummer	Abmessungen	Werkstoff	Gewicht
1	Radsatzwelle kpl	1	FRPRS_2_RSWellkpl-A	ø200 x 2180		55.665 kg
2	Radkörper kpl	2	FRPRS_2_Radkörkpl_-A	ø780 x 138		31.258 kg
3	Radreifen neu	2	FRPRS_1a_RadR_neu-A	ø920	Steel	208.603 kg
4	Torsions-Rohr	2	FRPRS_2_TorsionR_-A	ø430 x 270	Steel	41.859 kg
5	Bremsscheibe	2	FRPRS_1a_BremsSch-A	ø700 x 110	Steel	165.281 kg
6	Hülse Radanbindung	24	FRPRS_2_SHuelse1_-A	ø32/24 x 39.5	1.4410 (Superduplex) 730MPa	0.112 kg
7	Hülse Radanbindung	24	FRPRS_2_SHuelse__-A	ø32/24 x 54.5	1.4410 (Superduplex) 730MPa	0.198 kg
8	Sechskantschraube	12	4014.012.060-30	M12 x 60 / 38-8.8	Steel 8.8	0.07 kg
9	Sechskantschraube	37	4014.012.070-30	M12 x 70 / 38-8.8	Steel 8.8	0.08 kg
10	Sechskantschraube	23	4014.012.090-30	M12 x 90 / 38-8.8	Steel 8.8	0.10 kg
11	Sechskantmutter	72	4033.012.08	M12	Kategorie 8	0.02 kg
12	Unterlegscheibe	48	0732.130.032.020	ø 32 / 13 x 2	Steel	0.01 kg

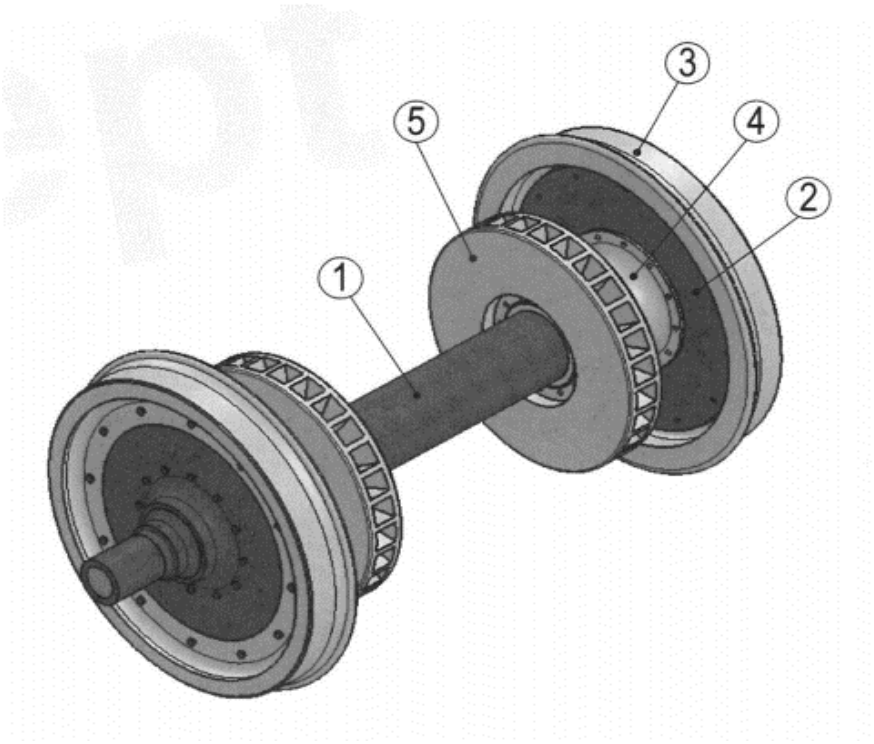



191 ±0.5
58 +1 0
0.03 AB
0.015
0.015
Ra 1.6
Ra 0.8
85
50
Ø17
M16
25
Ø130 p6
Ø160 f7
2x45°
Y
Y (1:1)
R8
0.15
R40
4
R25
21.5
Konzept
Carbo Link
Status: In Erstellung
Ersatz für: -
Ersetzt durch: -
Erstellt 19.02.2018 Tim Good
Geprüft
Freigegeben
Massstab 1:2
Benennung:
Radsatz kpl
für Design 2 FRP-Radsatz
Prüfvorschrift: PV-0000000
Laminatplan: -
Montageanleitung:
Blatt / Anz. 3 / 3
Carbo-Link AG
Unterhofstrasse 26
8320 Fehraltorf
Switzerland
T +41 58 201 2600
info@carbo-link.com
Werkstoff:
Behandlung:
Gewicht: 964.998 kg
Format A3
Zeichnungsnummer: FRPRS_2_RSWelle_A
Index
Plotstatum: 26.02.2018

Bericht 04-12-01269 Rev. 1.00

EMPA Eidg.Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf - BAFU FRP wheelset

Projekt-Nr.: 17.133.00



Radsatzwellendimensionierung nach EN 13103

PROSE AG
Zürcherstrasse 41
8400 Winterthur
Schweiz
Tel: +41 52 262 74 00
E-mail: info@prose.one

	Name	Datum	
Erstellt	R. Paradies	20.01.2018	
Geprüft	P. Hüberli	14.08.2018	
Freigegeben	C. Deiss	14.08.2018	

Verteiler

Firma / Abteilung / Name	Bemerkungen
BAFU Empa Carbo-Link AG PROSE Archiv	

Dieses Dokument gibt Kenntnis von Gegenständen, an denen die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz), Eigentumsrechte hat. Weder Erhalt noch Besitz dieses Dokuments verleihen oder übertragen das Recht, seinen Inhalt als Ganzes, einen Teil davon, eine darin enthaltene Information, oder irgendwelche Gegenstände oder Vorrichtungen zu kopieren oder bekannt zu machen oder irgendwelche Methoden oder Prozesse anzuwenden, ausser nach schriftlicher Genehmigung durch die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz) oder schriftlicher Vereinbarung mit dieser Firma.

Dieses Schreiben wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

Revisionsindex

Revision	Erstellt	Geprüft	Freigegeben	Datum
04-12-01269	R. Paradies	P. Hüberli	C. Deiss	19.01.2018
1.00	R. Paradies	P. Hüberli	C. Deiss	14.08.2018

Modifikationen

Revision	Beschreibung
1.00	Anpassung des mittleren Reibungswertes zwischen Bremsbelag und Scheibe, Anpassung der Wandstärke gemäss aktualisierter Referenz [4], Aktualisierung der Referenz [3] und der Zusammenfassung

Inhalt

Titel	Seite
Einführung	5
Berechnungsgrundlagen gemäss EN 13103	6
Geometrie mit betrachteten Querschnitten	9
Berechnungsergebnisse für Kurvenfahrt mit mechanischer Bremse am Rad	10
Diagramme für Kurvenfahrt mit mechanischer Bremse am Rad	11
Berechnungsergebnisse für Kurvenfahrt mit mechanischer Bremse auf der Achse	13
Diagramme für Kurvenfahrt mit mechanischer Bremse auf der Achse	14
Zusammenfassung	16
Referenzen	17

Einführung

Gegenstand des Berichtes ist die Festigkeitsbewertung einer Faserverbundradsatzwelle als nicht führende Laufradsatzwelle gemäss EN 13103.
Ziel der Berechnung ist die Erstellung eines Radsatzwellenauslegungswerkezuges unter Berücksichtigung normkonformer Belastungen, welche als mögliche Validierung für die Berechnungsergebnisse auf Grundlage der FEM der eigentlichen Faserverbundstruktur verwendet werden kann.

Bei der betrachteten Faserverbundradsatzwelle erfolgt die Anbindung der Wellenbremsscheibe an das Rad mittels eines Torsionsrohres, das gleichzeitig mit der Radsatzwelle verklebt ist. In Abhängigkeit der Eigenschaften dieser Verklebung und des Torsionsrohres wird die Bremslast entweder am Ort der Wellenbremsscheibe oder aber als Radnabenbremsscheibe eingeleitet. Aus diesem Grund werden zwei Berechnungen durchgeführt, bei der die Bremsart (Wellenbremsscheibe bzw. Radbremsscheibe) entsprechend variiert wird.

Berechnungsgrundlagen

Radsatzeigenschaften in Bezug zur Berechnung nach EN 13103 [1]

Radsatz	Symbol	Einheit	Wert	Quelle / weitere Information
Radsatzstellung			nicht führend	
Bremsart			2 Wellenbremsscheiben an Rad befestigt!	[4]
Material			Faserverbund	
Radzustand für die Berechnung			neu	
Nennradius des Radmesskreises für den Zustand neu	R_{neu}	[mm]	460	[3]
Nennradius des Radmesskreises für den Zustand abgefahren	$R_{abgefahren}$	[mm]	420	[3]
Radmesskreisdurchmesser für Bremskraftberechnung ($R = R_{neu} - R_{abgefahren})/2$	$R_{Bremsberechnung}$	[mm]	440	[3]
Radmasse (neu)		[kg]	236	[3]
Wellenmasse (bei Nennmass)		[kg]	111	[3]
unabgefederte Massen (hier Wellenbremsscheibe)	m_i	[kg]	130	[3]
Anzahl der unabgefederten Massen (hier Wellenbremsscheiben)		[-]	2	[3]
Abstand der Wellenbremsscheiben zur Mittelebene		[mm]	450	[3]
Radsatzmasse und unabgefederte Massen zwischen den Messkreisebenen	m_2	[kg]	843	
Radsatzlagermittenabstand	2b	[mm]	2’000	[3]
	b	[mm]	1’000	
Abstand der Messkreisebenen	2s	[mm]	1’500	[2]
	s	[mm]	750	
Erdbeschleunigung	g	[m/s^2]	9.81	
Achslast		[t]	25	[3]

Radsatzfahrmasse	$m_1 + m_2$	[kg]	25'000	[3]
Masse auf Wellenschenkeln	m_1	[kg]	24'157	
Radlast	P	[N]	122'625	
Vertikale Lagerkraft unter symmetrischer Belastung	P_0	[N]	118'490	
Schwerpunkthöhe der vom Radsatz getragenen Masse	G	[mm]	2'600	[3]
Schwerpunkthöhe des Radsatzes		[mm]	460	[3]
Schwerpunkthöhe der vom Radsatz getragenen Masse über Radsatzwellenmitte	h_1	[mm]	2'140	
Bremskraft je Radsatz	F_{Brems_RS}	[N]	0.2	Soll über Torsionsrohr abgetragen werden.
Auslegungstorsionsmoment infolge Bremskraft je Radsatz	M_{Brems_RS}	[Nm]	25'000	konservativ
Anteil der durch ein mechanisches Bremssystem abzubremsenden Radlast P	P'	[N]	122'625	[1], [2]
Moment infolge Bremskraftunterschied zwischen zwei Rädern einer gebremsten Radsatzwelle	M'y	[Nm]	16'922	reiner Kurvenlauf
Mittlerer Reibungswert zwischen Rad und Bremsklotz oder zwischen Bremsbelag und Scheibe	Γ	[-]	0.45	[1]
wirksamer Bremsradius	R_b	[mm]	230	(tbc)
Maximale Anpresskraft der Bremsklötze an einem Rad bzw. der Bremsbeläge an einer Scheibenbremse	F_f	[N]	120'773	Gemäss Auslegungs-torsionsmoment normalerweise < 40 kN

Kräfte am Radsatz

Massenkraft (hier Wellenbremsscheiben)	F_i	[N]	1'275
Vertikale Lagerkraft auf dem höher belasteten Radsatzwellenschenkel	P_1	[N]	186'148
Vertikale Lagerkraft auf dem geringer belasteten Radsatzwellenschenkel	P_2	[N]	110'077
Horizontale Querkraft senkrecht zur Schiene an der Seite des höher belasteten Radsatzwellenschenkels	Y_1	[N]	71'094
Horizontale Querkraft senkrecht zur Schiene an der Seite des geringer belasteten Radsatzwellenschenkels	Y_2	[N]	35'547
Querkraft zum Ausgleich der Kräfte Y_1 und Y_2	H	[N]	35'547
Radaufstandskraft auf der Seite des höher belasteten Wellenschenkels	Q_1	[N]	208'452
Radaufstandskraft auf der Seite des geringer belasteten Wellenschenkels	Q_2	[N]	85'477

Festigkeitswerte

minimal erforderlicher Sicherheitsbeiwert nach EN 13103	S	[-]	**1.40**	tbc
Zone 1: Radsatzwellenschaft, Gleitlagersitze, Übergänge	σ_1	[MPa]	**214**	tbd für Faserverbund
Zone 2: Alle Sitze ausser Radsatzwellenschenkeln und Gleitlagersitzen	σ_2	[MPa]	**214**	tbd für Faserverbund
Zone 3: Radsatzwellenschenkel (Lagersitz)	σ_3	[MPa]	**214**	tbd für Faserverbund
Zone 4: Bohrung	σ_4	[MPa]	**214**	tbd für Faserverbund

Materialwerte

Wechselfestigkeit	σ_w	[MPa]	**300**	tbc für Faserverbund

Legende

tbc	to be confirmed = noch zu bestätigen
tbd	to be defined = noch zu definieren
xyz	to be defined / to be confirmed Wichtig!
xyz	to be defined / to be confirmed

Hinweise

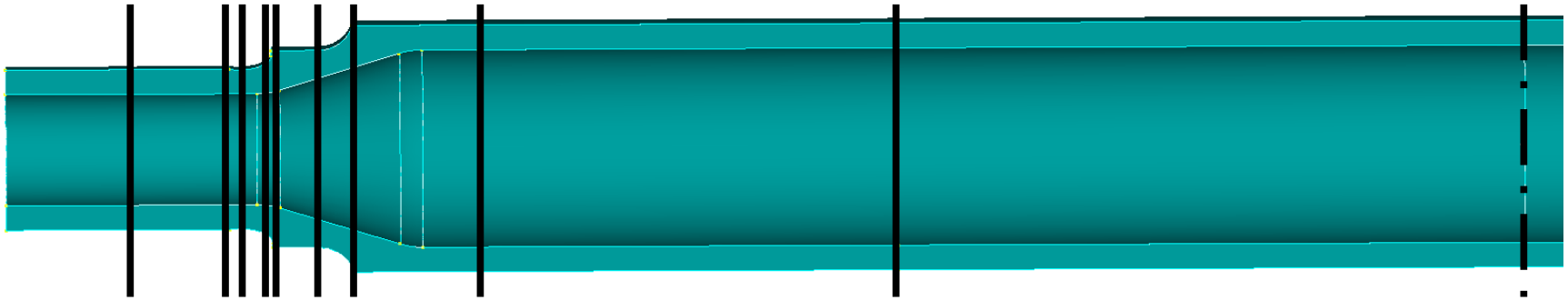
Weil die Wellenbremsscheiben (WBS) jeweils über Torsionsrohre an den Rädern befestigt sind und diese nicht mit der Radsatzwelle verbunden sind, wird einerseits die Bremsbelastung einer Radwellenbremsscheibe (RBS) angesetzt und andererseits der Traganteil der Torsionshülle bei Biegemomenten der Welle nicht berücksichtigt. Gleichzeitig wird jedoch davon ausgegangen, dass dieses Torsionsrohr so biegeweich ist, dass die Massenkräfte auf die Radsatzwelle wirken. Dieses Vorgehen ist in der Summe eher konservativ anzusehen.

Die zur WBS relativ geringe Masse der Torsionsrohre wird weggelassen. Dies ist konservativ, weil dadurch die Auflast vergrössert wird.

Der Berechnung liegt eine konstante Wandstärke zugrunde.

Geometrie mit betrachteten Querschnitten

Die Radsatzwelle ist symmetrisch zu ihrer Längsachse. Aus diesem Grund ist die Betrachtung der halben Wellengeometrie gemäss EN 13103 zulässig. Folgende Skizze zeigt indikativ die (generell) zu betrachteten Radsatzwellenquerschnitte bei Lager, Rad- und Wellenbremssitz sowie den Übergangsbögen. Weitere Querschnitte können bei Bedarf eingefügt werden. Die exakten Angaben zu den Nachweisquerschnitten sind der Berechnungstabelle zu entnehmen. Es ist zu erwähnen, dass in der Regel Radsatzwellen am Radsitz einen grösseren Durchmesser als am Schaft aufweisen (Bearbeitungsreserve und Forderung bei Stahlwellen). Dies ist beim untersuchten Design u.a. aus Fertigungsgründen nicht der Fall aber in der Berechnung für mögliche Designänderungen bereits vorgesehen.



Nummer: 1 2 .. 8 9 10

Position von Nachweisquerschnitten in Bezug zum linken Lager:

Skizze aus [4]

1 Lagermitte
2 Lagerende
3 minimaler Durchmesser bei Mulde
4 Radienübergang
5 Notlaufschulter
6 Radienbeginn
7 Beginn Radsitz
8 Radaufstandspunkt
9 WBS-Sitz
10 Wellenmitte

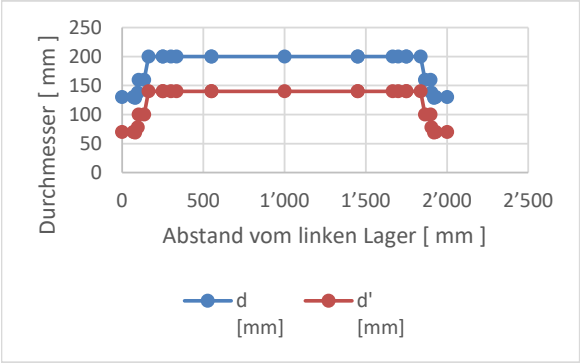
PROSE

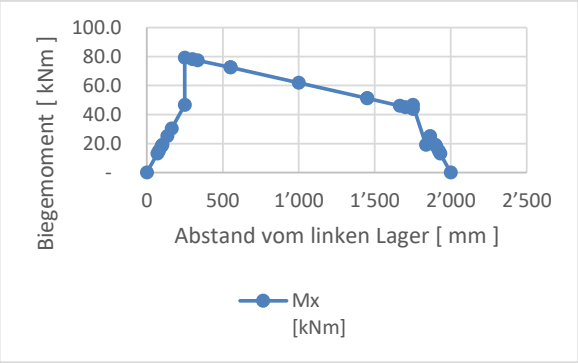
Berechnungsergebnisse für: Kurvenfahrt mit mechanischer Bremse am Rad

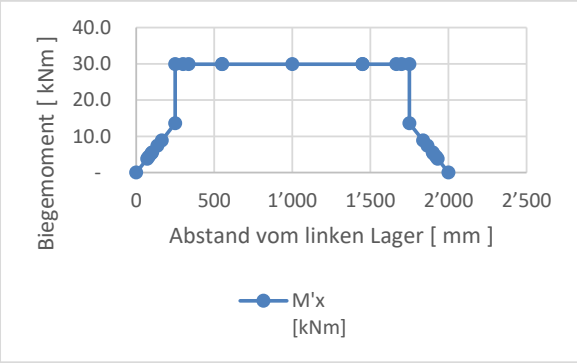
Ort	Querschnitt	Information zum Querschnitt	y [mm]	d [mm]	d' [mm]	D [mm]	r [mm]	r/D [-]	d/D [-]	k: øübergang "t" Nutengrund "g"	k [-]	Mx [kNm]	M'x [kNm]	M'z [kNm]	M'y [kNm]	MR [kNm]	σ [MPa]	Zone	σ_{Max} [MPa]	$\eta=\sigma_{Max}/\sigma$ [-]	$\sigma_{Bohrung}$ [MPa]	$\eta_{Bohrung} = \sigma_{Max}/\sigma$ [-]
Zwischen Lastebene und Messkreisebene	1	Radsatzlagermitte	-	130	70			-	-		1.00	-	-	-	0	-						
	2	Radsatzlagerende	70.0	130	70		-	-	-		1.00	13.0	3.8	2.0	0	17.0	86	3	214.3	2.50	46	4.6
	3	Mulde zum Dichtringsitz	79.5	129	69	160	40	0.31	1.24	t	1.02	14.8	4.3	2.3	0	19.3	102	1	214.3	2.10	55	3.9
	4	Korbbogen R40/R8 zum Dichtringsitz	96.8	138	78	160	8	0.06	1.16	t	1.16	18.0	5.3	2.8	0	23.4	118	3	214.3	1.82	67	3.2
	5	Beginn Dichtringsitz	102.1	160	100	242	-	-	1.51		1.00	19.0	5.5	2.9	0	24.7	73	2	214.3	2.95	45	4.7
	6	Radienbeginn im Dichtringsitz	135.4	160	100	242	25	0.16	1.51	t	1.15	25.2	7.4	3.8	0	32.8	111	2	214.3	1.93	69	3.1
	7	Beginn Radsitz	163.0	200	140			-	-		1.00	30.3	8.9	4.6	0	39.5	66	2	214.3	3.24	46	4.6
	8	Radaufstandspunkt	250.0	200	140			-	-		1.00	46.5	13.6	7.1	0	60.5	101	2	214.3	2.11	71	3.0
Zwischen den Messkreisebenen	9	Radaufstandspunkt	250.0	200	140			-	-		1.00	79.2	29.9	7.1	16.9	110.7	185	2	214.3	1.16	130	1.7
	10	Ende Radsitz	300.0	200	140			-	-		1.00	78.1	29.9	7.1	16.9	109.6	184	2	214.3	1.17	129	1.7
	11	Beginn Übergangsbogen Schaft / Radsitz	335.0	200	140	242	75	0.38	1.21		1.00	77.3	29.9	7.1	16.9	108.8	182	1	214.3	1.18	128	1.7
	12	Mitte der Wellenbremsscheibe	550.0	200	140			-	-		1.00	72.5	29.9	7.1	16.9	104.1	174	2	214.3	1.23	122	1.8
	13	Mitte der Wellenbremsscheibe	550.0	200	140			-	-		1.00	72.5	29.9	7.1	16.9	104.1	174	2	214.3	1.23	122	1.8
	14	Radsatzmitte	1'000.0	200	140			-	-		1.00	61.9	29.9	7.1	16.9	93.6	157	1	214.3	1.37	110	2.0
	15	Mitte der Wellenbremsscheibe	1'450.0	200	140	0		-	-		1.00	51.3	29.9	7.1	16.9	83.3	140	2	214.3	1.54	98	2.2
	16	Mitte der Wellenbremsscheibe	1'450.0	200	140	0		-	-		1.00	51.3	29.9	7.1	16.9	83.3	140	1	214.3	1.54	98	2.2
	17	Beginn Übergangsbogen Schaft / Radsitz	1'665.0	200	140	242	75	0.38	1.21		1.00	46.0	29.9	7.1	16.9	78.1	131	2	214.3	1.64	92	2.3
	18	Ende Radsitz	1'700.0	200	140	0	0	-	-		1.00	45.1	29.9	7.1	16.9	77.2	129	1	214.3	1.66	91	2.4
	19	Radaufstandspunkt	1'750.0	200	140	-	-	-	-		1.00	43.9	29.9	7.1	16.9	76.0	127	2	214.3	1.68	89	2.4
Zwischen Lastebene und Messkreisebene	20	Radaufstandspunkt	1'750.0	200	140	-	-	-	-		1.00	46.5	13.6	7.1	0	60.5	101	2	214.3	2.11	71	3.0
	21	Beginn Radsitz	1'837.0	200	140	0	0	0	1.513	-	1.00	19.0	8.9	4.6	0	28.2	47	2	214.3	4.53	33	6.5
	22	Radienbeginn im Dichtringsitz	1'864.6	160	100	242	25	0.156	1.513	t	1.15	25.2	7.4	3.8	0	32.8	111	2	214.3	1.93	69	3.1
	23	Beginn Dichtringsitz	1'897.9	160	100	242	-	-	1.51	-	1.00	19.0	5.5	2.9	0	24.7	73	2	214.3	2.95	45	4.7
	24	Korbbogen R40/R8 zum Dichtringsitz	1'903.2	138	78	160	8	0.06	1.16	t	1.16	18.0	5.3	2.8	0	23.4	118	3	214.3	1.82	67	3.2
	25	Mulde zum Dichtringsitz	1'920.5	129	69	160	40	0.31	1.24	t	1.02	14.8	4.3	2.3	0	19.3	102	1	214.3	2.10	55	3.9
	26	Radsatzlagerende	1'930.0	130	70	0	-	-	-		1.00	13.0	3.8	2.0	0	17.0	86	3	214.3	2.50	46	4.6
	27	Radsatzlagermitte	2'000.0	130	70	-	-	-	-		1.00	-	-	-	0	-						

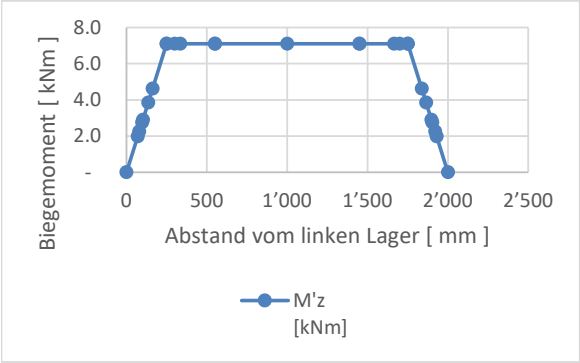
Wandstärke generell [mm] 30 Extremalwerte der Berechnung: max. Spannung [MPa]: **185** min. Sicherheit [-]: **1.16** **130** MPa

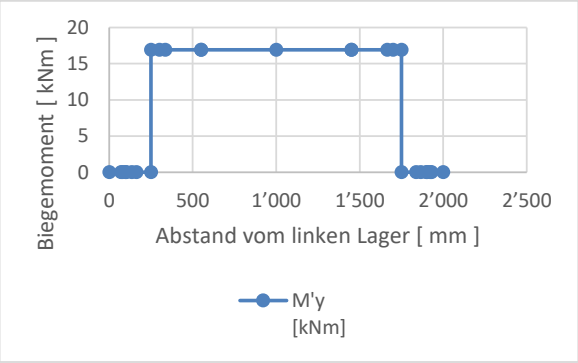
Diagramme für: Kurvenfahrt mit mechanischer Bremse am Rad











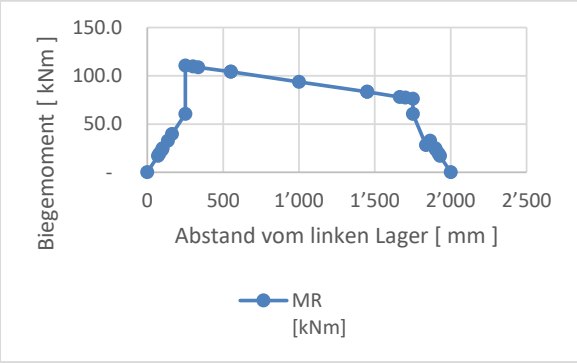
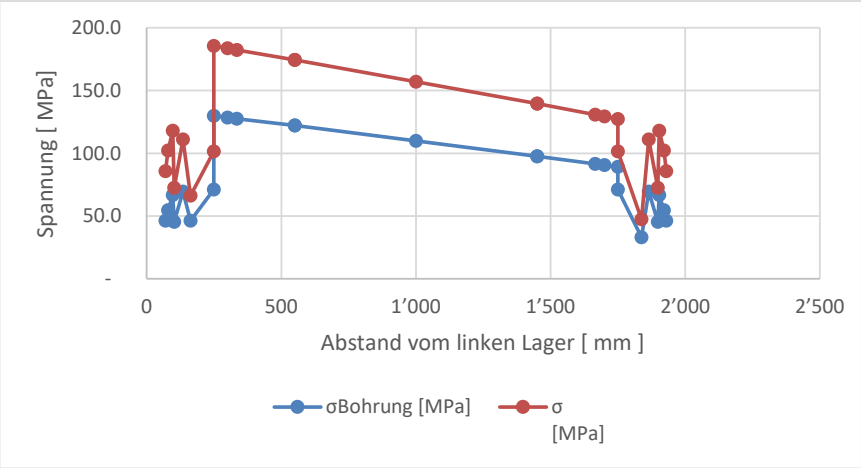
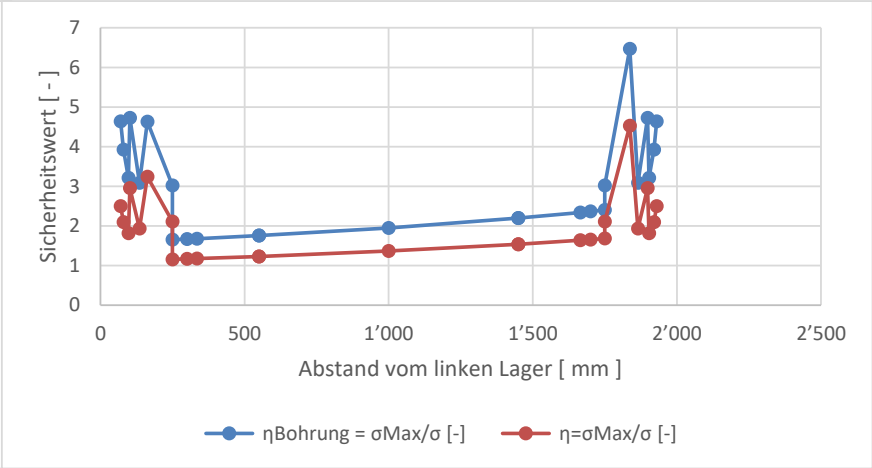


Diagramme für: Kurvenfahrt mit mechanischer Bremse am Rad





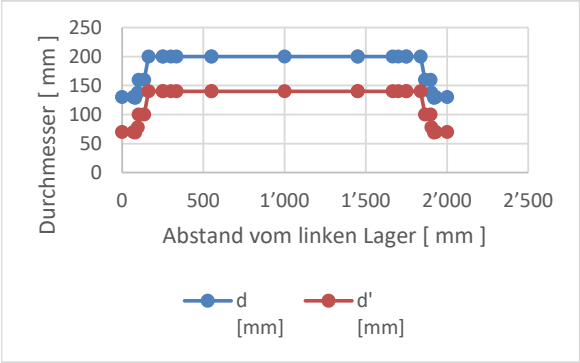
PROSE

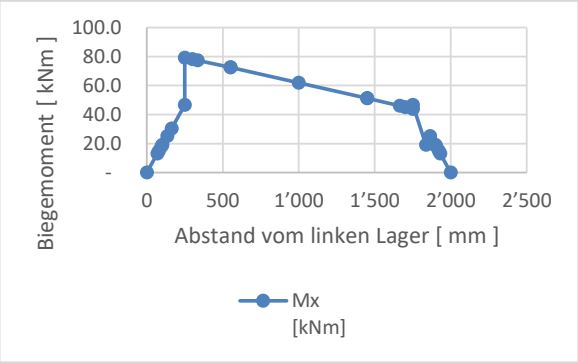
Berechnungsergebnisse für: Kurvenfahrt mit mech. Bremse auf der Achse

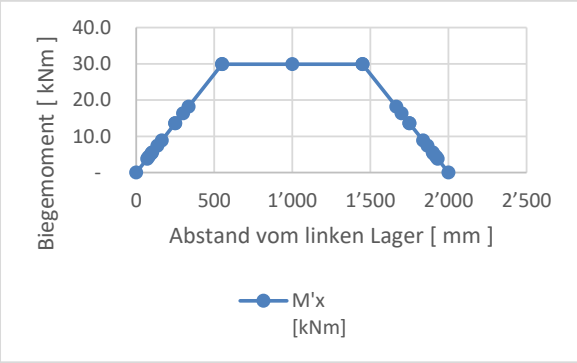
Ort	Querschnitt	Information zum Querschnitt	y [mm]	d [mm]	d' [mm]	D [mm]	r [mm]	r/D [-]	d/D [-]	k: øübergang "t" Nutengrund "g"	k [-]	Mx [kNm]	M'x [kNm]	M'z [kNm]	M'y [kNm]	MR [kNm]	σ [MPa]	Zone	σ_{Max} [MPa]	$\eta=\sigma_{Max}/\sigma$ [-]	$\sigma_{Bohrung}$ [MPa]	$\eta_{Bohrung} = \sigma_{Max}/\sigma$ [-]
Zwischen Lastebene und Messkreisebene	1	Radsatzlagermitte	-	130	70			-	-		1.00	-	-	-	0	-						
	2	Radsatzlagerende	70.0	130	70		-	-	-		1.00	13.0	3.8	2.0	0	17.0	86	3	214.3	2.50	46	4.6
	3	Mulde zum Dichtringsitz	79.5	129	69	160	40	0.31	1.24	t	1.02	14.8	4.3	2.3	0	19.3	102	1	214.3	2.10	55	3.9
	4	Korbbogen R40/R8 zum Dichtringsitz	96.8	138	78	160	8	0.06	1.16	t	1.16	18.0	5.3	2.8	0	23.4	118	3	214.3	1.82	67	3.2
	5	Beginn Dichtringsitz	102.1	160	100	242	-	-	1.51		1.00	19.0	5.5	2.9	0	24.7	73	2	214.3	2.95	45	4.7
	6	Radienbeginn im Dichtringsitz	135.4	160	100	242	25	0.16	1.51	t	1.15	25.2	7.4	3.8	0	32.8	111	2	214.3	1.93	69	3.1
	7	Beginn Radsitz	163.0	200	140			-	-		1.00	30.3	8.9	4.6	0	39.5	66	2	214.3	3.24	46	4.6
	8	Radaufstandspunkt	250.0	200	140			-	-		1.00	46.5	13.6	7.1	0	60.5	101	2	214.3	2.11	71	3.0
Zwischen den Messkreisebenen	9	Radaufstandspunkt	250.0	200	140			-	-		1.00	79.2	13.6	7.1	16.9	94.6	159	2	214.3	1.35	111	1.9
	10	Ende Radsitz	300.0	200	140			-	-		1.00	78.1	16.3	7.1	16.9	96.2	161	2	214.3	1.33	113	1.9
	11	Beginn Übergangsbogen Schaft / Radsitz	335.0	200	140	242	75	0.38	1.21		1.00	77.3	18.2	7.1	16.9	97.3	163	1	214.3	1.31	114	1.9
	12	Mitte der Wellenbremsscheibe	550.0	200	140			-	-		1.00	72.5	29.9	7.1	16.9	104.1	174	2	214.3	1.23	122	1.8
	13	Mitte der Wellenbremsscheibe	550.0	200	140			-	-		1.00	72.5	29.9	7.1	16.9	104.1	174	2	214.3	1.23	122	1.8
	14	Radsatzmitte	1'000.0	200	140			-	-		1.00	61.9	29.9	7.1	16.9	93.6	157	1	214.3	1.37	110	2.0
	15	Mitte der Wellenbremsscheibe	1'450.0	200	140	0		-	-		1.00	51.3	29.9	7.1	16.9	83.3	140	2	214.3	1.54	98	2.2
	16	Mitte der Wellenbremsscheibe	1'450.0	200	140	0		-	-		1.00	51.3	29.9	7.1	16.9	83.3	140	1	214.3	1.54	98	2.2
	17	Beginn Übergangsbogen Schaft / Radsitz	1'665.0	200	140	242	75	0.38	1.21		1.00	46.0	18.2	7.1	16.9	66.8	112	2	214.3	1.92	78	2.7
	18	Ende Radsitz	1'700.0	200	140	0	0	-	-		1.00	45.1	16.3	7.1	16.9	64.1	107	1	214.3	2.00	75	2.9
	19	Radaufstandspunkt	1'750.0	200	140	-	-	-	-		1.00	43.9	13.6	7.1	16.9	60.3	101	2	214.3	2.12	71	3.0
Zwischen Lastebene und Messkreisebene	20	Radaufstandspunkt	1'750.0	200	140	-	-	-	-		1.00	46.5	13.6	7.1	0	60.5	101	2	214.3	2.11	71	3.0
	21	Beginn Radsitz	1'837.0	200	140	0	0	0	1.513	-	1.00	19.0	8.9	4.6	0	28.2	47	2	214.3	4.53	33	6.5
	22	Radienbeginn im Dichtringsitz	1'864.6	160	100	242	25	0.156	1.513	t	1.15	25.2	7.4	3.8	0	32.8	111	2	214.3	1.93	69	3.1
	23	Beginn Dichtringsitz	1'897.9	160	100	242	-	-	1.51	-	1.00	19.0	5.5	2.9	0	24.7	73	2	214.3	2.95	45	4.7
	24	Korbbogen R40/R8 zum Dichtringsitz	1'903.2	138	78	160	8	0.06	1.16	t	1.16	18.0	5.3	2.8	0	23.4	118	3	214.3	1.82	67	3.2
	25	Mulde zum Dichtringsitz	1'920.5	129	69	160	40	0.31	1.24	t	1.02	14.8	4.3	2.3	0	19.3	102	1	214.3	2.10	55	3.9
	26	Radsatzlagerende	1'930.0	130	70	0	-	-	-		1.00	13.0	3.8	2.0	0	17.0	86	3	214.3	2.50	46	4.6
	27	Radsatzlagermitte	2'000.0	130	70	-	-	-	-		1.00	-	-	-	0	-						

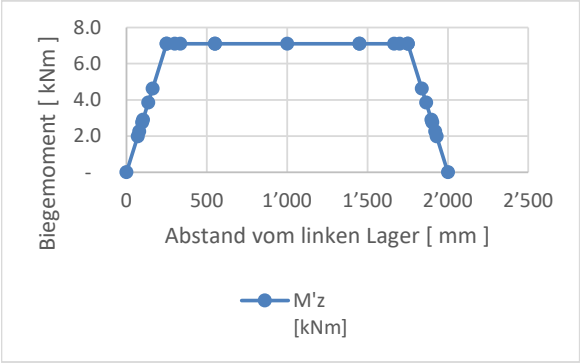
Wandstärke generell [mm] 30 Extremalwerte der Berechnung: max. Spannung [MPa]: **174** min. Sicherheit [-]: **1.23** **122** MPa

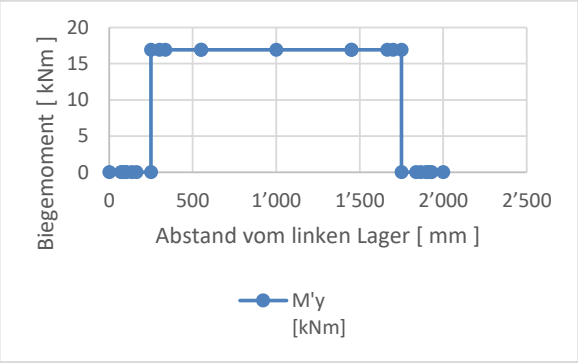
Diagramme für: Kurvenfahrt mit mech. Bremse auf der Achse











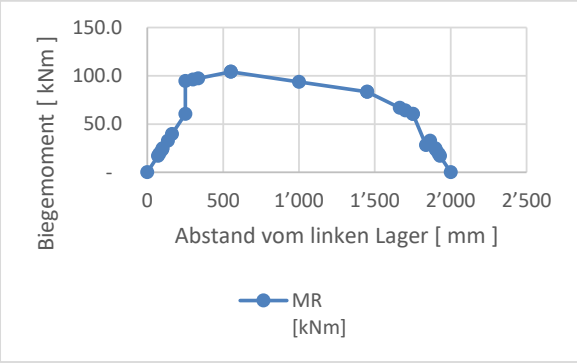
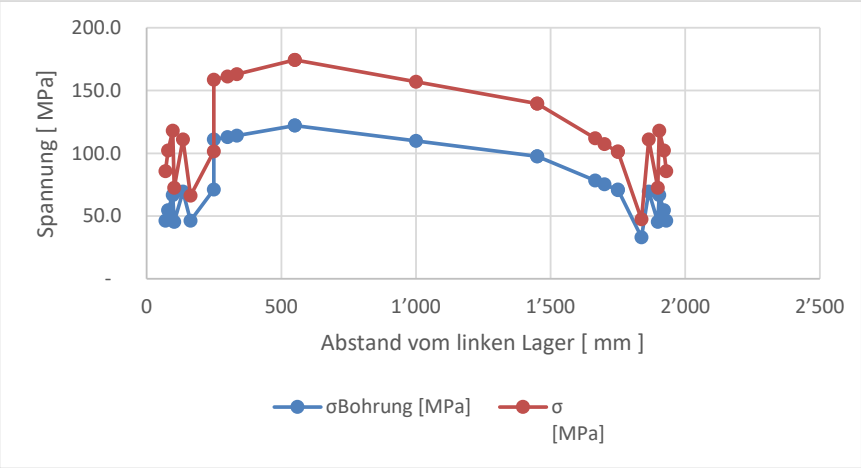
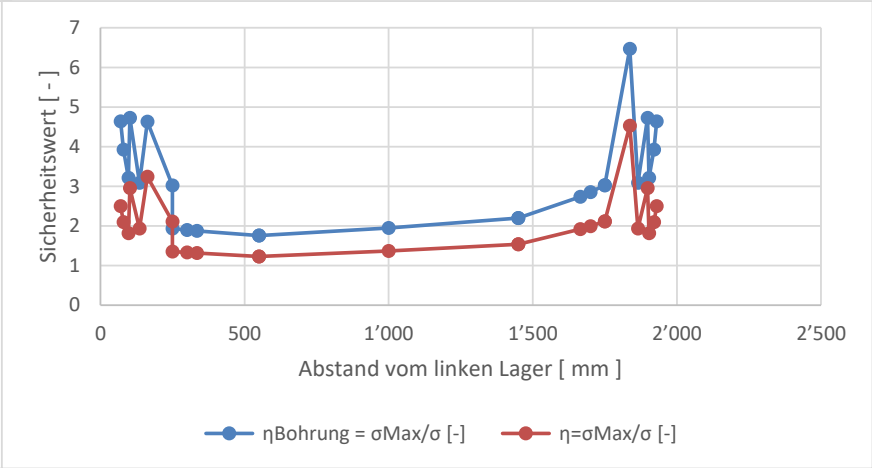


Diagramme für: Kurvenfahrt mit mech. Bremse auf der Achse





Zusammenfassung

Gegenstand des Berichtes ist die Festigkeitsbewertung einer Faserverbundradsatzwelle als nicht führende Laufradsatzwelle auf Grundlage der EN 13103.
Die in diesem Bericht ausgewiesenen Belastungen einer Radsatzwelle mit zwei Bremsscheiben auf der Radsatzwelle (WBS) bzw. mit zwei Bremsscheiben auf den Radnaben (RBS) entsprechen in ihrer Herleitung den Vorgaben der EN 13103. Dies gilt ebenfalls für die ausgewiesenen Spannungen an den Oberflächen der Struktur. Im Gegensatz dazu werden indikative Sicherheitswerte ausgewiesen, weil die exakte Auswertung eine faserverbundspezifische Auswertung bedingt, die nicht Gegenstand dieser Untersuchung ist.
Die Variationsrechnung der Bremsart zeigt deutlich, dass die RBS-Variante gegenüber der WBS-Variante grössere Belastungen in der Welle zur Folge haben und damit eine sichere Abschätzung dieser Anbindung der Wellenbremsscheibe an die Räder darstellt.

Summary

The subject of the report is the strength assessment of a composite wheelset axle as a non-leading wheelset according to EN 13103.
The loading conditions of the wheelset axle specified in this report for two brake discs mounted on the axle and for two brake discs attached to the wheel hub correspond in their derivation to the procedure of EN 13103. This also applies to the indicated stresses on the surfaces of the structure. The given safety values are indicative, since the exact evaluation requires a fiber-composite-specific evaluation, which is not the subject of this study.
The variational calculation of the brake type clearly shows that the wheel hub mounted brake discs introduces greater loads compared to the axle mounted brake discs and thereby represents a more reliable estimation of the connection of the brake mounting for this composite wheelset.

Referenzen

Administrative Unterlagen und übergeordnete Dokumente

[1] EN 13103:2009+A2:2012 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Laufradsatzwellen – Konstruktions- und Berechnungsrichtlinie

[2] DIN-Taschenbuch 491/1 Schienenfahrzeuge 1- Radsätze Beuth Verlag GmbH

Technische Unterlagen

[3] Lieferspezifikation Verbundradsatz, 04-02-00517 Rev. 1.00 PROSE AG, R. Paradies, 14.08.2018

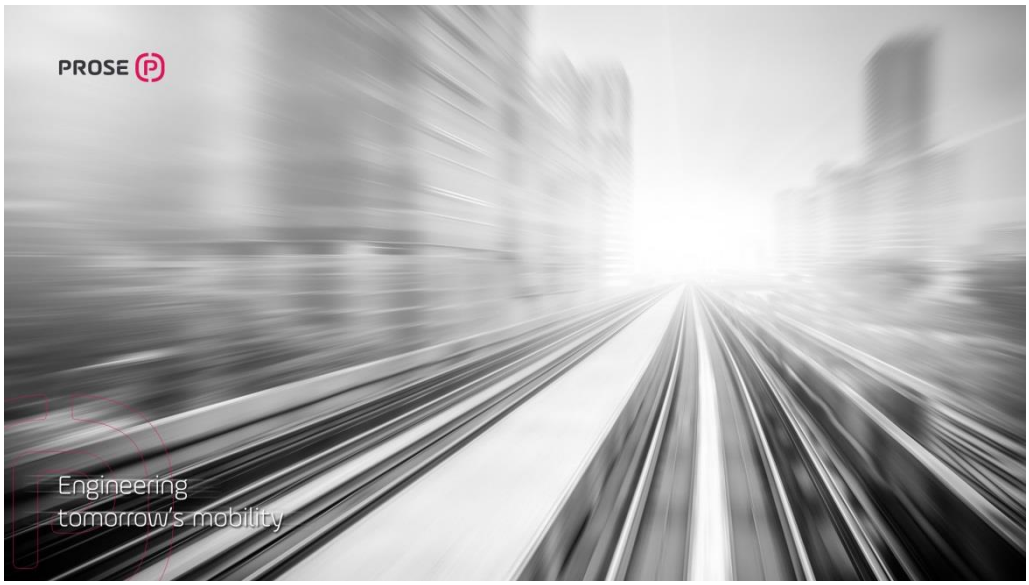
[4] Zeichnung Radsatz kpl für Design 2 FRP-Radsatz, FRPRS_2_RSWelle -A, Carbo-Link AG, T. Good, 19.02.2018

PROSE

Engineering
tomorrow's
mobility

Normenliste Verbundradsatz

Bericht



17.133.00 – EMPA Eidg.Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf
BAFU FRP wheelset

Erstellt	Geprüft	Freigegeben
Dr. R. Paradies	C. Deiss	C. Deiss

Dokumentnummer	Ausgabedatum	Revision	Revisionsdatum	Status
04-02-00529	19.01.2018	1.00	13.08.2018	Released

PROSE AG
Zürcherstrasse 41
8400 Winterthur
Schweiz

www.prose.one

Tel +41 52 262 74 00
Fax +41 52 262 74 01
info.winterthur@prose.one

Verteiler

Firma/Abteilung/Name	Bemerkungen
BAFU Empa Carbo-Link AG PROSE Archiv	

Revisionsindex

	Ersteller	Prüfer	Freigebender	Datum
04-02-00529	R. Paradies	P. Hüberli	C. Deiss	19.01.2018
Rev. 1.00	R. Paradies	C. Deiss	C. Deiss	13.08.2018
Rev.				
Rev.				
Rev.				
Rev.				

Modifikationen

Revision	Beschreibung
1.00	Ergänzung um die "Richtlinie Strukturnachweise Meter- und Spezialspurbahnen"

Dieses Dokument gibt Kenntnis von Gegenständen, an denen die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz), oder eines ihrer Tochterunternehmen Eigentumsrechte hat. Weder Erhalt noch Besitz dieses Dokuments verleihen oder übertragen das Recht, seinen Inhalt als Ganzes, einen Teil davon, eine darin enthaltene Information, oder irgendwelche Gegenstände oder Vorrichtungen zu kopieren oder bekannt zu machen oder irgendwelche Methoden oder Prozesse anzuwenden, ausser nach schriftlicher Genehmigung durch die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz) oder schriftlicher Vereinbarung mit dieser Firma.

Dieses Schreiben wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig

1 Hintergrund 4
1.1 Beschreibung 4
1.2 Anzuwendende Unterlagen 4
2 Referenzen 4
2.1 Generelle bzw. übergeordnete Dokumente 4
2.2 Normen zum Radsatz 5
2.3 Normen zur Radsatzwelle 5
2.4 Normen zum Rad 5
2.5 Normen zu Radsatzscheibenbremsen 5
2.6 Normen/Richtlinien zur Radsatzinstandhaltung 5
2.7 Normen/Richtlinien zu Verbindungstechniken und Materialien 6
2.8 Richtlinien zu Faserverbundstrukturen 6

1 Hintergrund

Im Projekt "Neuartige Radsätze zur Lärm- und Gewichtsreduktion bei Schienengüterwagen aus faserverstärktem Kunststoff (Towards noise and weight reduction by application of FRP wheelsets for freight wagons)" wird die Machbarkeit einer derartigen Radsatzwelle untersucht, mit dem Ziel diese in der Schweiz in den Verkehr bringen zu können. Weil dieser Radsatz vom Bundesamt für Verkehr (BAV) zugelassen werden muss, werden in diesem Bericht die anzuwendenden Unterlagen aufgeführt, die im Rahmen einer Zulassung zu beachten sind. Aufgrund des hohen Neuigkeitsgrades eines Faserverbundradsatzes bei Bahnanwendungen erhebt diese Liste keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

1.1 Beschreibung

Dieses Dokument gibt einen Überblick über die bei der möglichen Zulassung eines Faserverbundradsatzes zu beachtende Gesetze, Normen und Richtlinien.

1.2 Anzuwendende Unterlagen

Generell sind die allgemeinen Normen und die Fachnormen für Schienenfahrzeuge, also die aktuell gültigen technischen Regeln der UIC, SN, EN, und der DIN zu beachten. Dabei ist generell jeweils die neueste gültige Ausgabe zu verwenden. Der betrachtete Radsatz gehört gemäss dem Bundesamt für Verkehr (BAV) zu den Zulassungsgegenständen bei einer Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen [1]. Aus diesem Grund sind die Schweizer Normen und Ausführungsbestimmungen (AB-EBV [2]) den weiteren Normen übergeordnet.

2 Referenzen

2.1 Generelle bzw. übergeordnete Dokumente

[1] *Richtlinie - Zulassung Eisenbahnfahrzeuge (Typenzulassung/Betriebsbewilligung) V2.3 de, 1. Januar 2016, Aktenzeichen: BAV / BAV-511.5-00010/00010, Bundesamt für Verkehr, 3003 Bern, Abteilungen Infrastruktur und Sicherheit*

[2] *AUSFÜHRUNGSBESTIMMUNGEN ZUR EISENBAHNVERORDNUNG (A B - E B V) Stand am 1. Juli 2016, Bundesamt für Verkehr (BAV), 3003 Bern*

[3] *Richtlinie Strukturnachweise Meter- und Spezialspurbahnen V 1.0, 7. Oktober 2014, Aktenzeichen: BAV / BAV-041.4-00003/00009/00002/00004/00002, Bundesamt für Verkehr BAV, Infrastruktur und Sicherheit*

[4] *VERORDNUNG (EU) Nr. 321/2013 DER KOMMISSION vom 13. März 2013 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge — Güterwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union und zur Aufhebung der Entscheidung 2006/861/EG der Kommission*

[5] *VERORDNUNG (EU) Nr. 1302/2014 DER KOMMISSION vom 18. November 2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge — Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union*

[6] *EN 50125-1:2014 Bahnanwendungen - Umweltbedingungen für Betriebsmittel - Teil 1: Betriebsmittel auf Bahnfahrzeugen*

[7] *EN 45545 Teil 1 -Teil 7 Bahnanwendungen - Brandschutz in Schienenfahrzeugen*

2.2 Normen zum Radsatz

[8] *EN 13260:2009+A1:2010 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Radsätze – Produktanforderungen*

2.3 Normen zur Radsatzwelle

[9] *EN 13103:2009+A2:2012 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Laufradsatzwellen – Konstruktions- und Berechnungsrichtlinie*

[10] *EN 13261:2009+A1:2010 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Radsatzwellen – Produktanforderungen*

2.4 Normen zum Rad

[11] *EN 13262:2004+A2:2011 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Räder – Produktanforderungen*

[12] *EN 13979-1:2003+A2:2011 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Vollräder – Technische Zulassungsverfahren – Teil 1: Geschmiedete und gewalzte Räder*

[13] *EN 13715:2006+A1:2010 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Räder – Radprofile*

[14] *UIC 510-5 Technische Zulassung von Vollrädern – Anwendungsdokument für die EN 13979-1*

2.5 Normen zu Radsatzscheibenbremsen

[15] *EN 14535-1:2005+A1:2011, Bahnanwendungen — Bremsscheiben für Schienenfahrzeuge — Teil 1: Wellenbremsscheiben, aufgepresst oder geschrumpft, Abmessungen und Qualitätsanforderungen*

[16] *prEN 14535-2, Bahnanwendungen — Bremsscheiben für Schienenfahrzeuge — Teil 2: Bremsscheiben, die an einem Radreifen, einer Radscheibe oder Radnabe befestigt werden, Abmessungen und Qualitätsanforderungen*

2.6 Normen/Richtlinien zur Radsatzinstandhaltung

[17] *EN 15313:2016 Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle – Radsatzinstandhaltung*

[18] *R RTE 41000 – Instandhaltung Radsätze – Normalspur*
RTE – Regelwerk Technik Eisenbahn gültig ab 01.11.2016, VÖV Verband öffentlicher Verkehr

[19] *VPI 04 - Instandhaltung von Güterwagen Radsätze – Radsätze, Ausgabe 3.1 gültig ab 15.11.2017, VPI – Verband der Güterwagenhalter in Deutschland e.V.*

2.7 Normen/Richtlinien zu Verbindungstechniken und Materialien

[20] *DIN 25201 Teil 1-7:2015 Konstruktionsrichtlinie für Schienenfahrzeuge und deren Komponenten – Schraubenverbindungen*

[21] *VDI 2230 Blatt 1:2015 Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen*

[22] *VDI 2230 Blatt 2:2014 Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Mehrschraubenverbindungen*

[23] *FKM-Richtlinie - Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 6. Auflage VDMA Verlag*

[24] *EN 10204:2004 Metallische Erzeugnisse - Arten von Prüfbescheinigungen*

2.8 Richtlinien zu Faserverbundstrukturen

[25] *Germanischer Lloyd Klassifikations- und Bauvorschriften, II – Werkstoffe und Schweißtechnik, Teil 2 – Nichtmetallische Werkstoffe, Kapitel 1 – Faserverbundwerkstoffe und Kleben*

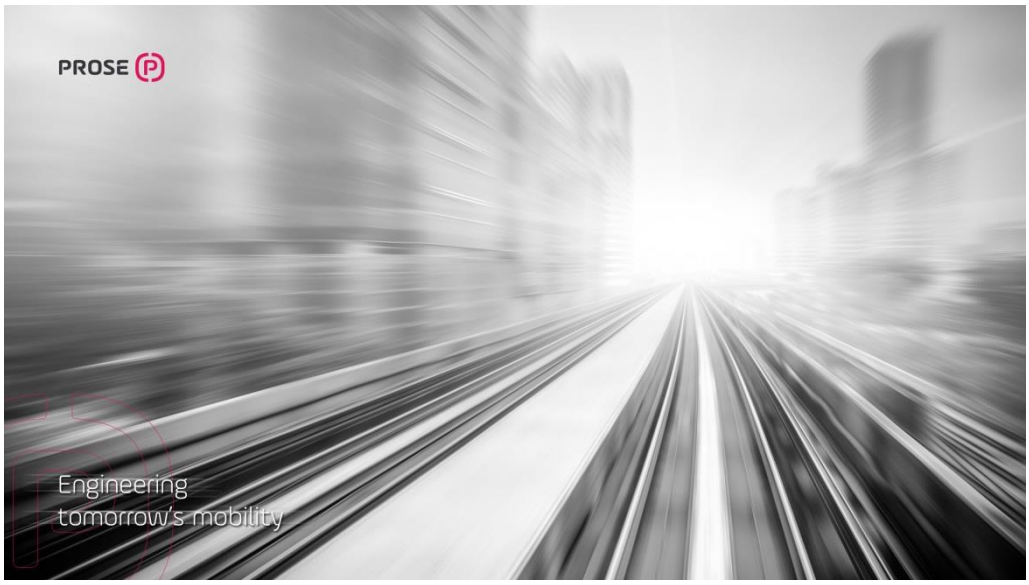
[26] *Zertifizierung von Windenergieanlagen Richtlinie Germanischer Lloyd, Ausgabe 2010*

PROSE

Engineering
tomorrow's
mobility

Nachweisplanung zum Betrieb eines Prototypens des Verbundradsatzes

Bericht



17.133.00 – EMPA Eidg.Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf
BAFU FRP wheelset

Erstellt	Geprüft	Freigegeben
Dr. R. Paradies	C. Deiss	C. Deiss

Dokumentnummer	Ausgabedatum	Revision	Revisionsdatum	Status
04-02-00500	15.08.2018	0.00	15.08.2018	Released

PROSE AG
Zürcherstrasse 41
8400 Winterthur
Schweiz

www.prose.one

Tel +41 52 262 74 00
Fax +41 52 262 74 01
info.winterthur@prose.one

Verteiler

Firma/Abteilung/Name	Bemerkungen
BAFU Empa Carbo-Link AG PROSE Archiv	

Revisionsindex

	Ersteller	Prüfer	Freigebender	Datum
04-02-00500	R. Paradies	C. Deiss	C. Deiss	15.08.2018
Rev.				
Rev.				
Rev.				
Rev.				
Rev.				

Modifikationen

Revision	Beschreibung

Dieses Dokument gibt Kenntnis von Gegenständen, an denen die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz), oder eines ihrer Tochterunternehmen Eigentumsrechte hat. Weder Erhalt noch Besitz dieses Dokuments verleihen oder übertragen das Recht, seinen Inhalt als Ganzes, einen Teil davon, eine darin enthaltene Information, oder irgendwelche Gegenstände oder Vorrichtungen zu kopieren oder bekannt zu machen oder irgendwelche Methoden oder Prozesse anzuwenden, ausser nach schriftlicher Genehmigung durch die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz) oder schriftlicher Vereinbarung mit dieser Firma.

Dieses Schreiben wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig

1 Hintergrund 4
1.1 Beschreibung 4
1.2 Anzuwendende Unterlagen 4
2 Nachweiskonzept zur Betriebsbewilligung eines Prototypens 4
2.1 Entwurfsprüfung 5
2.1.1 Mechanische Lasten 5
2.1.2 Experimentelle Untersuchungen als notwendige Voraussetzung der Entwurfsprüfung 7
2.1.3 Thermische Lasten 8
2.2 Bauteilprüfung und Kontrolle der Lastannahmen 9
3 Umfang der geplanten Nachweise beim Prototypen bzw. für eine mögliche Betriebsbewilligung 9
4 Weiteres Vorgehen nach Abschluss der Prototypenphase 11
5 Referenzen 11
5.1 Generelle bzw. übergeordnete Dokumente und Normen 11
5.2 Technische Unterlagen 11

1 Hintergrund

Im Projekt "Neuartige Radsätze zur Lärm- und Gewichtsreduktion bei Schienengüterwagen aus faserverstärktem Kunststoff (Towards noise and weight reduction by application of FRP wheelsets for freight wagons)" wird die Machbarkeit einer derartigen Radsatzwelle untersucht, mit dem Ziel diese in der Schweiz in den Verkehr bringen zu können. Weil dieser Radsatz vom Bundesamt für Verkehr (BAV) zugelassen werden muss, wird in diesem Dokument eine Nachweisplanung vorgestellt, mit dem der Betrieb eines Prototypens als Voraussetzung für weitere Untersuchungen ermöglicht werden soll. Hinsichtlich der zu erfüllenden Anforderungen eines zulassungskonformen Radsatzes wird auf die Lieferspezifikation Verbundradsatz [11] verwiesen.

Es ist zu betonen, dass formal Anträge auf eine Betriebsbewilligung (auch zu Probefahrten) durch einen Betreiber beim BAV gestellt werden und zudem der Netzzugang, d.h. Zugang zur Infrastruktur durch den jeweiligen Betreiber zu gewähren ist. Es ist daher auch für den Probebetrieb ein Betreiber zu finden, welcher gewillt ist, diese Aufwendungen auf sich zu nehmen.

1.1 Beschreibung

Die geplante Struktur [12] ist im Anhang A dargestellt. Informationen zu dieser sind in [11] enthalten. Dieses Dokument beschreibt die Nachweise, mit denen die Sicherheit des FRP-Radsatzes für einen möglichen Probebetrieb nachgewiesen werden soll.

1.2 Anzuwendende Unterlagen

Generell sind die allgemeinen Normen und die Fachnormen für Schienenfahrzeuge, also die aktuell gültigen technischen Regeln der UIC, SN, EN, und der DIN zu beachten. Dabei ist generell jeweils die neueste gültige Ausgabe zu verwenden. Der betrachtete Radsatz gehört gemäss dem Bundesamt für Verkehr (BAV) zu den Zulassungsgegenständen bei einer Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen [1]. Aus diesem Grund sind die Schweizer Normen und Ausführungsbestimmungen (AB-EBV [2]) den weiteren Normen übergeordnet.

2 Nachweiskonzept zur Betriebsbewilligung eines Prototypens

Der Nachweis setzt sich analog zum Zertifizierungsvorgehen bei metallischen Radsätzen aus einer Entwurfsprüfung und einer Bauteilprüfung zusammen. Zudem sind Betriebsmessungen geplant, mit denen die Annahmen zur Belastung validiert werden sollen. Insbesondere aus den letztgenannten Gründen wird der Einsatz eines Prototypens des Faserverbundradsatzes als erforderlich angesehen. Folgende Abbildung skizziert das geplante Vorgehen:

Abbildung 2-1 Generelle Nachweisthemen

Aufgrund der bisherigen Untersuchungen wird von einer ausreichenden mechanischen Festigkeit und Steifigkeit des Radsatzes ausgegangen, während die thermische Festigkeit infolge der Beharrungsbremsung gemäss TSI-WAG nicht gesichert ist. Infolgedessen ist der Prototyp des Faserverbundradsatzes nur unter kontrollierten Umgebungsbedingungen bzw. unter sensorischer Beobachtung einzusetzen.

2.1 Entwurfsprüfung

2.1.1 Mechanische Lasten

Im Rahmen der Entwurfsprüfung ist die ausreichende Sicherheit aller Komponenten der Radsatzwelle nachzuweisen. Hinsichtlich der zu erfüllenden Anforderungen und Nachweiswege wird auf die Lieferspezifikation Verbundradsatz [11] verwiesen. In diesem Zusammenhang wird insbesondere auf die Bereitstellung belastbarer Festigkeitswerte für die Faserverbundanteile und Verbindungstechniken (Verbindungselemente, strukturelles Kleben) hingewiesen. Die folgenden Abbildungen geben Auskunft über das diesbezüglich geplante Vorgehen.

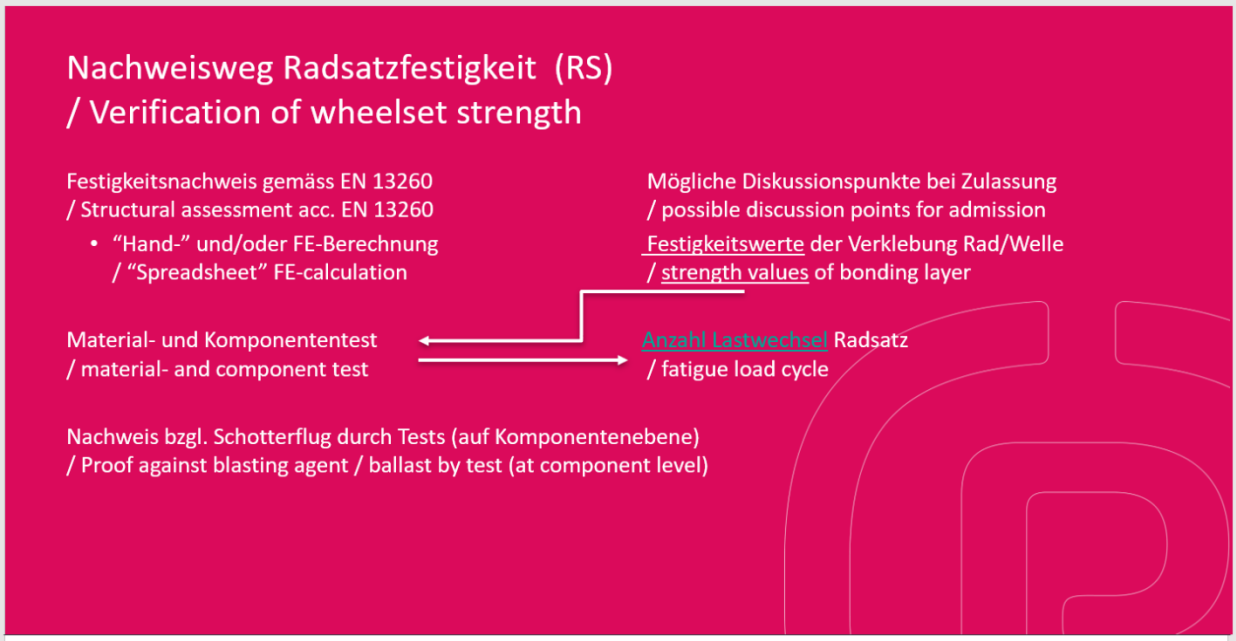


Abbildung 2-2 Nachweisweg auf der Radsatzebene

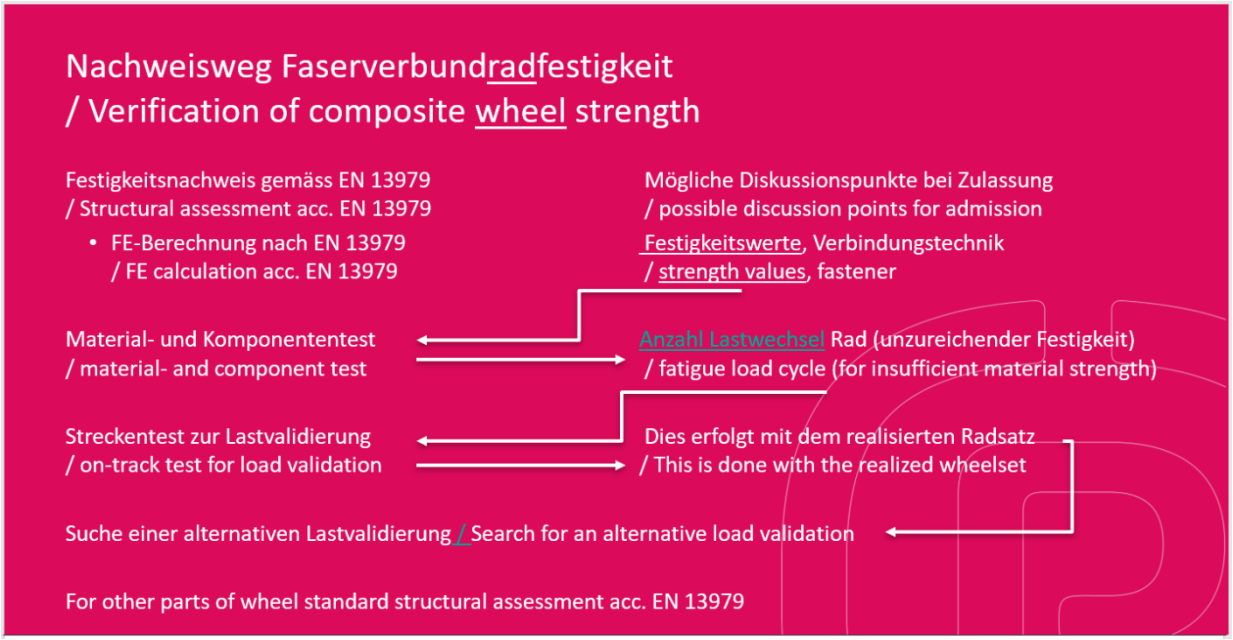


Abbildung 2-3 Nachweisweg auf der Radebene

Abbildung 2-4 Nachweisweg auf der Radsatzwellenebene

2.1.2 Experimentelle Untersuchungen als notwendige Voraussetzung der Entwurfsprüfung

Aufgrund des gegenüber metallischen Radsätzen anderen Werkstoffes ist bei der Nachweisführung eines Faserverbundradsatze den Material- und Komponententests wesentliche Bedeutung beizumessen, wie aus den vorhergehenden Abbildungen (Abbildung 2-2 - Abbildung 2-4) deutlich wird. In Bezug auf die normativen Anforderungen gemäss den zugrundeliegenden Radsatznormen EN 13103 [4], EN 13979 [8] ff. sind im Fall fehlender Ermüdungs- bzw. Dauerfestigkeitswerten entsprechende Tests geplant[1], mit denen die Bemessungswerte der Entwurfsprüfung für die geplante Einsatzdauer des Radsatzes abgedeckt werden. Indikative Angaben zur Versuchsdauer sind aus Abbildung 2-6 ersichtlich. Die detaillierten Anforderungen hinsichtlich der Anzahl Probenkörper, usw. sind den zugrundeliegenden Normen z.B. EN 13261 [5] zu entnehmen, die in der Lieferspezifikation Verbundradsatz [11] zusammengefasst sind. Im Fall fehlender Festigkeitswerte sind je nach Auslegungsdauer des geplanten Radsatzes die in Abbildung 2-6 ausgewiesenen Zeiträume von bis zu ca. 220 Tagen zu berücksichtigen. Im konkretem Fall stehen diese Angaben zum Zeitpunkt der Entwurfsprüfung nicht zur Verfügung und muss daher im Rahmen einer Prototypen- / Baumusterprüfung erbracht werden (siehe Kapitel 2.2).

[1] Die Ermüdungstests werden nicht als notwendige Voraussetzung für einen Prototypenbetrieb angesehen.

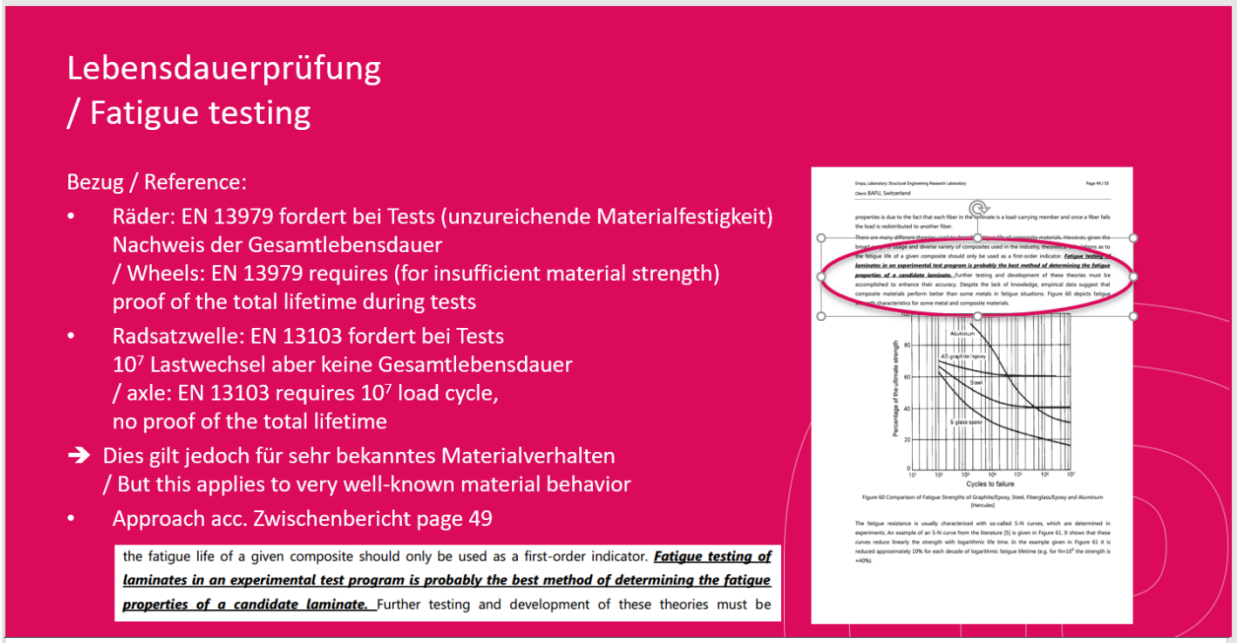
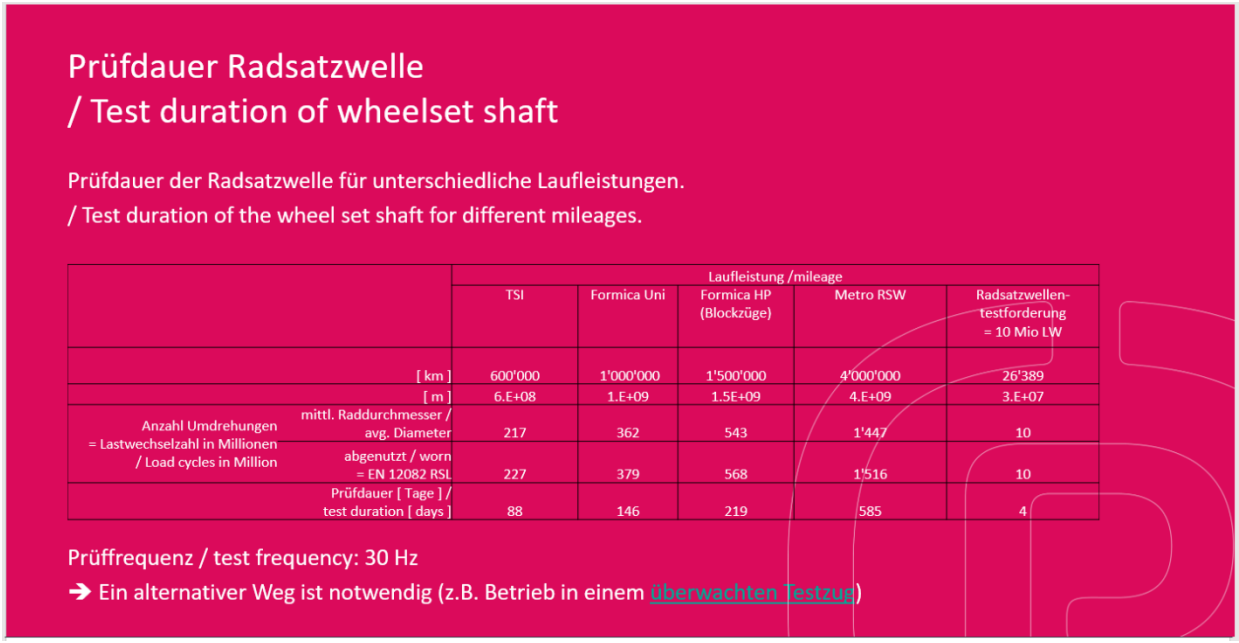


Abbildung 2-5 Informationen zur Ermüdungsfestigkeit von Faserverbundwerkstoffen und Bezug zu Radsatznachweisen



Prüfdauer Radsatzwelle / Test duration of wheelset shaft

Prüfdauer der Radsatzwelle für unterschiedliche Laufleistungen.
/ Test duration of the wheel set shaft for different mileages.

		Laufleistung /mileage				
		TSI	Formica Uni	Formica HP (Blockzüge)	Metro RSW	Radsatzwellen-testforderung = 10 Mio LW
	[km]	600'000	1'000'000	1'500'000	4'000'000	26'389
	[m]	6.E+08	1.E+09	1.5E+09	4.E+09	3.E+07
Anzahl Umdrehungen = Lastwechselzahl in Millionen / Load cycles in Million	mittl. Raddurchmesser / avg. Diameter	217	362	543	1'447	10
	abgenutzt / worn = EN 12082 RSL	227	379	568	1'516	10
	Prüfdauer [Tage] / test duration [days]	88	146	219	585	4

Prüffrequenz / test frequency: 30 Hz
➔ Ein alternativer Weg ist notwendig (z.B. Betrieb in einem überwachten Testzug)

Abbildung 2-6 Angaben von Prüfdauern zum Labornachweis von Faserverbundwerkstoffanteilen bei einer Faserverbundradsatzwelle

2.1.3 Thermische Lasten

Faserverbundwerkstoffe mit duromerer Matrix weisen gegenüber Metallen eine geringere Temperaturstabilität aus. Aus diesem Grund ist eine Kontrolle der thermischen Stabilität des Faserverbundradsatzes unter Berücksichtigung der für diesen Radsatz definierten Temperaturbelastungen erforderlich. Es ist daher geplant die Ergebnisse der numerischen Berechnung durch Vergleiche mit geeigneten experimentellen Untersuchungen (z.B. Bremsversuche an ähnlichen Wellenbremsscheiben) zu validieren. Diese Notwendigkeit resultiert aus dem Umstand, dass Berechnungen des thermischen Verhaltens in der Regel nur als Auftragsarbeit bei diversen Hersteller im Rahmen einer Lieferung ihrer Produkte erfolgt, während die frei zugänglichen Unterlagen zur Berechnung des thermischen Verhaltens Klotzge-

bremste Räder behandelt [9]. Aufgrund fehlender Referenzmessungen zum Zeitpunkt der Machbarkeitsprüfung konnte dieser Abgleich noch nicht durchgeführt werden.

2.2 Bauteilprüfung und Kontrolle der Lastannahmen

Aufgrund der geringen Datenbasis zum Ermüdungsverhalten von Faserverbundstrukturen sind auf der Radsatzebene generell die in den wesentlichen Radsatznormen EN 13103 [4], EN 13261 [5], EN 13979 [8], EN 13262 [7] definierten Komponententest vorgesehen. Diese sind jedoch erst nach einer erfolgreichen Prototypenphase geplant, in welcher zwei realisierte Radsätze in einem Fahrzeug unter Beobachtung oder Testfahrzeug/-zug eingesetzt werden sollen. Es ist eine vollständige Instrumentierung eines Radsatzes analog zu einem Messradsatz sowie eine Instrumentierung der Radsatzwelle wie bei einer Radsatztorsionsmessung (d.h. Biege- und Torsionsmessstellen) gemäss [6] geplant. Zudem ist die Messung der Temperaturen am Ort der Wellenbremsscheiben zur Validierung der thermischen Belastungen infolge Beharrungsbremsung geplant. Letzteres kann ggf. zum Teil auch durch geeignete Temperaturmessungen (z.B. 3x-Stoppbremsung) an ähnlichen Wellenbremsscheiben erfolgen. Sofern nicht bereits auf die weitere Instrumentierung wie Beschleunigungssensoren, usw. zurückgegriffen werden kann, die bei Streckentests immer appliziert sind, ist deren Applikation ebenfalls vorzusehen. Daraus resultieren die in Tabelle 2-1 aufgeführten klassischen Betriebsmessungen, welche im Rahmen der Prototypenphase entweder als Bauteilprüfung oder zur Validierung der Lastannahmen als Streckenmessung geplant sind. Grundlage dieser Betriebsmessung ist die Bereitschaft eines Betreibers in einem seiner Fahrzeuge derartige Faserverbundradsätze einzubauen, sowie die Erlaubnis seitens der Zulassungsstellen ein derartiges Fahrzeug für diese Messfahrten zuzulassen.

Radsatzkomponente	Nachweisthematik	Betriebsmessung	Regelwerk
Rad	Radaufstands- und Querkräfte	Messradsatzuntersuchung	EN 14363 [3]
Radsatzwelle	Biege- und Torsionsspannungsmessung	Biege-Torsionsuntersuchung	DIN Taschenbuch 491/1 [6]
Radsatz in der Nähe der Wellenbremsscheibe	Temperaturentwicklung /-stabilität	Bremstechnische Prüfungen	UIC 544-1 [10]

Tabelle 2-1 Überblick geplanter Betriebsmessungen in der Prototypen- bzw. Zulassungsphase

3 Umfang der geplanten Nachweise beim Prototypen bzw. für eine mögliche Betriebsbewilligung

Der Umfang der geplanten Nachweise beim Prototypen setzt sich neben den Dokumenten der Entwurfsprüfung aus den klassischen Labornachweisen zum Material bzw. der Komponente und den Betriebsmessungen im Rahmen der Bauteilprüfung und Kontrolle der Lastannahmen zusammen. Auf Grundlage der in der Regel einzureichenden Zulassungsunterlagen im Fall eines Radsatzwechsels sind in Tabelle 3-1 die Unterlagen aufgeführt, die derzeit für den Prototypenbetrieb bzw. einer möglichen Betriebsbewilligung des Faserverbundradsatzes geplant sind. Während bei einem möglichen Prototypenbetrieb noch nicht alle Unterlagen vorliegen müssen (siehe mit * markierte Positionen), sind diese im Fall eines Zulassungsantrags zur allgemeinen Betriebsbewilligung erwartungsgemäss vorzulegen.

Position	Laufnr. mit Position	Bauteil / funktionale Anforderung	Detaillierte Anforderung	Nachweis / Dokument	Regelwerk
0		**Allgemein**			
1		**Fahrtechnik**			
2		**Fahrzeugaufbau**			
3		**Zug und Stosseinrichtungen**			
4		**Drehgestell und Fahrwerk**			
5		**Radsatz / Radsatzlager**			
	501.1	Radsatzwellen Zeichnung Radsätze samt Berechnung der Achsen führender Radsatz	Zeichnung des Radsatzes (einschl. Masse- und Werkstoff-angaben), Einhaltung der Produktanforderungen für Radsatzwellen und Radscheibe	entfällt, da Güterwagenlaufradsätze als nicht führend betrachtet werden.	EN 13260
	501.2	Radsätze Zeichnung samt Berechnung der Achsen alle Radsätze	Zeichnung des Radsatzes (einschl. Masse- und Werkstoff-angaben), Einhaltung der Produktanforderungen für Radsatzwellen und Radscheibe	Zeichnung des Faserverbundlaufradsat-zes mit metallischen Radreifen inklusive der Materialspezifikationen	EN 13260
	501.3	Festigkeitsnachweis der Achsen Verbin-dung Rad zur Welle sowie Toleranzunter-suchungen bzgl. Spurweiteneinhaltung	Zeichnung des Radsatzes (einschl. Masse- und Werkstoff-angaben), Einhaltung der Produktanforderungen für Radsatzwellen und Radscheibe	Berechnungsbericht und Toleranzunter-suchung inklusive Materialquellen	EN 13260, EN 13715
	502	Radsatz Zeichnung Radscheibe	Zeichnung der Radscheibe (einschl. Masse- und Werkstoff-angaben), Einhaltung der Produktanforderungen für Kombination mit Verbundradsatzwelle	Zeichnungen Radscheibe mit Verbindung zur Welle und Radreifen	EN 13260
	503	Radsatz Radsatzwelle	Radsatzwellenberechnung	"Radsatzwellenberechnung" nach EN13103 "Faserverbundradsatzwellenberechnung"	EN 13103
	503.1	Radsatz Zeichnung Radsatzwellen	Zeichnung der Radsatzwelle (einschl. Masse- und Werk-stoffangaben), Einhaltung der Produktanforderungen für Radsatzwellen	Zeichnung der Faserverbundradsatzwelle inklusive der Materialspezifikationen (u.a. für Insert)	EN 13103
	503.2	Radsatz Zeichnung Radsatzwellen	Nachweis der Festigkeitswerte, Einhaltung der Produktan-forderungen für Radsatzwellen	Nachweisdokumente, Ermüdungstestbe-richte auf Material und Komponenten-ebene*	EN 13103, EN 13261
	504	Radsatz Zeichnung Rad	Zeichnung "Faserverbundrad" mit allen Toleranzen Schnittstellen, etc.	Zeichnung "Faserverbundrad"	EN 13715, EN 13262, UIC 510-5
	504.1	Festigkeitsnachweis für die Vollräder	Nachweis der mechanischen Eigenschaften jeweils für den Nenndurchmesser und das Betriebsgrenzmass	"Faserverbundradberechnung"	EN 13979-1, EN 13262, UIC 510-5
	504.2	Festigkeitsnachweis für die Vollräder	Nachweis der mechanischen Eigenschaften jeweils für den Nenndurchmesser und das Betriebsgrenzmass	"metallischer Radreifenberechnung"	EN 13979-1,EN 13262, UIC 510-5
	503.3	Festigkeitsnachweis für die Vollräder	Nachweis der mechanischen Eigenschaften jeweils für den Nenndurchmesser und das Betriebsgrenzmass	"Berechnungsbericht der Verbindungs-elemente"	EN 13979-1, EN 13262, UIC 510-5, DIN 25201
	504.4	Radsatz Zeichnung Rad	Nachweis der Festigkeitswerte, Einhaltung der Produktan-forderungen für Räder	Nachweisdokumente, Ermüdungstestbe-richte auf Material und Komponenten-ebene*	EN 13979-1, EN 13262, UIC 510-5
	504.5	Akustiknachweis für die Vollräder	Nachweis der akustischen Eigenschaften	"Berechnungsbericht der akustischen Eigenschaften"*	EN 13979-1, EN 13262, UIC 510-5
6		**Bremseinrichtungen**			
	601	Radsätze Zeichnung samt Bremsscheibe		Radsatzzeichnung mit Angaben zur Bremse und Torsionsrohr sowie Isolation gegenüber FRP-Körper	UIC 544-1
	601.1	Thermische Berechnung der Wellen-bremsscheibe	Thermische Berechnung der Wellenbremsscheibe	Berechnungsbericht zur Simulation der Wärmeentwicklung an der Wellenbrems-scheibe beim CFK-Verbundradsatz	UIC 544-1
	601.2	Bremsversuche zur Bestimmung der Temperatur bzw. Validierung der Berechnungen	Bremsversuche zur Bestimmung der Temperatur bzw. Validierung der Berechnungen	Bericht einer Bremsmessung mit Temperaturschrieb	UIC 544-1
	601.3	Festigkeitsnachweis der Wellenbremsbe-festigung	Festigkeitsnachweis von der Wellenbremsscheibe bis zum Rad	Festigkeitsnachweis Torsionsrohr und aller Verbindungselemente	UIC 544-1, DIN 25201, EN 15827
7		**Überwachungsbedürftige Anlagen**			
8		**Stromabnehmer**			
9		**Fenster**			
10		**Türen**			
11		**Übergang**			
12		**Energieversorgung / EMV**			
13		**Steuerungstechnik / Software**			
14		**Trink- und Abwasseranlagen**			
15		**Umweltschutz**			
16		**Brandschutz und Evakuation**			
17		**Arbeitsschutz**			
18		**Fahrzeugbegrenzung**			
19		**Sicherheitstechnische Einrichtungen**			
20		**Tankanlagen**			
21		**Ladegutbehälter und Druckentleerung**			
22		**Ladesicherung**			
23		**Anschriften**			
24		**Fügetechnik**			
25		**Instandhaltung**			
26		**Wartungsbuch**			
27		**Betriebshandbuch = "Bedienerhand-buch"**			
28		**Ausstattungen**			
29		**Störungen und Unfälle**			

Tabelle 3-1 Entwurf des Nachweisplans bzw. der einzureichenden Nachweisdokumente * Diese Nachweise werden nicht als notwendige Voraussetzung für einen Prototypenbetrieb angesehen.

4 Weiteres Vorgehen nach Abschluss der Prototypenphase

Nach Auswertung der Ergebnisse aus der Prototypenphase wird über das weitere Vorgehen entschieden. Spätestens zu diesem Zeitpunkt wird im Fall einer möglichen Zulassungsbestrebung die Kontaktaufnahme mit dem BAV empfohlen.

5 Referenzen

5.1 Generelle bzw. übergeordnete Dokumente und Normen

[1] *Richtlinie - Zulassung Eisenbahnfahrzeuge (Typenzulassung/Betriebsbewilligung) V2.3 de, 1. Januar 2016, Aktenzeichen: BAV / BAV-511.5-00010/00010, Bundesamt für Verkehr, 3003 Bern, Abteilungen Infrastruktur und Sicherheit*

[2] *AUSFÜHRUNGSBESTIMMUNGEN ZUR EISENBAHNVERORDNUNG (A B - E B V) Stand am 1. Juli 2016, Bundesamt für Verkehr (BAV), 3003 Bern*

[3] *EN 14363:2016 Bahnanwendungen - Fahrtechnische Prüfung für die fahrtechnische Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen – Prüfung des Fahrverhaltens und stationäre Versuche*

[4] *EN 13103:2009+A2:2012 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Laufradsatzwellen – Konstruktions- und Berechnungsrichtlinie*

[5] *EN 13261:2009+A1:2010 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Radsatzwellen – Produktanforderungen*

[6] *DIN-Taschenbuch 491/1, Schienenfahrzeuge 1, Radsätze, 2014 Beuth Verlag GmbH*

[7] *EN 13262:2004+A2:2011 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Räder – Produktanforderungen*

[8] *EN 13979-1:2003+A2:2011 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Vollräder – Technische Zulassungsverfahren – Teil 1: Geschmiedete und gewalzte Räder*

[9] *ORE Bericht B169 RP 1 „Thermische Grenzen der Räder und Bremsklötze“, Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes, September 1987*

[10] *UIC 544-1:2013 Bremse - Bremsleistung*

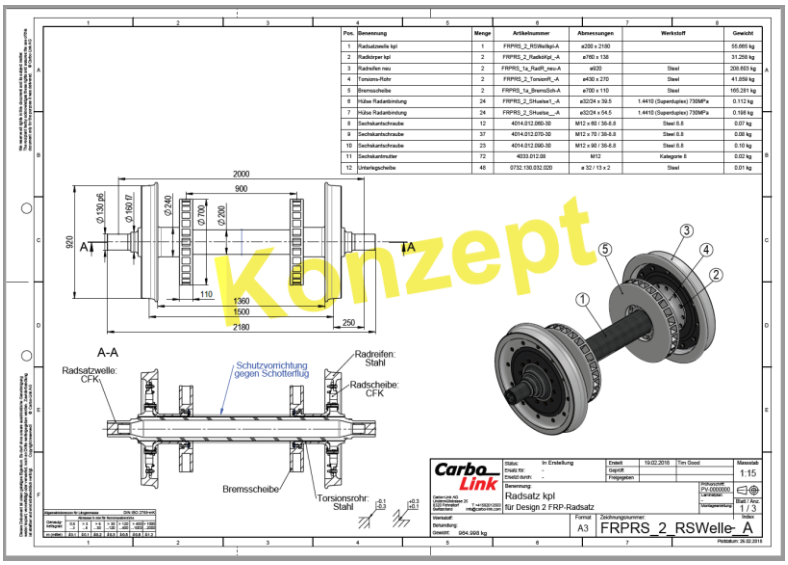
5.2 Technische Unterlagen

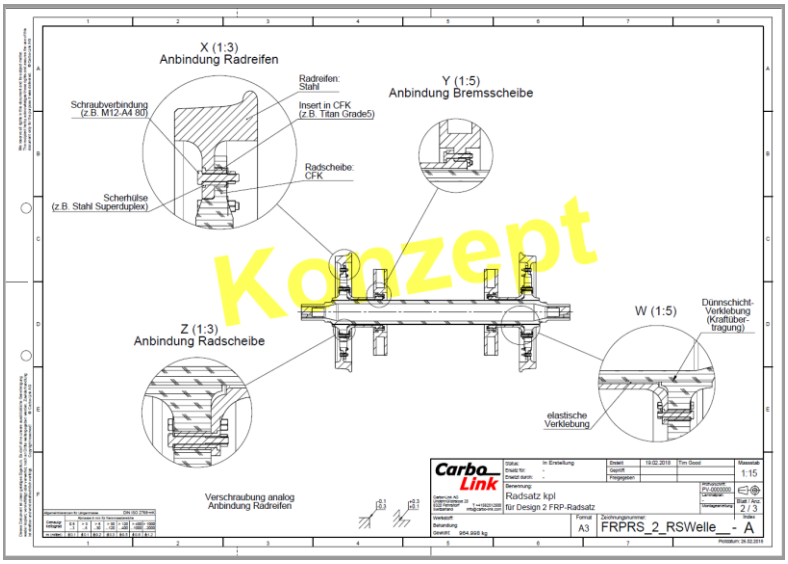
[11] *Lieferspezifikation Verbundradsatz, PROSE 04-02-00517 Rev. 1.0, R. Paradies, 14.08.2018*

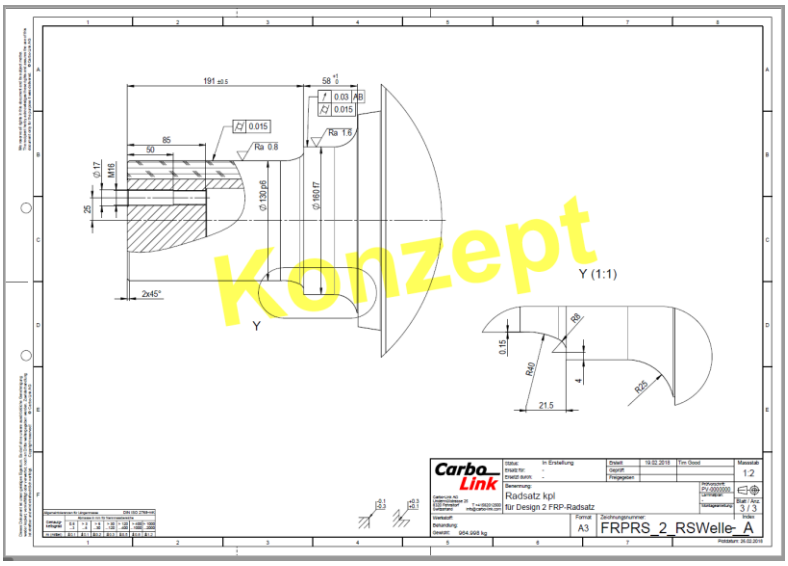
[12] *Radsatz kpl für Design 2 FRP-Radsatz, FRPRS_2_RSWelle -A, Carbo-Link AG, T. Good, 19.02.2018*

A Technischer Anhang

A.1 Zeichnung des Radsatzes [12]







Engineering
tomorrow's
mobility

Simulation der Wärmeentwicklung an der Wellenbremsscheibe beim FRP-Verbundradsatz

Bericht

17.133.00 – EMPA Eidg.Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf
BAFU FRP wheelset

Erstellt	Geprüft	Freigegeben
R. Paradies	M. Schmid	C. Deiss

Dokumenten-Nummer	Ausgabe Datum	Revision	Revisions Datum	Status
04-03-01719	22.08.2018	0.00	22.08.2018	Released

PROSE AG
Zürcherstrasse 41
8400 Winterthur
Schweiz

www.prose.one

Tel +41 52 262 74 00
Fax +41 52 262 74 01
info.winterthur@prose.one

Verteiler

Firma/Abteilung/Name	Bemerkungen
BAFU Empa Carbo-Link AG PROSE Archiv	

Revisions Index

	Ersteller	Prüfer	Freigeber	Datum
04-03-01719	R. Paradies	M. Schmid	C. Deiss	22.08.2018
Rev.				
Rev.				
Rev.				
Rev.				
Rev.				

Modifikationen

Revision	Beschreibung

Dieses Dokument gibt Kenntnis von Gegenständen, an denen die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz), oder eines ihrer Tochterunternehmen Eigentumsrechte hat. Weder Erhalt noch Besitz dieses Dokuments verleihen oder übertragen das Recht, seinen Inhalt als Ganzes, einen Teil davon, eine darin enthaltene Information, oder irgendwelche Gegenstände oder Vorrichtungen zu kopieren oder bekannt zu machen oder irgendwelche Methoden oder Prozesse anzuwenden, ausser nach schriftlicher Genehmigung durch die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz) oder schriftlicher Vereinbarung mit dieser Firma.

Dieses Schreiben wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

1 Einführung 4

2 Abkürzungsverzeichnis 4

3 Anzuwendende Unterlagen 5

4 Berechnungsmodell 5

4.1 Geometrie 5

4.2 Koordinatensystem 7

4.3 Finite-Elemente-Modell 7

4.4 Materialkennwerte von Wellenbremsscheibe und Torsionsrohr 8

4.5 Thermische Randbedingungen 9

4.6 Weitere Modell- bzw. Berechnungsparameter 11

5 Lastfälle und Randbedingungen 12

5.1 Bremsung 12

5.1.1 Stoppbremsung 12

5.1.2 Beharrungsbremsung 13

6 Resultate 16

6.1 Stoppbremsung 17

6.1.1 Referenzuntersuchung zur Stoppbremsung 17

6.1.2 Stoppbremsung 21

6.1.3 Stoppbremsung mit geringer Konvektion 23

6.2 Beharrungsbremsung 24

6.2.1 Beharrungsbremsung ohne Stoppbremsungen 24

6.2.2 Beharrungsbremsung mit Stoppbremsungen 26

7 Deformationsberechnung 28

8 Alternative Anwendungen 31

9 Zusammenfassung 32

10 Literatur 33

10.1 Administrative Unterlagen und übergeordnete Dokumente 33

10.2 Technische Unterlagen 33

1 Einführung

Dieser Bericht behandelt die Berechnung der Temperaturverteilung an einer typischen Wellenbremsscheibe (WBS) für Güterwagenradsätze mit einer Radsatzlast (RSL) von 22.5t gemäss der Spezifikation zum Projekt "Neuartige Radsätze zur Lärm- und Gewichtsreduktion bei Schienengüterwagen aus faserverstärktem Kunststoff (Towards noise and weight reduction by application of FRP wheelsets for freight wagons)" (siehe [4]). In der Regel (idR) sind mit Hilfe thermischer Simulationen die erforderlichen Wärmekapazitäten für die folgenden zwei Fälle nachzuweisen:

1. Drei aufeinanderfolgende Notbremsen aus der Maximalgeschwindigkeit bis zum Stillstand mit voll beladenem Fahrzeug unter der Verwendung der mechanischen Bremse
2. Beharrungsbremse als Gefällebremsung gemäss TSI-Wag [2]

Die thermischen Simulationen müssen alle möglichen Kombinationen der Abnutzungsgrade der wesentlichen Radsatzkomponenten abdecken. Somit sind generell Räder und Wellenbremsscheibe im Neuzustand und im abgefahrenen Zustand zu betrachten. Der kritischste Zustand stellt dabei die abgenutzte Wellenbremsscheibe (mit geringerer Breite und somit geringerer Wärmekapazität als im Neuzustand) in Kombination mit dem neuen Rad (geringere Umfangsgeschwindigkeit als beim abgenutzten Rad) dar. Auch resultiert aus einer Dauerbremsung (Beharrungsbremsung) z.T. mit nachgeschalteter Stoppbremsung die höchste Belastung. Gemäss TSI-Wag [2] wird eine Beharrungsbremsung ohne nachgeschalteter Stoppbremsung gefordert. Eine Beharrungsbremse mit anschliessender Stopp- bzw. Anhaltebremse ist normativ nur in der AB-EBV Abschnitt "Nicht interoperable Fahrzeuge" [3] Artikel: Zahnradbahnfahrzeuge in Position 2.2.3 beschrieben. In Tabelle 1-1 sind normative bzw. übliche Bremsanforderungen zusammengetragen, wobei letztere stellenweise als Nachweis von Betreibern verlangt werden.

Bremsszenario	**Quelle**
TSI WAG Notbremsanforderung nach Kapitel 4.2.4.3.3	[2]
TSI WAG Beharrungsbremse nach Kapitel 4.2.4.3.3	[2]
TSI-WAG Beharrungsbremse nach Anhang Tabelle C.4	[2]
2 Stoppbremsungen aus 120 km/h mit 1.177 m/s^2 mit zwischengeschalteter Beschleunigungsphase auf 120 km/h mit 0.2 m/s^2	
TSI WAG Beharrungsbremse nach Kapitel 4.2.4.3.3 plus sofortige Stoppbremsung mit 1.177 m/s^2	
TSI WAG Beharrungsbremse nach Kapitel 4.2.4.3.3 plus Beschleunigung auf 120 km/h mit 0.2 m/s^2 und danach sofortige Stoppbremsung mit 1.177 m/s^2	

Tabelle 1-1 Bekannte Bremsszenarien im Güterwagenbereich

Als begrenzender Faktor dieser Untersuchung wird die maximale Temperatur in der Nähe der Radsatzwelle betrachtet. Diese Temperatur darf den maximal zulässigen Wert des Faserverbundwerkstoffes sowohl als kurzzeitiger Wert als auch als Dauerwert nicht überschreiten. In Abhängigkeit der Matrixanteile weisen Duromere Faserverbundwerkstoffe zulässige Einsatztemperaturen von 80°C bis 120°C auf.

2 Abkürzungsverzeichnis

In diesem Bericht werden folgende Abkürzungen verwendet:

Abkürzung	Bedeutung
TSI WAG	technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems Güterwagen
tbc	To be confirmed = zu bestätigen
FRP	Fiber reinforced plastic = Faserverbundwerkstoff
WBS	Wellenbremsscheibe

Tabelle 2-1 Verwendete Abkürzungen

3 Anzuwendende Unterlagen

Die anzuwendenden Unterlagen und Quellen, sind in Kapitel 10 (S. 33) zusammengefasst.

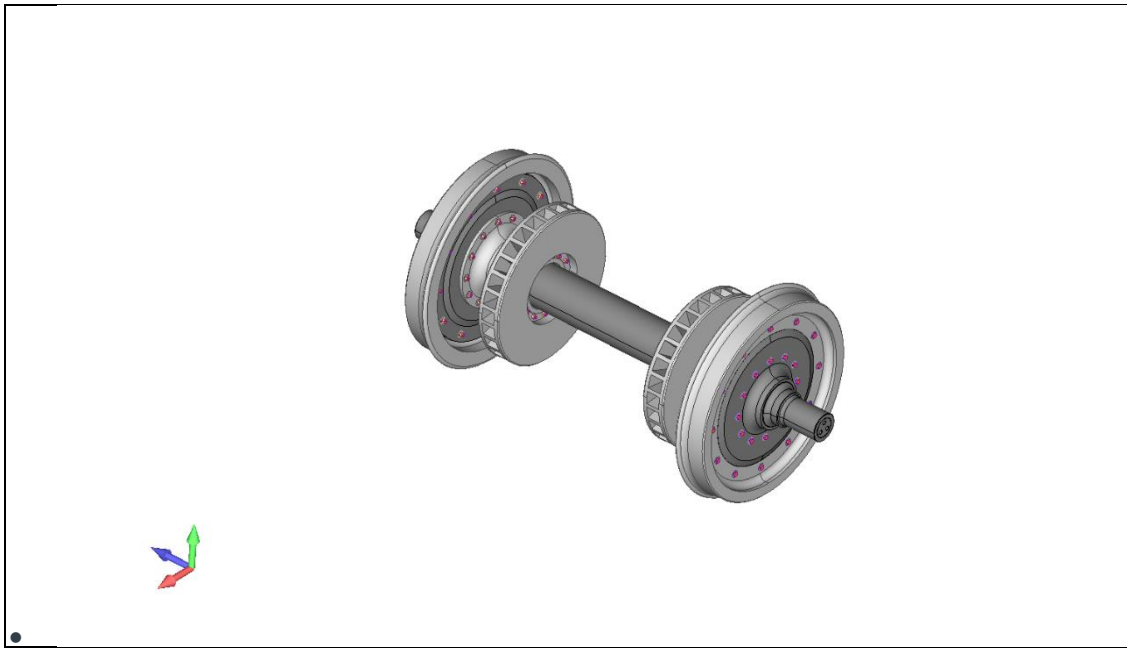
4 Berechnungsmodell

Alle Pre- und Postprocessing-Schritte erfolgten mit dem Programm FEMAP 11.4 (SIEMENS PLM Software). Als Solver wurde NX Nastran 11 verwendet.

4.1 Geometrie

Bei der Faserverbundradsatzwelle ist aus thermischen Gründen der Einsatz von Wellenbremsscheiben (WBS) geplant, die aus mechanischen Überlegungen jeweils seitlich am Rad befestigt werden sollen (siehe [4]). Das Halbmodell dieser Wellenbremsscheibe mit Befestigung ist in Abbildung 4-2 ersichtlich. Weil für diese thermische Analyse keine konkrete Wellenbremsscheibe für Güterwagen mit einer Radsatzlast von 25t (nominal 22.5t) zur Verfügung stehen und erfahrungsgemäss nicht auf die Geometrie von Wellenbremsscheiben Zugriff genommen werden kann, wird die Geometrie einer bekannten Wellenbremsscheibe (siehe Abbildung 4-3) für einen 22.5t-Radsatz herangezogen. Das bezüglich der Wellenachse rotationssymmetrisch aufgebaute Modell beinhaltet folgende Vereinfachungen:

- Kleine Details, wie Ölabpressbohrung, Schrauben und Nuten sowie die Ausnahme im Bereich der Bohrungen werden nicht modelliert.
- Auf Übergangsradien zwischen den einzelnen Flächen wird verzichtet.



- Abbildung 4-1: Geometrie des FRP-Radsatzes mit idealisierten WBS

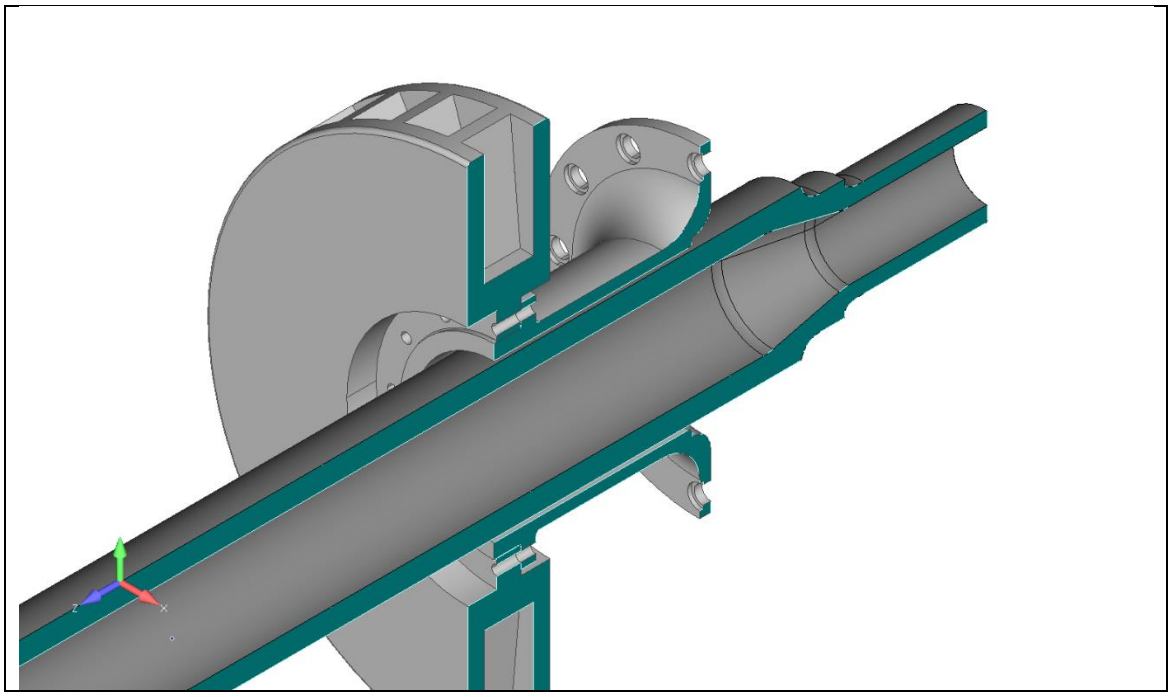


Abbildung 4-2: Geometrie der idealisierten WBS (inkl. Befestigung) beim geplanten Faserverbundradsatz

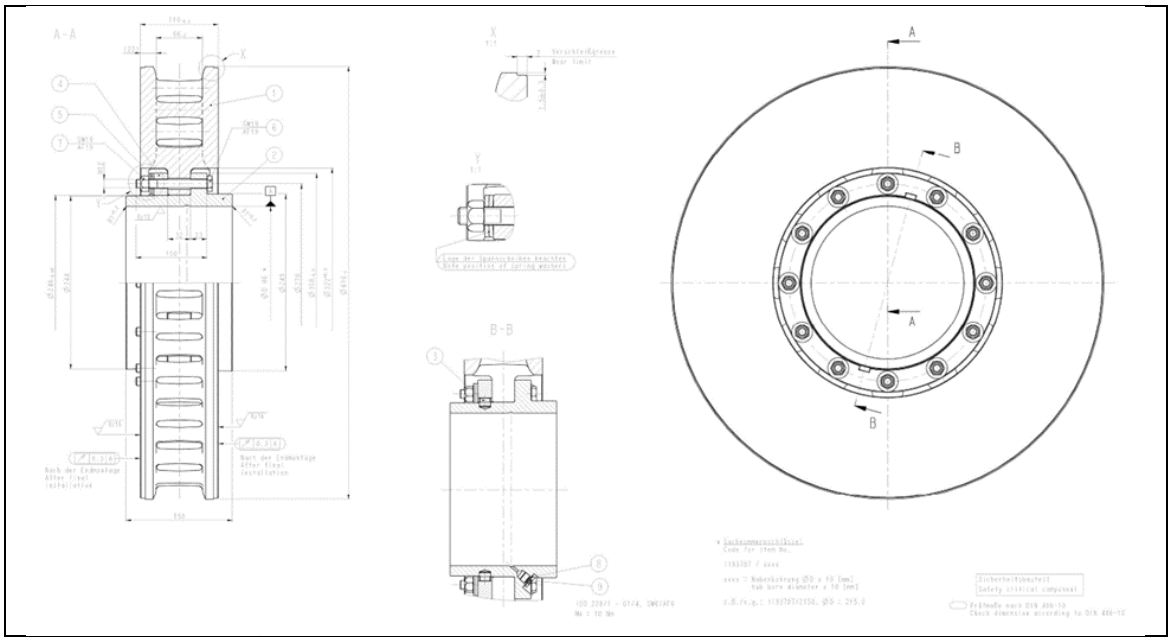


Abbildung 4-3: Geometrie der verwendeten WBS (aus Referenzprojekt)

Auf Grundlage der Geometrie in Abbildung 4-3 wird das FE-Modell als Viertelmodell der Wellenbremsscheibe (WBS) zusammen mit dem sogenannten Torsionsrohr aufgebaut (siehe Abbildung 4-4[1]). Das FE-Modell bildet dabei Masse und Massenträgheit der Wellenbremsscheibe mit einer Abweichung von < 4% ab. Gegenüber der WBS im Neuzustand nimmt deren Masse im abgenutzten Zustand um 17% ab. Aus diesem Grund wird nur die Geometrie der abgefahrenen Wellenbremsscheibe betrachtet, weil dies den thermisch kritischeren Zustand darstellt.

[1] Die Faserverbundradsatzwelle wurde nicht abgebildet, weil diese nicht direkt im Kontakt mit der WBS steht und daher kein Teil der Berechnung ist.

4.2 Koordinatensystem

Das verwendete Koordinatensystem ist in Abbildung 4-4 ersichtlich. Der Koordinatenursprung liegt in der Symmetrieebene der Bremsscheibe.

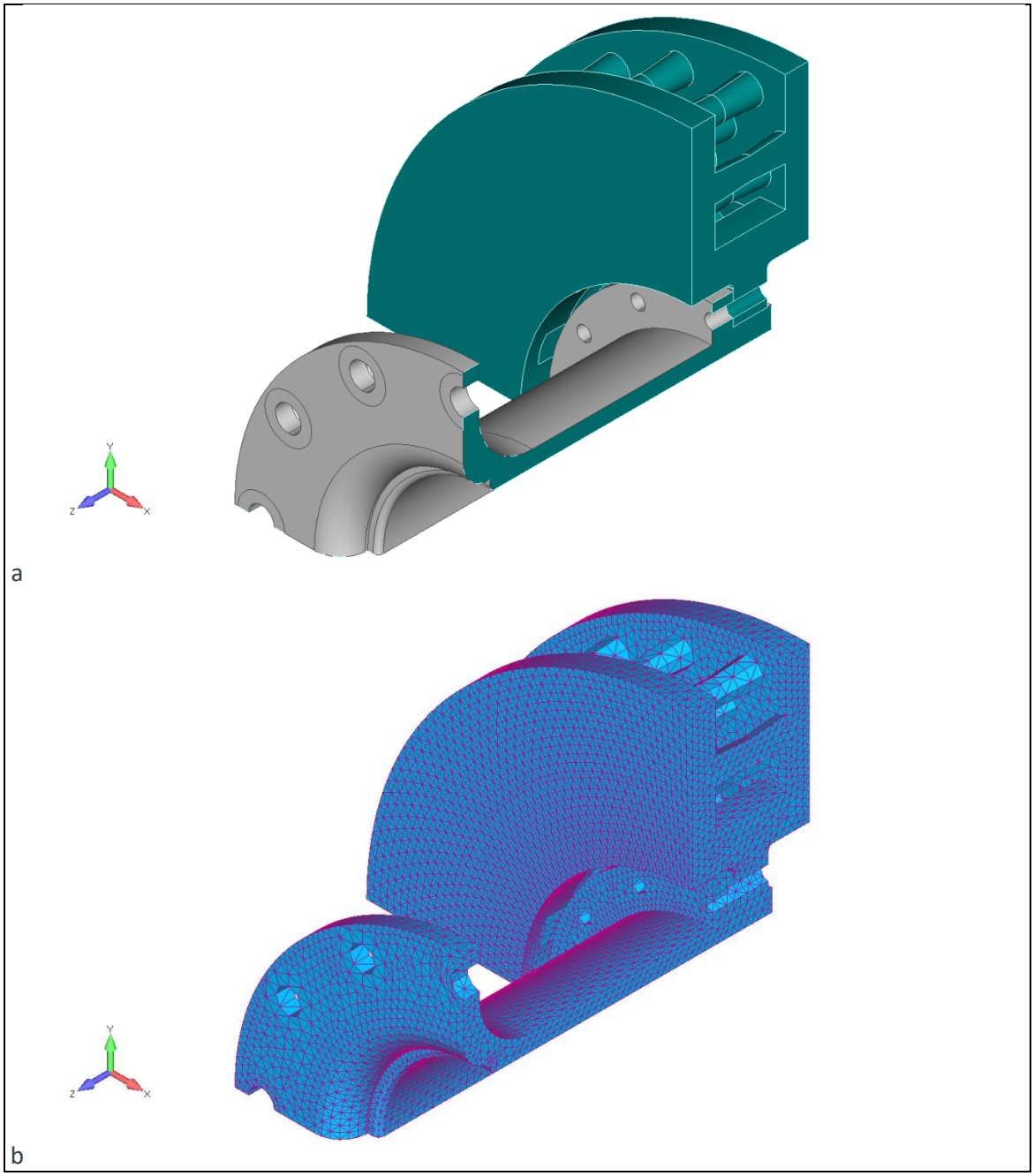


Abbildung 4-4: Koordinatensystem mit (a) Geometrie und (b) Finite-Elemente-Netz jeweils im abgefahrenen Zustand der WBS

4.3 Finite-Elemente-Modell

Abbildung 4-4 zeigt die verwendete Vernetzung der abgefahrenen Bremsscheibe. Es werden parabolische Tetraeder (10-Knoten Tetraeder) verwendet. Die Elementkantenlänge beträgt in ungestörten Bereichen 7 mm mit lokalen Reduktion auf ca. 2 mm. Das Finite-Elemente-Netz im Falle der abgenutzten Wellenbremsscheibe besteht aus 182776 Knoten und 115655 Elementen. Für diese thermische Übergangsberechnung werden die verschiedenen Volumennetze von Wellenbremsscheibe und Torsionsrohr numerisch miteinander „verklebt bzw. verschmolzen“, so dass zwischen diesen Volumina Wärmeenergie übertragen werden kann. Das Modell ist in den SI-Einheiten m, s, kg, °K aufgebaut.

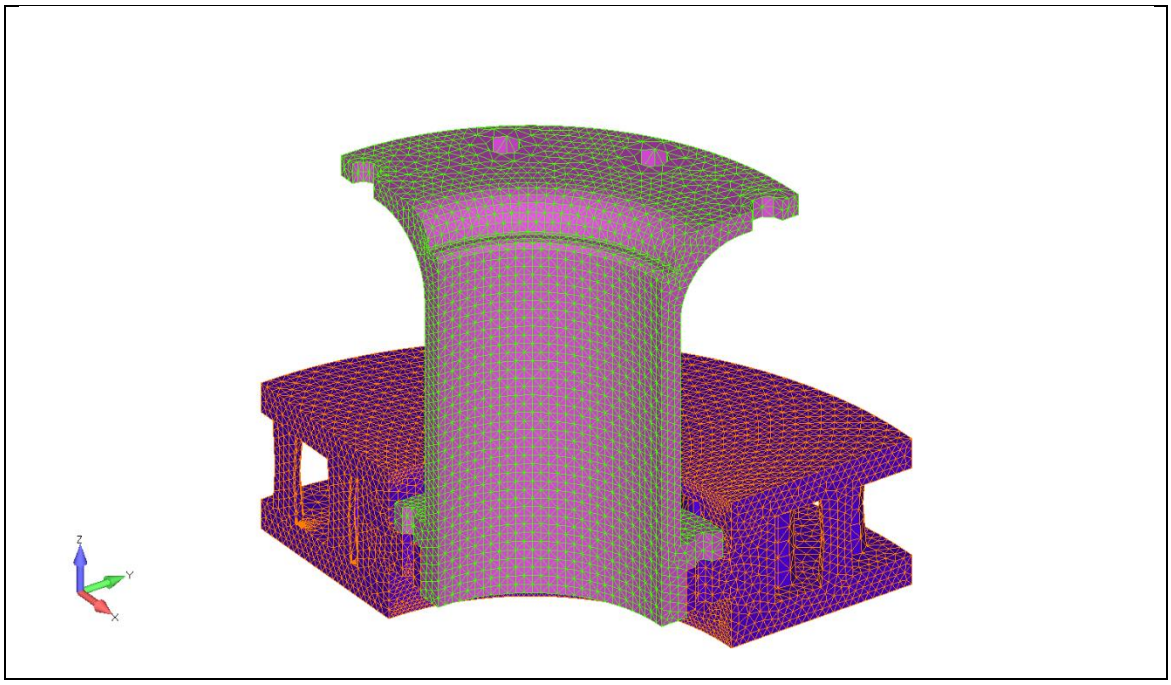


Abbildung 4-5: Berechnungsmodell der Wellenbremsscheibe mit den farbig markierten Komponenten WBS und Torsionsrohr

4.4 Materialkennwerte von Wellenbremsscheibe und Torsionsrohr

Sofern nicht anders erwähnt werden die in Tabelle 4-1 aufgeführten Materialdaten verwendet. Wellenbremsscheiben bestehen in der Regel aus Grauguss, während der Werkstoff des Torsionsrohrs (siehe [4]) mit S355 angenommen wird. Der Hohlwelle wird das Material einer CFK-Radsatzwelle gemäss [6] zugrunde gelegt. Letztere wird in der rein thermischen Berechnung jedoch nicht modelliert, weil in dieser Analyse Wärmeleitung aber keine Wärmestrahlung betrachtet wird. Wärmeleitung ist infolge des Luftspaltes zwischen Torsionsrohr und CFK-Welle nicht möglich.

		CFK-Welle	**WBS**	**Torsionsrohr**
Bezeichnung		CFK[2]	Grauguss	Annahme: S355
E-Modul	[MPa = N/mm^2]	E_1: 175900 E_2: 6500	137000	210000
Querkontraktionszahl	[-]	ν_{12}: 0.28 ν_{21}: 0.10	0.26	0.3
Ausdehnungskoeffizient	[1/°K]	α_1: 1e-6 α_2: 3.5e-5	1.3e-5	1.2e-5
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m°K)]	1: 15.0[3] 2: 1.0	47.5	43.0
Spezifische Wärmekapazität	[J/(kg°K)]	970[4]	460	470
Dichte	[kg/m^3]	1.79e+3	7.25e+3	7.85e+3

Tabelle 4-1 Materialwerte

In Ermangelung der umfangreichen Materialangaben von Wellenbremsscheiben aus Grauguss werden grundsätzlich die temperaturabhängigen Materialparameter gemäss ORE-Bericht [1] verwendet (Tabelle 4-2). Dieser Bericht behandelt die thermischen Grenzen von Eisenbahnrädern

[2] 1 = in Faserrichtung, 2 = senkrecht zur Faserrichtung
[3] Aufgrund fehlender Angaben in erster Näherung mit dem Wert von Kohle (inkl. gewichteten Faservolumenanteil) gleichgesetzt
[4] Aufgrund fehlender Angaben in erster Näherung mit dem gewichteten Wert von Kohle und Epoxyd gleichgesetzt

aus ER7 und Bremsklötzen. Die Zulässigkeit dieses Vorgehens wurde im Rahmen anderer Projekte geprüft.

spezifische Wärmekapazität
Wärmeleitfähigkeit
Geschwindigkeits- und temperaturabhängige Wärmeübergangszahlen in Anlehnung an [1]. Die Wärmeübergangszahl (siehe Abbildung 4-6, Abbildung 4-7) innerhalb der Wellenbremsscheibe ist gegenüber den Werten der ORE aufgrund von Erfahrungswerten aus anderen Projekten skaliert.

Tabelle 4-2 Betrachtete Materialparameter mit temperaturabhängigen Verhalten gemäss ORE-Bericht [1]

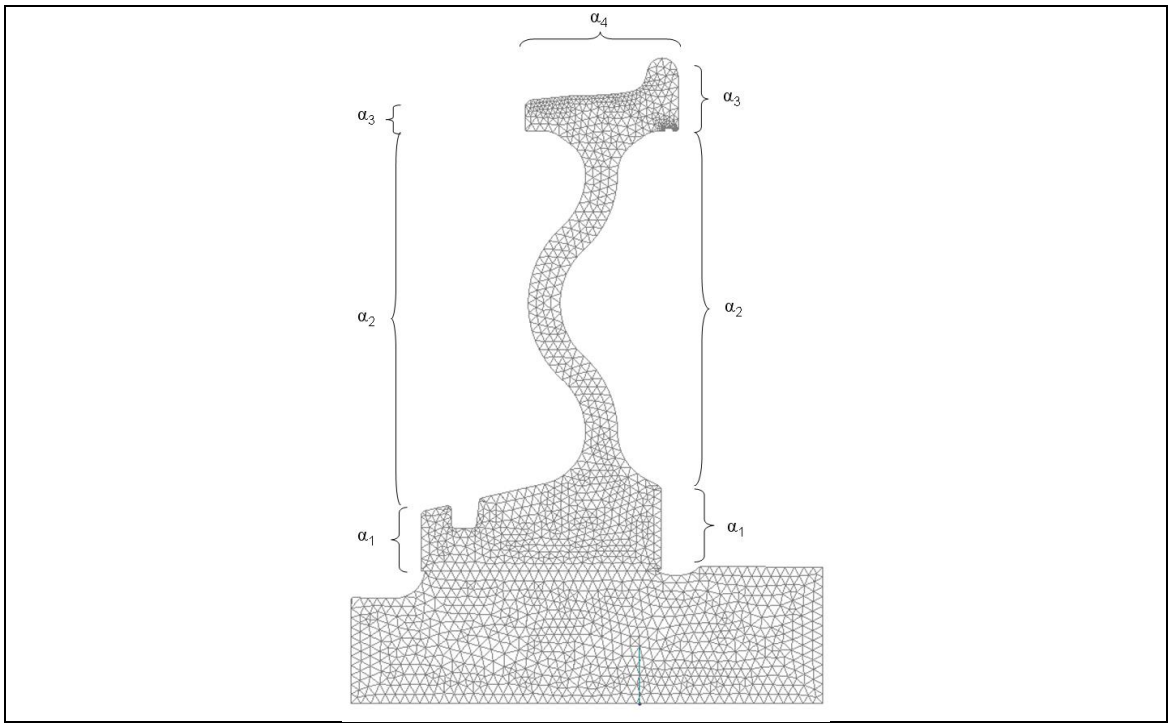


Abbildung 4-6: Definition der Bereiche für Wärmeübergang gemäss ORE-Bericht [1]

4.5 Thermische Randbedingungen

Die thermischen Randbedingungen setzen sich einerseits aus dem Energieeintrag infolge des mechanischen Bremsens und andererseits aus dem Wärmeübergang zusammen. Strahlung wird analog zum ORE-Bericht [1] nicht betrachtet. In Abbildung 4-7 sind die Wärmeübergangsbereiche dargestellt, denen jeweils unterschiedliche temperaturabhängige Konvektionsbedingungen in Anlehnung an [1] zugeordnet sind. Diese geschwindigkeitsabhängige Konvektionsbedingungen werden in der Regel nur bei Beharrungsbremsungen verwendet. Bei Stoppbremsungen werden in der Regel geschwindigkeitsunabhängige Konvektionsbedingungen gesetzt. Unabhängig davon ist zu beachten, dass ein Teil der Bremsscheibenoberfläche durch die Bremsbacken bedeckt sind und der entsprechende Konvektionsanteil deswegen zu gewichten ist. Dieser Skalierungsfaktor folgt aus dem Anteil der freien Bremsfläche zur Gesamtoberfläche der Bremsscheibenfläche und beträgt bei der konkreten Bremsscheibe 76%, d.h. die Konvektion dieser gesamten Oberfläche beträgt 76% des Nominalwertes. Im Inneren der WBS wird dagegen der Nominalwert angehoben, weil in diesem Bereich durch einen "Pumpeneffekt" eine turbulente Durchströmung existiert, die so nicht im ORE-Bericht [1] betrachtet wird.

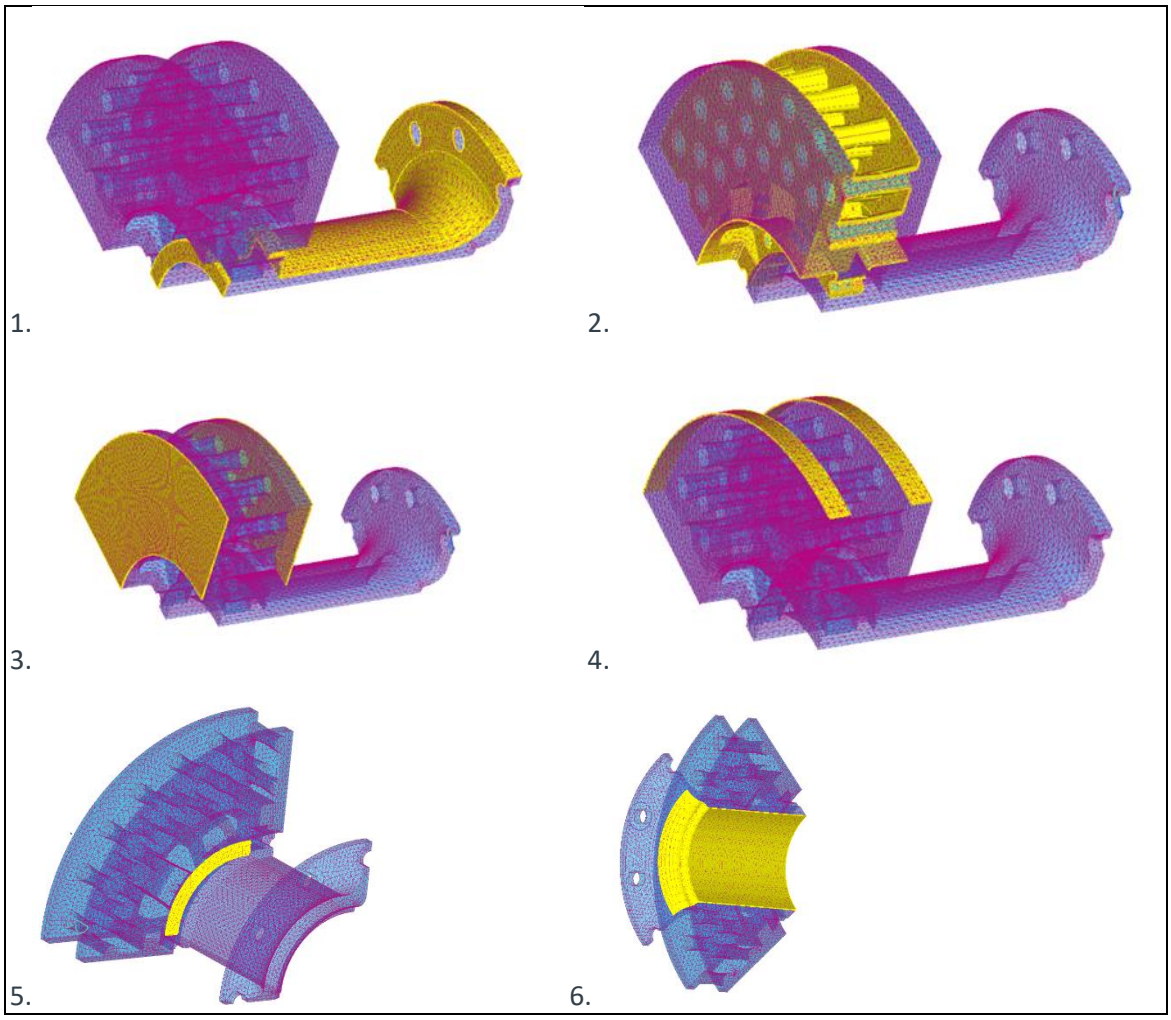


Abbildung 4-7: Wärmeübergangsbereiche im FE-Modell mit unterschiedlichen Wärmeübergangsfunktionen (vgl. Abbildung 4-6) gemäss [1] und Skalierung bei 2. um "Pumpeneffekt" sowie bei 3. um Bremssattelfläche)

Die Bremsenergie für die in Kapitel 5.1 definierten Lastfälle wird über die seitliche Oberfläche der Bremsscheibe eingebracht. Der Energieeintrag erfolgt dabei über die Knoten des FE-Modells, weshalb unterschiedliche Energieeinträge für die Knoten auf dem Rand der Bremsscheibe und in deren Fläche zu definieren sind (siehe Abbildung 4-8).

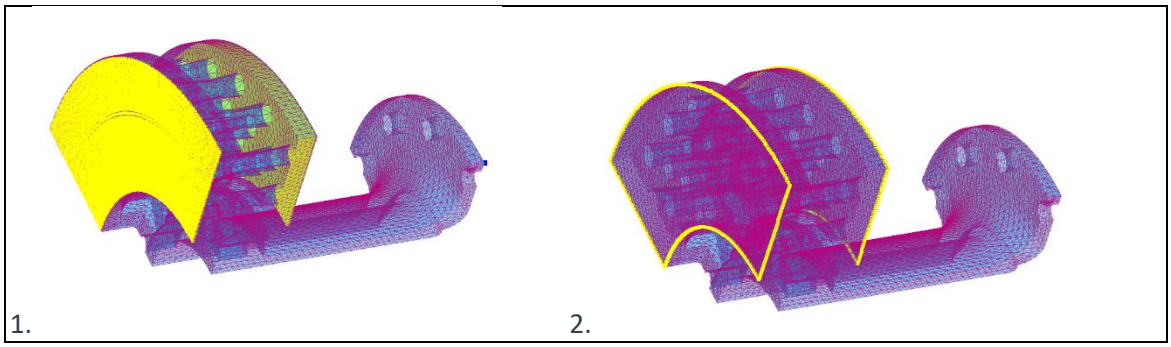


Abbildung 4-8: Eintrag der Bremsenergie in das FE-Modell über die Knoten der seitlichen Bremsscheibenfläche

Diese bisher erläuterten Randbedingungen werden an der Schnittstelle von Torsionsrohr und Rad mit einer konstanten Temperatur von 35°C (konservative Umgebungstemperatur im Sommer) ergänzt (Abbildung 4-9). Diese Umgebungstemperatur ermöglicht generell einen Wärmeabfluss in das Faserverbundrad. Weitere Randbedingungen z.B. in Umfangsrichtung sind nicht definiert.

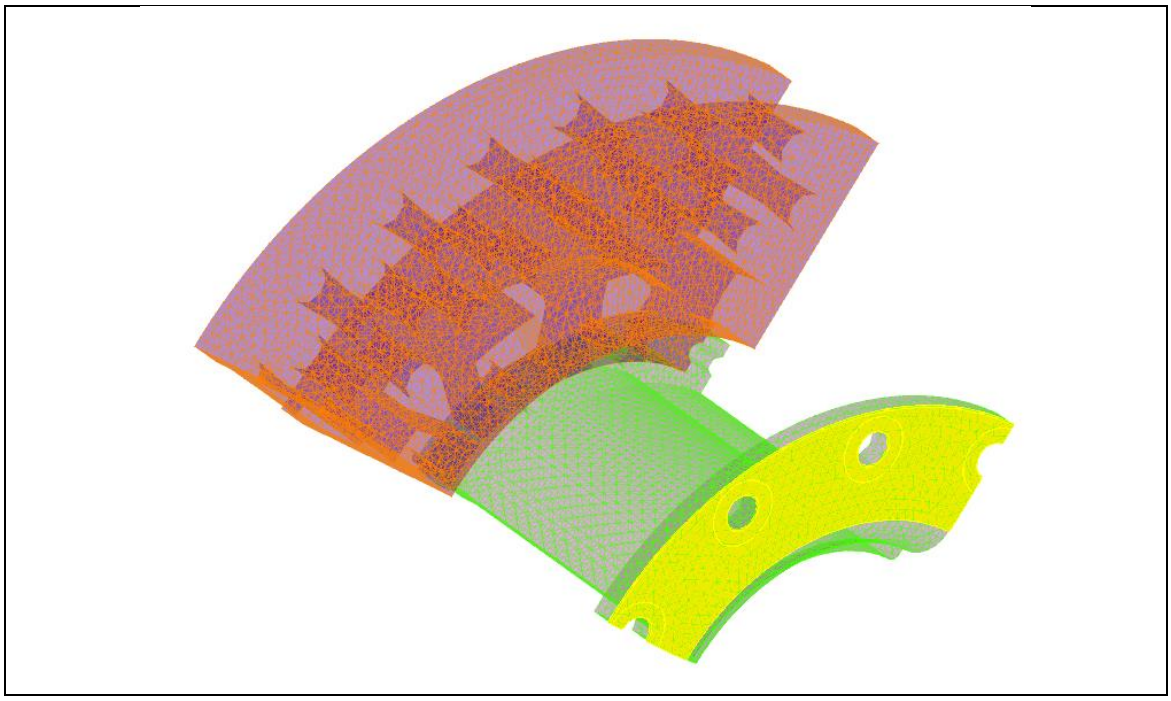


Abbildung 4-9: Thermische Randbedingung einer konstanten Temperatur zwischen Torsionsrohr und Rad (gelb)

4.6 Weitere Modell- bzw. Berechnungsparameter

In Tabelle 4-3 sind weitere Parameter bzw. Annahmen für diese thermische Berechnung zusammengefasst.

Beschreibung	Wert	Anmerkung
Umgebungstemperatur:	35 °C	Konservativ (Sommer-einsatz), allg. 20°C
Starttemperatur der Rechnungen:	35 °C	
Max. Radsatzlast:	22.5 t	Sollvorgabe [4]
Raddurchmesser neu	920 mm	
Raddurchmesser abgenutzt	840 mm	
Erdbeschleunigung	9.81 m/s^2	
Anzahl WBS pro Radsatz:	2	
Bremsscheibe:	Ø 610 x 110	WBS für 22.5t Achslast
Massenfaktor der Radsatzwelle:	1.01[5]	Ist gegenüber konv. Radsätzen wesentlich geringer, tbc
Maximale dauerhafte Temperatur (Radsatzwelle):	80 - 135°C	[5], [6]
Maximal dauerhaft ertragbare Temperatur des Bremsbelages:	350 °C tbc	Indikativ
Maximal kurzzeitig ertragbare Temperatur des Bremsbelages:	450 °C tbc	Indikativ
Max. dauerhaft ertragbare Temperatur der Bremsscheibe (Reibflächentemperatur)	550°C tbc	Indikativ
Einflüsse aus Roll- und Luftwiderstand werden nicht berücksichtigt		Standard nach TSI

Tabelle 4-3 Weitere Modellierungs-/Berechnungsparameter

5 Lastfälle und Randbedingungen

5.1 Bremsung

Bei den thermischen Übergangsrechnungen wird die Energie jeweils über die ganze Fläche der Bremsscheibe eingeführt. Im Sinn einer konservativen Annahme wird zudem von organischen Bremsbelägen bei den Bremsklötzen ausgegangen. Diese werden als schlecht wärmeleitend angesehen, so dass die Bremsenergie zu 100% in die Bremsscheibe eingeleitet wird.

In der Regel werden Stopp- und Beharrungsbremsungen oder deren Kombination betrachtet.

Während die Beharrungsbremsungen mit einem Zeitschritt von ca. 3 Sekunden berechnet werden, beträgt der Zeitschritt bei der Stoppbremse ca. 1 Sekunde.

5.1.1 Stoppbremsung

Der Lastfall „Stoppbremsung“ sieht eine wiederholte Bremsung aus einer maximalen Geschwindigkeit von 120 km/h mit grösstmöglichem Bremsdruck vor. Gemäss Information seitens SBB Cargo wird dabei eine konstante Verzögerung von 1.177 m/s^2 und eine Beschleunigung von 0.2 m/s^2 angesetzt. Der daraus resultierende linear abnehmende Leistungseintrag ist auf die Anzahl Wellenbremsscheiben zu verteilen.

In der Regel sind bei einer derart kurzzeitigen Bremsung Wärmeübertragungseffekte durch Wärmeleitung im Material wesentlich entscheidender als Wärmeverluste durch Konvektion. Weil der zusätzliche Wärmeverlust durch Strahlung in der Berechnung der Stoppbremsung nicht

[5] Bei Beharrungsbremsungen erfolgt keine Beschleunigungsänderung des Radsatzes (quasi-stationärer Betrachtung). Somit wird dieser Anteil, wie auch bei der Berechnung der Achslastabhängigen Roll- und Hangwiderstände nicht benötigt. Bei einer Schnell- bzw. Stoppbremsungen ist dieser Effekt der rotatorischen Masse zu berücksichtigen sofern diese nicht über den Energieeintrag definiert wird.

berücksichtigt ist, wird in der Regel auf eine Geschwindigkeitsabhängigkeit der Konvektionswerte verzichtet. In Abhängigkeit der Analyse werden z.B. die Werte für 35 km/h oder für Stillstand (0 km/h) verwendet.

5.1.2 Beharrungsbremsung

Da bei der Beharrungsbremsung über einen längeren Zeitraum eine geringere Leistung als bei der Stoppbremsung zugeführt wird, werden Verlusteffekte durch Konvektion und Wärmestrahlung wichtiger, siehe vorhergehendes Kapitel 5.1.1. Es werden daher geschwindigkeitsabhängige Konvektionswerte verwendet.

Die Minimalforderung bezüglich der Bremsleistung an ein Rad lautet gemäss den Vorgaben der TSI-WAG [2] in Kapitel 4.2.4.3.3: *"Die Bremsanlage muss eine Notbremsung vollziehen können, ohne dass sich dadurch die Bremskraft aufgrund von thermischen oder mechanischen Auswirkungen verringert.*
Die Bremsleistung, die die Einheit ohne Verringerung der Bremskraft aufgrund von thermischen oder mechanischen Auswirkungen aufnehmen kann, ist unter Bezug auf Geschwindigkeit und Bremsanlegezeit zu bestimmen und auszudrücken. Als Referenzfall zur Bestimmung der Wärmekapazität ist von einer Geschwindigkeit von 70 km/h bei einem konstanten Gefälle von 21 ‰ über eine Entfernung von 40 km auszugehen, woraus sich eine Bremsleistung von 45 kW pro Rad (Nenndurchmesser 920 mm, Radsatzlast 22,5 t) über einen Zeitraum von 34 Minuten ergibt."

Darüber hinausgehend formuliert Anhang C Nummer 15 der TSI-WAG folgende "optionale Zusatzbedingungen" der TSI-WAG [2], die in den meisten Fällen von Radsatzhersteller angestrebt wird und für den Einsatz in der Schweiz normativen Charakter hat: *"Bei unmittelbar auf die Radlauffläche wirkenden Bremssystemen muss die in Abschnitt 6.1.2.3 vorgesehene thermomechanische Baumusterprüfung gemäß Tabelle C.4 durchgeführt werden."*

Raddurchmesser [mm]	1000-920	920-840	840-760	760-680
Standardleistungswert [kW]	50	50	42.5	38
Betätigungsdauer [min]	45	45	45	45
Betriebsgeschwindigkeit [km/h]	60	60	60	60

Tabelle 5-1 Tabelle C.4 Bedingungen für die thermomechanische Baumusterprüfung [2]

Bei letztgenannter Beharrungsbremsanforderung wird ca. 47% mehr Bremsenergie eingeleitet, wie aus Abbildung 5-1 ersichtlich ist. Zudem tritt bei diesem Szenario infolge der geringeren Geschwindigkeit eine geringere Kühlleistung auf (siehe Tabelle 5-2).

Bremsszenario	Leistung [kW]	Zeit [Minuten]	Geschwindigkeit [km/h]
Kapitel 4.2.4.3.3	45	34	70
Tabelle C.4	50	45	60

Tabelle 5-2 Vergleich der Bremsszenarien gemäss TSI-WAG [2]

Da bei Anhang C Nummer 15 der TSI-WAG [2] explizit von *"auf die Radlauffläche wirkenden Bremssystemen"* gesprochen wird, ist für den Faserverbundradsatz mit Wellenbremsscheibe dieses Bremsszenarium nicht zu erfüllen. Es ist das Bremsszenario gemäss Kapitel 4.2.4.3.3 der TSI-WAG [2] mit 45 kW über 34 Minuten anzuwenden.

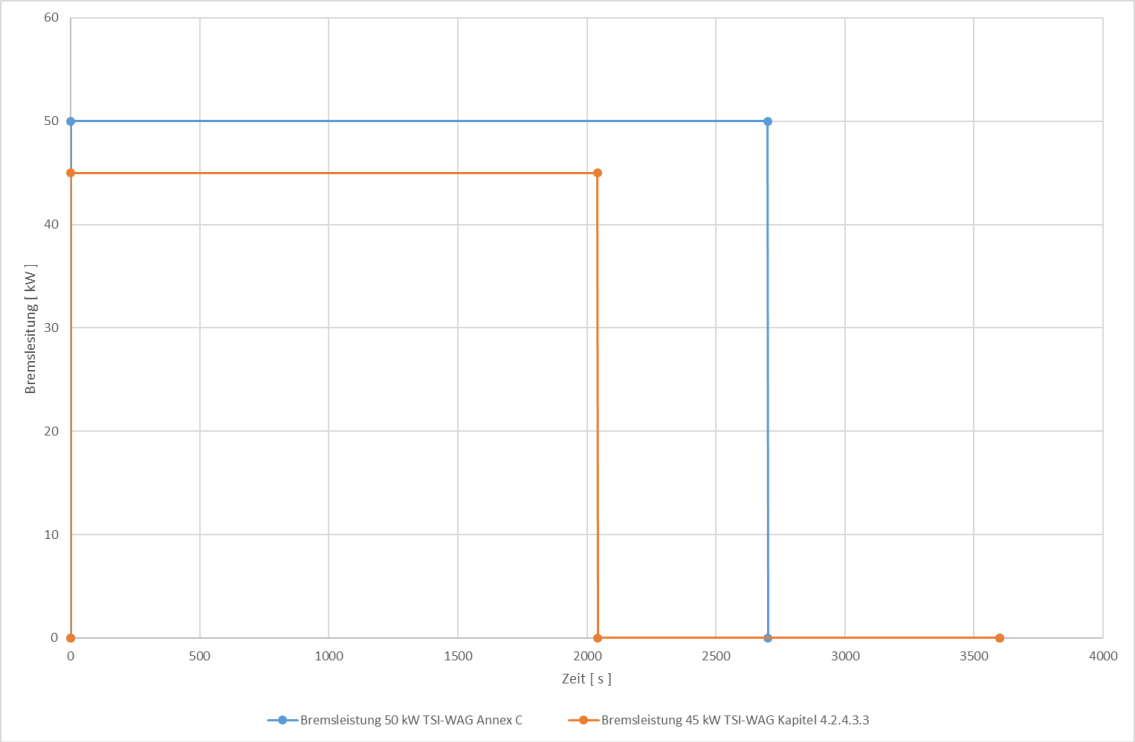


Abbildung 5-1: Zeitsignale der Beharrungsbremsszenarien gemäss TSI-WAG [2]

Auch wenn es gemäss TSI-WAG nicht gefordert wird, wird in der Regel bei der Auslegung von Bremsen der Beharrungsbremsung eine Stoppbremsung mit anschliessendem Stillstand angefügt. Dies ist der thermisch kritischste Belastungszustand, welcher auch in Realität auftreten kann. Es können dabei durch den Betreiber unterschiedliche Varianten von Stoppbremsungen definiert sein (z.B. in der Ebene, im Gefälle von 21 ‰, aus der Beharrungsbremsgeschwindigkeit oder aus einer Geschwindigkeit von 120 km/h).

Abbildung 5-2 zeigt daraus abgeleitete mögliche Bremsszenarien, während in Tabelle 5-3 die daraus resultierenden zu absorbierenden Bremsenergien aufgeführt sind. Es ist klar ersichtlich, dass die Bremsung im Gefälle des erneut beschleunigten Fahrzeuges die grössten thermischen Belastungen darstellt. Dies weil das Fahrzeug bei zusätzlicher Beschleunigung infolge Hangabtrieb mit gleicher Verzögerung abzubremsen ist, während der Hangabtrieb zudem die Beschleunigungszeit und somit Abkühlzeit vor der erneuten thermischen Belastung reduziert. Aus diesem Grund wird nur dieses Bremsszenarium in Ergänzung zu der Forderung gemäss TSI-WAG untersucht. Es ist jedoch zu betonen, dass die zur Verfügung stehende Geometrie der Bremsscheibe nur für eine Bremsleistung < 200 kW geeignet ist und daher für dieses Bremsszenario unzulässig hohe Temperaturen zu erwarten sind. Aus diesem Grund wird zudem die Stoppbremsung aus der Beharrungsgeschwindigkeit von 70km/h (nach Kapitel 4.2.4.3.3 aus [2]) berechnet, bei denen die Bremsleistung der Scheibe nicht überschritten wird.

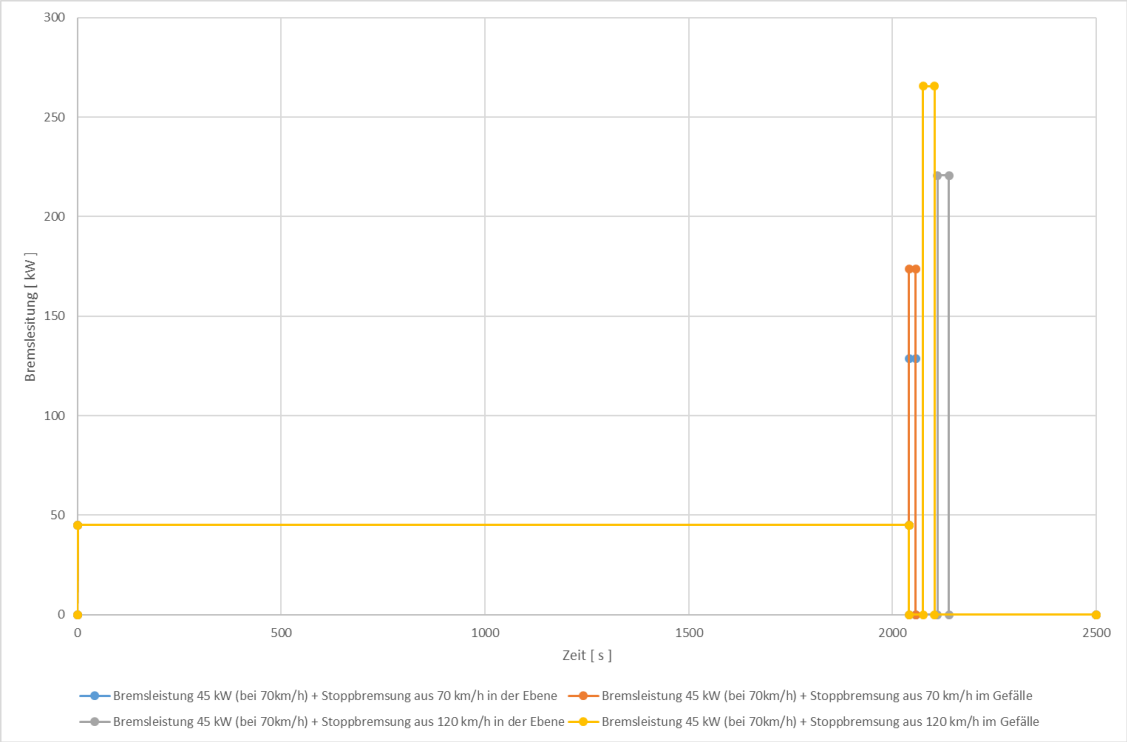


Abbildung 5-2: Zeitsignale der Beharrungsbremsung gemäss TSI-WAG [2] mit anschliessenden Stoppbremsvarianten

Bremsszenario	Total der Bremsenergie [kWs bzw. kJ]	Steigerung [%]
Beharrungsbremsung 45 kW (bei 70km/h)	91'800	-
Beharrungsbremsung 45 kW (bei 70km/h) + Stoppbremsung aus 70 km/h in der Ebene	93'927	2
Beharrungsbremsung 45 kW (bei 70km/h) + Stoppbremsung aus 70 km/h im Gefälle	94'670	3
Beharrungsbremsung 45 kW (bei 70km/h) + Stoppbremsung aus 120 km/h in der Ebene	98'050	7
Beharrungsbremsung 45 kW (bei 70km/h) + Stoppbremsung aus 120 km/h im Gefälle	99'324	8

Tabelle 5-3 Vergleich der Stoppbremsszenarien nach der Beharrungsbremsung gemäss TSI-WAG [2]

Der Vollständigkeit halber sei auch die Bremsbeurteilung auf der Grundlage von Stoppbremsungen aufgeführt, die z.B. bei Lokomotiven, "gelben Maschinen" und im Personenverkehr verwendet wird. Diese Beurteilung basiert auf einer idR dreimaligen Stoppbremsung aus der maximal zulässigen Fahrzeuggeschwindigkeit in Kombination mit der dazwischengeschalteten maximalen Beschleunigung um die Abkühlung möglichst gering, d.h. konservativ zu halten. Aufgrund der Einschränkung hinsichtlich der absorbierbaren Bremsleistung wird zudem die Verzögerung variiert und somit der Energieeintrag in die Wellenbremsscheibe variiert, wie aus den daraus folgenden Zeitsignalen und Energieeinträgen in Abbildung 5-3 und Tabelle 5-4 ersichtlich wird. Aus dem Vergleich mit Tabelle 5-3 ist klar ersichtlich, dass die aus Stoppbremsungen resultierenden Energien gegenüber den Energien aus dem Beharrungsbremszustand wesentlich geringer sind.

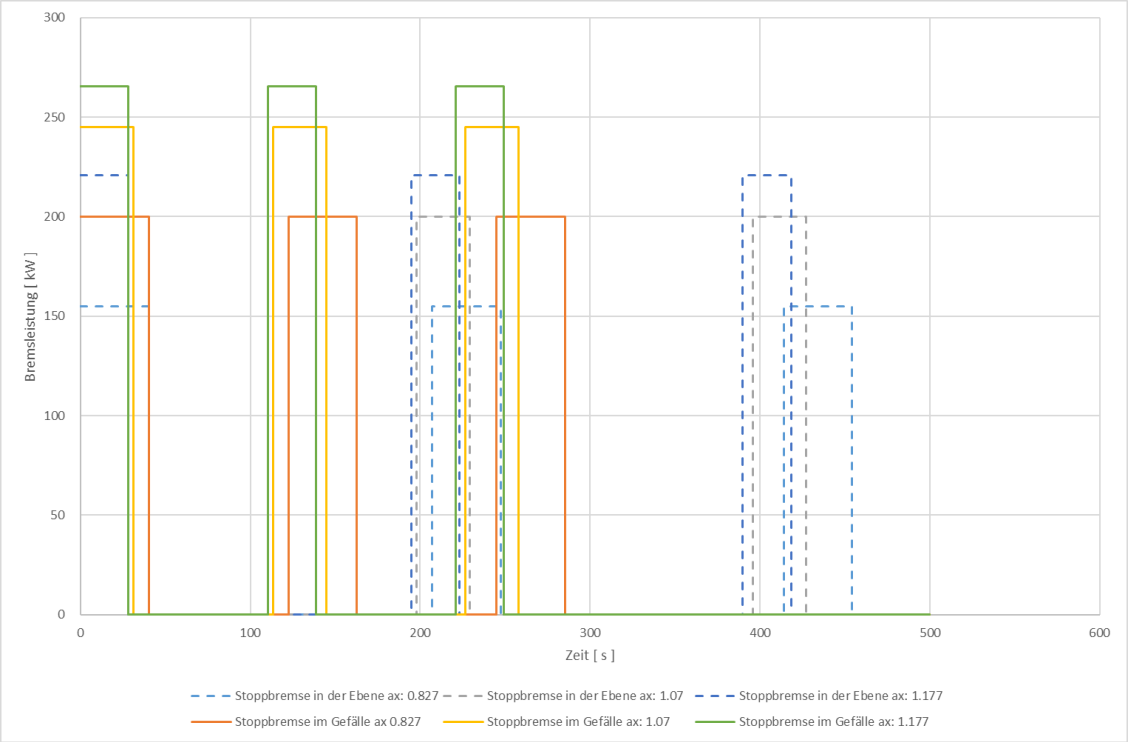


Abbildung 5-3: Zeitsignale infolge 3-maliger Stoppbremsung

Bremsszenario	Total der Bremsenergie [kWs bzw. kJ]
3-malige Stoppbremsung aus 120 km/h in der Ebene mit einer Verzögerung bei Stoppbremsung von 1.177 m/s^2	18'750
3-malige Stoppbremsung aus 120 km/h in der Ebene mit einer Verzögerung bei Stoppbremsung von 1.067 m/s^2	
3-malige Stoppbremsung aus 120 km/h in der Ebene mit einer Verzögerung bei Stoppbremsung von 0.827 m/s^2	
3-malig Stoppbremsung aus 120 km/h im Gefälle mit einer Verzögerung bei Stoppbremsung von 1.177 m/s^2	22’573
3-malig Stoppbremsung aus 120 km/h im Gefälle mit einer Verzögerung bei Stoppbremsung von 1.067 m/s^2	22’969
3-malig Stoppbremsung aus 120 km/h im Gefälle mit einer Verzögerung bei Stoppbremsung von 0.827 m/s^2	24’194

Tabelle 5-4 Vergleich von Stoppbremsszenarien

6 Resultate

Im Vergleich zu mechanischen Struktur- bzw. Festigkeitsberechnungen sind thermische Berechnung insbesondere von Wellenbremsscheiben eher selten, da sie viele Eingangsparameter erfordern, welche nur durch umfangreiche Messungen bereitgestellt werden können. Als dynamischer Vorgang besteht neben der rein quantitativen auch eine zeitliche Sensibilität der Ergebnisse in Abhängigkeit der Eingangsparameter und Randbedingungen. Aus diesem Grund wird grundsätzlich eine Kontrolle der Berechnungsergebnisse mit Messergebnissen empfohlen, um z.B. die Konvektionsparameter abgleichen zu können. Ein derartiger Abgleich ist bei dieser Untersuchung nicht möglich, worunter die Aussagegenauigkeit der Prognose leidet.

6.1 Stoppbremsung

6.1.1 Referenzuntersuchung zur Stoppbremsung

Bei dieser numerischen Berechnung werden in der Regel keine Bewegungswiderstände oder Luftwiderstände berücksichtigt. Auch wird davon ausgegangen, dass die thermische Energie zu 100 % in die Bremsscheibe eingeht. Letzteres variiert sehr mit dem Bremsbelag und ist nicht in allen Fällen eine konservative Annahme. Bei der Berechnung der Bremsenergie infolge Stoppbremsung wird bei diesem Design der Anteil der rotatorischen Massen nicht berücksichtigt. Grund dafür ist der Umstand, dass dieser mit weniger als 3% angesichts aller Designunsicherheiten als vernachlässigbar klein angesehen wird.

Abbildung 6-1 zeigt die charakteristischen Ergebnisse einer derartigen Bremsmessung. In Ergänzung zu den typischen Messergebnissen, wie Bremsdruck, Geschwindigkeit-, Weg- und Zeitsignale wird auch die Temperatur am Kranz (T1 & T2) bzw. Grund (T3) der Wellenbremsscheibe, mit den Messsensoren aus Abbildung 6-2, aufgezeichnet. Die Messwerte gelten für eine Radsatzlast von 20t.

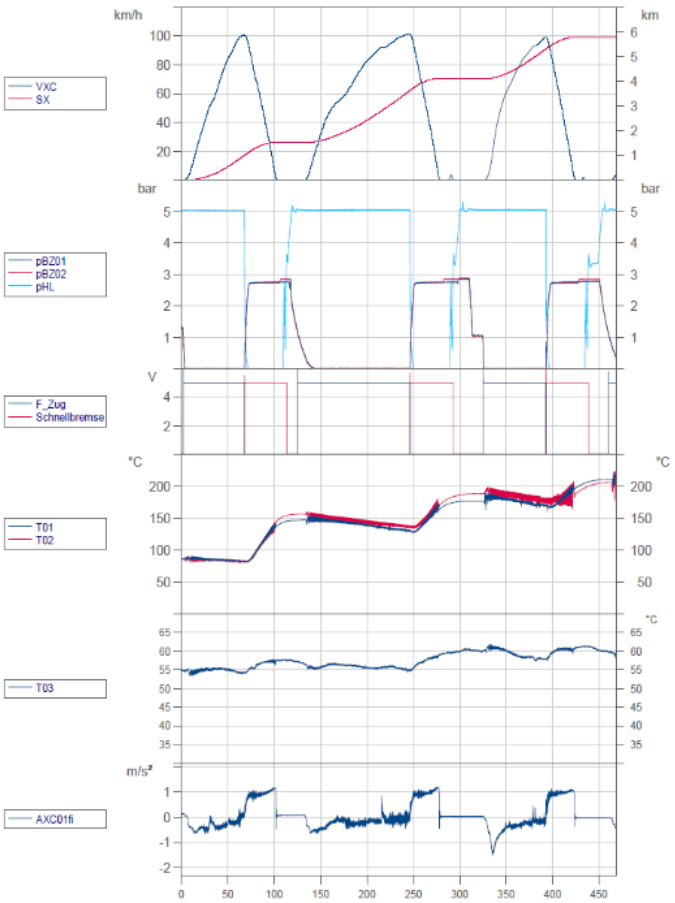


Abbildung 6-1: Typische Signale einer wiederholten Schnellbremsung (3x aus 100km/h in der Ebene)

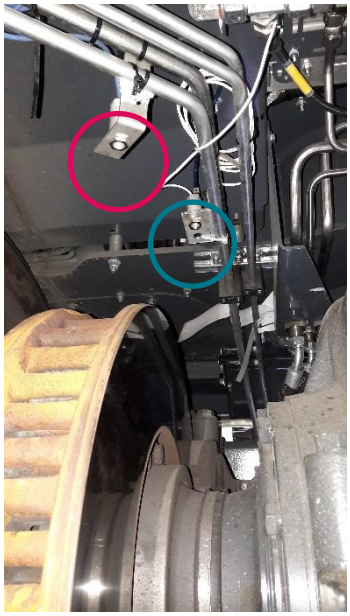


Abbildung 6-2: Anordnung der Temperaturmesssensoren in der Nähe einer Wellenbremsscheibe (Der linke Sensor misst die Temperatur am Umfang der WBS und der rechte Sensor auf der Wellennabe.)

Weil die Geometrie der Scheibe und ihr Abnutzungsgrad nicht bekannt ist, erfolgte kein Abgleich der Konvektionsparameter mit den Ergebnissen der Messung. Abbildung 6-3 bis Abbildung 6-5 zeigen die berechnete Temperaturverteilung nach der dritten Stoppbremsung. Während die Berechnung gegenüber der Messung am Rand der Wellenbremsscheibe grössere Werte aufweist, gibt die Berechnung die Temperatur am Fuss der Wellenbremsscheibe gut wieder. Die Lage der Messpunkte ist in diesen Abbildungen jeweils durch einen Pfeil gekennzeichnet.

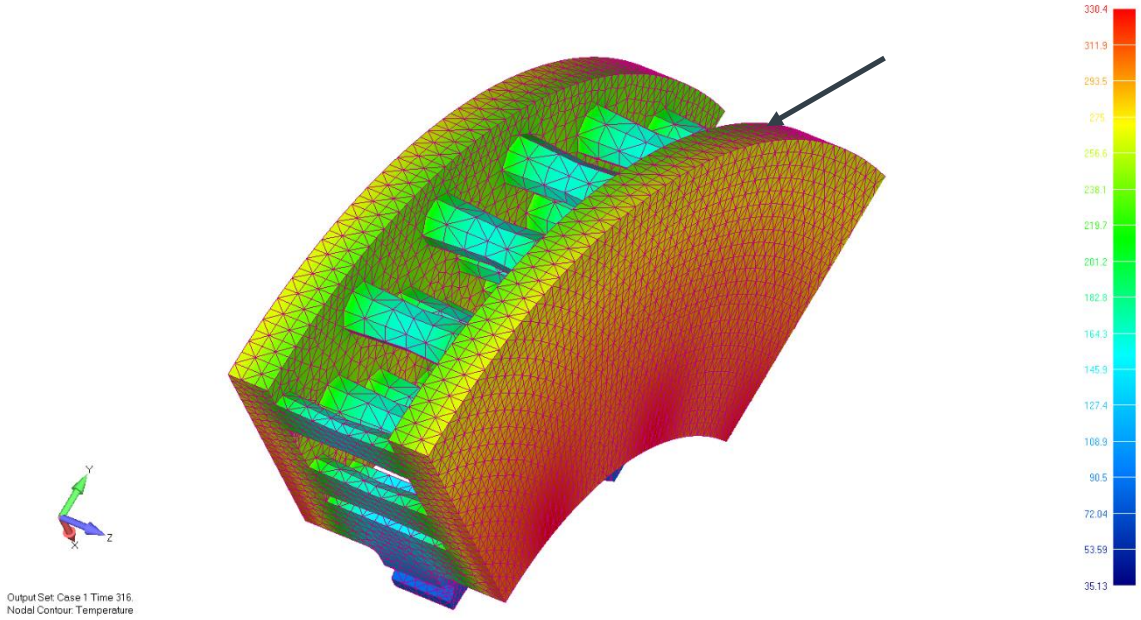


Abbildung 6-3: Temperaturverteilung in der Wellenbremsscheibe zum Zeitpunkt der maximalen Erwärmung (Referenzuntersuchung zur Stoppbremsung)

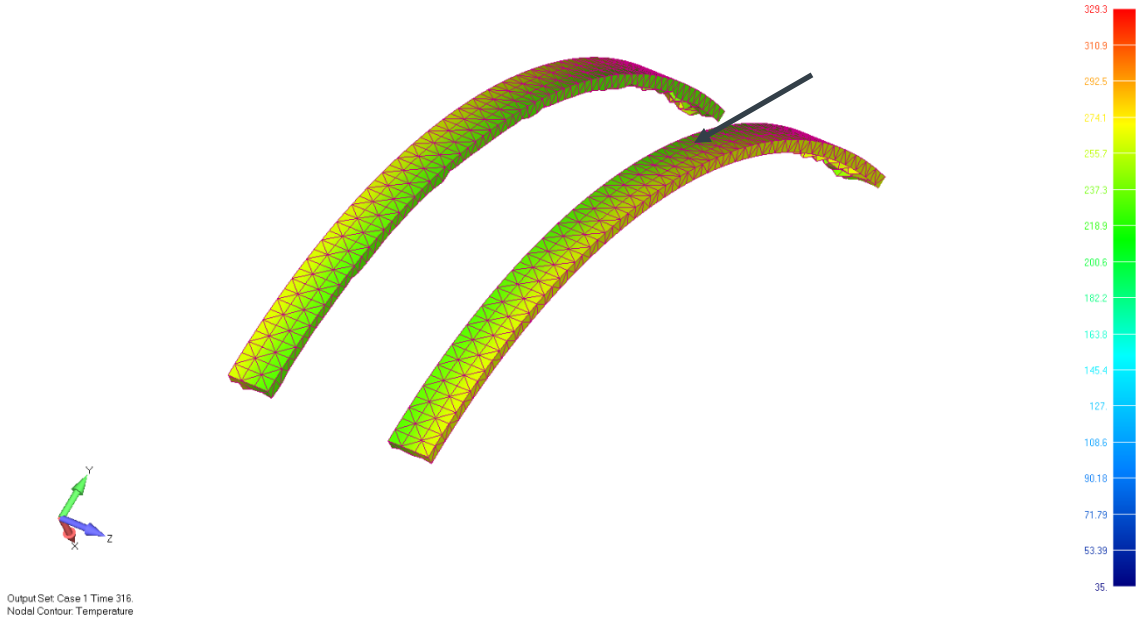


Abbildung 6-4: Temperaturverteilung am Rand der Wellenbremsscheibe zum Zeitpunkt der maximalen Erwärmung (Referenzuntersuchung zur Stoppbremsung)

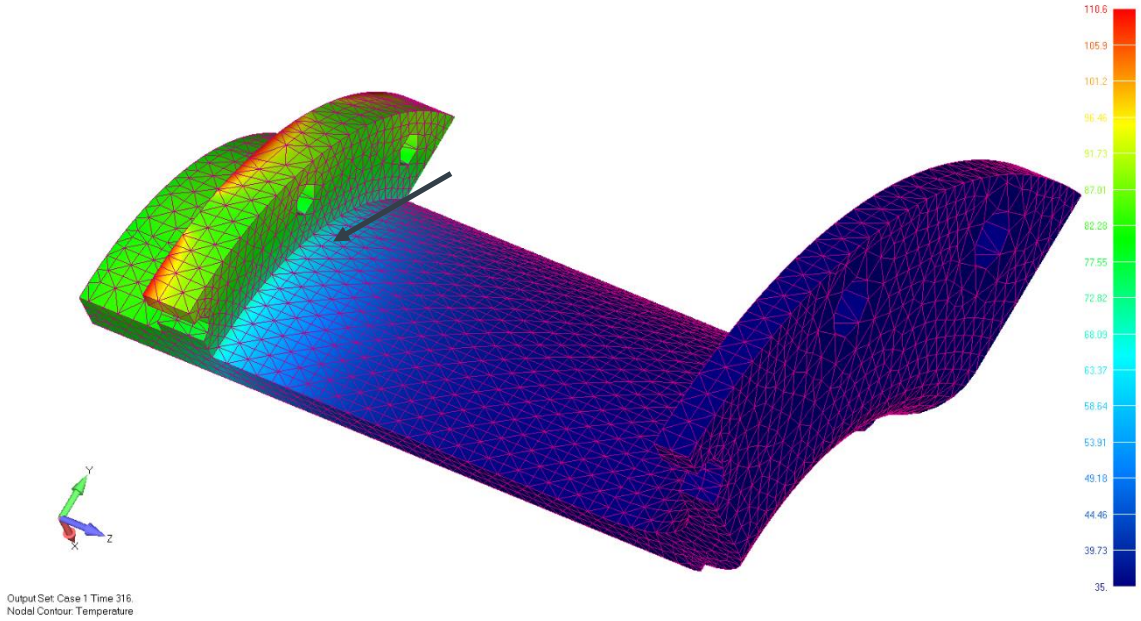


Abbildung 6-5: Temperaturverteilung am Fuss der Wellenbremsscheibe und im Torsionsrohr zum Zeitpunkt der maximalen (Referenzuntersuchung zur Stoppbremsung)

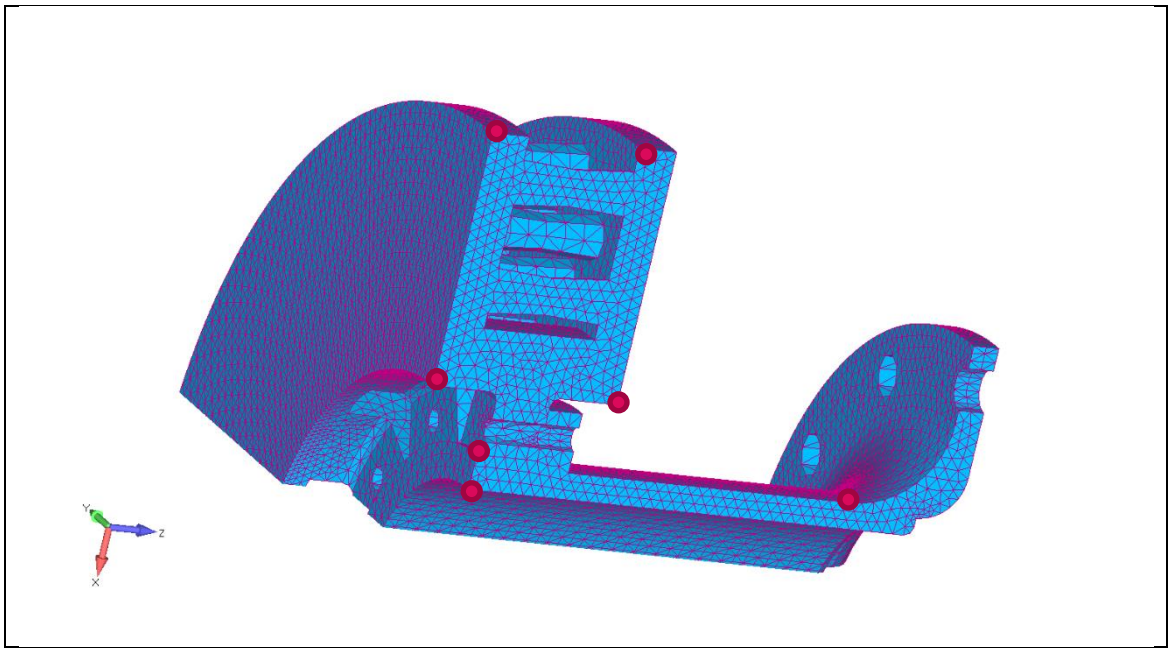


Abbildung 6-6: FE-Modell mit Lage der Temperaturmesspunkte

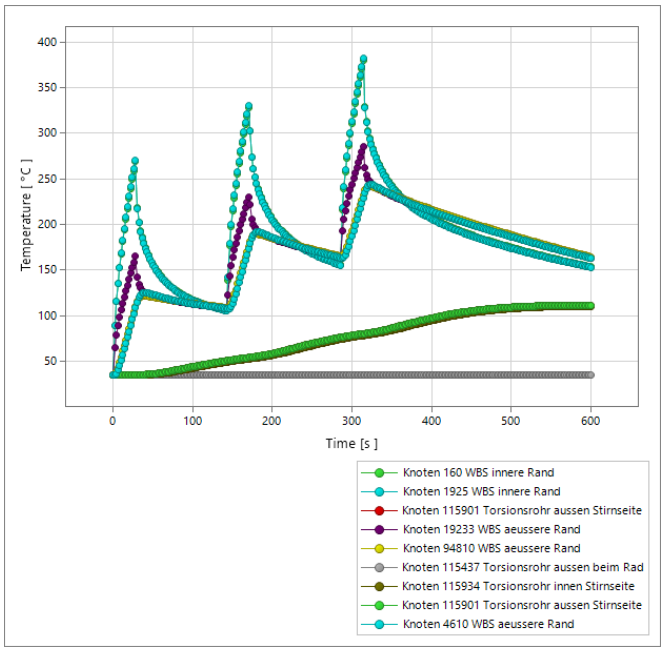


Abbildung 6-7: Zeitliche Temperaturänderung in unterschiedlichen Regionen von Wellenbremsscheibe und Torsionsrohr (Referenzuntersuchung zur Stoppbremsung)

Wie aus den vorhergehenden Abbildungen ersichtlich ist, weist die Berechnung einen grossen Temperaturgradienten über die Dicke der Wellenbremsscheibe als auch über deren Durchmesser auf. Dies ist beides auf die unterschiedliche Konvektion zurückzuführen, die einerseits nach aussen hin zum Rand zunimmt und innerhalb der Wellenbremsscheibe gegenüber der Aussenfläche höher angesetzt wird. In Bezug auf eine Faserverbundradsatzwelle ist die Temperaturentwicklung auf der äusseren und inneren Oberfläche des Torsionsrohrs von besonderer Bedeutung. Dies sind die einzigen Bereiche, welche nach erfolgter Bremsung sich nicht abkühlen, sondern weiter aufheizen. Während die Temperaturen am Ort der Wellenbremsscheibe (Torsionsrohr Stirnseite) bis auf ca. 115°C ansteigen und somit die Temperaturschwelle von 80°C übersteigen (vgl. Tabelle 4-3), bleiben diese an der Schnittstelle vom Torsionsrohr zum Rad unter diesem Grenzwert (siehe Abbildung 6-7 Torsionsohr aussen beim Rad).

6.1.2 Stoppbremsung

Wie aus dem Vergleich der Zeitsignalen in Abbildung 6-7 und Abbildung 6-8 ersichtlich ist, wird der FRP-Radsatz gegenüber der Referenzberechnung grösseren Thermischen Belastungen unterworfen, die zu höheren Temperaturen führen. Grund dafür ist die höhere Radsatzlast, wie auch die grössere bzw. kürzere Beschleunigungsvorgaben (während die Verzögerungszeit bei beiden Untersuchungen ungefähr gleich ist).

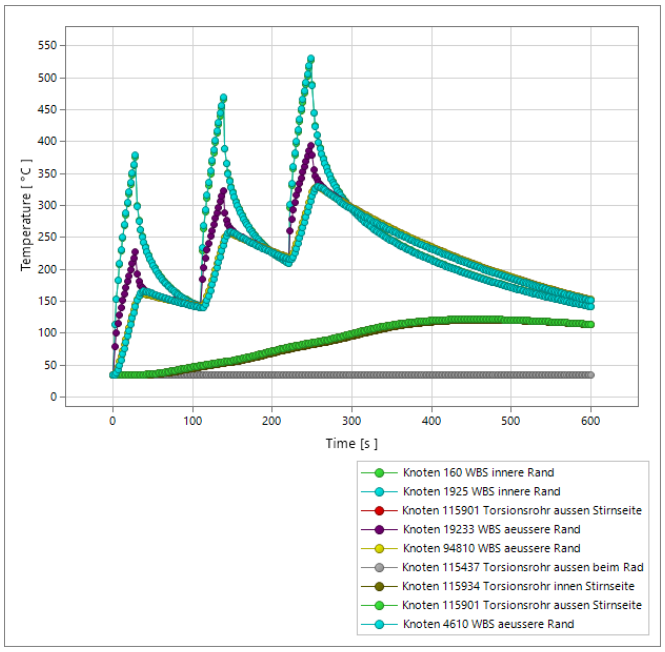


Abbildung 6-8: Zeitliche Temperaturänderung in unterschiedlichen Regionen von Wellenbremsscheibe und Torsionsrohr (Stoppbremsung)

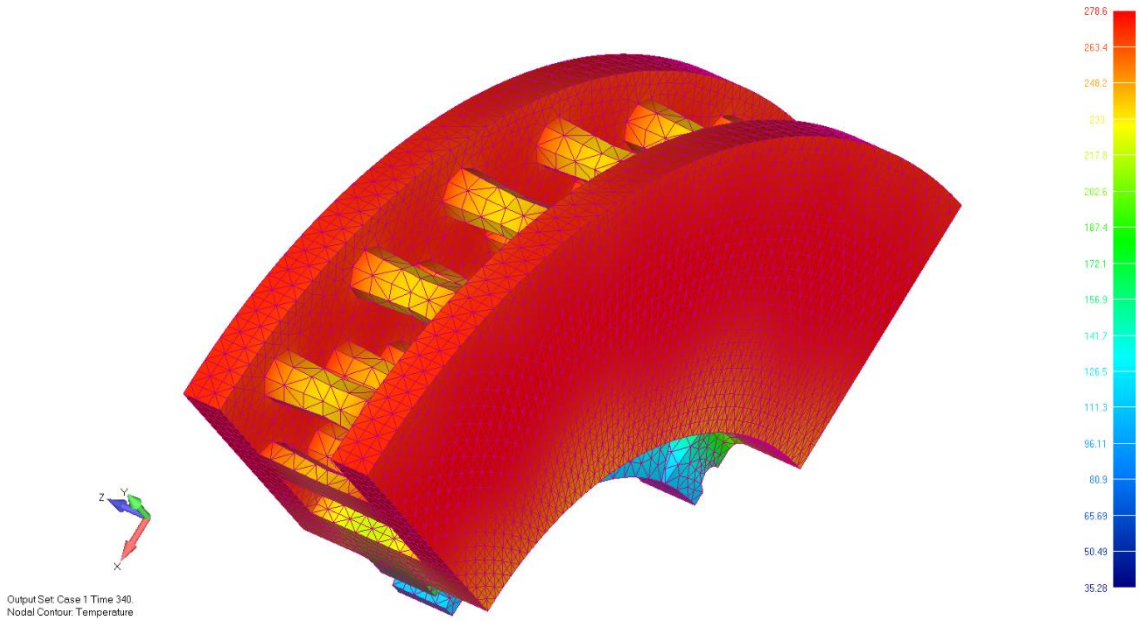
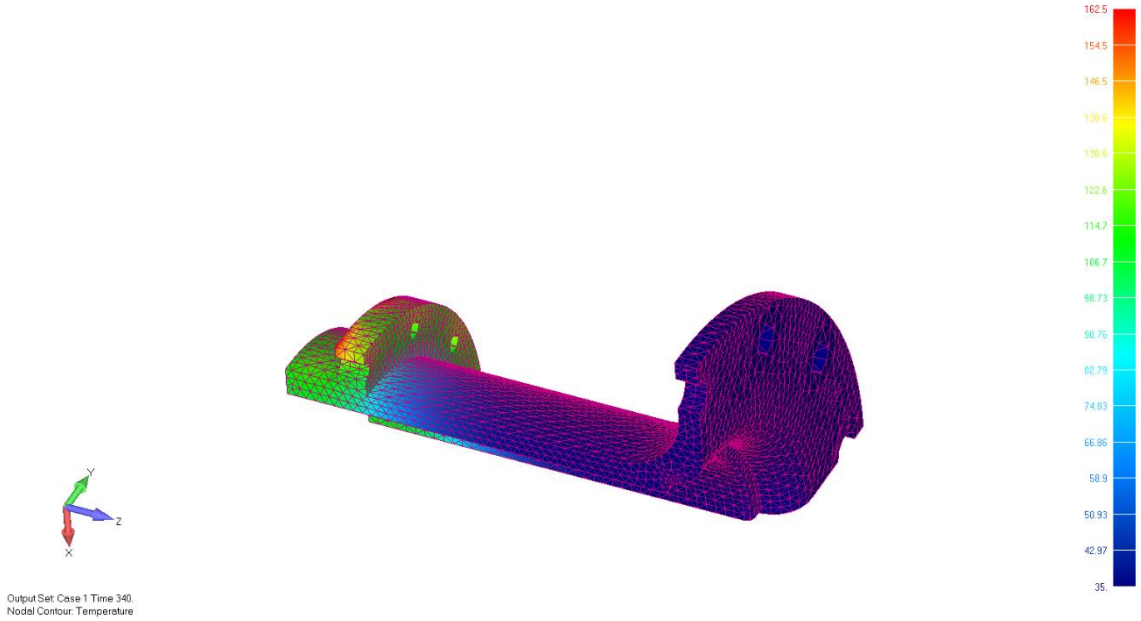


Abbildung 6-9: Temperaturverteilung in der Wellenbremsscheibe zum Zeitpunkt der maximalen Erwärmung (Stoppbremsung)



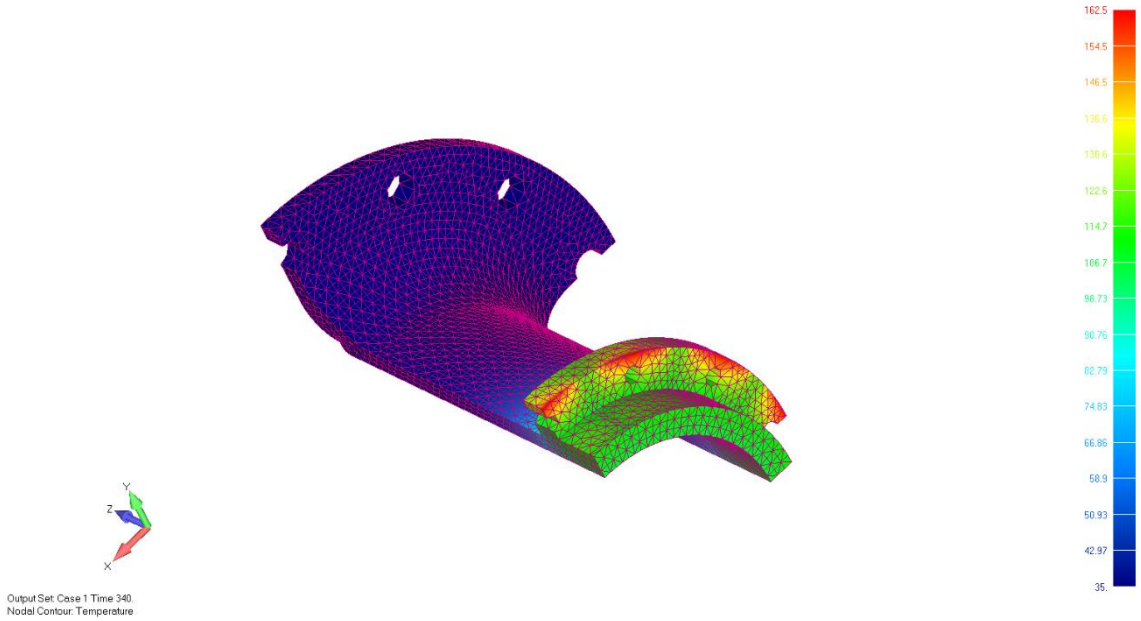


Abbildung 6-10: Temperaturverteilung am Fuss der Wellenbremsscheibe und im Torsionsrohr zum Zeitpunkt der maximalen Erwärmung (Stoppbremsung)

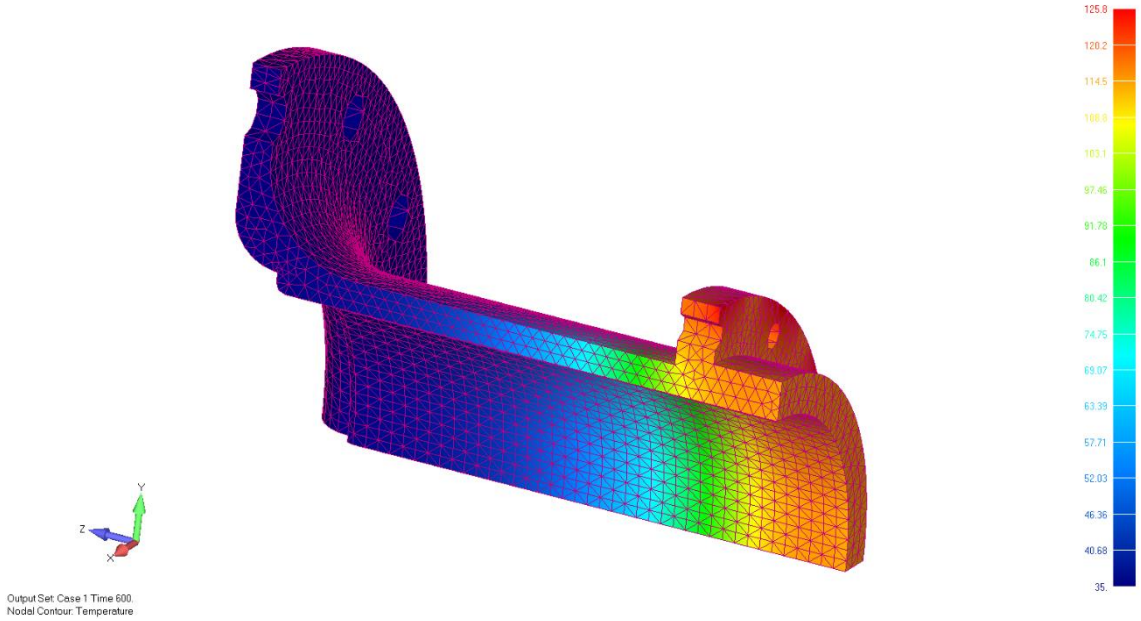


Abbildung 6-11: Temperaturverteilung am Fuss der Wellenbremsscheibe und im Torsionsrohr zum Ende der Simulation (Zeitpunkt der maximalen Erwärmung in der Nähe der FRP-Radsatzwelle (Stoppbremsung)

6.1.3 Stoppbremsung mit geringer Konvektion

Aufgrund der Kürze des Bremsvorganges und dem anschliessenden Stillstand wird bei dieser Stoppbremsung die Konvektion mit den Werten für die Relativgeschwindigkeit von 0 km/h angesetzt. Dieser konservative Ansatz berücksichtigt den Umstand, dass in vielen Berechnungsprogrammen die Konvektion als Funktion der Temperatur nicht aber als Funktion der Temperatur und der Zeit (bzw. der Strömungsgeschwindigkeit) definiert werden kann. Die folgende Abbildung 6-12 zeigt den Einfluss dieser Konvektion auf die Temperaturentwicklung in der Struktur und besonders im Torsionsrohr. Aufgrund der wesentlich geringeren Konvektionsgeschwindigkeit steigen auch die Temperaturen während der Bremsung an, d.h. die Simulation ist zu konservativ. Dafür wird die Temperaturentwicklung im Torsionsrohr mit dieser Analyse besser dargestellt.

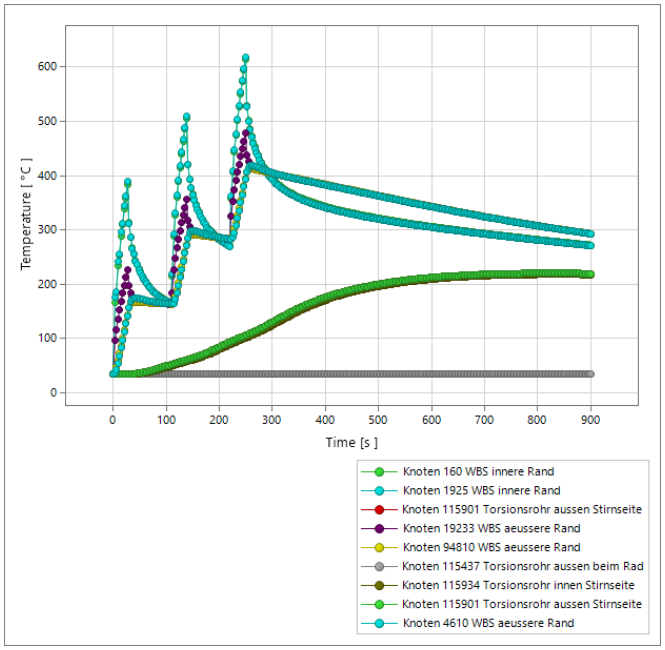


Abbildung 6-12: Zeitliche Temperaturänderung in unterschiedlichen Regionen von Wellenbremsscheibe und Torsionsrohr (Stoppbremsung mit Konvektionswerten für v = 0km/h)

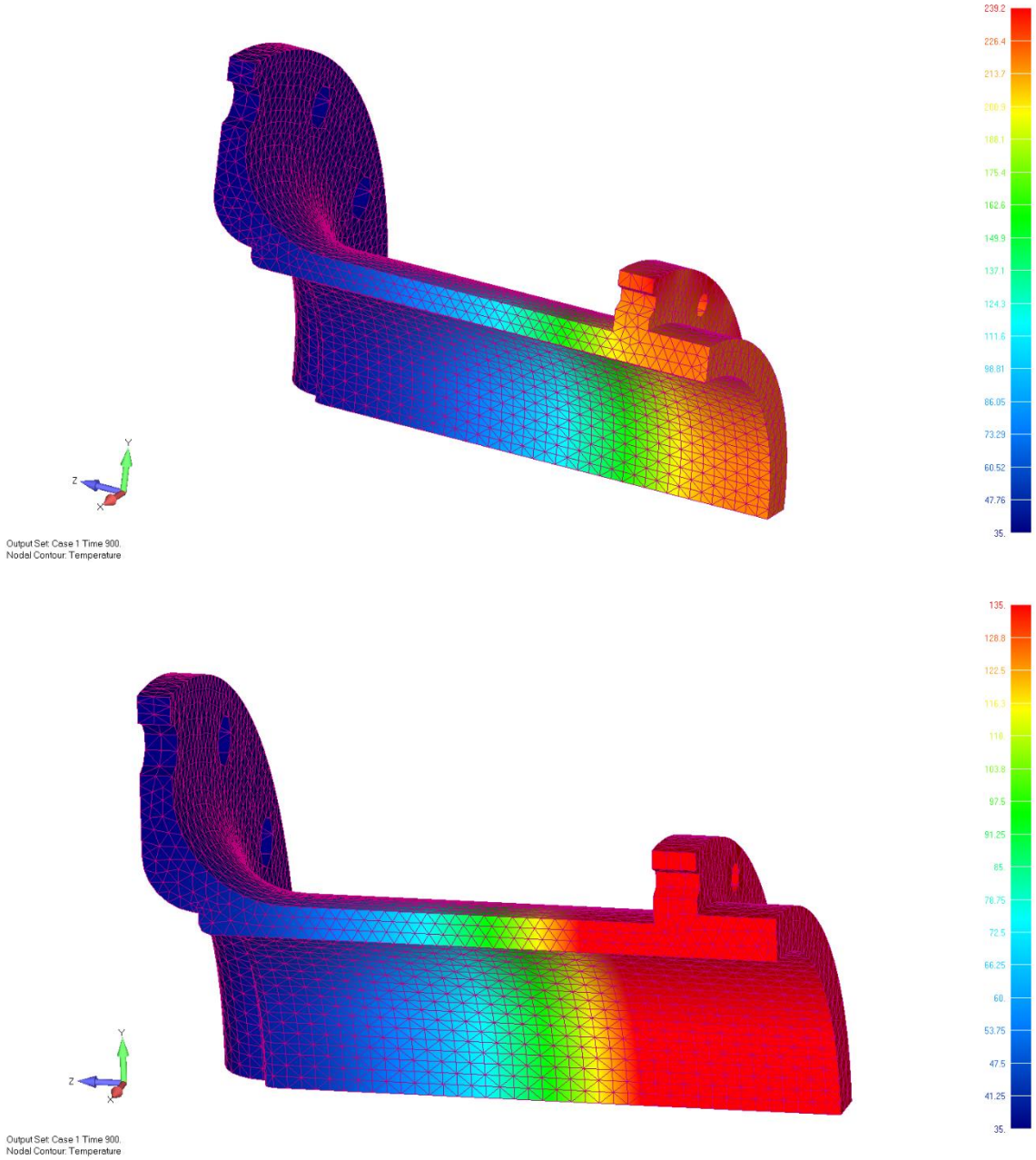


Abbildung 6-13: Temperaturverteilung am Fuss der Wellenbremsscheibe und im Torsionsrohr zum Ende der Simulation (Zeitpunkt der maximalen Erwärmung in der Nähe der FRP-Radsatzwelle (Stoppbremsung mit angepassten Konvektionswerten)

6.2 Beharrungsbremsung

Es wird jeweils eine Beharrungsbremsung gemäss Kapitel 4.2.4.3.3 der TSI-WAG [2] mit 45 kW über 34 Minuten betrachtet. Es ist zu betonen, dass bei allen Beharrungsbremsungen mit anschliessender Stoppbremsung die Konvektionswerte unverändert für die Beharrungsgeschwindigkeit von 70 km/h gelten und daher mögliche Effekte im Anschluss an die Stoppbremsung zu optimistisch darstellen.

6.2.1 Beharrungsbremsung ohne Stoppbremsungen

Die folgende Abbildung 6-14 zeigt die Temperaturentwicklung an unterschiedlichen Stellen der Wellenbremsscheibe, Torsionsrohr und in der Kontaktzone zum Faserverbundrad für dieses Bremsszenario und den Fall der abgenutzten WBS in Kombination mit einem neuen Rad (kritischster Fall). Abbildung 6-15 zeigt die Temperaturverteilung in der Bremsscheibe zum

Zeitpunkt der maximalen Temperaturentwicklung. Die maximale Temperatur der Bremsscheibe ist am Ort der Messung über dem zulässigen Wert der Dauertemperatur von 350°C (vgl. Tabelle 4-3, S. 12). Die Bremsscheibe wäre gemäss dieser Berechnung für diesen Einsatz nicht geeignet. Möglicherweise wird aus diesem Grund auch der zulässige Grenzwert in der Kontaktzone zur Welle mit 80°C (vgl. Tabelle 4-3, S. 12) weit überschritten. Aufgrund fehlender Unterlagen kann diese nicht verifiziert werden. Aufgrund der unveränderten Konvektionsparameter ist der Bezug zur Referenz der 3x-Stoppbremsung (siehe 6.1.1 Referenzuntersuchung zur Stoppbremsung, S. 17) gegeben. Gemäss diesem Ergebnis ist ohne eine thermische Isolation zwischen Torsionsrohr und FRP-Radsatzwelle deren Einsatz nicht möglich.

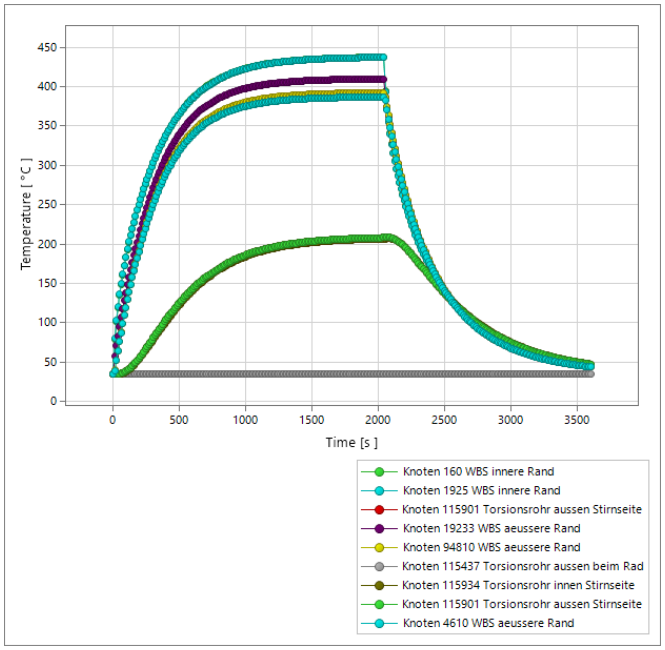


Abbildung 6-14: Zeitliche Temperaturänderung in unterschiedlichen Regionen von Wellenbremsscheibe und Torsionsrohr (Beharrungsbremsung mit 45 kW über 34 Minuten)

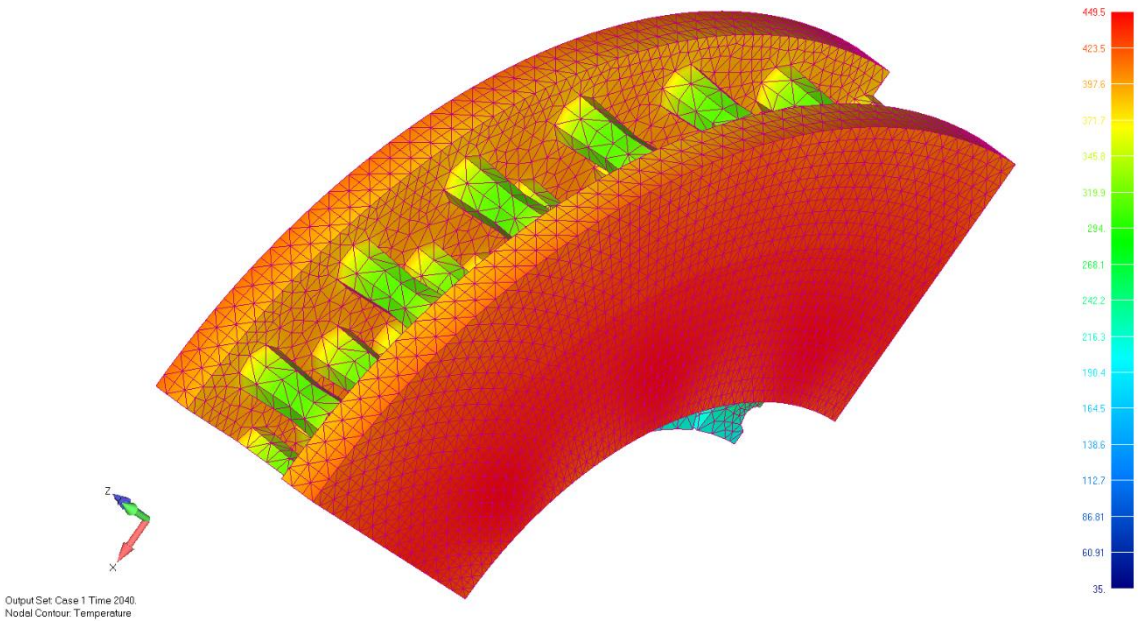


Abbildung 6-15: Temperaturverteilung in der Wellenbremsscheibe zum Zeitpunkt der maximalen Erwärmung (Beharrungsbremsung mit 45 kW über 34 Minuten)

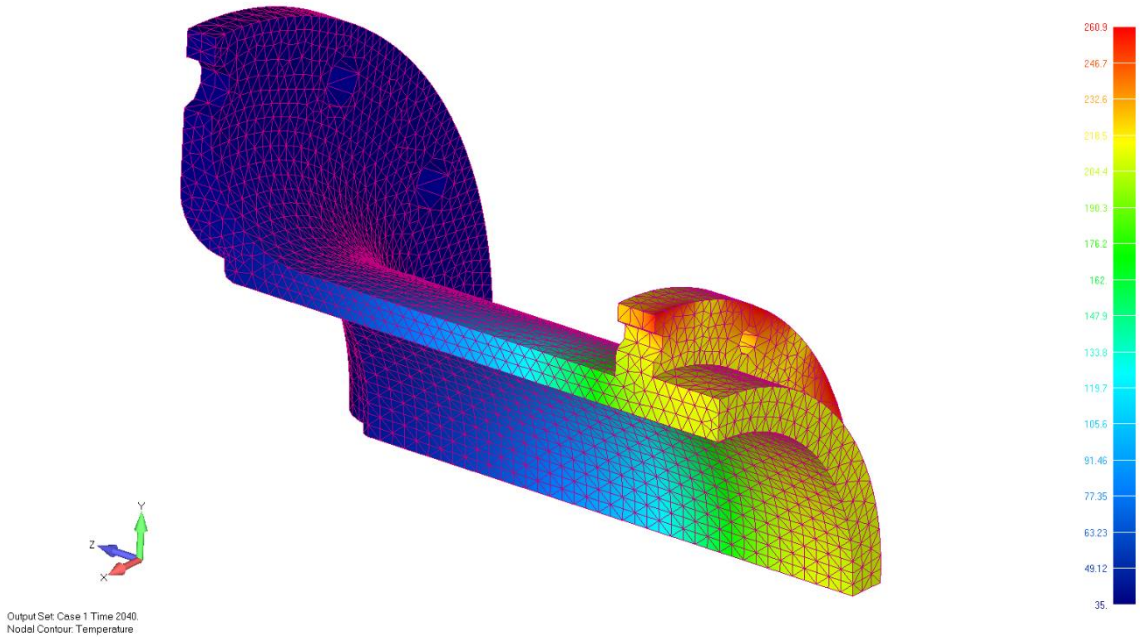


Abbildung 6-16: Temperaturverteilung am Fuss der Wellenbremsscheibe und im Torsionsrohr zum Zeitpunkt der maximalen Erwärmung (Beharrungsbremsung mit 45 kW über 34 Minuten)

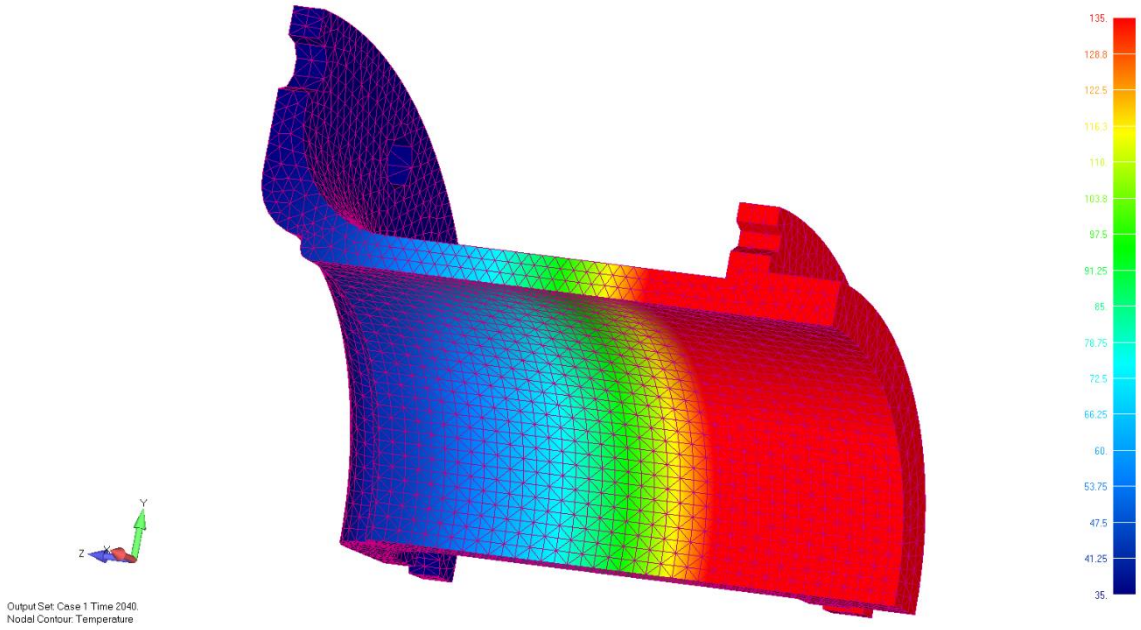


Abbildung 6-17: Temperaturverteilung am Fuss der Wellenbremsscheibe und im Torsionsrohr zum Zeitpunkt der maximalen Erwärmung (Beharrungsbremsung mit 45 kW über 34 Minuten, Skalierung bis 135°C)

6.2.2 Beharrungsbremsung mit Stoppbremsungen

Beharrungsbremsung mit Stoppbremsung aus 70 km/h

Die Stoppbremsung gleich im Anschluss an die Beharrungsbremsung, d.h. aus der Beharrungsgeschwindigkeit von 70 km/h hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Temperatur im Torsionsrohr bzw. die Faserverbundstruktur, wie aus dem Temperaturverlauf in Abbildung 6-18 ersichtlich ist.

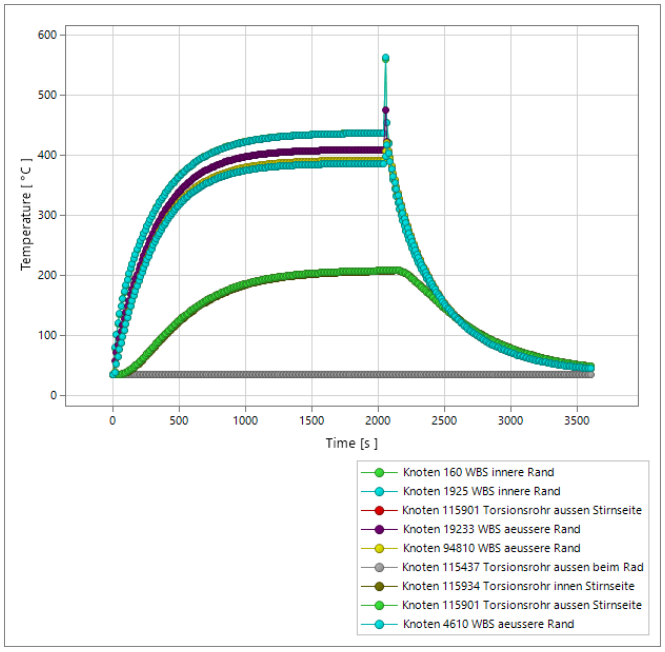


Abbildung 6-18: Zeitliche Temperaturänderung in unterschiedlichen Regionen von Wellenbremsscheibe und Torsionsrohr (Beharrungsbremsung mit 45 kW über 34 Minuten und Stoppbremse aus 70 km/h)

Beharrungsbremsung mit Stoppbremsung aus 120 km/h in der Ebene

Abbildung 6-19 zeigt die Temperaturentwicklung nach der Beharrungsbremsung und einer Stoppbremsung aus einer Geschwindigkeit von 120 km/h. In diesem Fall nimmt der zusätzliche Energieeintrag auch Einfluss auf die Temperatur im Torsionsrohr und somit auf die Temperaturen in der Nähe der Faserverbundstruktur. Es ist jedoch festzuhalten, dass der Energieeintrag für diesen Lastfall voraussichtlich (leicht) über den zulässigen Grenzwerten der Wellenbremsscheibe sind (Abbildung 5-2, S. 15) und daher die Ergebnisse eher qualitativen Charakter haben. Zudem ist zu betonen, dass aufgrund der Programmbedingten Definition der Konvektionswerte diese im Anschluss an die Beharrungsbremsung zu optimistisch sind und daher gegenüber Abbildung 6-19 höhere Temperaturen im Torsionsrohr zu erwarten sind.

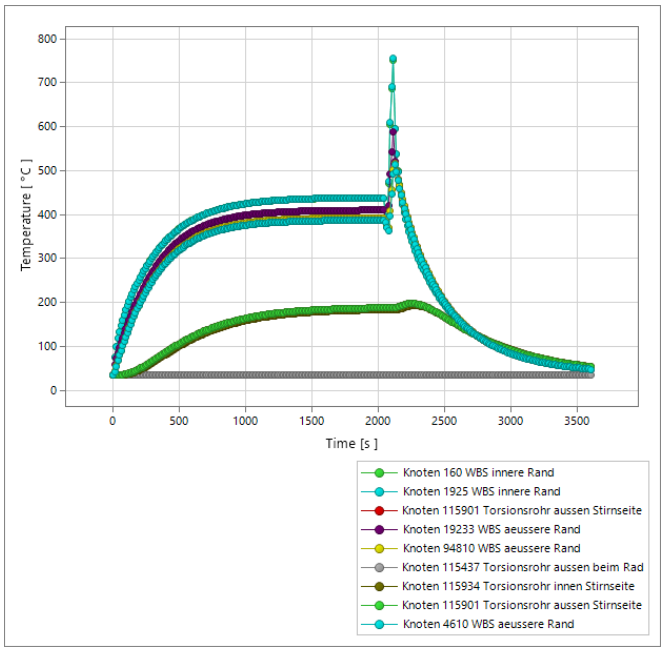


Abbildung 6-19: Zeitliche Temperaturänderung in unterschiedlichen Regionen von Wellenbremsscheibe und Torsionsrohr (Beharrungsbremsung mit 45 kW über 34 Minuten und Stoppbremse aus 120 km/h)

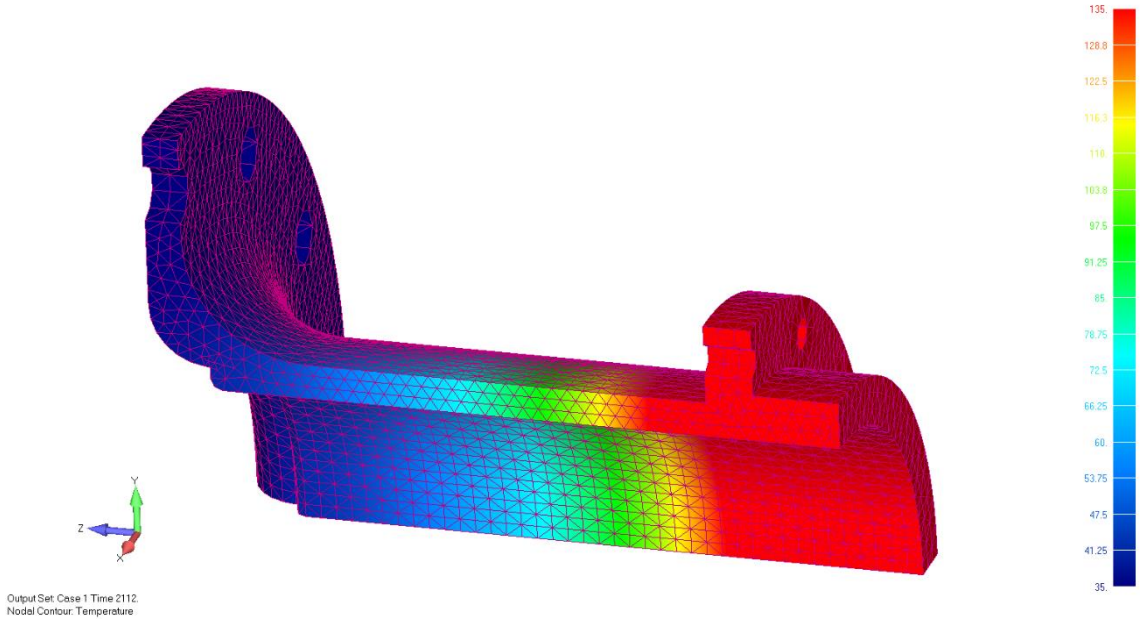


Abbildung 6-20: Temperaturverteilung im Torsionsrohr zum Zeitpunkt der maximalen Erwärmung (Beharrungsbremsung mit 45 kW über 34 Minuten und zusätzliche Stoppbremsung aus 120 km/h in der Ebene, Skalierung bis 135°C)

Angesichts der Unsicherheiten, mit denen die thermischen Berechnungen zu bewerten sind, wurde Knorr-Bremse Systems for Rail Vehicles GmbH als Bremsspezialist um Temperaturangaben am Fuss von Güterwagenwellenbremsscheibena für das betrachtete TSI- Bremsszenario gebeten. Diese empfehlen für diese Schnittstelle und Beharrungsbremse ohne Stoppbremse eine Temperatur von (mindestens) 150°C anzusetzen. Eine thermische Isolation zwischen Torsionsrohr und Verbundradsatzwelle ist daher bei dem Einsatz der bisher erwähnten Werkstoffe (siehe Tabelle 4-3, S. 12) dringend erforderlich.

7 Deformationsberechnung

Aufgrund der hohen Temperaturen im Bereich des Torsionsrohrs in unmittelbarer Nähe der Wellenbremsscheibe ist eine Isolation des Faserverbundkörpers empfehlenswert. In diesem Zusammenhang wird mit folgender Untersuchung die Änderung des Abstandes zwischen Torsionsrohr und Faserverbundwelle betrachtet. Die untersuchte Struktur ist in Abbildung 7-1 dargestellt während aus Abbildung 7-2 das FE-Modell ersichtlich ist. Die Untersuchung zeigt, dass der Abstand von 5 mm zwischen Torsionsrohr und FRP-Welle infolge der bekannten Belastungen aus Bremsen und Kurvenlauf konstant bleibt und somit diese ganze Höhe für die Isolation zur Verfügung steht.

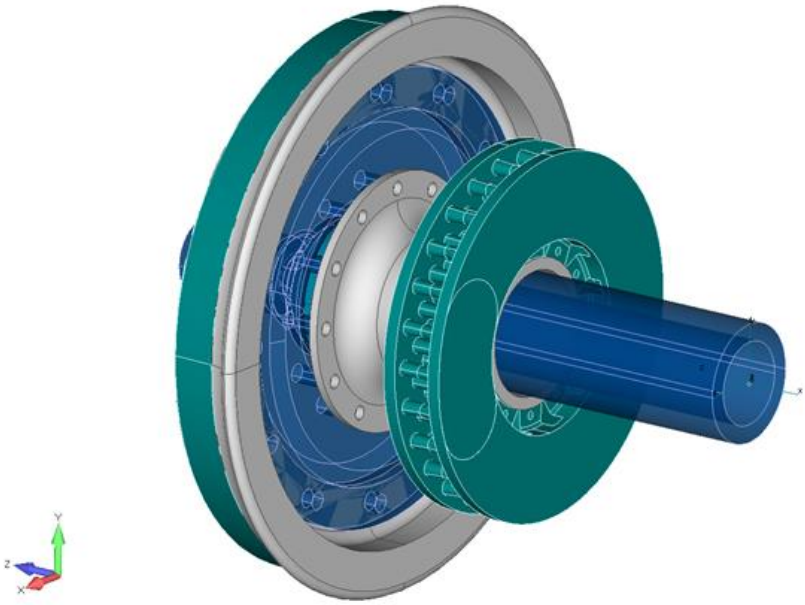


Abbildung 7-1: Geometrie des Verbundradsatzes mit Wellenbremsscheibe und angedeuteter Wirkfläche des Bremssattels

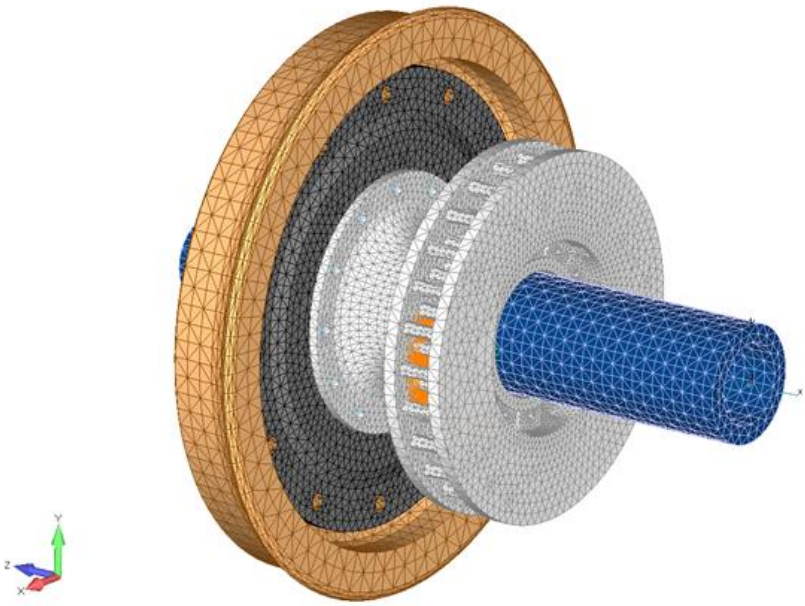


Abbildung 7-2: Teilmodell des Verbundradsatzes

Das Modell wir mit den Belastungen des höherbelasteten (kurvenäusseren) Rads beim Bogenlauf in Kombination mit Lasten infolge des mechanischen Bremsens beaufschlagt. Zudem werden neben den Symmetrierandbedingungen unterschiedliche Randbedingungen (Einspannungen) der Wellenbremsscheibe betrachtet.

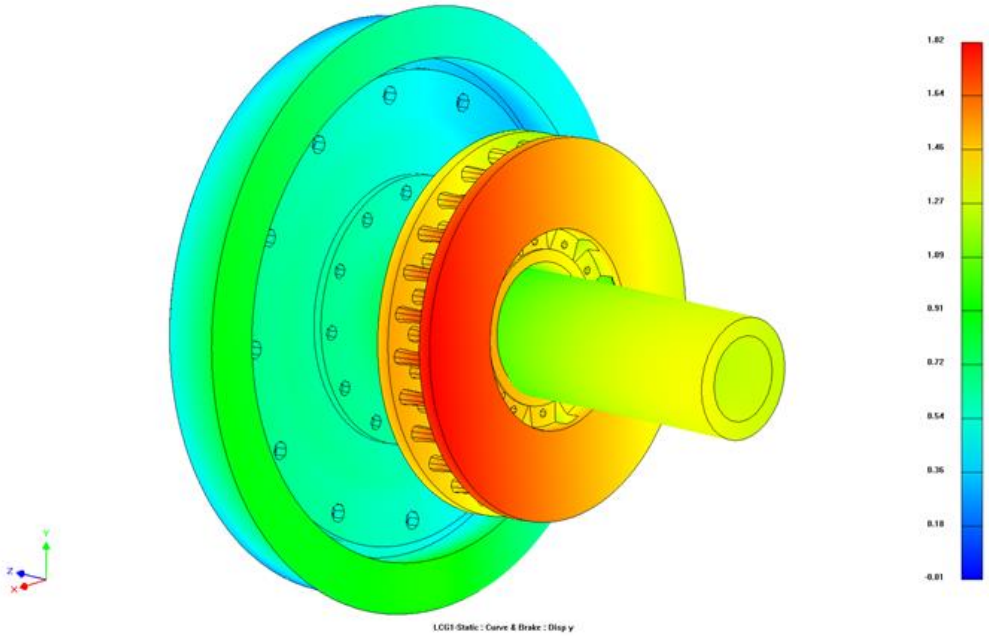


Abbildung 7-3: Verschiebungsfeld des Verbundradsatzes infolge des mechanischen Bremsens im Bogenlauf

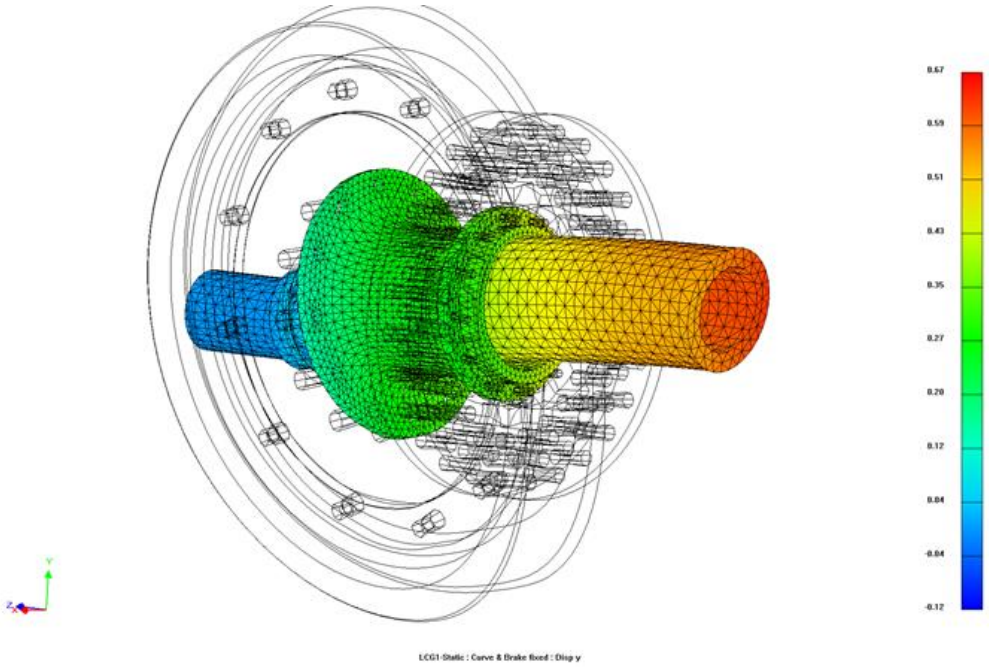


Abbildung 7-4: Verformungsplot der Verbundradsatzwelle infolge des mechanischen Bremsens im Bogenlauf

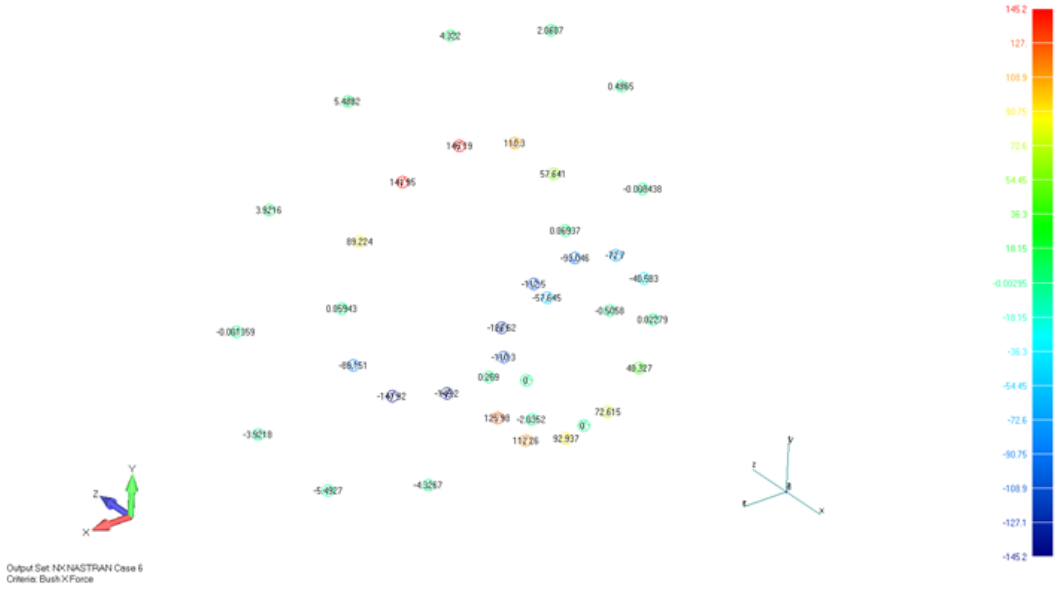


Abbildung 7-5: Axialbelastungen innerhalb der unterschiedlichen Verbindungselemente zwischen CFK-Rad und Torsionsrohr, CFK-Rad und Radreifen sowie zwischen Torsionsrohr und Wellenbremsscheibe infolge des mechanischen Bremsens im Bogenlauf

8 Alternative Anwendungen

Aufgrund der klaren Tendenzen der Untersuchungsergebnisse wird die Anwendung einer Faserverbundwelle bei Güterwagen als anspruchsvoll angesehen. Es sind weitere Abklärungen erforderlich (siehe Kapitel 9 Zusammenfassung). Aus diesem Grund werden an dieser Stelle bereits mögliche Alternativen zur Verbesserung der Situation als auch alternative Anwendungen einer derartigen Faserverbundwelle betrachtet.

Eine Alternative zur Verbesserung der Situation ist der Ersatz der Faserverbundwelle durch eine normale metallische Radsatzwelle. Dadurch wird die thermische Belastbarkeit wesentlich verbessert. In diesem Fall wird lediglich der Faserverbundkörper der Radsatzwelle 1:1 durch eine stählerne Radsatzwelle ersetzt. Der Kraftfluss zwischen Wellenbremsscheibe und Rad könnte weiterhin über das Torsionsrohr erfolgen, weil die strukturelle Verklebung zwischen Rad und Wellenkörper nicht die mechanischen Belastungen aus dem Bremsen übertragen kann. Weil die akustischen Eigenschaften durch das Rad und nicht durch die Welle bestimmt werden, bleibt der akustische Vorteil weiterhin bestehen. Während das Gewicht dieser Verbundradsatz natürlich zunimmt, würden die Kosten durch das günstigere Material dagegen signifikant sinken. Es werden jedoch Korrosionsprobleme an der Schnittstelle zwischen Stahl- und CFK-Verbundkörper erwartet, die genauer zu untersuchen sind, weil diese voraussichtlich nicht durch den Einsatz von Glasfasern behoben werden können.

Eine alternative Anwendung der Faserverbundradsatzwelle könnte das thermische Problem verbessern, d.h. es sind Anwendungen zu betrachten, bei denen wesentlich geringere thermische Belastungen auftreten. Als Beispiel sei die im Jahr 2018 abgeschlossene Modernisierung der Zürcher S-Bahn (LION DPZ+) genannt, bei der die Komposition generell generatorisch gebremst wird und infolgedessen an den Wellenbremsscheiben der Laufradsätze gegenüber dem Beharrungsbremslastfall bei Güterwagen wesentlich geringere thermische und mechanische Belastungen auftreten. Gleichzeitig ermöglicht die Massenreduktion infolge einer Verbund-radsatzwelle eine leichtere Einhaltung der zulässigen Radsatzlast. D.h. die bei derartigen Fahrzeugen erforderliche Massnahmen zur Einhaltung der Radsatzlast könnten ggf. entfallen bzw. geringer ausfallen und somit sind die Mehrkosten der Radsatzwelle durch den Wegfall andere Massnahmen leichter zu kompensieren. Auch könnte ggf. aufgrund der geringeren Schall-

abstrahlung der Faserverbundräder das Kurvenquietschen im Bahnhof Stadelhofen positiv beeinflusst werden.

9 Zusammenfassung

Dieser Bericht behandelt die Temperaturentwicklung in einer Wellenbremsscheibe infolge von Beharrungs- und Stoppbremsungen mit unterschiedlichen Bremsanforderungen. Die Untersuchung zeigt, dass die dabei auftretende Temperaturen in der Nähe der Wellenbremsscheibe stellenweise weit über den zulässigen Temperaturwert des Faserverbundwerkstoffes liegen, sich aber innerhalb des metallischen Torsionsrohrs auf ein Niveau reduzieren, welches an der Schnittstelle zum Rad unterhalb der kritischen Temperaturen für den Faserverbundwerkstoff sind. Die Untersuchung gibt die Grössenordnung der zu erwartenden Temperaturen und die grundlegenden Zusammenhänge wieder. Obwohl ein Vergleich mit Messfahrten angestrebt wurde, weist sie Untersuchung aufgrund fehlender Unterlagen und dem erforderlichen spezifischen Fachwissen einige Unsicherheiten auf. Aus diesem wurde zudem ein Bremsspezialist (Knorr-Bremse Systems for Rail Vehicles GmbH) angefragt seinerseits Auslegungstemperaturen am Fuss von Güterwagenwellenbremsscheibe für das betrachtete TSI- Bremsszenario gemäss Kapitel 4.2.4.3.3 der TSI-WAG [2] zu geben. Dieser empfiehlt für dieses Bremsszenario, d.h. ohne Stoppbremsung im Anschluss an die Beharrungsbremsung eine Temperatur von mindestens 150°C. Eine thermische Isolation zwischen Torsionsrohr und Verbundradsatzwelle ist daher bei dem Einsatz der bisher erwähnten Werkstoffe (siehe Tabelle 4-3, S. 12) dringend erforderlich. Der Freiraum für eine derartige Isolationsschicht ist gemäss einer Deformationsberechnung grundsätzlich gegeben. Aufgrund der klaren Tendenzen der Untersuchungsergebnisse werden zudem Alternativen bzgl. Anwendung und Konstruktion der Faserverbundwelle gegeben, mit der diese Situation entschärft werden könnten. Es wird auf jeden Fall empfohlen das thermische Verhalten für die jeweilige konkrete Anwendung genauer zu untersuchen und diesbezüglich mehr Ressourcen in der Projektplanung bereitzustellen. Dies sollte ebenfalls die Temperaturmessung an Güterwagen beinhalten, um mit deren Hilfe ggf. das thermische Anforderungsprofil reduzieren zu können (mit dem Wissen, dass dieser Radsatz u.U. nicht die TSI-Anforderungen erfüllen wird).

10 Literatur

10.1 Administrative Unterlagen und übergeordnete Dokumente

[1] *ORE Bericht B169 RP 1 „Thermische Grenzen der Räder und Bremsklötze“,* Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes, September 1987

[2] VERORDNUNG (EU) Nr. 321/2013 DER KOMMISSION vom 13. März 2013 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge - Güterwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union und zur Aufhebung der Entscheidung 2006/861/EG der Kommission

[3] AUSFÜHRUNGSBESTIMMUNGEN ZUR EISENBAHNVERORDNUNG (A B - E B V) Stand am 1. Juli 2016

10.2 Technische Unterlagen

[4] (Zeichnung) Radsatz kpl für Design 2 FRP-Radsatz, FRPRS_2_RSWelle -A, Carbo-Link AG, T. Good, 19.02.2018

[5] Zwischenbericht zum BAFU-Forschungsprojekt, Vertragsnummer 1337000317 - Neuartige Radsätze zur Lärm- und Gewichtsreduktion bei Schienengüterwagen aus faserverstärktem Kunststoff Zwischenbericht, 25. Januar 2018

[6] Lieferspezifikation Verbundradsatz, PROSE 04-02-00517 Rev. 1.0, R. Paradies, 14.08.2018