

Individualisierbarer Fahrradrahmen in Hybridbauweise

T. Kuttner, V. Nedeljkovic-Groha, S. Brenner, T. Dickhut
Universität der Bundeswehr München, Neubiberg: thomas.kuttner@unibw.de

Für einen Fahrradrahmen in Hybridbauweise wird ein Konzept vorgestellt, additiv gefertigte Aluminium-Muffen über Strukturklebeverbindungen mit handelsüblichen CFK-Rohren zu verbinden. Diese Bauweise eröffnet die Möglichkeit, das Fahrrad auf die Körpermaße abzustimmen und in vielfältiger Richtung zu individualisieren. Überdies lassen sich Baugruppen in den Rahmen integrieren (z. B. Batterie, Brems- und Schaltsysteme, etc.) und der daraus resultierende Sekundärleichtbau sinnvoll nutzen. In Zusammenarbeit mit bayerischen Industrieunternehmen und der Forschung soll ein Technologiedemonstrator aus der Schnittmenge der drei hochgradig attraktiven Technologiefelder CFK, additive Fertigung und Strukturkleben entstehen.

Die strukturelle Klebeverbindung zwischen CFK-Rohr und Muffe ist hierbei essentiell wichtig für die Bauteilsicherheit. Bereits Smolik [1] hat das Technologiepotenzial des Klebens von CFK-Rohren im Fahrradbau bewertet und weist auf die geringe Festigkeit bei den üblichen Fügemaßen hin. Einem Vorschlag von Dickhut [2] folgend, standen Übermaße von Null bzw. Presspassungen im Zentrum der bewerteten Varianten.

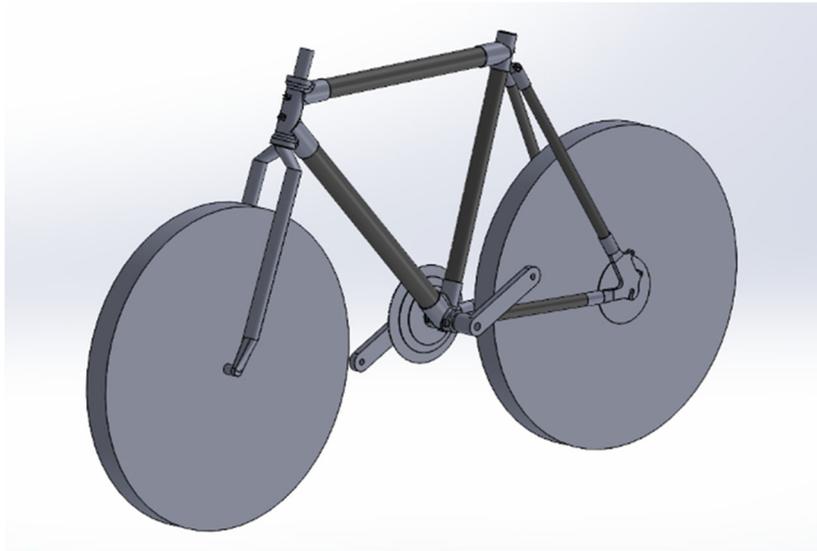


Abb. 1: Konstruktiver Entwurf [3]

Zur Abschätzung der auftretenden Beanspruchungen erfolgte eine FEM-Analyse an einem Fahrradrahmen, welche die Lastfälle in Anlehnung an die DIN EN ISO 4210-6 zugrunde legt. Die Rückrechnung in Schnittlasten an den Muffen mittels des Strukturspannungskonzeptes ergab signifikante Anteile an Biegebelastungen in den Verbindungen. Mit diesen Ergebnissen wurde eine Probenform für Versuche unter überlagerter Zug- und Biegebeanspruchung entwickelt. Daraufhin wurden systematisch die Einflussgrößen auf die Bauteilfestigkeit im Schwingversuch an vereinfachten, modellhaften Bauteilproben untersucht.

Die Einflüsse der technologischen Gestaltungsmöglichkeiten, wie Fügelänge, Übermaß und Klebstoffsystem auf die Verbindung werden vergleichend bewertet und Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten herausgestellt. Ergebnisse aus Berechnungen und Versuchen werden systematisch verglichen und dargestellt. Mit weiterem Nachweis der Praxistauglichkeit der eingesetzten Technologien und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit ist eine künftige wirtschaftliche Umsetzung der Technologie möglich.

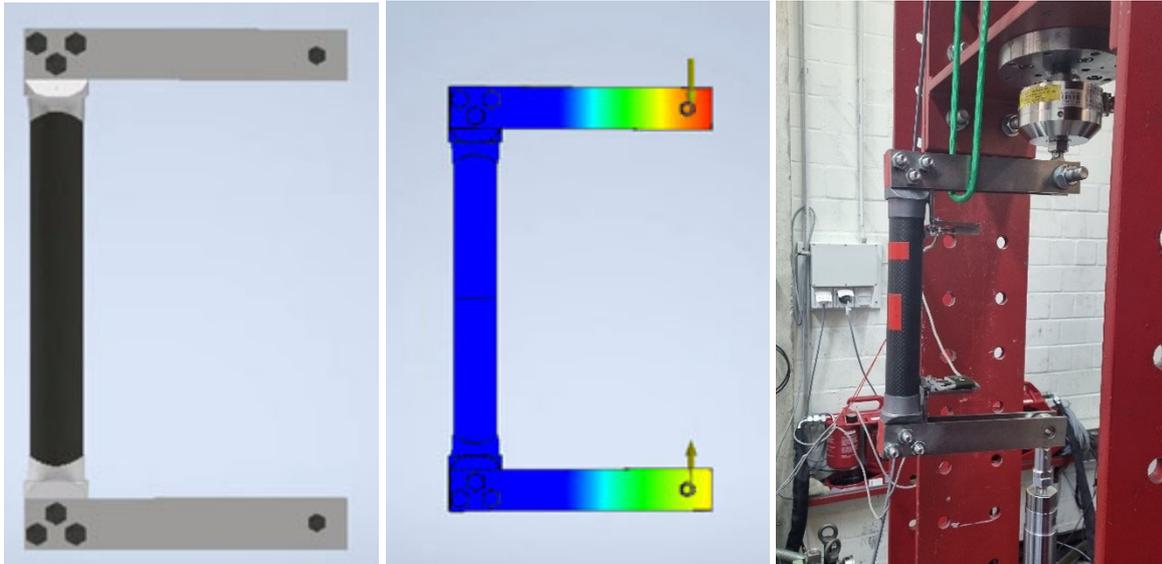


Abb. 2: Vereinfachte Ersatzstruktur für den Schwingversuch (CAD, FEM-Berechnung, Versuch) [5]

- [1] http://www.smolik-velotech.de/glossar/k_KLEBETECHNIKEN.htm (abgerufen am 03.02.2021)
- [2] Dickhut, T: Beitrag zur Auslegung und Gestaltung von Antriebswellen aus Faser-Kunststoff-Verbunden, Diss. TU Darmstadt 2013
- [3] Deutsch, Goldbach, Hoffmann, Romeiks, Röttgen-Burtscheid: CARB:aggi Fahrradrahmen in Hybridbauweise, Abschlussarbeit Experimentaltechnik, Universität der Bundeswehr München

Individualisierbarer Fahrradrahmen in Hybridbauweise

T. Kuttner, V. Nedeljkovic-Groha, S. Brenner, T. Dickhut

Universität der Bundeswehr München, Fakultät Maschinenbau, 85577 Neubiberg

thomas.kuttner@unibw.de



Motivation

Individualisierbarer Fahrradrahmen in Hybridbauweise CFK + additive Fertigung

Symbol innovativer Technologien

- Positive Wahrnehmung d. Verkehrsmittels
- Individuelles Statement
- Spin-off Technologie

Individualisierbarkeit des Produktes

- Abstimmung auf die Körpermaße
- Individualisierungsmerkmale



Leichtbau

- Geringe Masse
- Hohe Festigkeit und Steifigkeit

Unabhängigkeit von Lieferketten

- Qualitätsprobleme, Lieferengpässe
- Reparaturfreundlichkeit des Rahmens

Hybridbauweise

CFK-Rohr „von der Stange“

- etablierte Technologie
- hohe Verfügbarkeit
- relativ preiswert

Additive Fertigung Al-Muffen

- kleine Stückzahlen
- komplexe Geometrien möglich
- Fertigung nach Kundenwunsch

Klebertechnologie

- Hochleistungsklebstoffe verfügbar
- Revival des Strukturklebens
- Qualitätssicherung

Wo stehen wir heute?

- TRL 2...4
- Forschungsvorhaben beantragt

TECHNOLOGY READINESS LEVEL (TRL)

RESEARCH	9	ACTUAL SYSTEM PROVEN IN OPERATIONAL ENVIRONMENT
	8	SYSTEM COMPLETE AND QUALIFIED
	7	SYSTEM PROTOTYPE DEMONSTRATION IN OPERATIONAL ENVIRONMENT
DEVELOPMENT	6	TECHNOLOGY DEMONSTRATED IN RELEVANT ENVIRONMENT
	5	TECHNOLOGY VALIDATED IN RELEVANT ENVIRONMENT
	4	TECHNOLOGY VALIDATED IN LAB
	3	EXPERIMENTAL PROOF OF CONCEPT
DEVELOPMENT	2	TECHNOLOGY CONCEPT FORMULATED
	1	BASIC PRINCIPLES OBSERVED

Quelle: twi-global.com

Innovativer Ansatz

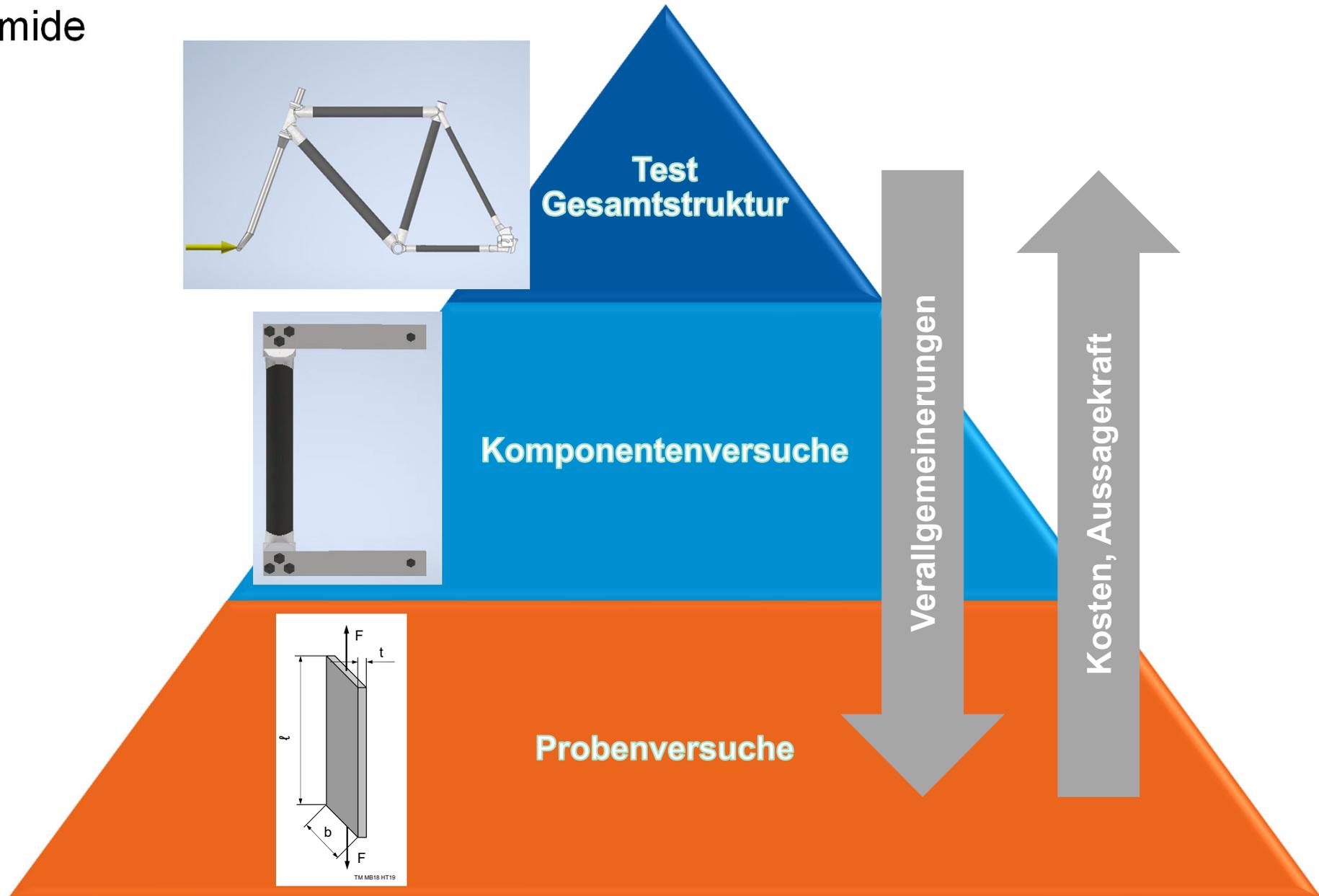
➤ Klebeverbindung ist kritisch für die Gesamtstruktur

- in der Vergangenheit: Probleme in Fertigung und Festigkeit
- inzwischen: Weiterentwicklung von Klebstoffen und Technologien
- Ansätze der Optimierung



Festigkeitsnachweis

Testpyramide

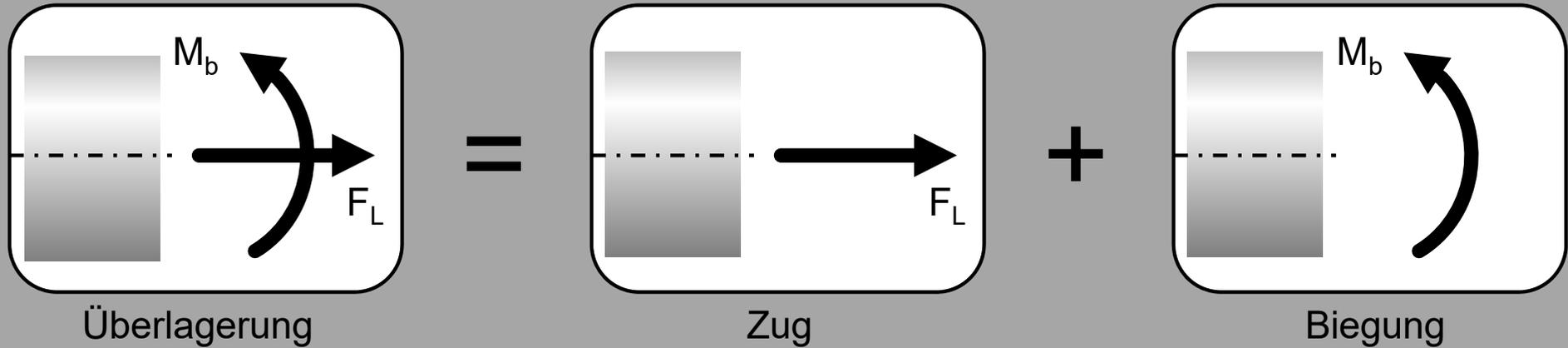


Festigkeitnachweis

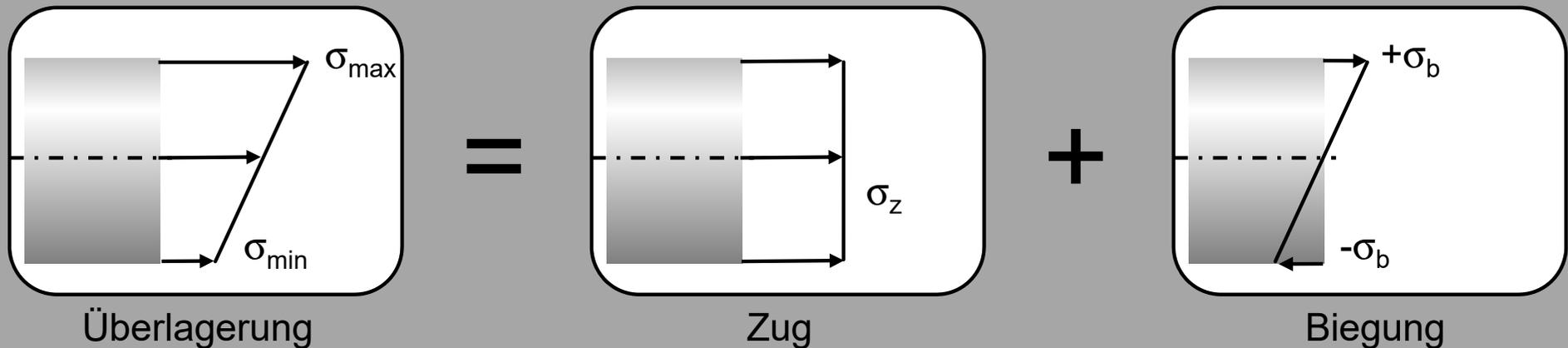
Strukturspannungskonzept

- Zerlegung in die Grundlastfälle Zug und Biegung

Schnittgrößen

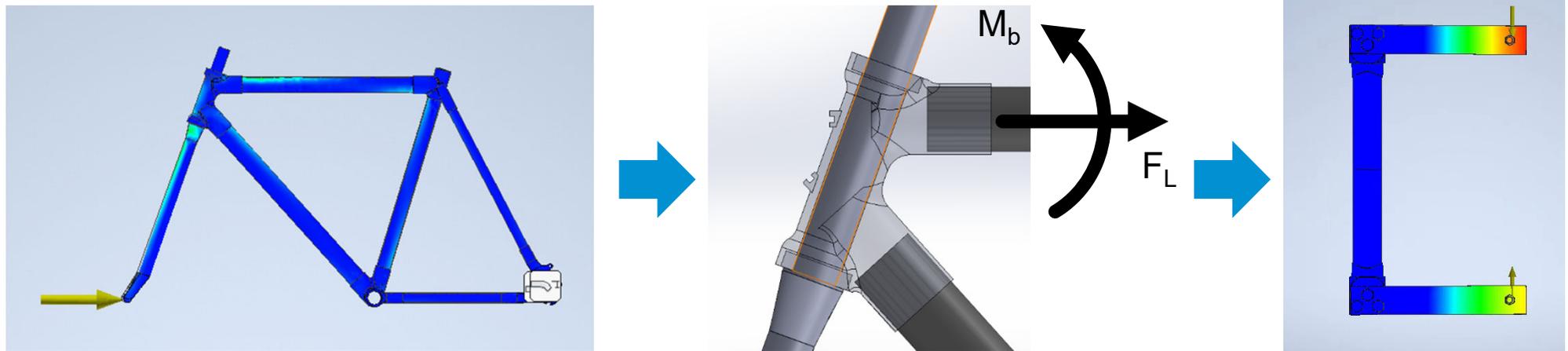


Spannungen



Festigkeitsnachweis

- ▶ FEM-Berechnung und Ableitung Lastannahmen
 - Komponentenversuche zum Variantenvergleich
 - preiswerte und schnelle Vorversuche für Strukturtests im 1:1- Maßstab



FEM-Analyse der Lastfälle
nach DIN EN ISO 4210-6

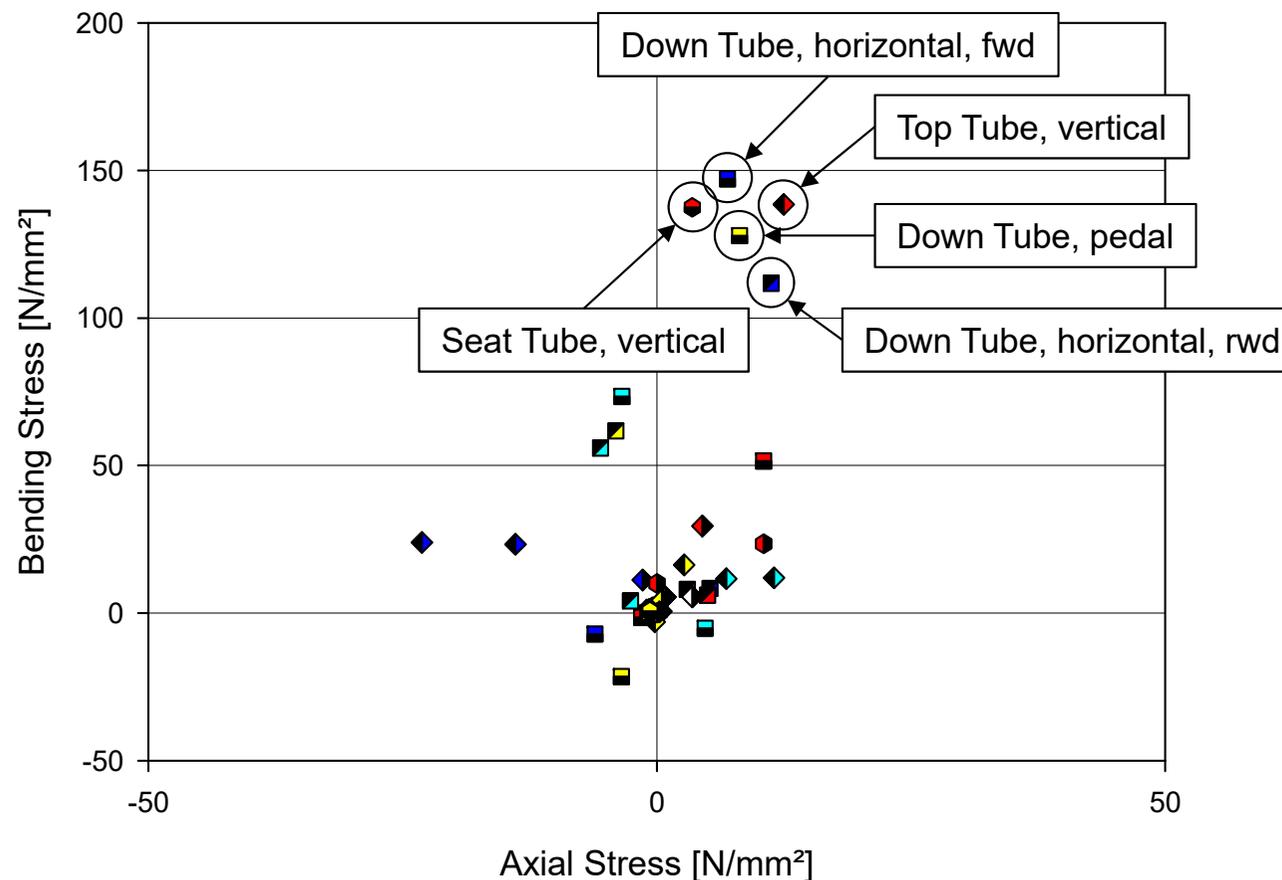
Berechnung der
Schnittlasten

Komponenten-
versuche mit
Rahmenausschnitten

Festigkeitsnachweis

Ergebnisse der FEM-Berechnung

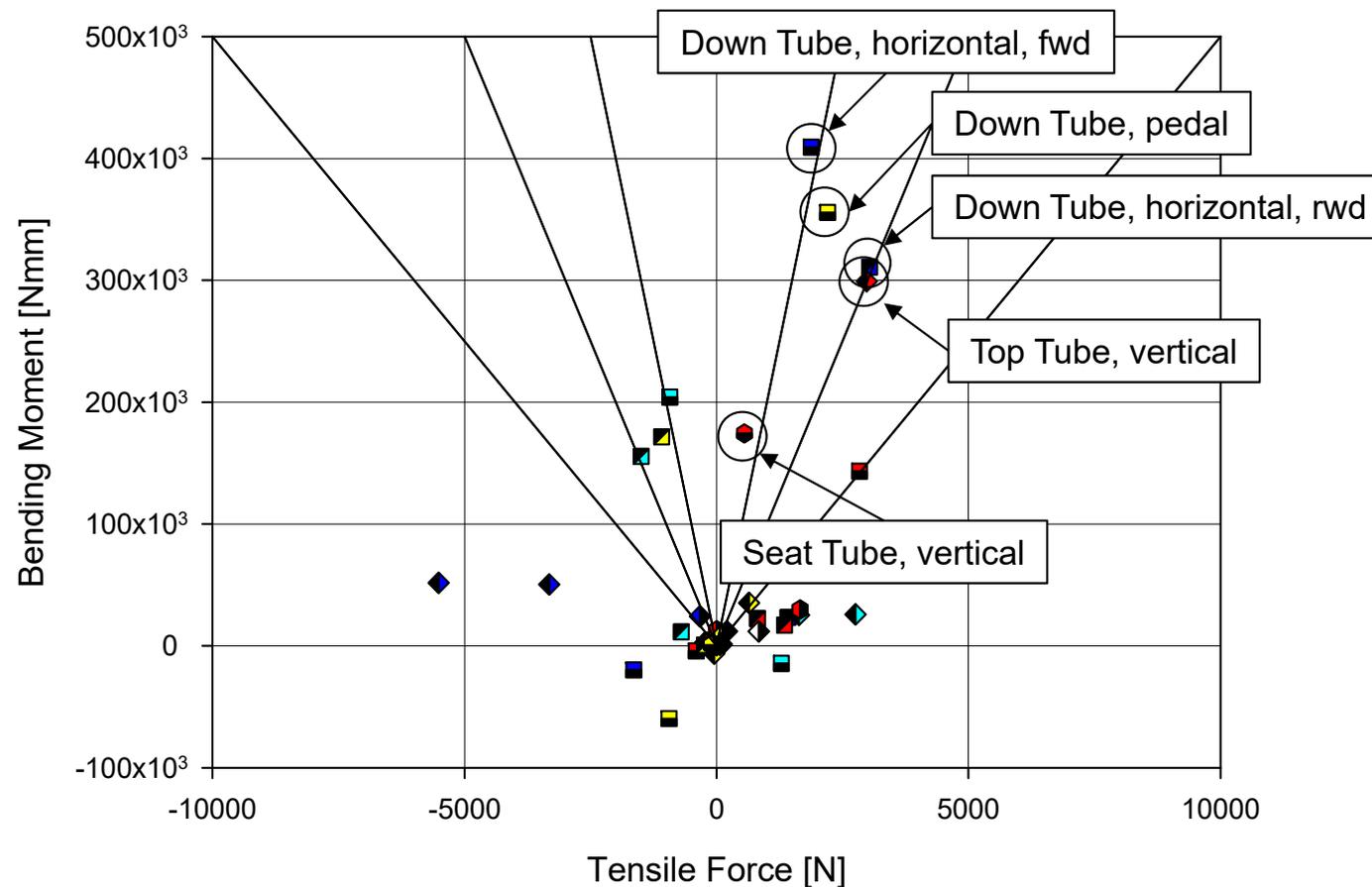
- Biegespannungen bestimmen die Beanspruchung
- Verhältnis der Biegespannung zur Zugspannung ca. 10:1
- Identifikation hochbeanspruchter Stellen und Lastfälle



Festigkeitsnachweis

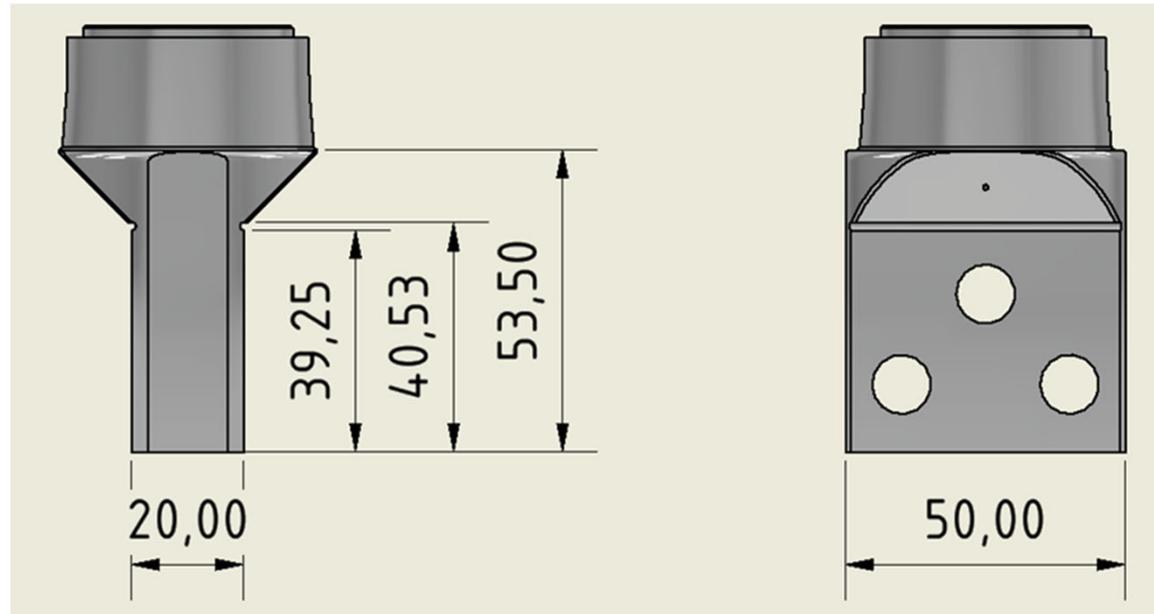
Ableitung der kritischen Lastfälle:

- Rückrechnung auf Schnittgrößen
- Unterrohr hochbeansprucht
- Exzentrischer Zug $F_{\max} = 1,8 \text{ kN}$



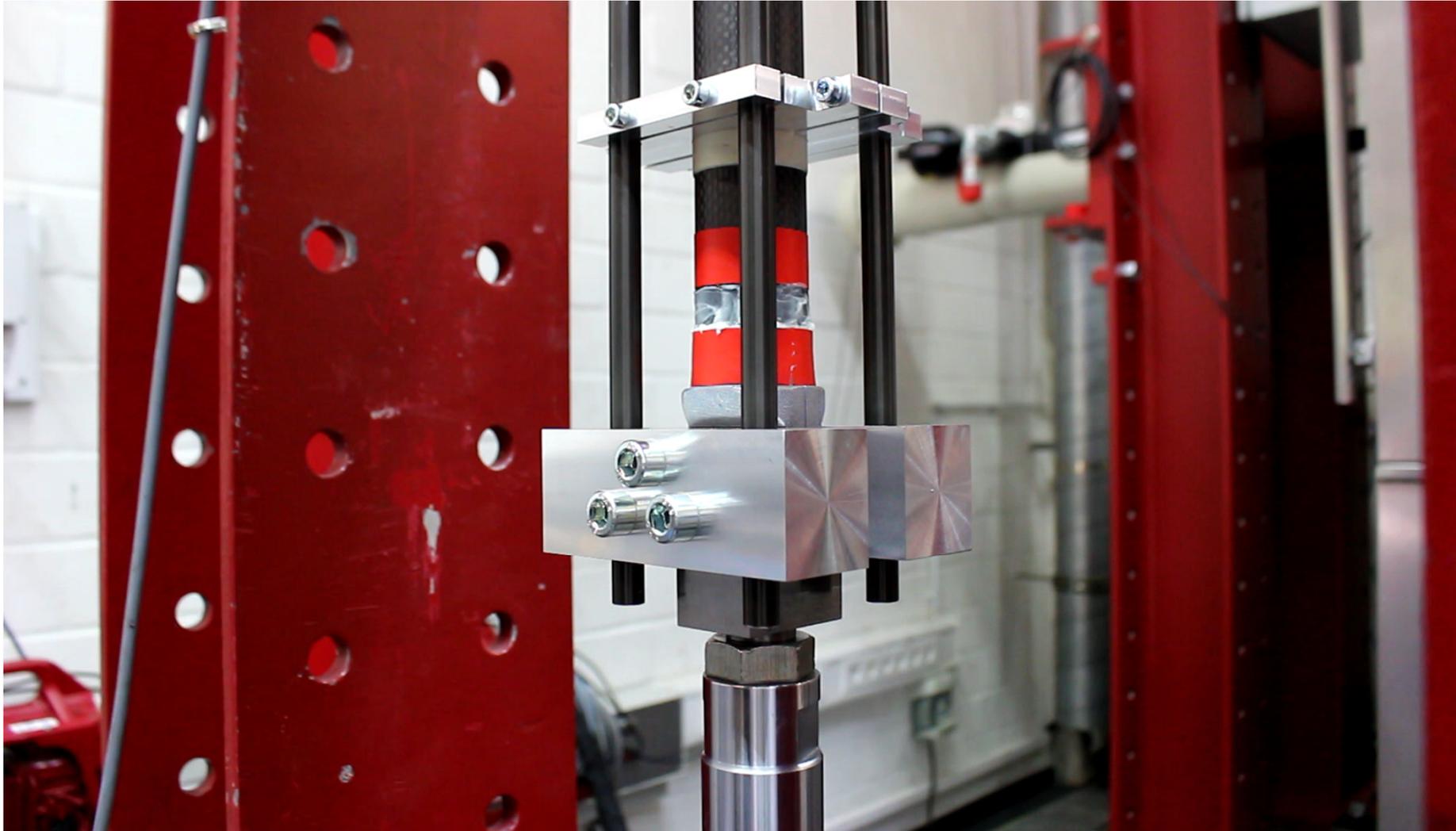
Rahmenausschnitte

Geometrie der Rohre, additiv gefertigten Muffen und Rahmenausschnitte



Fügetechnologie

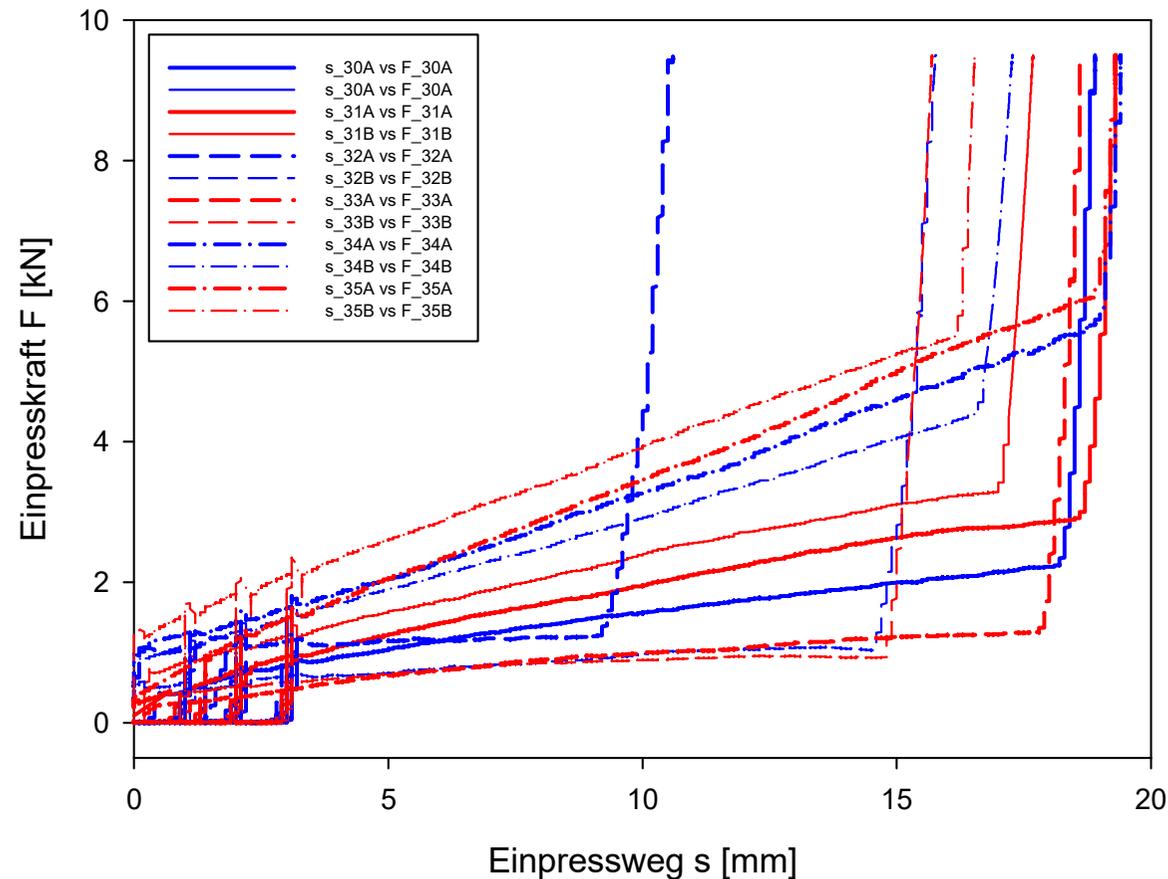
► Fügen der Längspressverbindung



Fügetechnologie

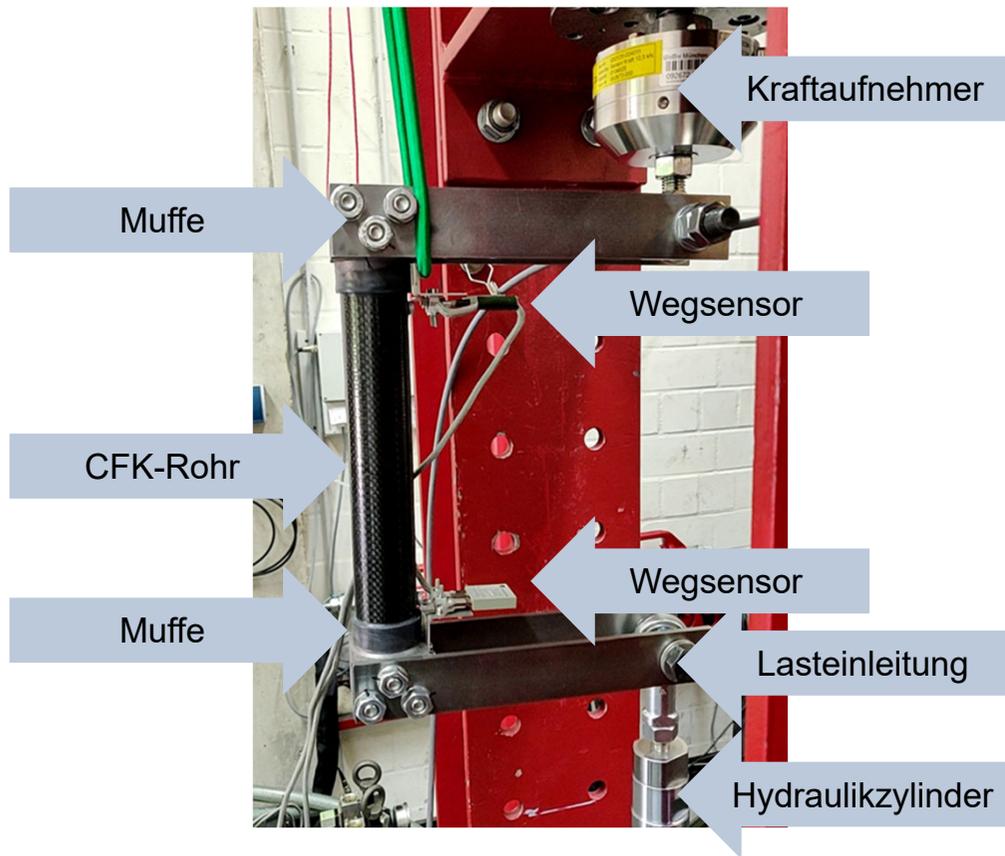
Einpressdiagramm

- Anstieg im Kraft-Weg-Diagramm
 - durch Übermaß (Fugendruck)
 - geringere Kräfte im Epoxy-System als im MMA-System
- Anstieg am Ende zeigt Endanschlag des Rohres an



Schwingversuche

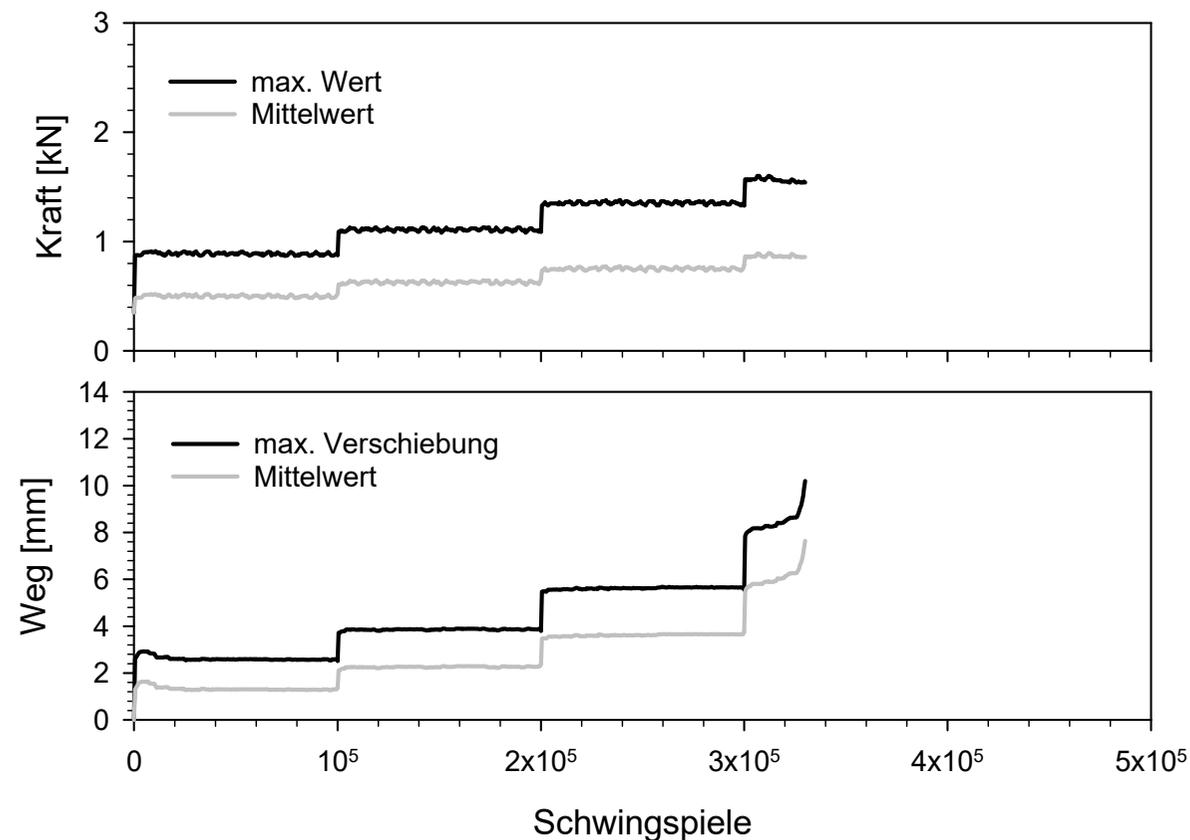
- ▶ Komponentenversuche mit Rahmenausschnitten
 - preiswerte und schnelle Vorversuche



Schwingversuche

Laststeigerungsversuche

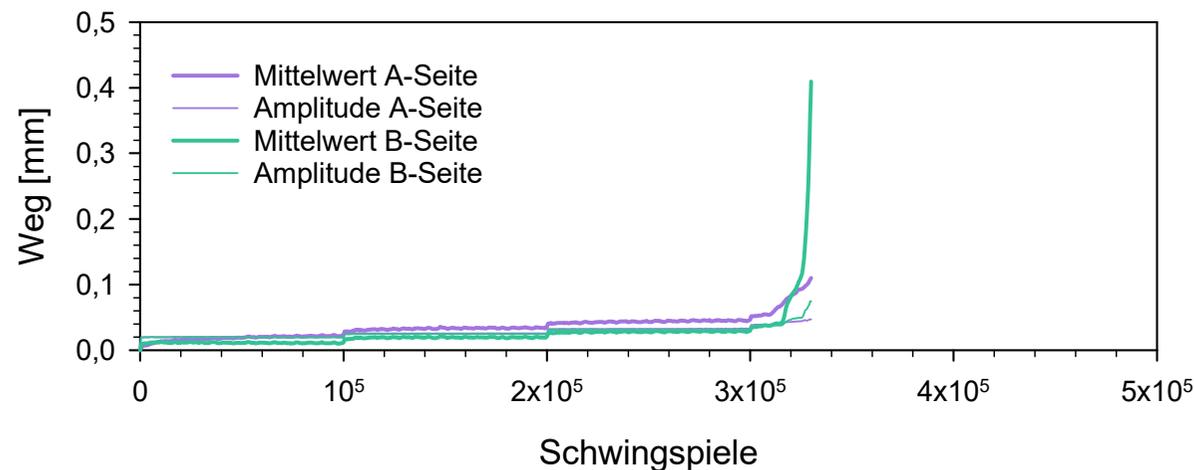
- Erhöhung von F_{\max} um 10% nach jeweils 10^5 Schwingspielen
- Abbruchkriterien
 - globaler Steifigkeitsabfall um 20%
 - Verschiebung in den Fügstellen von 0,5 mm



Schwingversuche

Ergebnisse

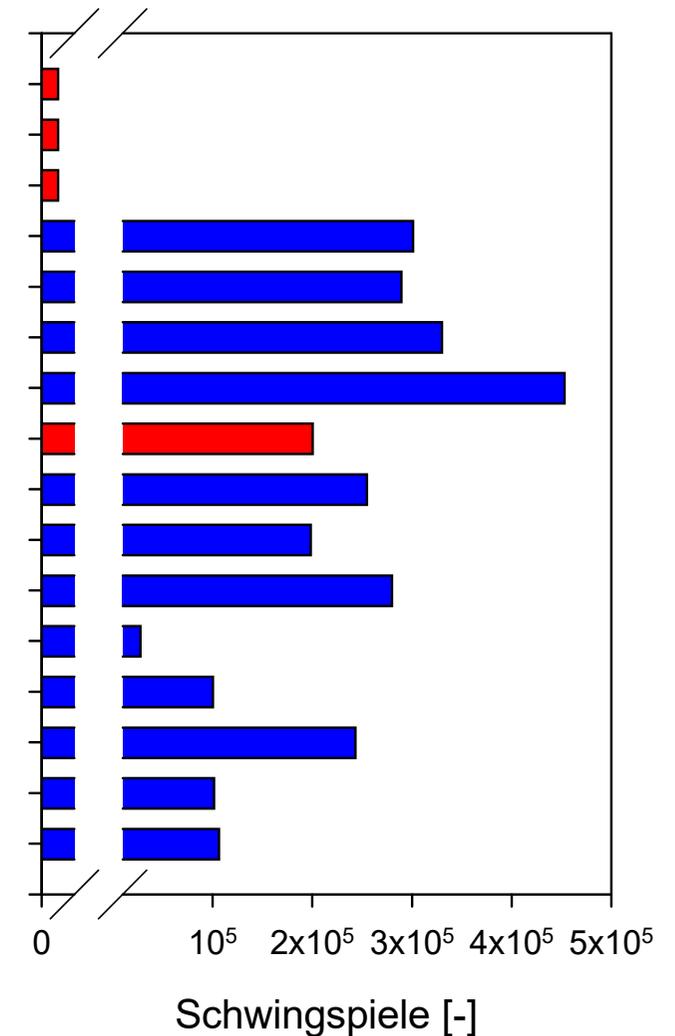
- Versagen in der Klebeverbindung
- kein Versagen in den CFK-Rohren und den additiv gefertigten Muffen
- keine schleichende Verschlechterung der Steifigkeit
- kein gleichzeitiges Versagen in beiden Fügstellen (Redundanz)



Schwingversuche

Einflüsse der Parameter

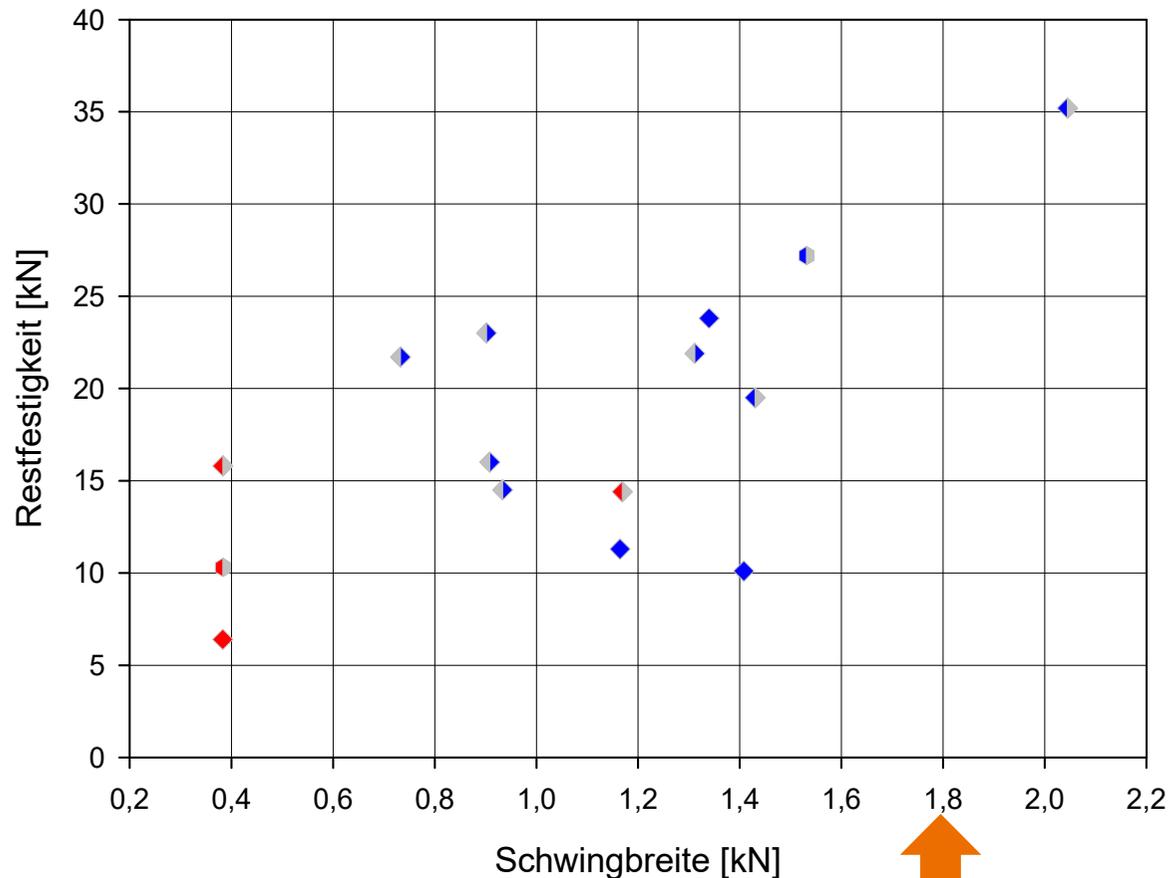
Klebstoffsystem	Fügelänge [mm]	Passung innen	Passung außen	Bemerkung
MMA	25	>> 0	< 0	
MMA	25	>> 0	> 0	
MMA	25	>> 0	= 0	
Epoxy	25	>> 0	< 0	
Epoxy	25	>> 0	> 0	
Epoxy	25	>> 0	= 0	
Epoxy	25	> 0	< 0	
MMA	20	> 0	< 0	mod. System
Epoxy	20	> 0	> 0	
Epoxy	12	< 0	> 0	
Epoxy	20	< 0	> 0	ovalisierte Form
Epoxy	10	< 0	>> 0	
Epoxy	20	< 0	> 0	
Epoxy	10	< 0	> 0	
Epoxy				
Epoxy				Trichterform



Schwingversuche

Auftragung der Restfestigkeit im Zugversuch über der Schwingbreite

- Schädigungsgleiche Umrechnung auf 100000 Ssp
- Auslegungsziel erreichbar
- nach Anriss noch hohe Restfestigkeit (Schadenstoleranz)



Auslegungsziel

Zusammenfassung

Fahrradrahmen in Hybridbauweise

- Komponentenversuche an Rahmenausschnitten
- Lastannahmen mit dem Strukturspannungskonzept

Ergebnisse

- Epoxy-System zeigt deutlich höhere Schwingspielzahlen als MMA-System
- Versagen in der Klebeverbindung
- kein Versagen in den CFK-Rohren und den additiv gefertigten Muffen
- keine schleichende Verschlechterung der Steifigkeit
- kein gleichzeitiges Versagen in beiden Fügestellen (Redundanz)
- Hohe Schwingspielzahlen durch
 - Längspressverband
 - Presspassung Rohr Außendurchmesser mit Muffe Innendurchmesser
 - große Fügelänge
- Auslegungsziel erreichbar
- nach Anriss noch hohe Restfestigkeit (Schadenstoleranz)

Weitere Optimierung der Klebeverbindung notwendig