

# Betriebsfestigkeit und Leichtbau am Beispiel Drehgestell

47. Tagung „Moderne Schienenfahrzeuge“

Martin Leitner<sup>1</sup>, Peter Brunnhofer<sup>1</sup>, Stefan Erlach<sup>2</sup>, Diemo Wojik<sup>2</sup>

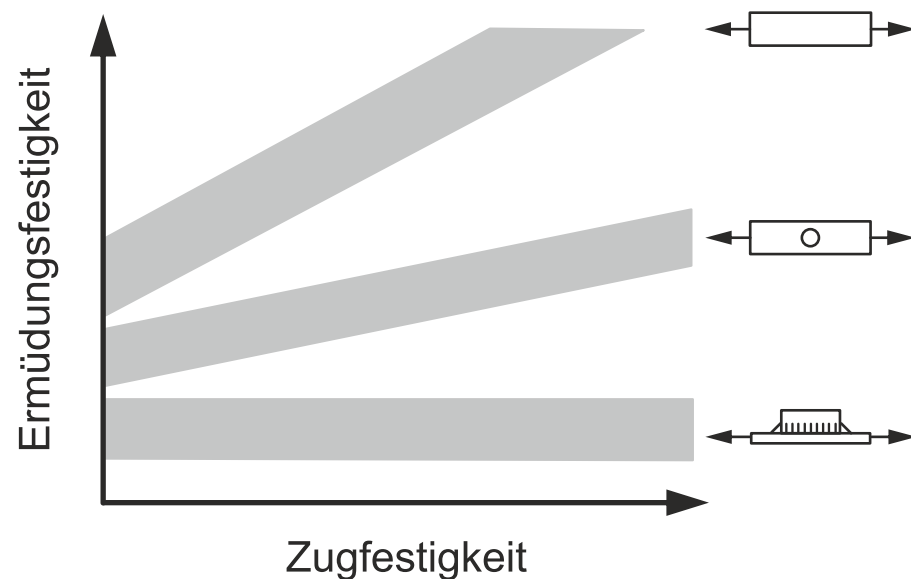
<sup>1</sup>Institut für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik, TU Graz

<sup>2</sup>Siemens Mobility Austria GmbH

# Motivation

Wesentliche Motivation für Leichtbau: Erhöhung der Energieeffizienz, weniger Emissionen und Schädigung von Rad, Gleis und Oberbau, Reduktion der Lebenszykluskosten

Leichtbauweise durch: Anwendung alternativer oder höherfester Werkstoffe, Beanspruchungsgerechte Konstruktion, Berücksichtigung der Fertigung, Funktion und Lebensdauer sowie weiterer Randbedingungen

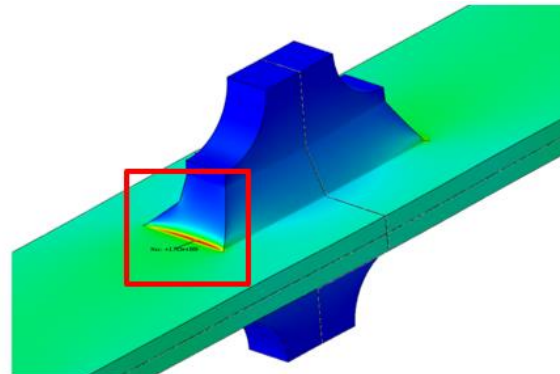
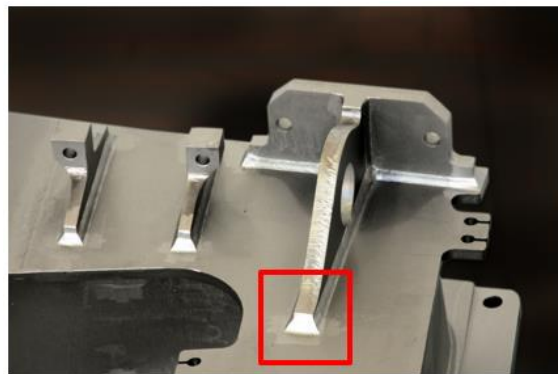


[Naess, Fatigue Handbook, 1985]

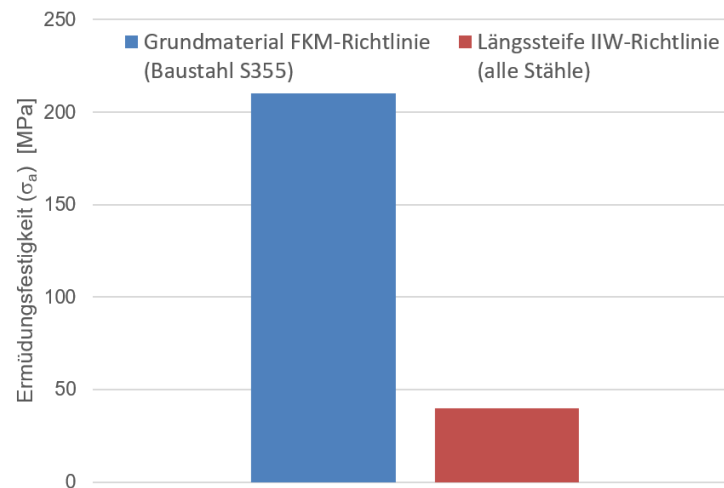
- Fokus auf geschweißte Strukturen am Beispiel Drehgestell
- Anwendung höher-/hochfester Stähle zur Erhöhung des Leichtbaupotentials:
  - Wesentliche Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit speziell bei ungekerbten Strukturdetails (Grundmaterial)
  - Moderate Erhöhung im Falle geringer Kerbwirkung
  - Keine Erhöhung im Falle geschweißter Verbindungen

# Ermüdungsfestigkeit geschweißter Verbindungen

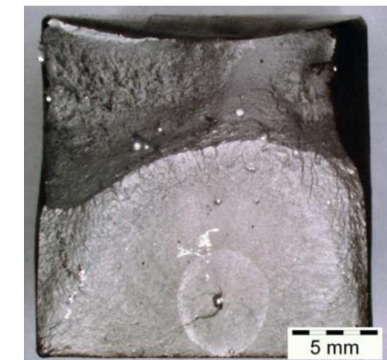
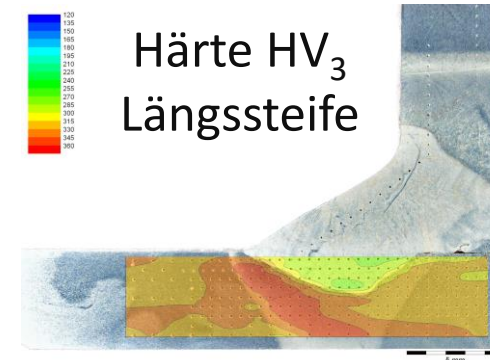
Schweißen kann zu einer wesentlichen Reduktion der Ermüdungsfestigkeit durch folgende Einflüsse führen:



- Kerbwirkung (Nahtübergang und/oder Wurzel)
- Komplexe (Zug-)Eigenspannungszustände
- Unterschiedliche Gefügestrukturen im Bereich der Wärmeeinflusszone (Ort der Rissinitiierung)
- Ungänzen/Defekte (beispielsweise Gasporen)
- Überlagerte Effekte bei der Montage durch schweißbedingte Verformungen (Verzug)



→ Reduktion der Ermüdungsfestigkeit um rund 80% für den Fall einer Längssteife (Vergleich bei  $R_{Last}=-1$  und Annahme hoher Eigenspannungen)

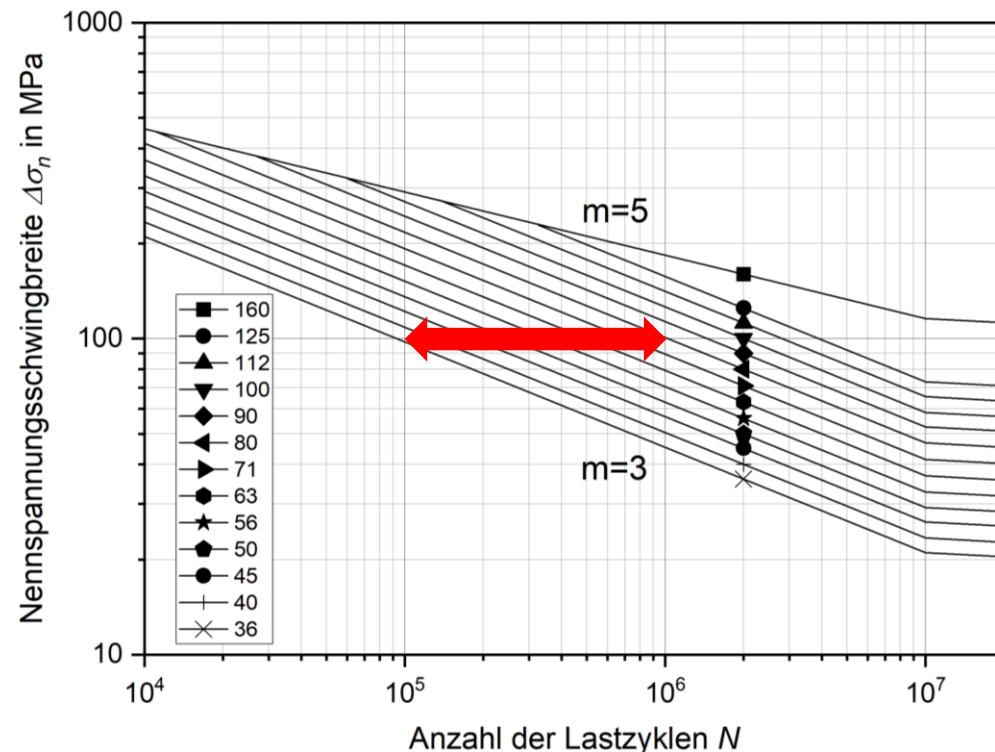


[Leitner et al., Weld World 58, 2014 / Leitner et al., Metals 8, 2018]

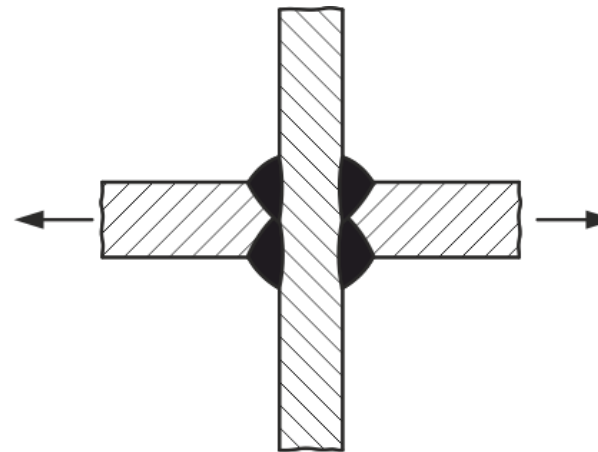
# Auslegung nach der IIW-Richtlinie

Wöhlerliniennetz für Stahl mit entsprechenden Kerbfallklassen unabhängig von der Festigkeit des Grundmaterials

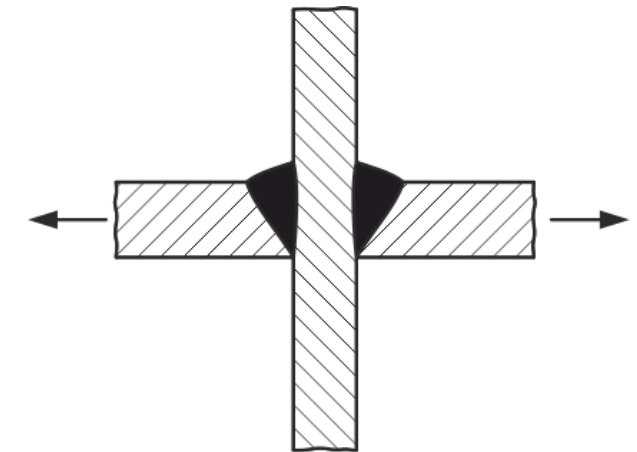
- Kreuzstöße aus Stahl mit Vollanschluss und beidseitig geschweißten Nähten: FAT-Klasse bis zu 80 MPa
- Für einseitig geschweißte Nähte und Rissinitiierung von der Wurzel: FAT-Klasse von 36 MPa ( $\sigma_a=18$  MPa)



Kreuzstoß mit Vollanschluss



ohne Vollanschluss

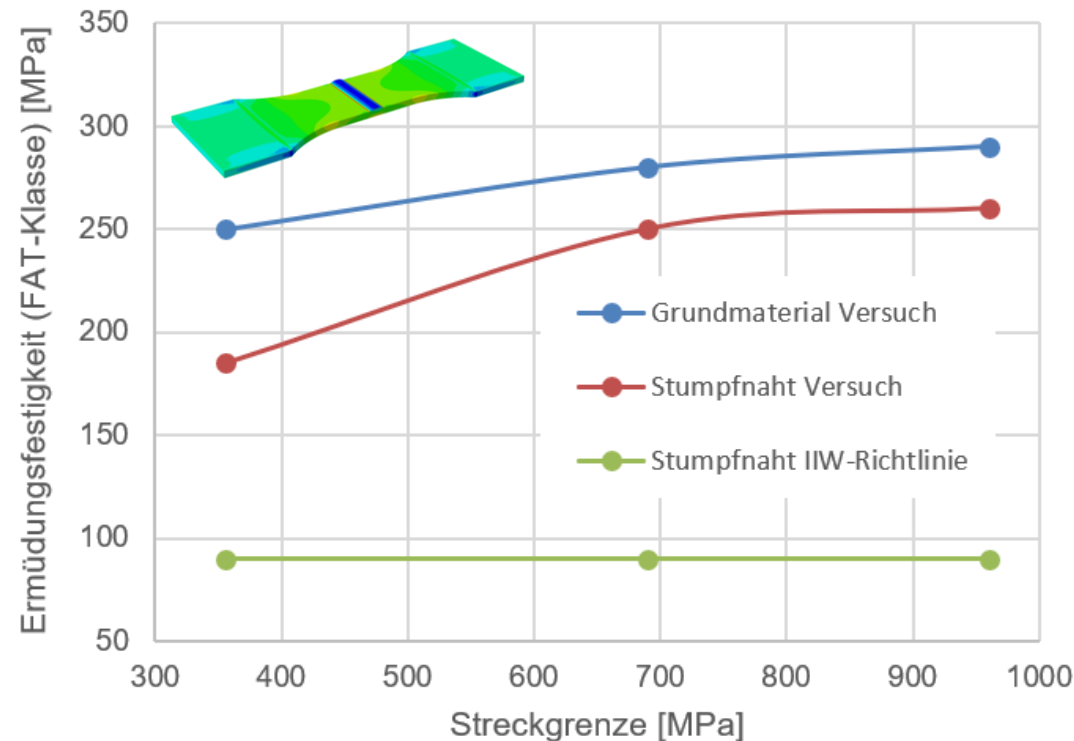


- Unterschied in Lebensdauer bei einer Nennbeanspruchung von 100 MPa um rund einen Faktor 10!

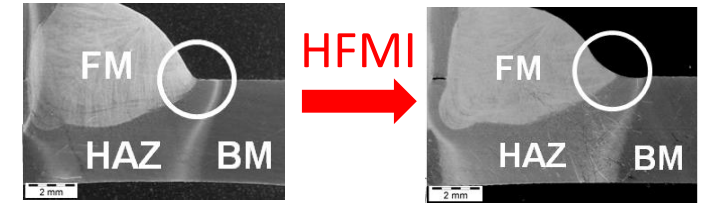
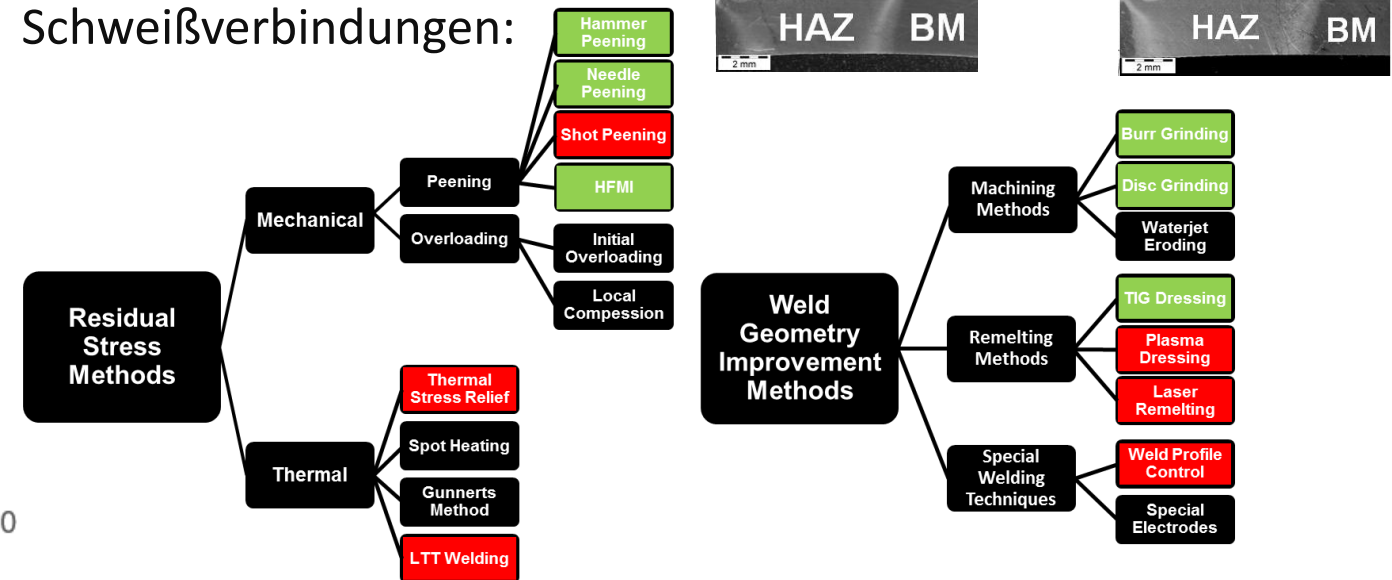
[Hobbacher, Springer, 2016]

# Höherfeste Stähle und Schweißnahtnachbehandlung

- Versuche an strukturellen Details mit vergleichsweise geringer Kerbwirkung (Stumpfnahthproben) zeigen eine Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit (FAT-Klasse) bei einer Anwendung höherfester Stähle als Grundmaterial
- Besonders bei höherfesten Stählen zeigen Schweißnahtnachbehandlungsverfahren eine gute Wirkungsweise



Gängige Methoden zur Nachbehandlung von Schweißverbindungen:

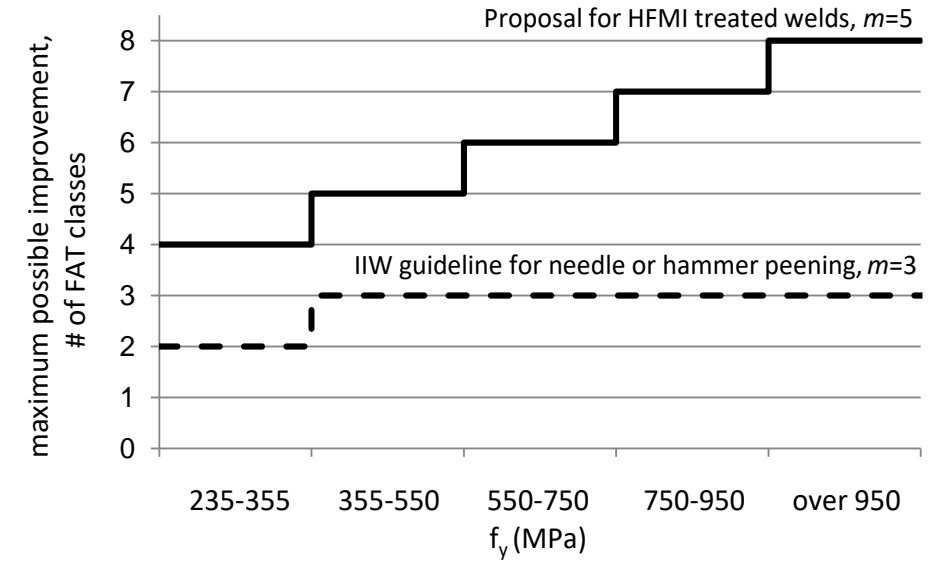
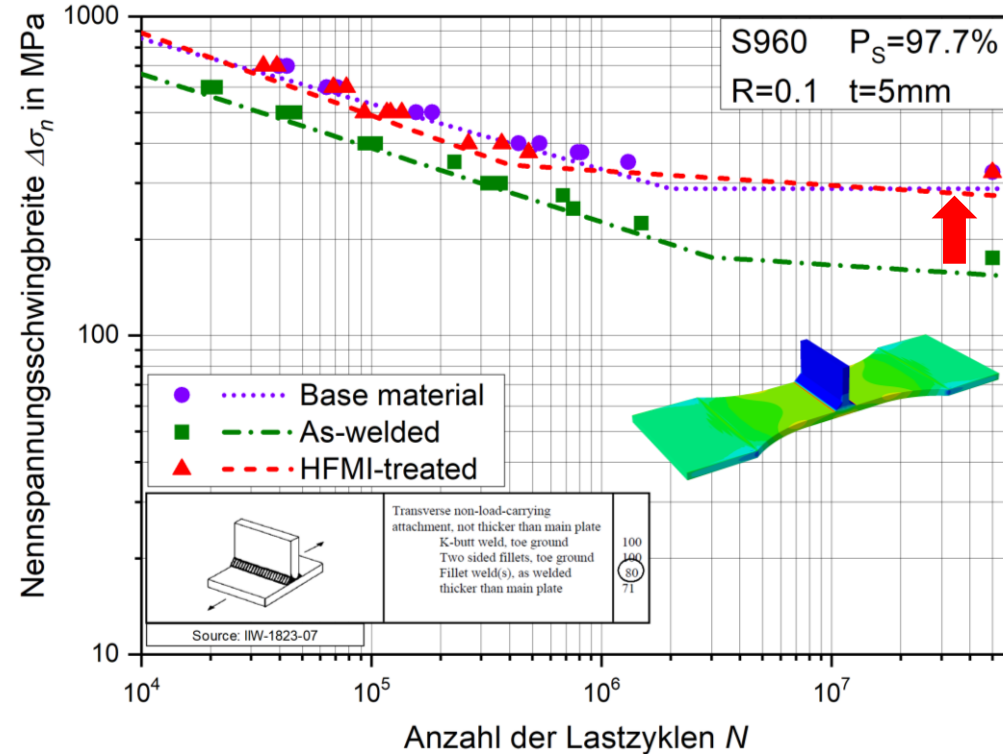


[Leitner et al., Weld World 58, 2014 / Leitner, Barsoum, Welding in the World 64, 2020]



# Anwendung HFMI-treatment

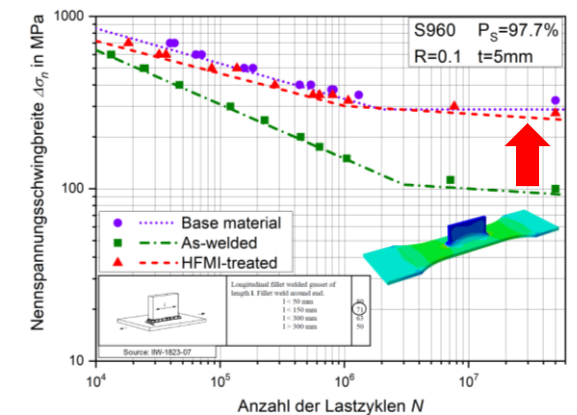
- Nahezu Verdoppelung der Langzeitfestigkeit bei T-Stoß
- HFMI-Zustand annähernd gleich der Grundmaterialfestigkeit
- IIW-HFMI-Empfehlungen in Abhängigkeit der Streckgrenze



## HFMI-Nachbehandlung T-Stoß



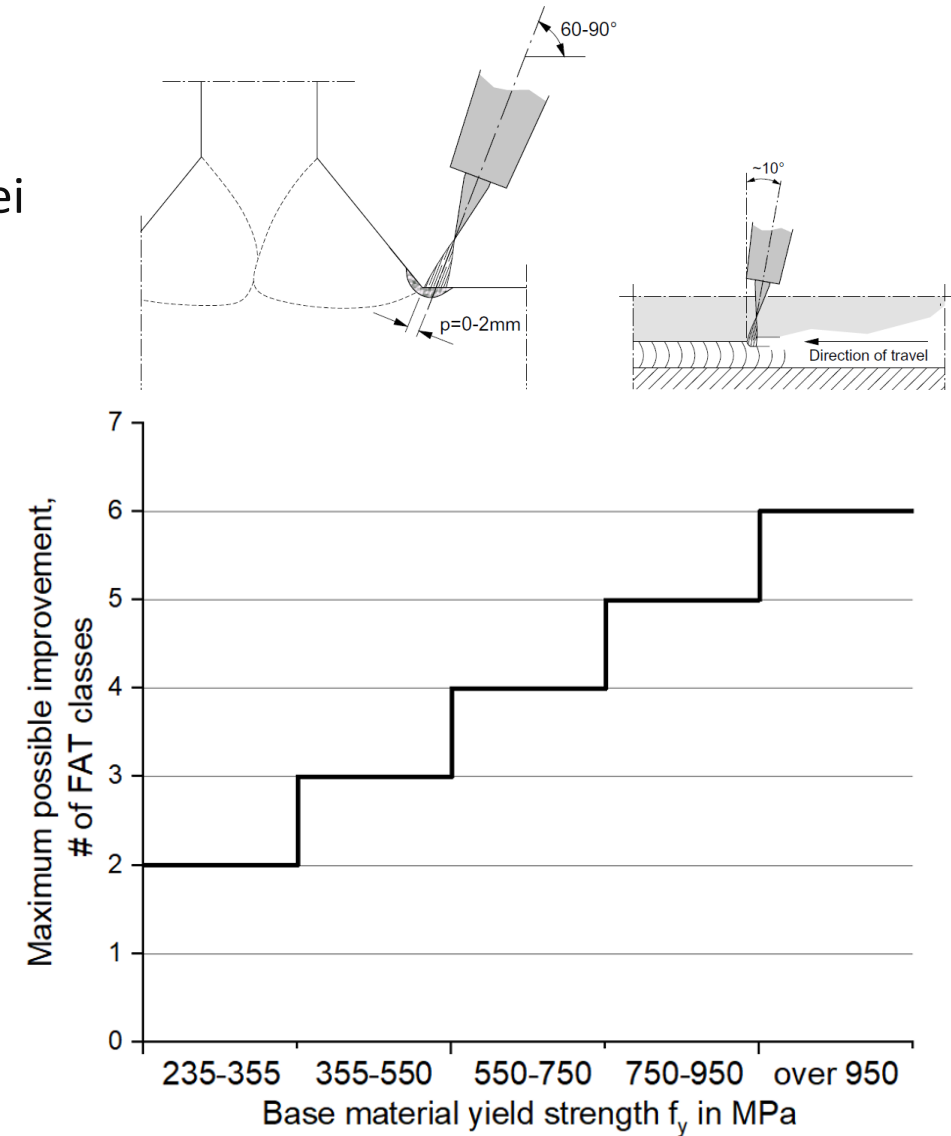
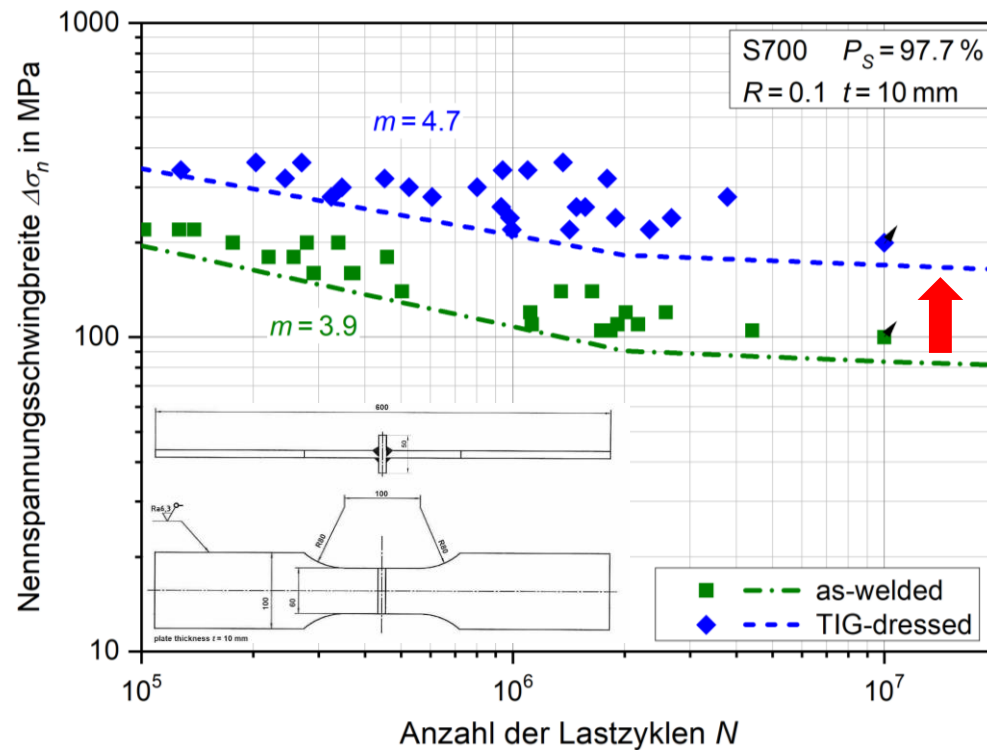
## Längssteife: Steigerung um Faktor 2,5!



[Leitner et al., Weld World 58, 2014 / Marquis, Barsoum, Springer, 2016]

# Anwendung TIG-dressing

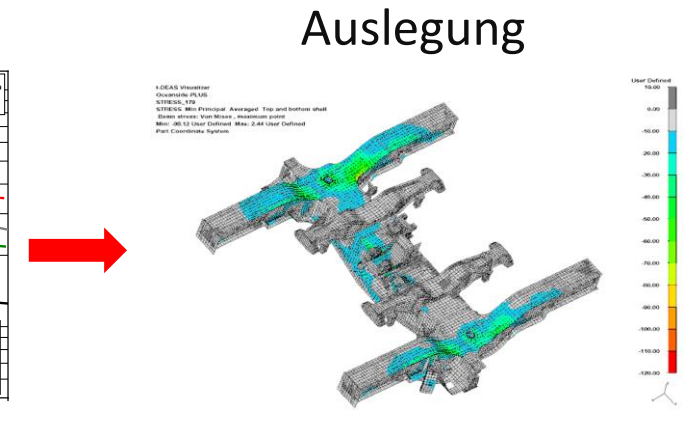
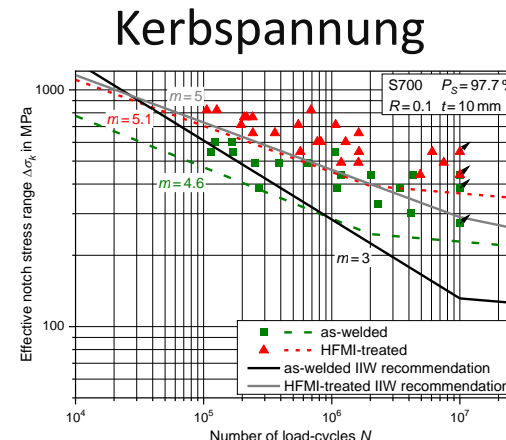
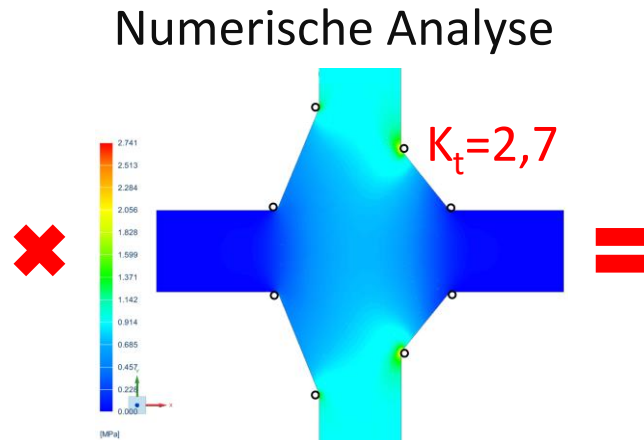
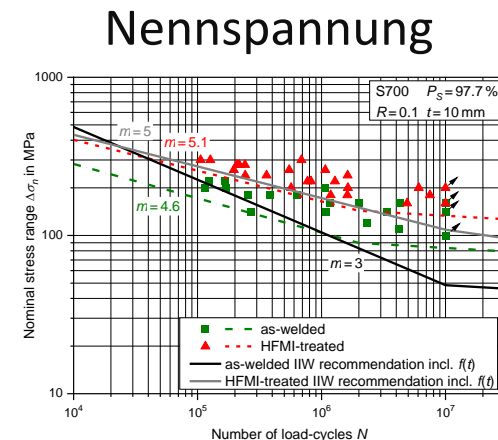
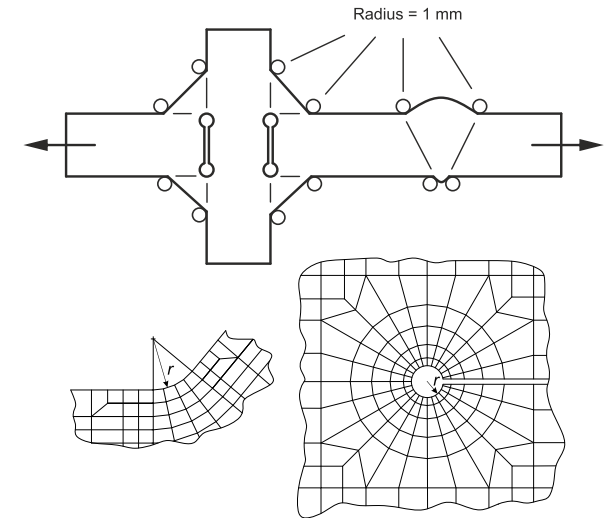
- Erhöhung der Langzeitfestigkeit um Faktor von rund zwei
- Richtlinien zur effektiven und praktikablen Anwendung
- Vorschläge für mögliche IIW-Empfehlungen vorhanden



[Brunnhöfer et al., IIW-Dokument XIII-2893-2021, 2021 / Haagenen, Maddox, XIII-2200r7-07, 2007 / Yildirim et al., International Journal of Fatigue 79, 2015]

# Lokale Auslegungsmethodik

- Modellierung von Nahtübergang und Wurzeln mit fiktivem Kerbradius von  $r=1\text{mm}$  nach dem effektiven Kerbspannungskonzept (Mikrostützwirkung)
- Richtlinien zur einheitlichen FE-Modellierung (Vernetzung, Elementtyp)
- Anwendung von Spannungskonzentrationsfaktor  $K_t$  auf Versuchsergebnisse in Nennspannungen ergibt entsprechende Kerbspannungswöhlerlinien
- Auslegung komplexer Schweißstrukturen anhand globaler Modelle unter Anwendung von Submodellen zur lokalen Bewertung einzelner Details

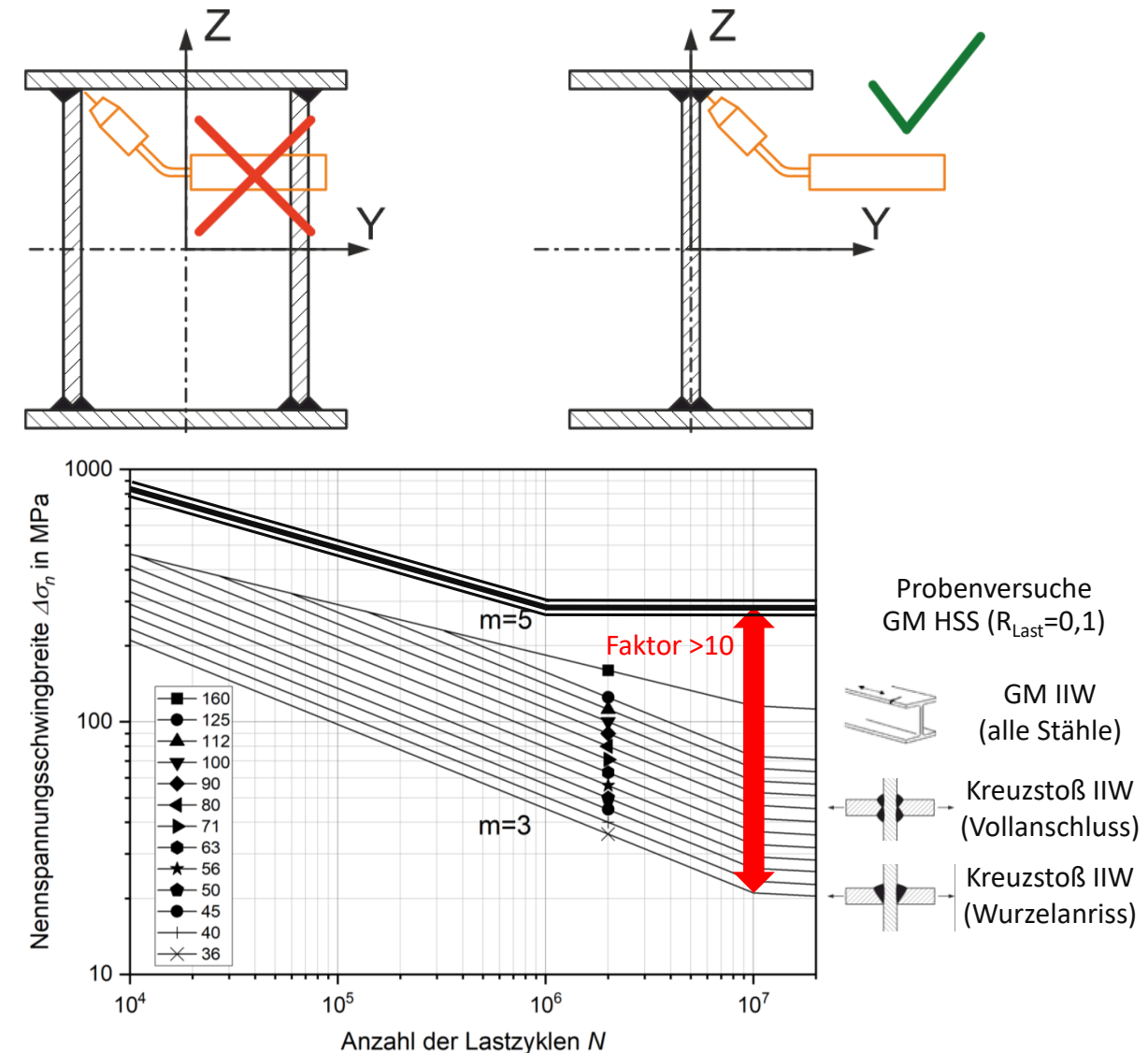
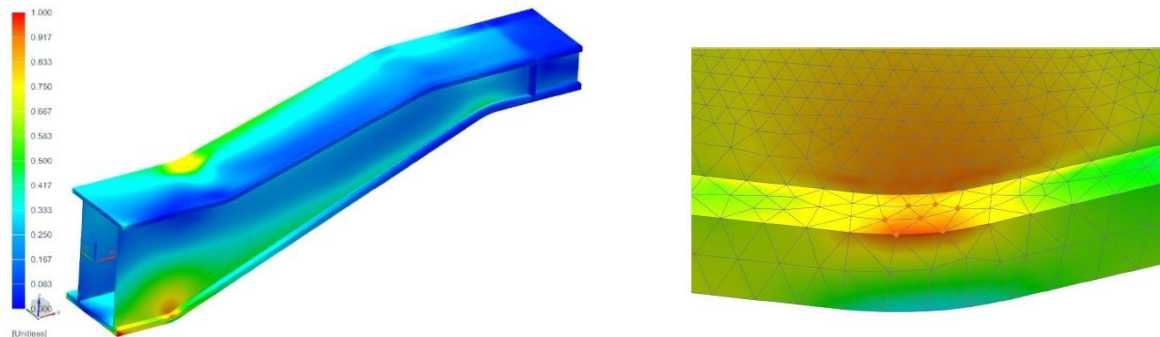


[Brunnhofer et al., Procedia Structural Integrity 38, 2022 / Siemens Mobility / Hobbacher, Springer, 2016]



# Konstruktionsaspekte

- Fertigung: Offene Profile (I-Profile) mit beidseitiger Schweißbarkeit (Anriss Nahtübergang) anstelle von geschlossenen Profilen (Anriss Wurzel)
- Kraftfluss: Beanspruchungsgerechte Gestaltung mit Zonen höherer Spannungen vorrangig in Bereichen des Grundmaterials (GM) und nicht im Bereich von Schweißverbindungen
- Wesentliche Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit speziell bei höher-/hochfesten Stählen (HSS)

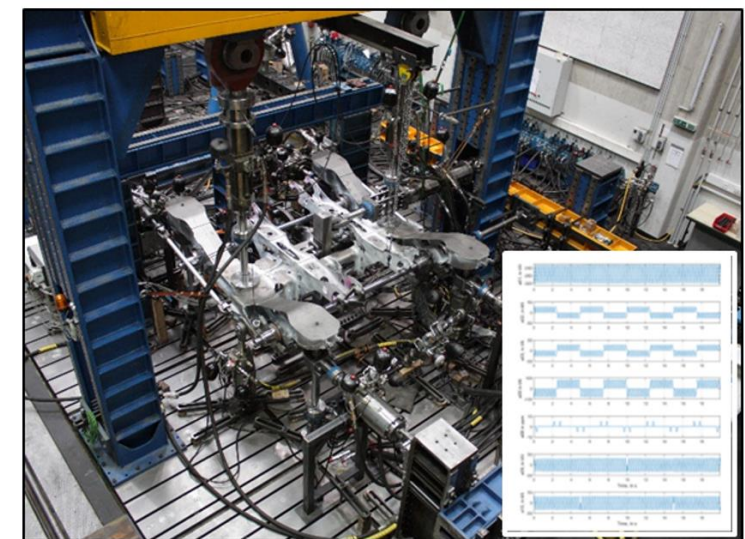
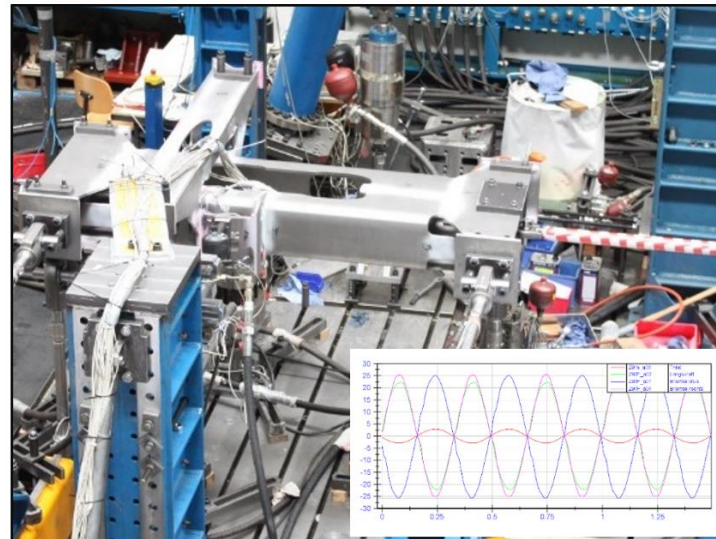
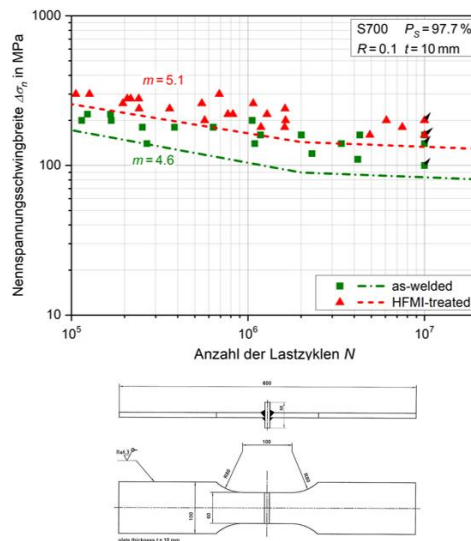


[Krahulec, Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2019 / Leitner et al., Weld World 58, 2014 / Hobbacher, Springer, 2016]

# Untersuchung auf mehreren Größenskalen

Methodik zur Übertragbarkeit von Proben auf reale Bauteile und Strukturen:

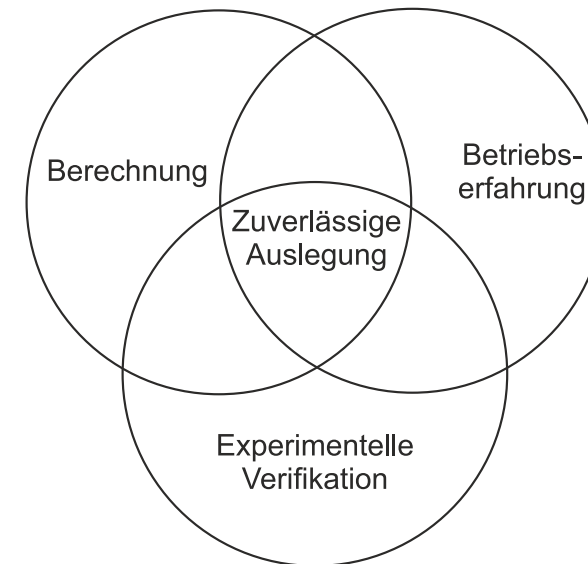
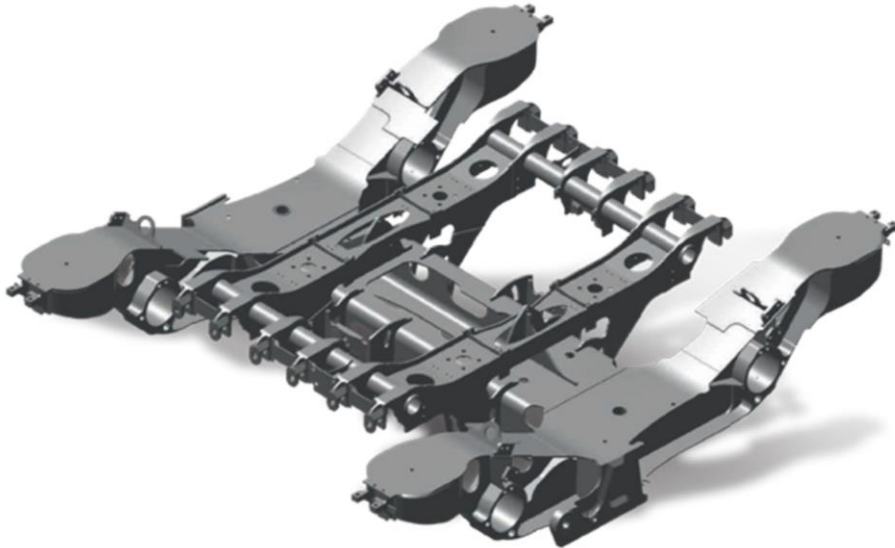
- Ableitung repräsentativer (Klein-)Probengeometrien (Grundlage für übertragbare Versuchsergebnisse)
- Ermittlung von Kennwerten auf Basis von Kleinproben (systematische Analyse wesentlicher Einflüsse)
- Evaluierung der Übertragbarkeit durch Bauteilversuche (Eigenspannungen, Steifigkeiten, Kraftflüsse, etc.)
- Validierung anhand von Versuchen an realen Strukturen (variable Lastamplituden, Mehrachsigkeit, etc.)



[Institut für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik, Technische Universität Graz]

# Leichtbaudesign und zuverlässige Auslegung

- Beanspruchungsgerechtes Leichtbaudesign mit Anwendung eines höherfesten Feinkornbaustahls S700
- Offener Träger (I-Profil) mit reduzierter Blechdicke anstatt Konstruktion mit geschlossenem Kastenprofil
- Reduktion des Gesamtgewichtes um rund 40% im Vergleich zur ursprünglichen Variante aus Baustahl S355
- Zuverlässige Auslegung: Berechnung (Probenversuche, numerische Analysemethoden, lokale Auslegung, etc.), Experimentelle Verifikation (Methodik zur Übertragbarkeit) und Betriebserfahrung (Lastkollektive, etc.)

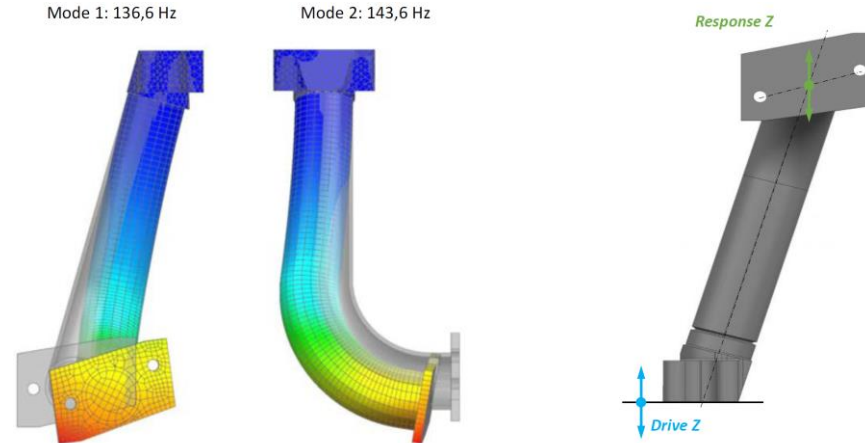


[Siemens Mobility / Sonsino, MP Materials Testing 50, 2008]

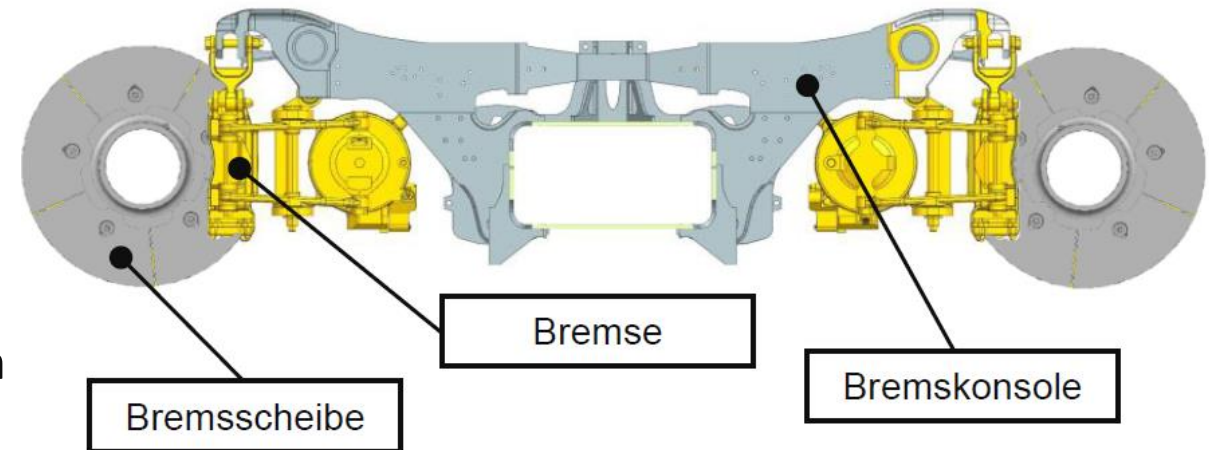


# Auslegung schwingungsfähiger Systeme

- Anbauteile können im Betrieb aufschwingen und demnach erhöhte Beschleunigungen erfahren, welche im Zuge der Auslegung zu berücksichtigen sind. Beispiel Sandungsrohr:

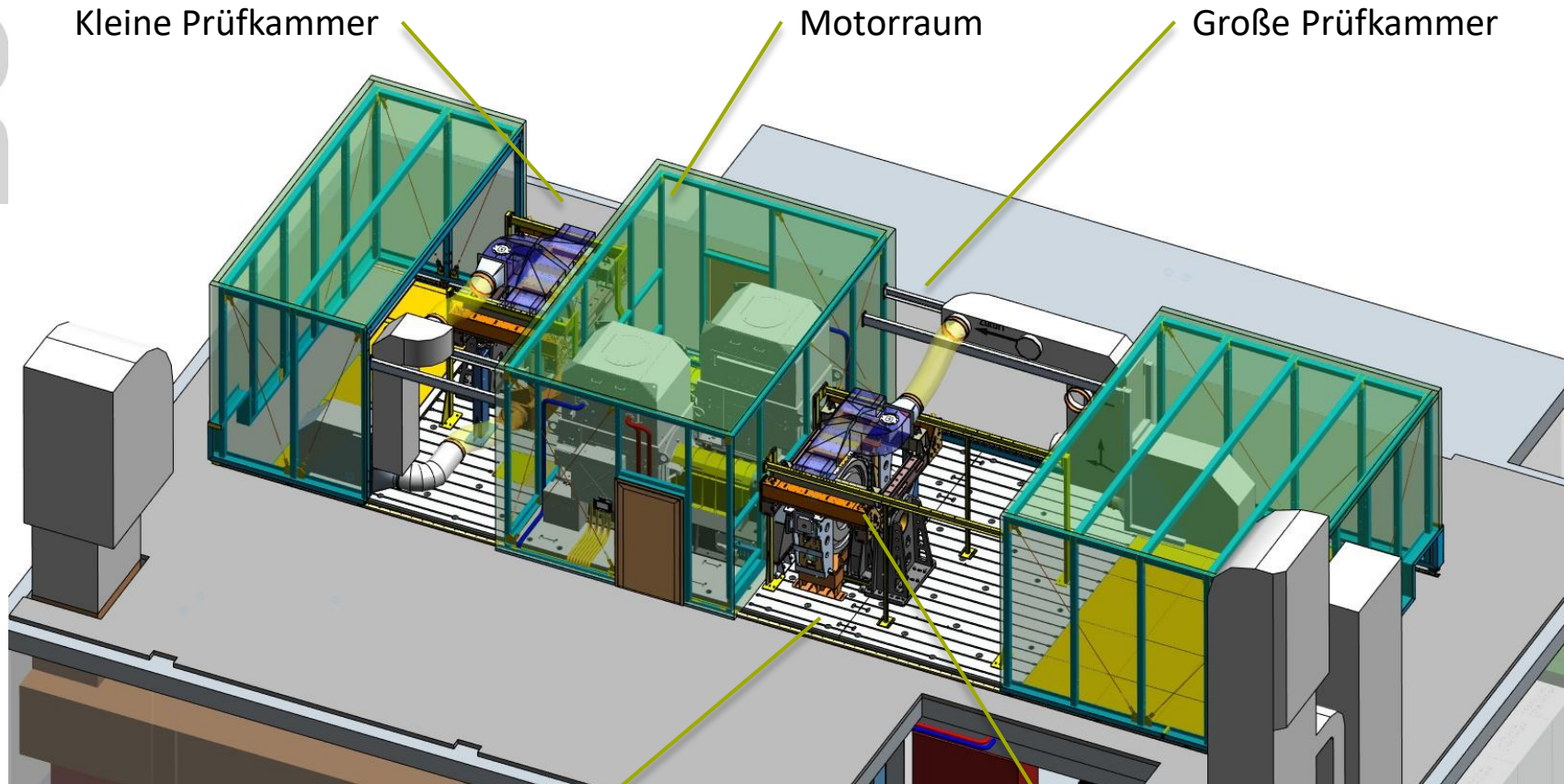


- Leichtbaustrukturen: Mögliche Änderung des Steifigkeits-/Schwingungsverhaltens
- Bremsinduzierte Beanspruchungen, welche im Kontaktbereich von Bremsscheibe und -belag erzeugt werden und von Elementen der Bremse auf die Konsole und Rahmen übertragen werden
- Berücksichtigung in betriebsfester Auslegung?



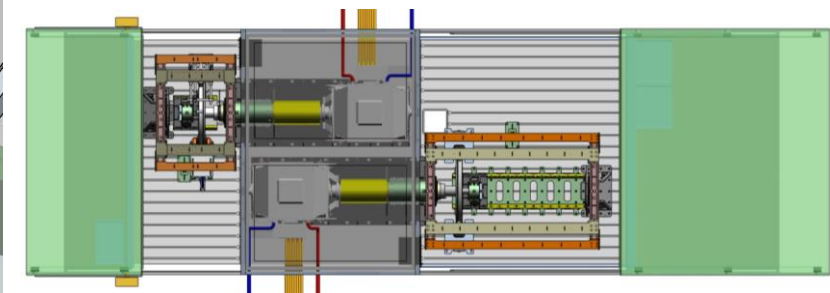
[Brunnhofer, Dissertation, Technische Universität Graz, 2016 / Siemens Mobility]

# Bremsenprüfstand



## Technische Daten

Leistung (Motor)	1.4 MW
Max. Bremsmoment	35 000 Nm
Dauerbremsmoment	9 200 Nm
Max. Drehzahl	3 000 min <sup>-1</sup>
Max. Geschwindigkeit	520 km/h
Max. Bremsdruck	16 bar



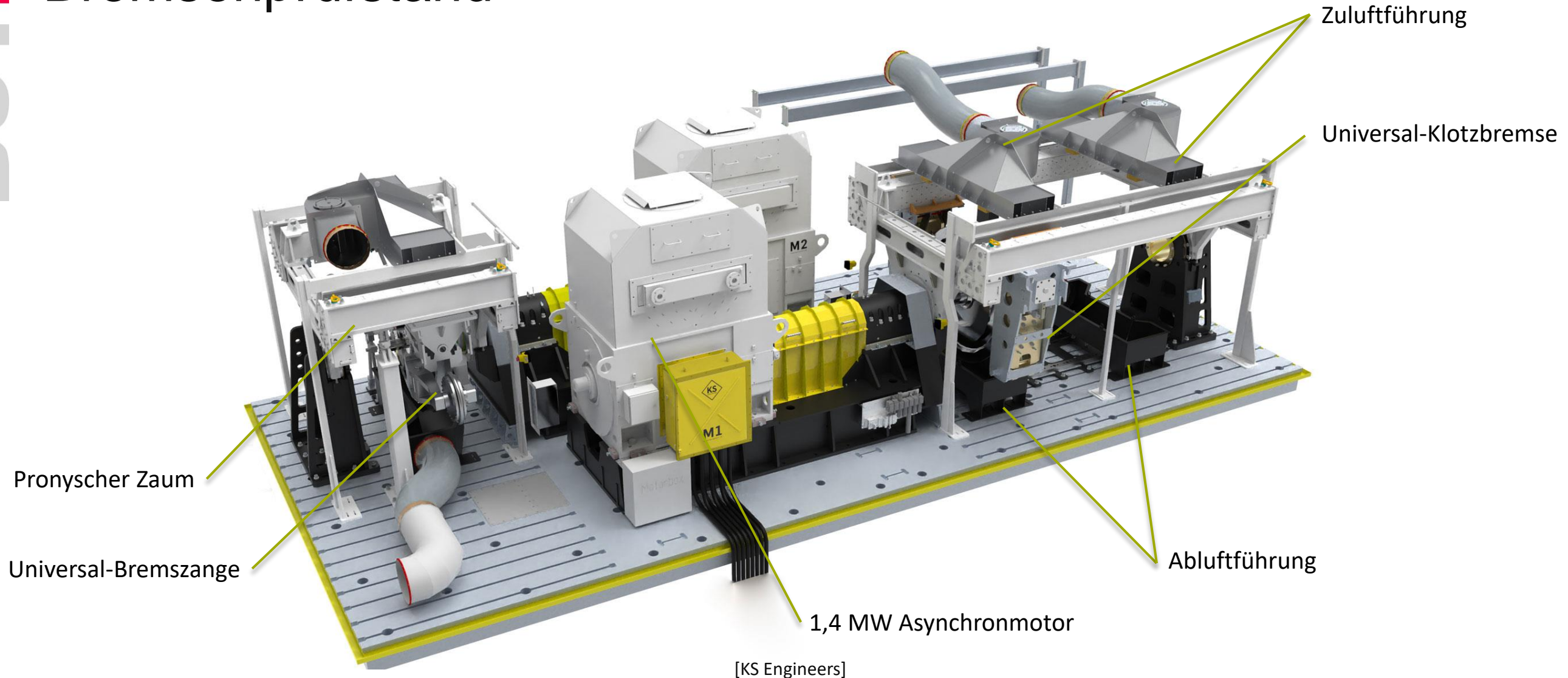
Aufspannplatte

Belüftung

[KS Engineers]

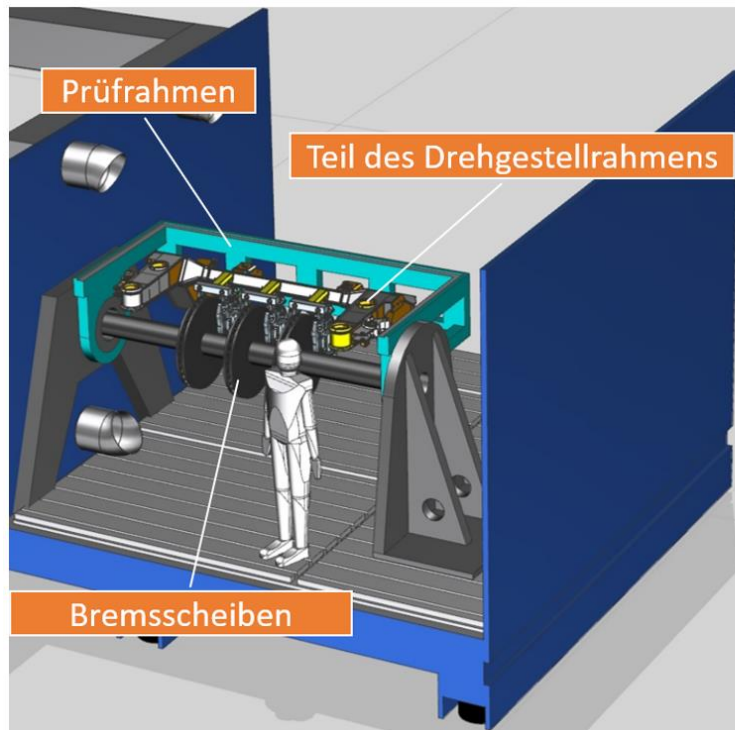


# Bremsenprüfstand

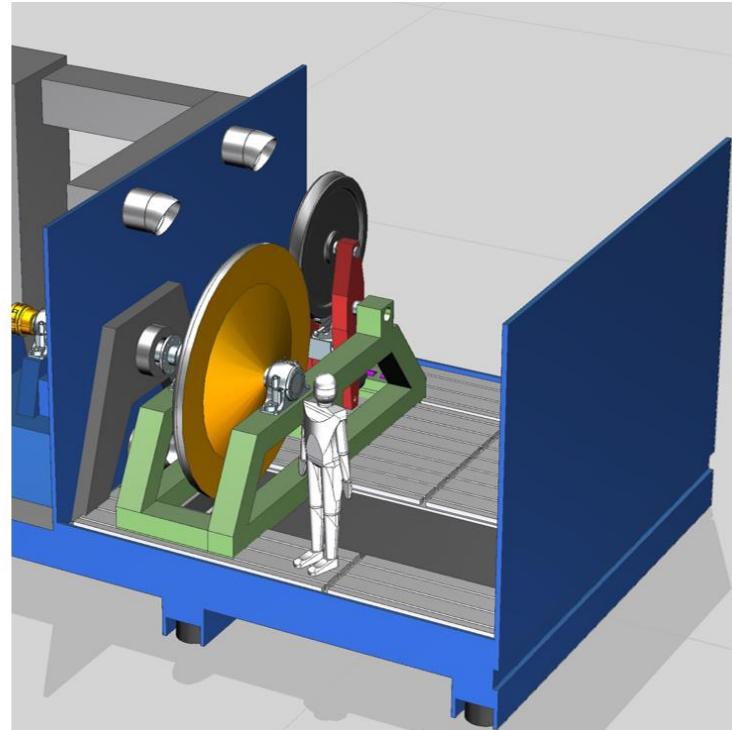


# Versuchsmöglichkeiten

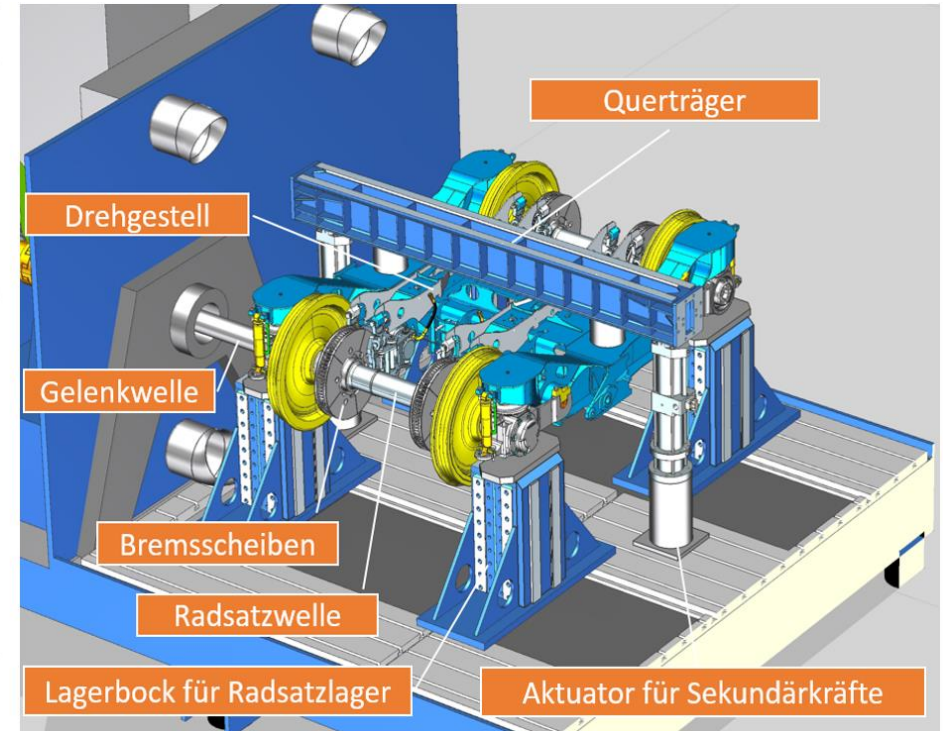
Versuchsaufbau für mehrere  
Bremseinheiten



Rollenprüfstand  
(beide Wellen können  
angetrieben werden)



Prüfstandskonzept mit Gesamt-Fahrwerk  
zur Untersuchung der Wechselwirkung  
Bremse-Nachbarkomponenten

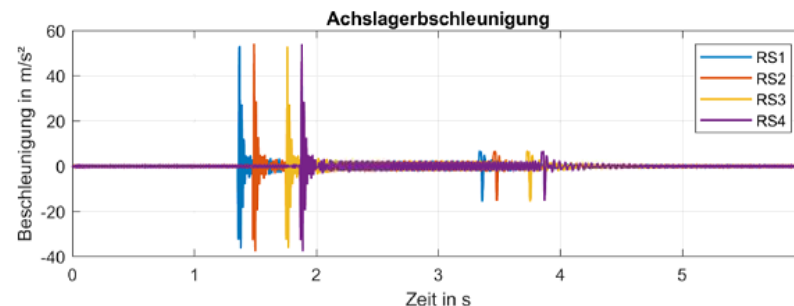
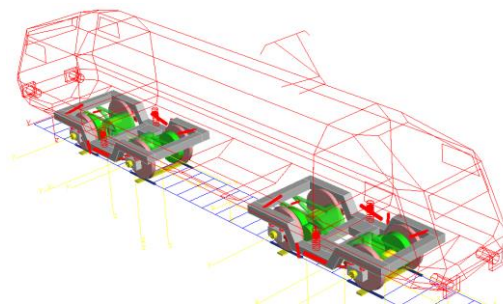
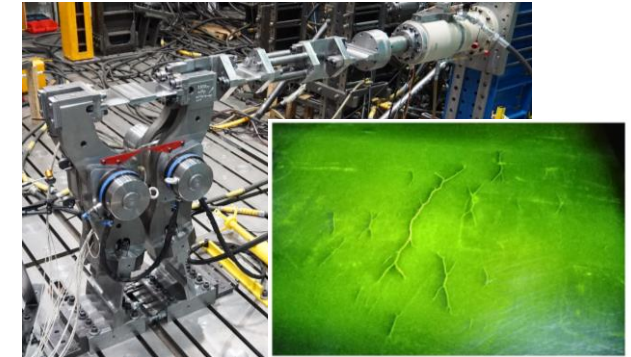


[Institut für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik, Technische Universität Graz]

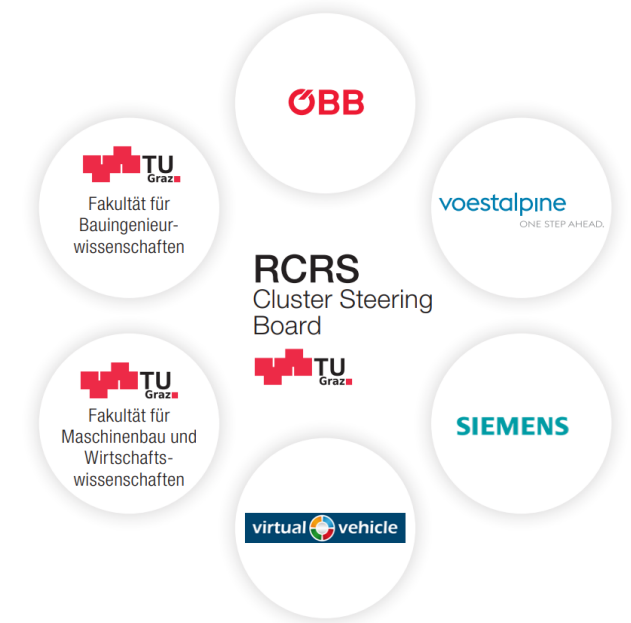


# Forschungsaspekte – Betriebsfestigkeit und Auslegung

- Betriebsfestigkeit: Einfluss globaler/lokaler Charakteristika (Konstruktion, Belastungen, Material, Fertigung, Eigenspannung/Verzug, Defekte, etc.) auf die Betriebsfestigkeit höher-/hochfester Materialien
- Auslegung: Übertragbarkeit mechanischer Kennwerte von Kleinproben auf Bauteile/Strukturen (Größeneffekte, Lastkollektiv, Multiaxialität, etc.)
- Designkennwerte: Werkstoff(-hybride), Nachbehandlungsverfahren (TIG, HFMI, Schleifen, etc.), Ermüdungsfestigkeit unter Schubbeanspruchung
- Belastung: Mehrkörpersimulationen (Übergeordnetes Ziel: Digital Twin), Einfluss dynamischer (bremsinduzierter) Schwingungen
- Interaktion Fahrzeug/Fahrweg: Research Cluster Railway Systems (RCRS)



[Weilguny et al., ÖVG-Fachtagung Monitoring Rad-Schiene, 2021 / Institut für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik, TU Graz / Research Cluster Railway Systems ]



# Zusammenfassung und Ausblick

Leichtbaupotential geschweißter Stahlstrukturen:

- Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit durch Anwendung höher-/hochfester Stähle unter Berücksichtigung des Strukturdetails möglich (Grundmaterial, Schweißverbindungen mit vergleichsweise geringer Kerbwirkung)
- Fertigungs-/Konstruktionsaspekte: Schweißverbindungen mit Vollanschluss, Anrisse von der Wurzel vermeiden
- Leichtbaudesign: Beanspruchungsgerechte Konstruktion (I-Profil statt Kastenprofil, hochbeanspruchte Bereiche vorrangig im Grundmaterial) aus S700, Gewichtsreduktion um 40% am vorliegenden Beispiel eines Drehgestells

Auslegung schwingungsfähiger Systeme:

- Änderung des Steifigkeits-/Schwingungsverhaltens durch Leichtbaustrukturen möglich
- Untersuchung bremsinduzierter Schwingungen als Beispiel zur Auslegung schwingungsfähiger Systeme
- Umfassende Versuche (UIC-konforme Zulassungsversuche, Versuche unter Berücksichtigung einzelner Bauteile sowie ganzer Systeme und Strukturen) an neuartigen Bremsenprüfstand zukünftig möglich

Weitere Forschungsaspekte: Übertragbarkeit (Probe-Bauteil/Struktur), Interaktion Fahrzeug/Fahrweg, etc.