
Name der Forschungsstelle(n)

IGF-Vorhaben-Nr. / GAG

Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum :

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

Normalverfahren

Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

ist beigefügt

liegt bereits vor

wird fristgerecht nachgereicht

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

KURZFASSUNG

Das Fahrrad ist in Deutschland nicht nur ein verbreitetes Beförderungs- und Transportmittel, sondern wird auch vermehrt zur Freizeitgestaltung eingesetzt. Die bestehenden Regelwerke über die Prüfungen von Fahrrädern basieren hauptsächlich auf empirischen Festlegungen, die bereits vor vielen Jahren getroffen wurden und dem heutigen Stand der Technik nicht mehr genügen. Forschungsziel bei diesem Projekt ist deshalb für fahrradherstellende kmU die experimentelle Grundlage für die betriebsfeste Bemessung und Prüfung für Leichtbau-Fahrradrahmen zu entwickeln.

Im ersten Schritt wurden Prüfungen gemäß der aktuellen DIN-Normen (Wiegetritt-Prüfung) an den Einrohrrahmen durchgeführt und die auftretenden Belastungsarten denen im Realbetrieb auftretenden gegenübergestellt. Wie erwartet, zeigte die herkömmliche Wiegetritt-Prüfung Mängel im Hinblick auf die Erfassung des gesamten Belastungskollektivs.

Mit dieser Erkenntnis wurde im nächsten Schritt der Prüfaufbau um weitere Komponenten ergänzt. Mit einer Bremsvorrichtung wurden die Biegeverformungen an dem Sattel- und dem Unterrohr messtechnisch erfasst. Zusätzlich wurde das Gesamtsystem mit Lenker- und Sattellasten ausgestattet, welche auf einem Schlitten verfahrbar gelagert wurden. Des Weiteren wurde der Schlitten mit einem Aktuator zur Aufbringung einer vertikalen Kraft ausgestattet, welcher die Fahrbahnunregelmäßigkeiten und die Tretbewegung erfasst. Im Endergebnis wurde ein Prüfstand entwickelt, welcher nicht nur die Tretbewegungen, sondern auch Bremsbelastungen, Sattel- und Lenkerlasten erfasst und somit die auftretenden Belastungen an einem Fahrrad im Realfall abbildet.

Im letzten Schritt wurden Untersuchungen an bauteilähnlichen Probekörpern (Rohrknoten) mit äquivalenten Belastungen durchgeführt und im Zusammenhang zu ermittelten Ergebnissen an den Rahmen diskutiert.

Somit wurde das Ziel des Forschungsvorhabens erreicht.

INHALTSVERZEICHNIS

1 DANKSAGUNG	4
2 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	5
3 STAND DER TECHNIK UND WISSENSCHAFT	8
4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE	13
4.1 FAHRRADRAHMEN / EINROHRRAHMEN	13
4.1.1 „WIEGETRITT-PRÜFUNG“ NACH DINPLUS	13
4.1.2 MESSUNGEN MIT DEM GOM-SYSTEM	14
4.1.3 REALE BEANSPRUCHUNGSKOLLEKTIVE AM EINROHRRAHMEN	15
4.1.4 BETRIEBSLASTVERSUCHE AM PRÜFSTAND / PRÜFAUFBAU	19
4.1.5 KOMBINIERTER PRÜFUNG (SCHWEBUNG)	31
4.2 STEUERKOPFROHRKNOTEN / T-STOß-PROBEN	33
4.2.1 PROBENGEOMETRIE	33
4.2.2 BIEGEPRÜFUNGEN	34
4.2.3 TORSIONSPRÜFUNGEN	38
5 ÜBERTRAGBARKEIT DER VERSUCHSERGEBNISSE	41
6 LITERATUR	45
7 ANHANG	47
7.1 MESSERGEBNISSE DES GRAUWERT-KORRELATIONSVERFAHRENS (GOM)	47
7.2 VERFORMUNGSDIAGRAMME AUS DEM REALVERSUCH	52
7.2.1 EBENE FAHRBAHN / KOPFSTEINPFLASTER	52
7.2.2 BORDSTEINKANTE	53
7.2.3 STUFE	54
7.2.4 VOLLBREMSUNG	55

1 DANKSAGUNG

Die vorgestellten Untersuchungen zum Thema „Betriebsfestigkeit von geschweißten Fahrradrahmen“ wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) im Rahmen der industriellen Gemeinschaftsforschung IGF gefördert.

Für die Förderung und Durchführung sei weiterhin der Forschungsvereinigung „Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS)“ gedankt.

Herzlicher Dank gilt weiterhin den Mitgliedern des projektbegleitenden Arbeitskreises für Ihre Mitarbeit und die kritischen und konstruktiven Diskussionen sowie für die Bereitstellung von Realbauteilen, die wesentlich zur erfolgreichen Durchführung des Forschungsprojektes beigetragen haben:

Herr Jürgen Anis	Modern Sports GmbH
Herr Dipl.-Ing. Ernst Brust	velotech.de GmbH
Herr Joachim Heerdt	Langenberg Fahrradmanufaktur
Herr Dipl.-Ing. Markus Hermann	Hot Chili GmbH
Herr Wolfgang Kischnik	Votum
Herr Achim Nöll	Nöll Fahrradbau GmbH
Herr Dr. Friedrich Ostermann	Aluminium Technologie Service
Herr Marcus Pürner	Pendung System GmbH&Co KG
Herr Jürgen Schlender	Alutech-Zweiradtechnik
Herr Dipl.-Ing. Andreas Schuwirth	Logisch! consulting GmbH
Herr Dr. Sumanjit Singh	Beratender Ingenieur
Herr Dipl.-Ing. Dirk Zedler	Ingenieurbüro Zedler

2 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Der Bestand an Fahrrädern in Deutschland betrug 2006 ca. 67 Millionen; die weltweite Jahresproduktion wird auf ca. 130 Millionen Fahrräder geschätzt [StB07]. Neben der Freizeitgestaltung wird das Fahrrad auch vermehrt als Beförderungs- und Transportmittel genutzt. Dabei zeichnet sich immer deutlicher der Trend zur Gewichtsreduktion ab. Einerseits aus Gründen der Handhabung und aufgrund des geringeren menschlichen Energieaufwands, andererseits aus wirtschaftlichen Gründen: denn durch den Bau von leichten Fahrrädern durch deutsche kleine und mittlere Unternehmen (kmU) kann ein neues Marktsegment erschlossen und billige außereuropäische Importe verdrängt werden. Die Herstellung und Verbreitung von „Leichtbaukomponenten“ führte jedoch in den vergangenen Jahren zu ernsthaften Befürchtungen hinsichtlich der Betriebssicherheit.

Fahrräder bzw. einzelne Bauteile werden hauptsächlich von kleinen und mittleren Unternehmen hergestellt. Die deutschen kmU sind im Allgemeinen jedoch nicht in der Lage ihre Produkte auf Sicherheit, Qualität und Zuverlässigkeit zu überprüfen, da wissenschaftlich erarbeitete und belegte Grundlagen weitgehend fehlen. Für die notwendigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten tritt an dieser Stelle die industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) ein. Ausgehend aus den Diskussionen mit den Vertretern von kmU der Fahrradbranche haben sich folgende Problemstellungen herauskristallisiert:

- Die Sicherheitsproblematik moderner Leichtbaufahrräder, insbesondere vor dem Hintergrund verschärfter Produkthaftungsgesetze
- Das Fehlen einer wissenschaftlich fundierten Basis von Lastannahmen für Fahrräder
- Die Frage einer realitätsnahen Prüfung von Fahrradrahmen, möglichst mit gestrafften Prüfprozeduren
- Der Wunsch nach einer kmU-gerechten Bemessungsmethode durch Versuch statt aufwändiger rechnerischer Auslegungsmodelle

Eine der Hauptbeanspruchungsarten, die am Fahrrad zu Schäden und Versagen führt, ist die schwingende Beanspruchung von einzelnen Komponenten. Der Fahrradrahmen ist dabei das zentrale Bauteil, welches die Fahreigenschaften maßgeblich bestimmt und im Herstellungsprozess das höchste Wertschöpfungspotenzial aufweist. Infolge schwingender Beanspruchung kommt es an geschweißten Rahmenkonstruktionen zum Bruch an den Knotenpunkten, welcher durch Risse in der Schweißnaht bzw. am Schweißnahttrand in der Wärmeeinflusszone ausgelöst

wurde. Im Gegensatz zu einem Diamantrahmen, wo durch Tragwerksredundanz eine hohe Schadenstoleranz gewährleistet wird, führt der Bruch bei Einrohrrahmenmodellen zum plötzlichen Versagen des Gesamtrahmens, was in Extremsituationen schwere Unfälle zur Folge haben könnte.

Forschungsziel ist deshalb, einen erweiterten, realitätsnahen Prüfaufbau für Einrohrrahmen zu entwickeln und mit diesem umfangreiche Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit von Fahrradrahmen durchzuführen. Dieser Prüfaufbau soll anhand von im Betrieb des Fahrrades aufgezeichneter Belastungskollektive aufgebaut werden. Im Mittelpunkt der Untersuchungen werden dabei geschweißte Aluminiumrahmen in Einrohrbauweise stehen. Zudem sollen im Hinblick auf Versuchs- und Probekörpervereinfachung auch Versuche an bauteilähnlichen Probekörpern (Rohrknoten) mit äquivalenten Belastungen durchgeführt werden. Die Untersuchungen sollen den realen Belastungsfall besser abbilden als derzeit angewendete Verfahren und sollen eine Basis für weitere zukünftige Betrachtungen zur betriebsfesten Bemessung von Fahrradrahmen darstellen.

Der folgende Projektplan zeigt die gemäß Antrag vorgesehenen Untersuchungen.

Projektplan
1. Prüfung des Rahmens nach der gängigen DINplus-Norm
<p><i>Versuchsdurchführung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Wiegetritt-Versuch mit den entsprechenden Kräften und Lastspielzahlen - Einsatz der GOM-Analyse zur ortsabhängigen Dehnungsermittlung
2. Bestimmung des Lastkollektivs am Rahmen im Realbetrieb
<p><i>Versuchsvorbereitung und Kalibrierung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Adaptierung von DMS im Rahmen (Unterrohr, Sattelrohr) zu Messung der Biegung und Torsion <p><i>Datenermittlung bei Fahrversuchen im freien Gelände:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Befahren einer ebenen Strecke und Kopfsteinpflaster mit verschiedenen Geschwindigkeiten - Überfahren einer Bordsteinkante mit verschiedenen Geschwindigkeiten - Fahrt über eine Stufe / Doppelstufe in verschiedenen Sitzpositionen - Durchführung von Bremsmanöver <p><i>Auswertung der Versuchsdaten:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung der im Realversuch vorgegebenen Maximaldehnungen bei Biegung und Torsion - Ermittlung der Äquivalenzkräfte am Prüfstand
3. Erweiterung des Prüfaufbaus
<p><i>Konstruktion der weiteren Elemente zur realitätsnahen Simulation des Fahrbetriebs:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Bremsen - Lenker- und Sattellast - Tret- und Sattelkräfte <p><i>Durchführung einer kombinierten Prüfung (Schwebung)</i></p>
4. Prüfung der Steuerkopfrohrknoten (T-Stoß-Proben)
<p><i>Vorbereitung des servohydraulischen Prüffeldes</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Biegeprüfungen - Torsionsprüfungen <p><i>Auswertung der Ergebnisse, Erstellung der Wöhlerlinien</i></p>
5. Aussage zur Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse

3 STAND DER TECHNIK UND WISSENSCHAFT

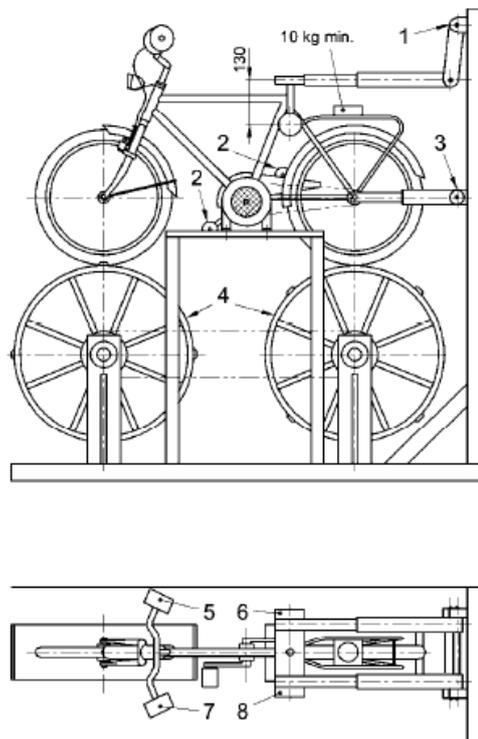
Zur betriebssicheren *Auslegung und Konstruktion* von Fahrradkomponenten existieren derzeit keine Richtlinien oder Regelwerke, nur in vereinzelt wissenschaftlichen Arbeiten wurden entsprechende Untersuchungen eingeleitet [Spa96, Gro97].

Die Problematik angemessener Prüfungen der Fahrradrahmen ist derzeit hochaktuell. Die prüftechnische Verwirklichung realer Lastkollektive gestaltet sich beim Fahrrad besonders schwierig. Das System Fahrer/Fahrrad ist komplex: Belastungen werden zum einen in unterschiedlichster Form durch den Fahrer induziert (Antriebskräfte, Massenkräfte aus der Fahrerbewegung). Zum anderen wird der Rahmen durch Bremsreaktionskräfte und durch Massenkräfte belastet, welche von Fahrbahnunregelmäßigkeiten herrühren.

Die wichtigsten für Deutschland gültigen Normen zu sicherheitstechnischen Anforderungen und Prüfverfahren an Fahrrädern sind DIN EN 14781, DIN EN 14764, DIN EN 14765 und DIN EN 14766, welche von der DIN 79100 bzw. *DINplus* abgelöst wurden. Das aktuelle Europäische Normenwerk wurde im Wesentlichen auf die vier verschiedene Fahrradtypen, nämlich Rennrad, City- und Trekkingrad, Kinderfahrrad und Mountainbike erweitert. Wie bei der veralteten, so auch bei den aktuellen DIN-Normen, werden lediglich einstufige Prüfungen (Wöhlerversuche), kombiniert mit statischen Überlastungstests und Stoßbelastungen, empfohlen. Eine Erweiterung davon bildet die *DINplus*, wo ein Zweistufentest beschrieben wird. Jedoch findet wie bei der DIN 79100 so auch bei den neuen Regelwerken keine Berücksichtigung weiterer Fahrradbelastungen im Betrieb, wie z. B. Bremsvorgänge statt.

In allen Normen wird grundsätzlich zwischen Komplettfahrradprüfung und der Prüfung von Rahmen-/Gabeleinheit unterschieden.

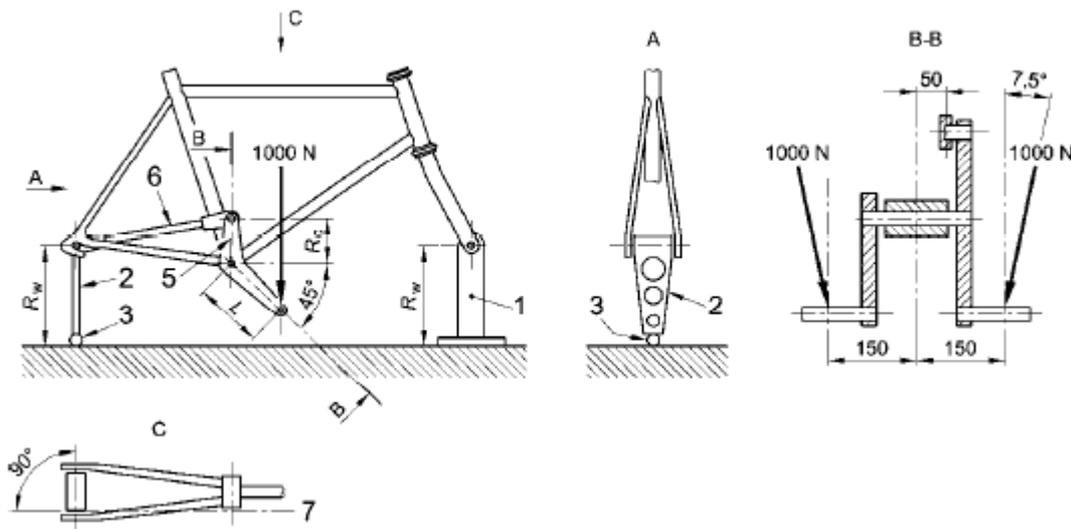
Die Prüfung des fertig montierten Fahrrads, welche letztendlich eine Rahmenprüfung beinhaltet, wird auf einem Rollenprüfstand mit Querleisten, wie in Abbildung 1 dargestellt, durchgeführt [DIN05].

**Legende**

- 1 Höheneinstellung
- 2 Gewicht 18 kg
- 3 Höheneinstellung
- 4 Trommel durchmesser 760 mm
- 5 Gewicht 6,57 kg
- 6 Gewicht 18 kg
- 7 Gewicht 6,75 kg
- 8 Gewicht 18 kg

Abbildung 1: Prüfung der dynamischen Festigkeit des fertig montierten Fahrrades

Bei der Prüfung der Rahmen-/Gabeleinheit werden Pedalkräfte wechselseitig von pneumatischen oder hydraulischen Zylindern eingeleitet, so dass sich ein resultierendes sinusförmiges Torsionsmoment um die Rahmenlängsachse ergibt (siehe Abbildung 2).



Legende

- R_w Höhe der starren Stütze und der vertikalen Verbindung
- R_c Länge des vertikalen Hebelarmes (75 mm)
- l Länge der Tretkurbel (175 mm)
- 1 starre Stütze
- 2 vertikale Verbindung
- 3 Kugelgelenk
- 4 Adapter-Einheit
- 5 vertikaler Hebelarm
- 6 Haltestange
- 7 Mittellinie der Haltestange

Abbildung 2: Dynamische Prüfung des Rahmens im Wiegetritt

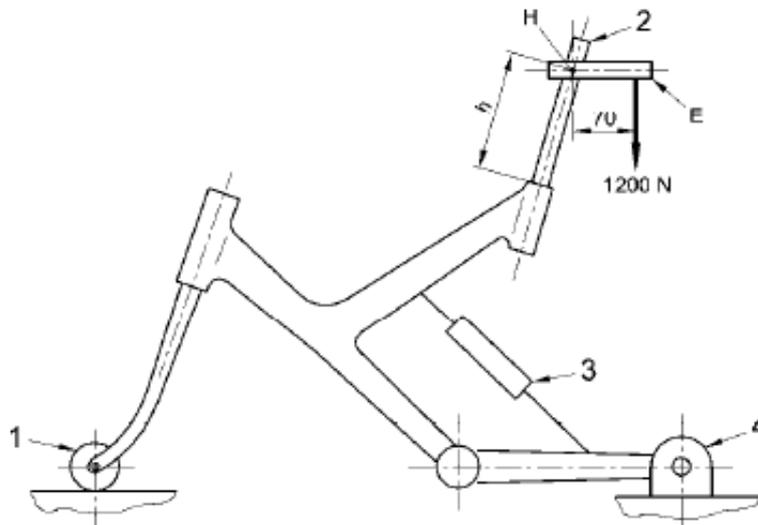
Es wird eine nach unten gerichtete Prüfkraft, F , von 1000 N unter einem Winkel von $7,5^\circ$ zur Mittelsenkrechten, 150 mm von der Mittelachse des Rahmens entfernt, in beide Pedale eingeleitet. Bis zum sichtbaren Anriss oder Bruch an irgendeinem Teil muss der Rahmen 10^5 Schwingspiele überdauern, wobei ein Schwingspiel aus der Be- und Entlastung von zwei Prüfkraften besteht.

Die DINplus schlägt eine Prüfung in zwei Stufen vor: 10^5 und anschließend 10^4 Schwingspiele, wobei das Kraftniveau für jeden Fahrradtyp unterschiedlich ist (siehe Tabelle 1) [DIN98].

Tabelle 1: Rahmen-Gabel-Einheit

Rahmen/Gabel - Einheit	C Citybike	T Trekking- bike	M Mountain- bike	R Rennrad
statisch	350 kg	350 kg	350 kg	350 kg
10^5	950N	1000N	1200N	1200N
10^4	1200N	1300N	1500N	1500N
Stoß	100J	110J	110J	110J

Bei der dynamischen Prüfung mit einer vertikalen Kraft führt der Rahmen unter Einwirkung der Prüfkräfte eine Biegebewegung nach vorne und hinten (siehe Abbildung 3).



Legende

- 1 frei drehende Rolle
- 2 Stahlrohr
- 3 blockiertes Federelement oder festes Verbindungsglied
- 4 starre, drehbar gelagerte Halterung zur Aufnahme der hinteren Achse

Abbildung 3: Rahmen - dynamische Prüfung mit einer vertikalen Kraft

Geprüft werden soll mit einer Frequenz von 25 Hz und bis zum sichtbaren Anriss bzw. bis zum Bruch sollte der Rahmen 50.000 Schwingspiele überdauern.

Bemessung geschweißter dünnwandiger Rohre

Die Auslegung geschweißter Rohre und Verbindungsknoten erfolgt im Allgemeinen nach AD-Merkblättern (AD: Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter). Dieses Regelwerk ist für Aluminiumlegierungen gültig, jedoch aufgrund der vorliegenden Wandstärken von 3 mm ist es nicht direkt auf dünnwandigere Fahrradrahmen übertragbar. Zudem unterscheidet sich der Beanspruchungszustand von Fahrradrahmen deutlich von dem für Rohrleitungen und Druckbehälter.

Die Berechnung geschweißter Aluminiumkonstruktionen wird in der DIN 4113-2 und der EUROCODE 9 aufgeführt. Die DIN 4113-2 ist jedoch nur für Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung geeignet, wohingegen EUROCODE 9 Angaben zur Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauten für ermüdungsanfällige Tragwerke behandelt. Dieses Regelwerk beschreibt verschiedene Bemessungsmethoden bei Ermüdung: nach der sicheren Lebensdauer, nach Schadenstoleranz und durch Versuche. Es fehlen jedoch jegliche Angaben zu Bemessungskollektiven an einem Fahrradrahmen, zudem wird die mehrachsige

äußere Beanspruchung, welche auf die geschweißten Rohrknöten im Rahmen einwirkt, nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die betriebssichere Auslegung und Konstruktion von Fahrradrahmen durch die beschriebenen Normen und Regelwerke nicht ausreichend bestimmt wird, da diese hauptsächlich auf empirischen Festlegungen aus den Erfahrungen der letzten Jahren getroffen wurden. Es fehlt zum einen eine Grundlage zur Bemessung auftretender Belastungskollektive wie Sattel- und Lenkerlasten sowie Bremskräfte, zum anderen wird die Qualität der Rahmenfertigung, vor allem der Füge-technik, und deren Auswirkung auf die Festigkeit und Lebensdauer nicht hinreichend erfasst.

4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE

4.1 FAHRRADRAHMEN / EINROHRRAHMEN

In Folge einer umfassenden Marktanalyse im Hinblick auf City-/Alltagsräder mit geringer Rahmenmasse wurden mit Einvernehmen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) zu Versuchszwecken ungefederte Einrohrrahmen der Marke Maxcycles mit dem Modellnamen „Lady Lite“ mit einer Rahmenhöhe von 50 cm ausgewählt. Diese Rahmen wurden als erstes der gängigen Wiegetrittprüfung unterzogen.

4.1.1 „WIEGETRITT-PRÜFUNG“ NACH DINPLUS

Das Bauteilverhalten der Rahmen wurde in Anlehnung an DIN 79100 bzw. *DIN-plus* für Trekkingbike (siehe Tabelle 1) in einer Wiegetritt-Prüfung mit 1 Hz Prüffrequenz und wechselnder Belastung ermittelt. In Abbildung 4 ist ein mehrachsiger servohydraulischer Prüfstand zur Betriebslastprüfung von Fahrradrahmen dargestellt. Der modulare Aufbau der Hardware und die flexibel einsetzbare Software erlauben die schnelle Anpassung an verschiedenste Aufgaben.

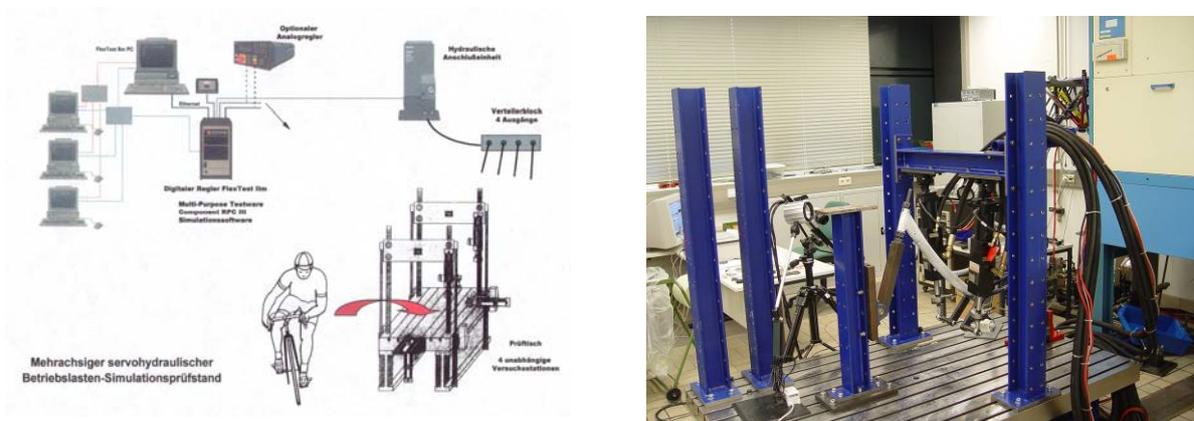


Abbildung 4: Mehrachsiger servohydraulischer Betriebslastprüfstand für Fahrradrahmen

(A) prinzipieller Aufbau

(B) Prüfung eines geschweißten Aluminiumrahmens

Es wurden mehrere Rahmen der dynamischen Beanspruchung von 100.000 Lastwechseln mit einer maximalen Kraft von 1000 N und im Anschluss mit 10.000 Lastwechseln und 1300 N ausgesetzt (siehe Abbildung 5). Als Versagenskriterium wurden optisch erkennbare Schädigungen und die Zunahme des Verfahrweges an den Kraft einleitenden Aktuatoren definiert.

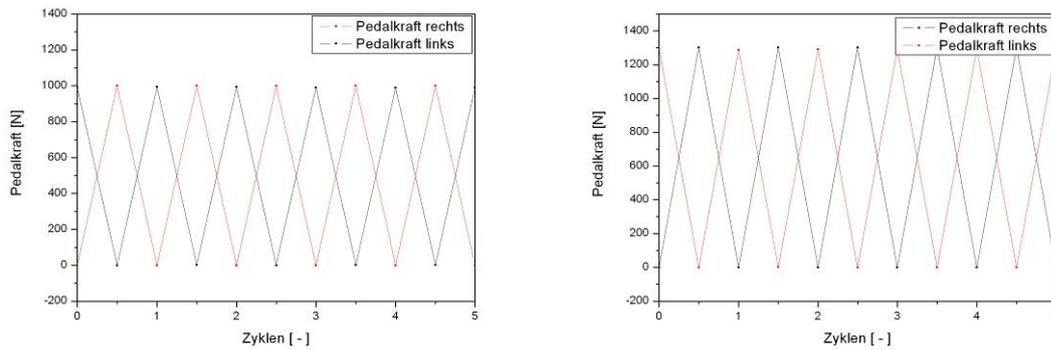


Abbildung 5: Laststeigerungsversuche gemäß DINplus (Pedalkraft über die Zyklenzahl)

Die Prüfprozedur wurde gemäß Versagensdefinition bei allen geprüften Rahmen schädigungsfrei überstanden.

4.1.2 MESSUNGEN MIT DEM GOM-SYSTEM

Die Lokalisierung geeigneter Messstellen für Dehnungsmessstreifen (DMS) wurde durch den Einsatz des Grauwert-Korrelationsverfahrens (GOM) realisiert.

Das Grauwert-Korrelationsverfahren ist ein optisches Verfahren zur Erfassung der Bauteilverformung infolge äußerer Belastungen. Bei der Messung wird eine auf der Bauteiloberfläche aufgebrachte Struktur, welche der Deformation bei den unterschiedlichen Lastzuständen folgt, mit zwei CCD-Kameras erfasst. In den Bildern des Ausgangszustandes werden Facetten definiert, die bei jeder weiteren Aufnahme hochpräzise wieder gefunden werden. Über photogrammetrische Algorithmen werden für jeden Lastzustand 3D-Koordinaten der Facetten ermittelt, woraus anschließend dreidimensionale Verschiebungen und Dehnungen flächenhaft hochaufgelöst berechnet werden.

Geprüft wurde in Anlehnung an die DINplus, wobei eine Erhöhung der statischen Last in 100 N – Schritten von 0 N bis 1300 N für jedes Pedal einzeln stattfand. Zudem wurden Hauptformänderungen bei simultaner Belastung der beiden Seiten mit einer Kraft von 650 N erfasst. Die Aufzeichnung der auftretenden Dehnungen bzw. Verformungen fand am Unter- und Sattelrohr statt (siehe Abbildung 6), die entsprechenden Ergebnisse sind im Kapitel 7.1 zusammengestellt.

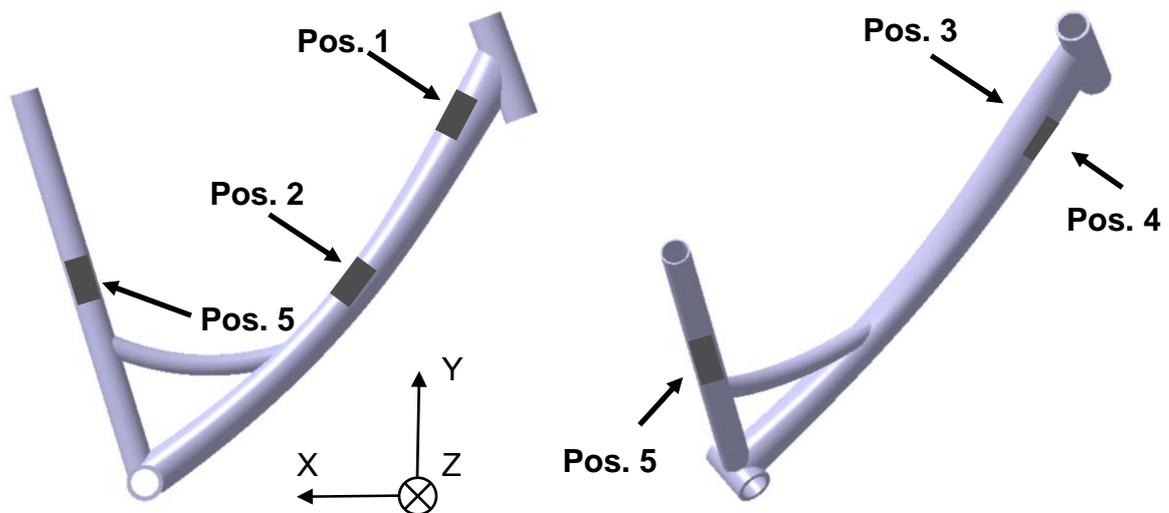


Abbildung 6: Messpositionen am vorderen Rahmenabschnitt

Die Auswertung der GOM-Analyse zeigte zum einen, dass die größten Verschiebungen wie bei der einseitigen Maximalbelastung mit 1300 N an einem Pedal, so auch bei der simultanen symmetrischen Belastung der beiden Pedale mit jeweils 650 N auftritt. Zum anderen bestätigte die GOM-Analyse die Auswahl geeigneter Applikationsstellen für die DMS-Meßbrücken.

4.1.3 REALE BEANSPRUCHUNGSKOLLEKTIVE AM EINROHRRAHMEN

Die experimentelle Ermittlung von realen Beanspruchungskollektiven fand an einem mit Dehnungsmessstreifen bestückten Fahrradrahmen mit mobilem Datenlogger statt.

Im Wiegetritt wird durch die sinusförmige Kräfteinleitung im Tretlagerbereich Biegung und Torsion im Unterrohr erzeugt. Die Torsionsverformung wird in z-Richtung nahe der Schweißverbindung Unterrohr-Steuerrohr aufgezeichnet. Bei dieser Applikationsstelle ist die Verformungsüberlagerung der beiden Beanspruchungsarten besonders gering, da die größte Durchbiegung des Unterrohrs in der Mitte zwischen dem Steuerrohr und dem Tretlagerbereich stattfindet, wo diese auch mittels DMS aufgezeichnet wird. Zusätzlich wird die Biegeverformung am Sattelrohr in x-Richtung erfasst. Die Applikationsstellen sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt.

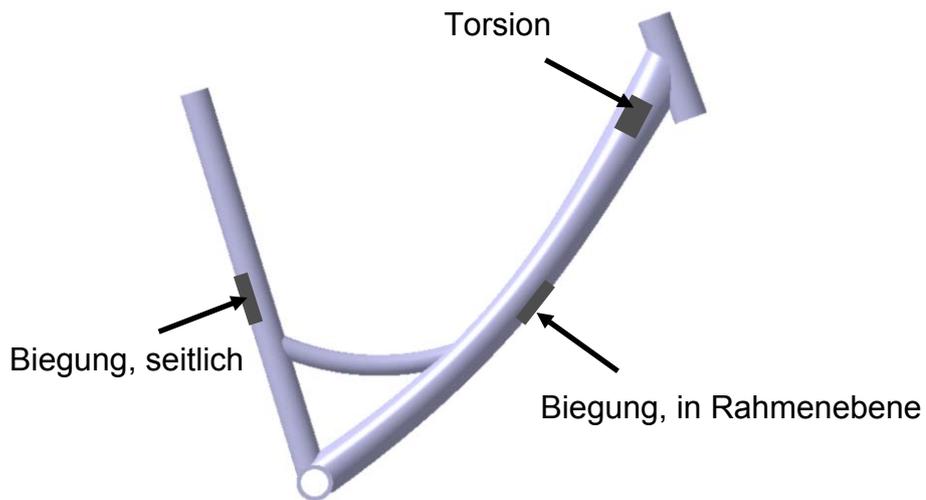


Abbildung 7: Maximale Verformungen am Fahrradrahmen



Abbildung 8: Mit DMS bestückter Einrohr-Rahmen (Abbildungen exemplarisch)

Das Messfahrrad wurde mit einem mobilen Datenerfassungssystem (8-Kanal-Datenlogger) ausgerüstet, welcher zur Verstärkung und Aufzeichnung der Signale dient. Zur Befestigung wurde eine besonders leichte Halterung in Aluminium-CFK-Mischbauweise konstruiert, um das Gesamtgewicht des Systems möglichst gering zu halten und die Rahmenstruktur im Messbereich (vorderer Rahmenbereich) nicht zu beeinflussen (siehe Abbildung 9).



Abbildung 9: Messrad mit Datenaufzeichnungssystem

Im Realversuch wurden die auftretenden Belastungen am Rahmen bei unterschiedlichen Fahrtechniken gemessen. Zusätzlich wurden verschiedene Untergründe gewählt, um deren Auswirkungen auf den Rahmen beurteilen zu können.

In der folgenden Tabelle sind alle Prüfprozeduren aus dem Realversuch aufgelistet.

Tabelle 2: Im Realversuch durchgeführte Prüfprozeduren

Messung 1	Fahrt über Kopfsteinpflaster bergauf und über ebene Fahrbahn bergab bei <ul style="list-style-type: none"> • 15 km/h • 20 km/h • 25 km/h
Messung 2	Herunterfahren von einer Bordsteinkante
Messung 3	Fahrt über eine Stufe <ul style="list-style-type: none"> • stehend auf Pedalen und sitzend im Sattel • nur stehend auf den Pedalen • stehend auf den Pedalen über eine Doppelstufe • sitzend, ohne Fußkontakt zu den Pedalen
Messung 4	Vollbremsung bei <ul style="list-style-type: none"> • 15 km/h • 20 km/h • 25 km/h

In Abbildung 10 ist ein Ausschnitt der Daten für die Biegung am Unterrohr für die Messung 1 bei 20 km/h für die Dauer von 15 Sekunden dargestellt. Mit dem Ziel einer zeitgerafften Prüfung werden den Diagrammen lediglich Maximalwerte entnommen. Bei den nachfolgenden Projekten wäre die Berücksichtigung von Lastkollektiven mit den auftretenden Lasten und deren Häufigkeit sinnvoll.

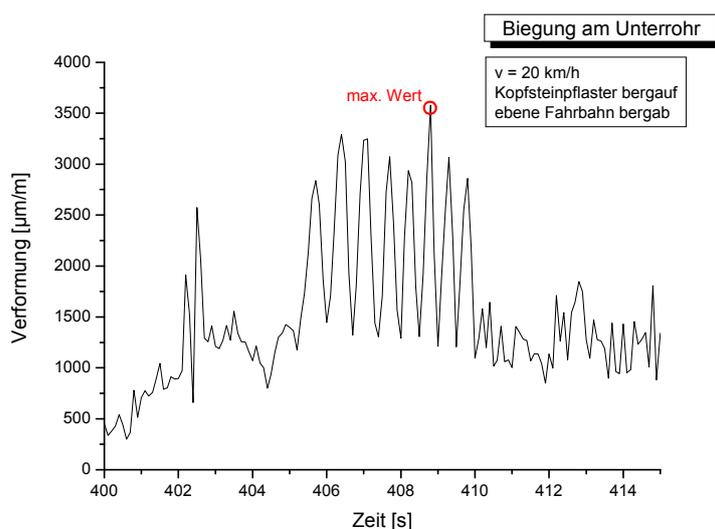


Abbildung 10: Ausschnitt aus dem zeitlichen Verlauf der Verformung am Unterrohr

Analog dazu werden alle Diagramme (siehe Anhang 7.2) bearbeitet und die Ergebnisse der auftretenden Gesamtverformungen an dem Sattel- und an dem Unterrohr in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Maximalwerte bei der jeweiligen Beanspruchungsart

Beanspruchung		DMS 1	DMS 2	DMS 3
		Biegung/Unterrohr	Torsion/Unterrohr	Biegung/Sattelrohr
in $\mu\text{m/m}$				
ebene Fahrbahn Kopfsteinpflaster	ϵ_{\min}	- 151	- 578	- 2120
	ϵ_{\max}	3463	590	1847
Bordsteinkante	ϵ_{\min}	- 1293	- 437	- 2001
	ϵ_{\max}	3583	417	1773
Stufe	ϵ_{\min}	- 1305	- 608	- 1417
	ϵ_{\max}	3870	639	1393
Vollbremsung	ϵ_{\min}	- 4043	- 429	- 1569
	ϵ_{\max}	3316	685	1334

Auffallend ist, dass besonders kritische Beanspruchungen am Unterrohr, vor allem durch Bremsmanöver mit der Vorderradbremse, erreicht werden. Diese Art der Belastung tritt im Wiegetritt-Versuch nicht auf.

Anhand der auftretenden Dehnungen erfolgt durch experimentelle Anpassung die Umsetzung des gemessenen Kollektivs in ein charakteristisches Belastungskollektiv.

4.1.4 BETRIEBSLASTVERSUCHE AM PRÜFSTAND / PRÜFAUFBAU

Die experimentelle Datenanpassung erfolgt an dem Prüffeld mit dem DMS-Rahmen aus dem Realversuch („Lady Lite“, 50 cm Rahmenhöhe). Die Verformungen werden über die DMS-Meßbrücken aufgezeichnet, welche an einen Meßverstärker angeschlossen wurden.

Die Einspannung des Rahmens erfolgt gemäß Wiegetritt-Prüfung nach der DIN 79100 (aktuell DIN 17674): vorne wird der Rahmen fest über die Gabelaufnahme befestigt, hinten gelenkig über die Schwinge. Die Krafteinleitung wird über zwei Hydraulikzylinder am Tretlager realisiert.

Im Laufe des Versuchs wird die Kraft schrittweise gesteigert. Dabei werden die Werte für die Verformung des Rahmens aus den DMS-Meßbrücken in Abhängigkeit der Pedalkraft aufgezeichnet. Es sollen so genannte Äquivalentkräfte zu den Verformungsdaten aus dem Realversuch gefunden werden.

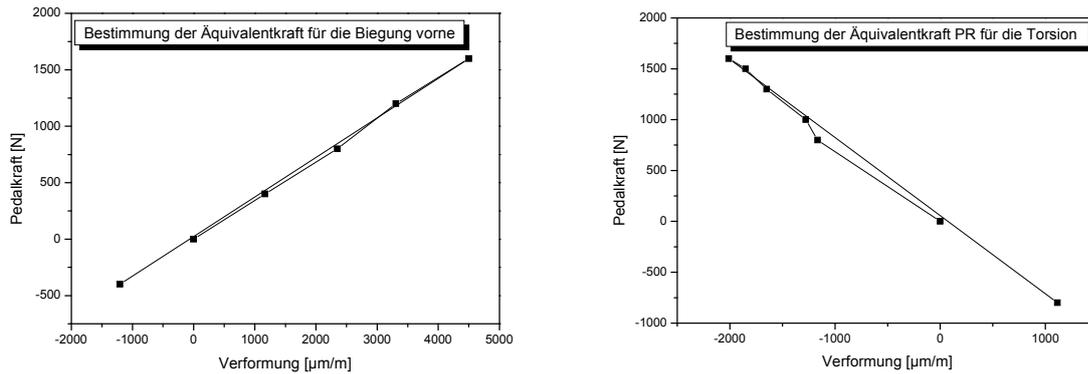


Abbildung 11: Verformungen am eingespannten Rahmen (Wiegetritt) in Abhängigkeit der Pedalkraft

Wie für die Biegung am Unterrohr, so auch für die Torsion wird am Prüfstand ein proportionales Verhalten der Verformung in Abhängigkeit der angelegten Pedalkraft angezeigt. Bei der Äquivalentkraftbestimmung wird in Abhängigkeit der ansteigenden Kraft am Prüfstand der maximal erreichte Dehnungswert aus dem Realversuch ermittelt und somit die entsprechende maximale Belastung bestimmt. So ergibt sich zum Beispiel für die Fahrt auf der ebenen Fahrbahn der maximale Dehnungswert von 3463 µm/m, auf dem Versuchsstand musste dafür eine maximale Kraft von 1245 N aufgebracht werden. Analog dazu erfolgt der Kraft-Dehnungs-Abgleich für die Torsion und die Biegung am Sattelrohr bei allen Prüfprozeduren.

Im Anschluss daran wird der DMS-Rahmen einer Wiegetritt-Prüfung nach der DINplus mit 10^5 Lastwechseln bis 1000 N und 10^4 Lastwechsel bis 1300 N unterzogen. Diese Prozedur wird in mehreren Durchläufen ohne sichtbare Beschädigungen des Rahmens überstanden. Außerdem wird aus den DMS-Aufzeichnungen im Realversuch ersichtlich, dass das aufgezeichnete Beanspruchungskollektiv (Abbildung 12) dort nicht dem im Wiegetritt-Versuch beobachteten relativ gleichmäßigen sinusförmigen Verlauf der Verformungen entspricht. Dies sollte bei der Übertragbarkeit berücksichtigt werden.

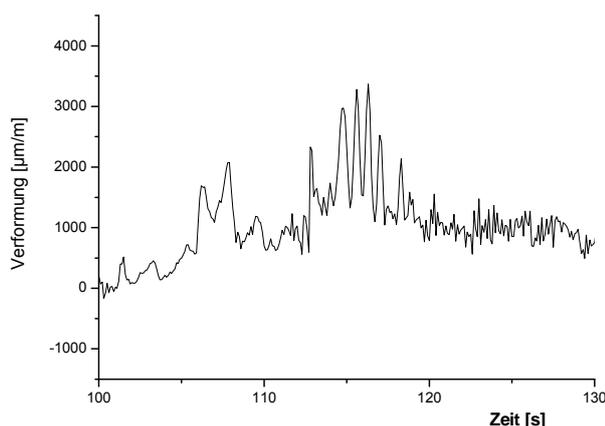


Abbildung 12: Aufgezeichnete Beanspruchungskollektiv im Realversuch beim Befahren einer ebenen Strecke

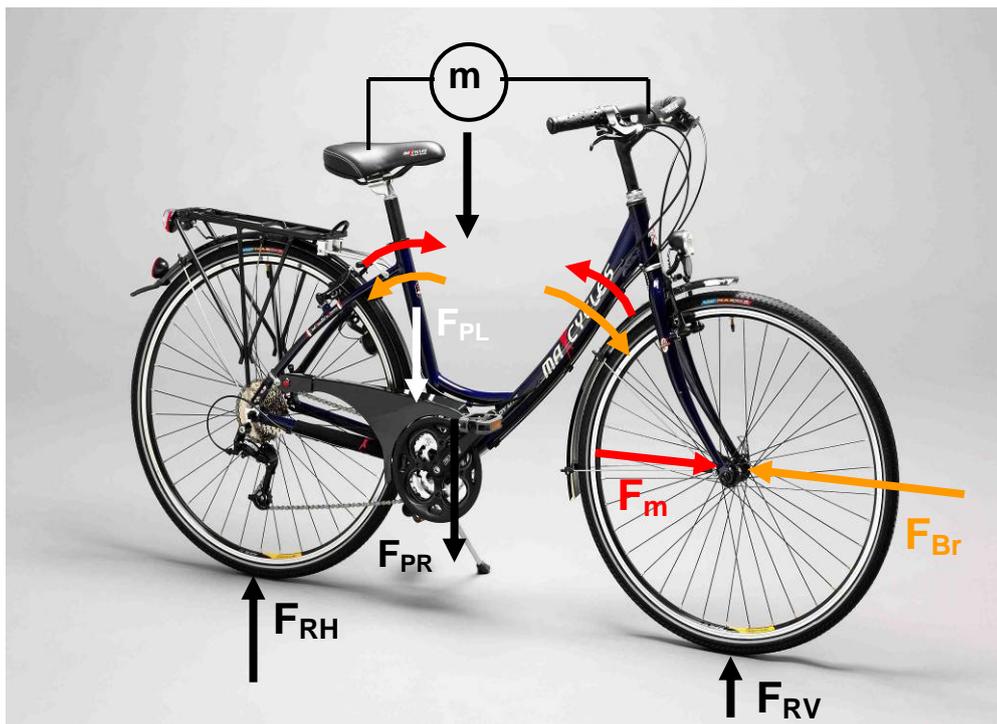


Abbildung 13: Auftretende Kräfte im Fahrbetrieb

Aus den Daten des Nachfahrversuches auf dem Prüffeld wird ersichtlich, dass die Beanspruchungen aus dem Wiegetrittversuch nach der DINplus nicht den Belastungen im realen Fahrbetrieb entsprechen. Aus diesem Grund wird der Prüfaufbau um weitere Elemente erweitert, welche diese Belastungen berücksichtigen (siehe Abbildung 13).

Die ermittelte hohe Beanspruchung am Unterrohr durch **Bremsmanöver** mit der Vorderradbremse im Realbetrieb wird bei der dynamischen Wiegetrittprüfung darüber hinaus überhaupt nicht erfasst. Die Wirkungsrichtung der Bremskraft an der Vorderachse ist in der Abbildung 13 zu erkennen.

Beim Ausführen des Bremsvorganges unterliegt der Rahmen einer Biegebeanspruchung, wobei eine starke Verformung am Sattel- und vor allem am Unterrohr auftritt (siehe Abbildung 14).

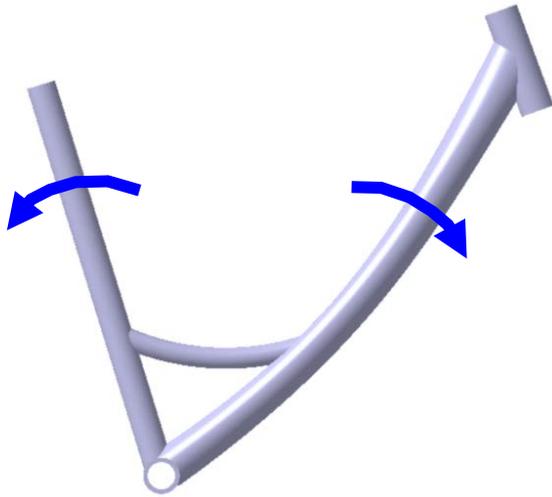


Abbildung 14: Verformungen („Ausfedern“) am Rahmen bei einem Bremsmanöver (Biegebeanspruchung)

Zur messtechnischen Erfassung des Bremsvorganges bzw. der Biegebeanspruchung wird das vorhandene Prüffeld um einen entsprechenden Aufbau erweitert (Abbildung 15).

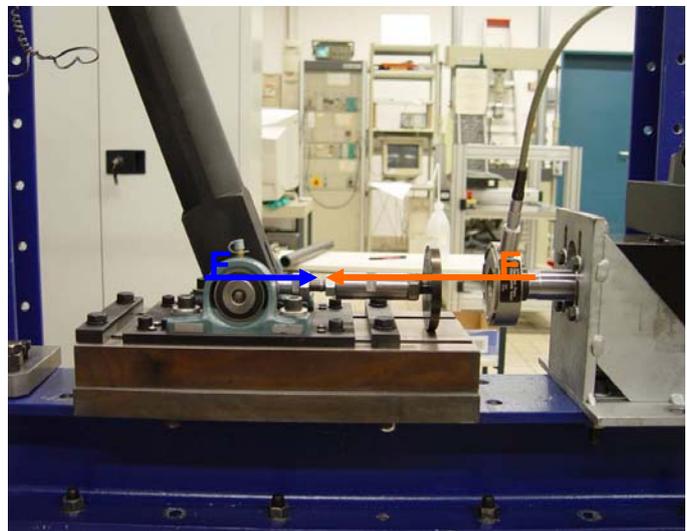
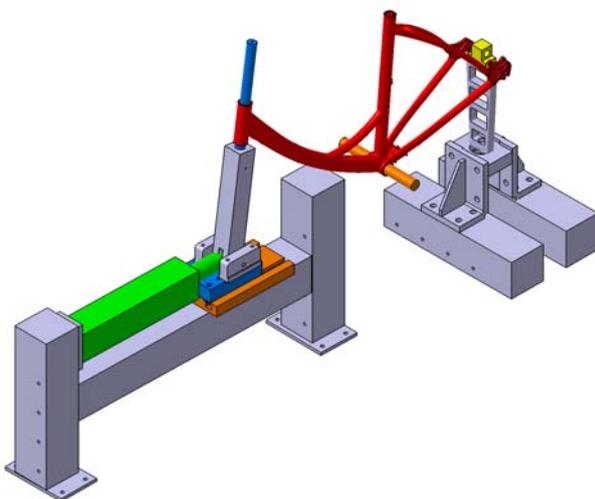


Abbildung 15: Aufbau der Bremsprüfung

In Abbildung 16 sind die Verformungen am Unter- und am Sattelrohr in Abhängigkeit der angelegten Gabelkraft dargestellt. Die maximal angelegte Gabelkraft beträgt dabei 1200 N (Messpositionen sind in der Abbildung 6 dargestellt).

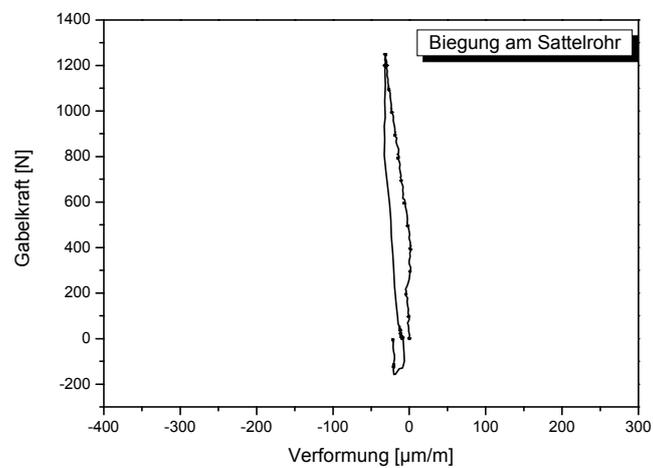
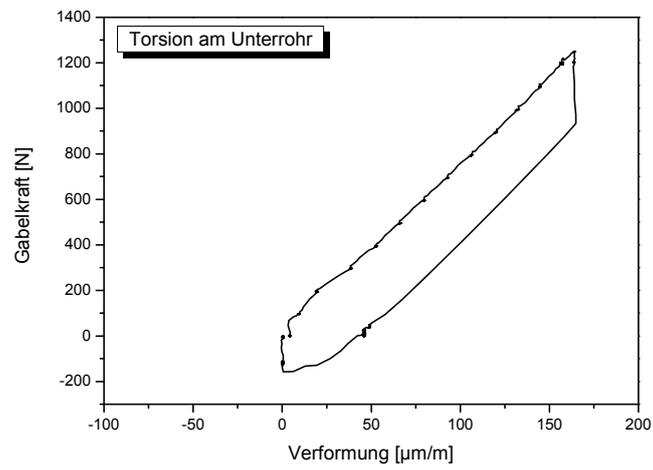
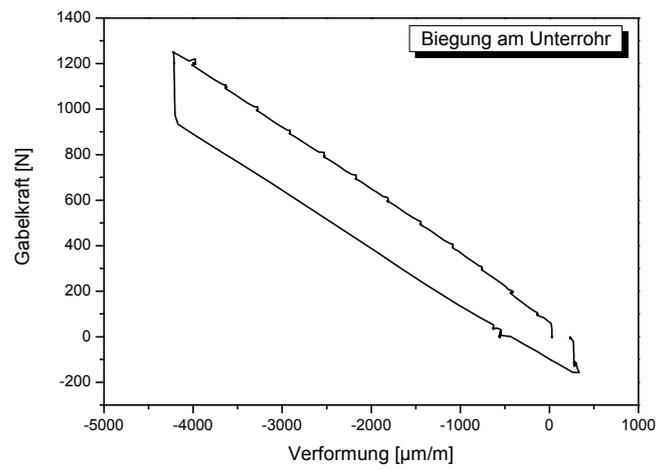


Abbildung 16: Verformungen am Unter- und Sattelrohr in Abhängigkeit der Gabelkraft

Die größten Rahmendeformationen werden am Unterrohr infolge der Biegebelastung beobachtet. Diese Werte entsprechen in etwa den beobachteten Maximalwerten im Realversuch für die Vollbremsung, d.h. die Erweiterung des Prüfaufbaus in Bezug auf Biegeverformung des Unterrohrs eignet sich hervorragend zur Untersuchung des Bremsmanövers.

Im Realfall wird beim Bremsen ein „Ausfedern“ (siehe Abbildung 14) des gesamten Rahmens beobachtet, was sich jedoch auf dem Prüfstand aufgrund der geringen Verformung des Sattelrohrs nicht bewahrheitet. Außerdem wird das Unterrohr mit ansteigender Gabelkraft durch die Kettenstrebe einseitig auf Torsion belastet. Dies wird nicht in der Prüfung berücksichtigt, ebenfalls nicht in dem gängigen Prüfverfahren auf Basis der DIN EN 14764.

Bei der Prüfung nach DIN EN 14764 und nach EfbE-Standard wird die Last ausschließlich über die Pedale bzw. über das Tretlagerrohr eingeleitet, d.h. **Sattel- und Lenkerlasten** bleiben bei diesen Prüfverfahren unberücksichtigt.

Zur Ermittlung der Lastverteilung werden in erster Linie Messungen mit mehreren Testfahrern verschiedener Körpergewichte durchgeführt. Dabei wird es bei den Messungen zwischen sportlicher und aufrechter Sitzposition unterschieden (siehe Abbildung 17).

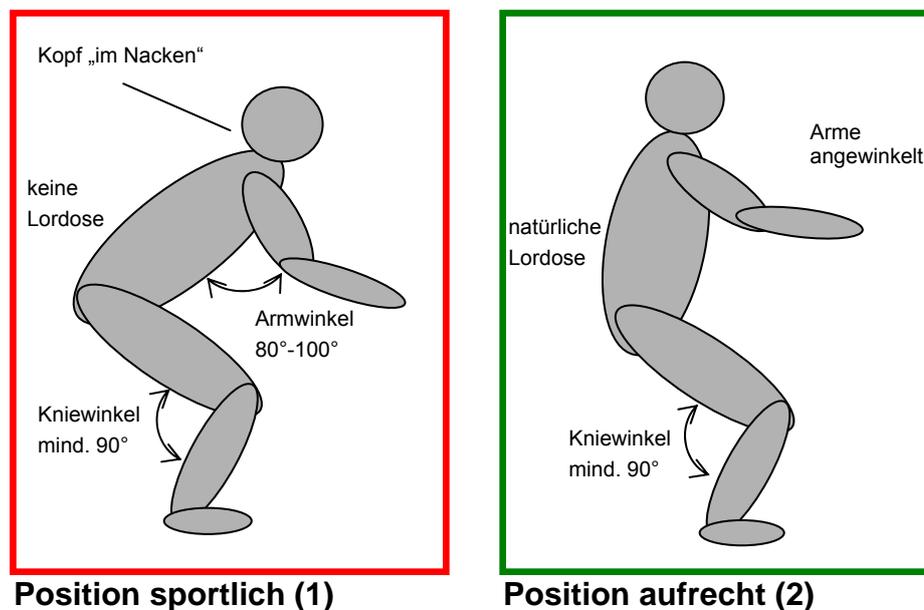


Abbildung 17: Sportliche und aufrechte Sitzposition

Die sportlich gestreckte ist die Sitzposition auf Rennrad und Mountainbike.

Aufrecht ist die Sitzposition beim Cityrad. Bei dieser Sitzposition sind die Arme weitgehend entlastet.

Tabelle 4: Lastverteilung in Abhängigkeit der Sitzposition

Testperson	Fahrer	Position sportlich (1)		Position aufrecht (2)	
		F_{RV}	F_{RH}	F_{RV}	F_{RH}
	[kg] ([N])	[N]	[N]	[N]	[N]
1	91 (892,41)	402,21	618,03	353,16	647,46
2	74 (725,69)	333,54	510,12	274,68	559,17
3	92 (902,21)	403,68	606,75	348,22	662,21

Radmasse: 11 kg (107,91 N)

Die durchschnittliche Lastverteilung unterscheidet sich je nach Fahrweise: in der sportlichen Position liegt die durchschnittliche Lastverteilung von 39 % Vorderlast und 61 % Hinterlast; die aufrechte Sitzposition führt zu einer Lastverteilung mit durchschnittlich 34 % Vorderlast und 66 % Hinterlast.

Im nächsten Schritt wurde ein einstellbarer Lastrahmen zur Aufbringung einer statischen Last angefertigt, welcher zur Berücksichtigung der Lastverteilung (Tabelle 4) und zur Einleitung vertikaler Kräfte F_{vert} bei zukünftigen Prüfstandtests dient.

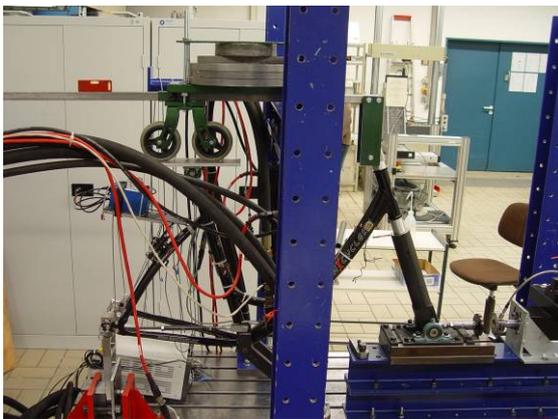


Abbildung 18: Einstellbarer Lastrahmen auf dem Prüfstand

Der erweiterte Prüfaufbau berücksichtigt Lenker- und Sattelkräfte und deren Verteilung sowie die Bremsvorgänge.

Analog zu oben beschriebener Vorgehensweise wird die Äquivalentkraft unter Berücksichtigung des Fahrergewichtes bestimmt (Abbildung 19). Durch die aufgebraachte Last erfährt der Rahmen eine Gesamtverformung um ca. 12 mm (Abbildung 20).

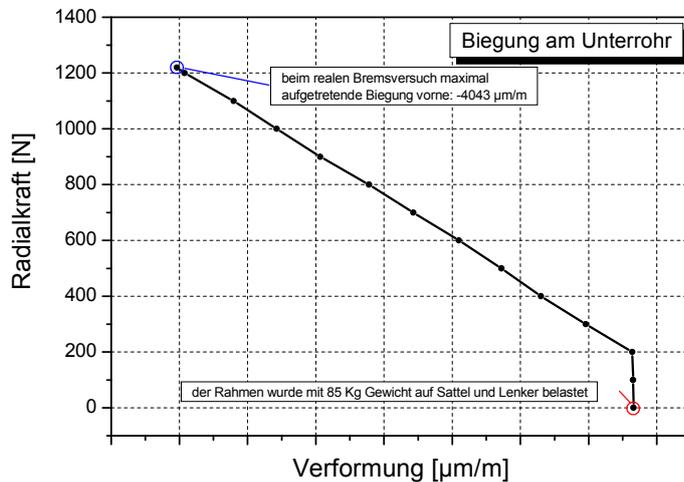


Abbildung 19:

Äquivalentkraftbestimmung unter Berücksichtigung des Fahrergewichtes beim Bremsvorgang

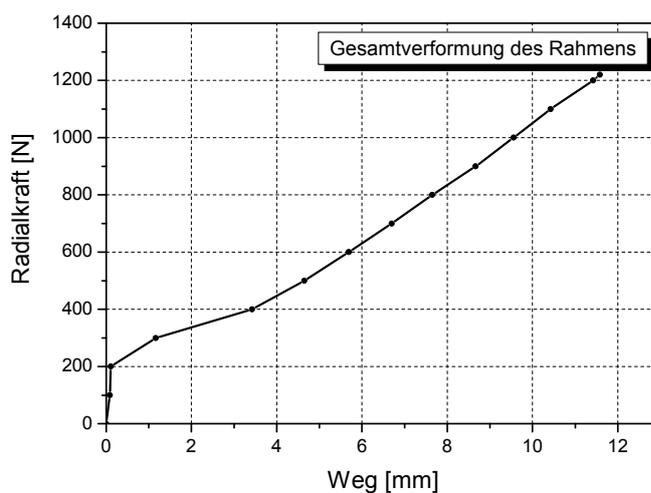


Abbildung 20:

Maximale Rahmenverformung infolge der Radialbelastung

Zusätzlich wurden Untersuchungen zum Biegeverhalten des Unterrohrs in Abhängigkeit der Belastungsverteilung (Pedale/Sattel) durchgeführt, wobei die Gesamtbelastung konstant gehalten wurde (Abbildung 21). Die Messung zeigt deutlich, dass durch die Lastaufteilung auf Pedale und Sattel das Unterrohr eine höhere Verformung erfährt, als nur mit Sattellast.

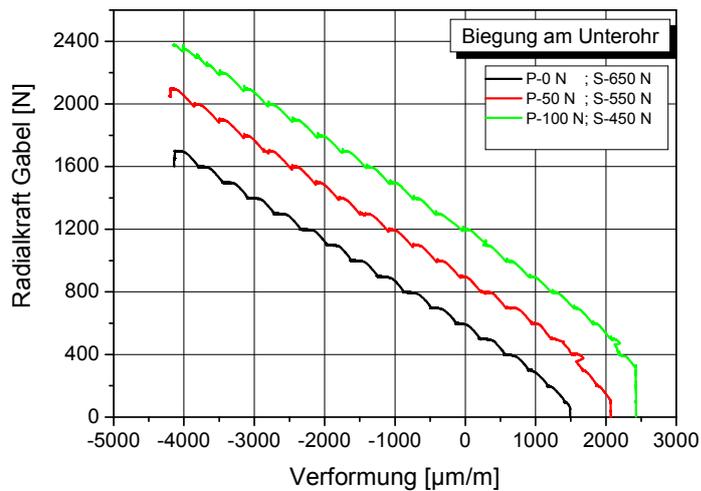


Abbildung 21:

Verformungsverhalten des Unterrohres in Abhängigkeit der Belastungsverteilung

(P: Pedallast, S: Sattellast)

In Bezug auf den Realfall jedoch kann insbesondere die Sattellast nicht als konstante statische Last betrachtet werden, es müssen zusätzlich dynamische Komponenten wie die Tretbewegung und die Fahrbahnunregelmäßigkeiten erfasst werden. Aus diesem Grund wird der Prüfaufbau darüber hinaus mit einem Aktuator zur Aufbringung variabler vertikaler Kräfte $F_{\text{vert}}(t)$ erweitert, welcher in Abbildung 22 dargestellt ist.

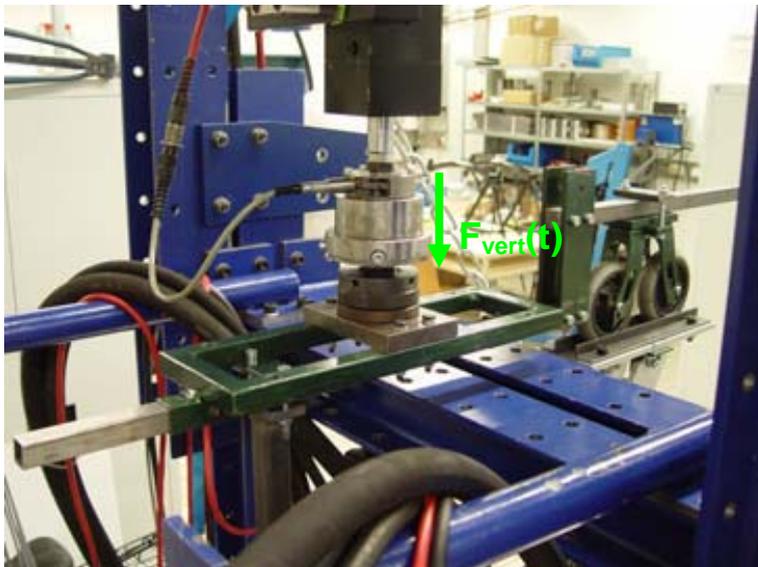


Abbildung 22:

Aufbringen der vertikalen Kraft $F_{\text{vert}}(t)$

In Verbindung mit dem instrumentierten Messrahmen ist es möglich geworden, die Beanspruchungen in der Rahmenebene aus dem Realfall durch Fahrbahnerregungen und Bremsmanöver auf dem Prüfstand zu realisieren. Die Gabelbelastung wurde an dem Messrahmen im Bremsversuch bestimmt, für die Ermittlung der tatsächlich auftretenden Kräfte im **Sattel- und im Tretbereich** wurde eine direkte Messung am Sattel und an den Pedalen durchgeführt (siehe Abbildung 23).



Abbildung 23:

Aufbau zur Messung von Pedal- und Sattelkräften

Die Prüfverfahren für Fahrräder nach DIN EN 14764 werden Pedalkräfte in Höhe von 1000 N im Wiegetritt vorgeschrieben. Es wurden Messungen mit unterschiedlichen sportlichen Fahrern im Gewichtsbereich zwischen 72 kg und 92 kg durchgeführt, wobei Spitzenwerte bis zu 1000 N erreicht wurden. Im Durchschnitt jedoch lagen Pedalkräfte in Höhe von 300-500 N und die Sattelkräfte in Höhe von 500-700 N.

Der **erweiterte Prüfaufbau** stellt eine deutliche Entwicklung zu Normprüfungen dar. Es können Beanspruchungen durch Bremsen $F_{Brems}(t)$, durch Treten $F_{PedR/L}(t)$ sowie Fahrbahnereignisse $F_{vert}(t)$ realitätsnah abgebildet werden (siehe Abbildung 24).

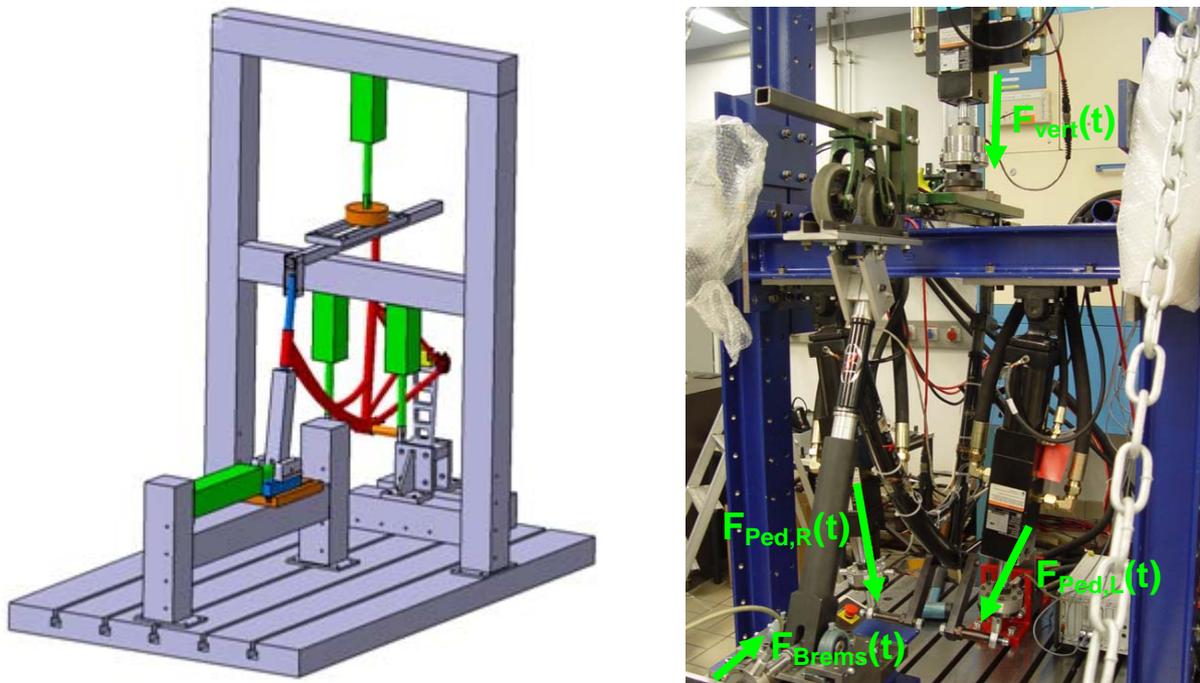


Abbildung 24: Erweiterter Prüfaufbau

Aus den erhaltenen Daten wurden unterschiedliche Prüfprozeduren für eine realitätsnahe Prüfung zusammengestellt und mehrere Rahmen der Marke „Maxcycles“ vom Typ „LadyLite“ diesen Prüfungen unterzogen. Eine Prüfprozedur nach Messdaten sah zum Beispiel so aus:

Tabelle 5: Beispielprozedur nach Messdaten

	Prüfkraft F	Schwingspielzahl N	Frequenz f
	[N]	[LW]	[Hz]
$F_{Brems}(t)$	1200	10.000	0,25
$F_{vert}(t)$	500-1350	500.000	5
$F_{Ped R/L}(t)$	1000	100.000	1

Nach Beendigung der Prüfprozedur (auch nach mehreren Durchläufen) wies der „LadyLite“-Rahmen keine Beschädigungen auf. Vom bezeichneten Rahmenmodell

sind auch im Praxisbetrieb weder seitens des Herstellers noch vom Sachverständigen Schadensfälle bekannt. Aus diesem Grund wurden andere, aus Versicherungsfällen bekannte Fahrräder mit Einrohrrahmen („Rabeneick“, „Bocas“ und „Kettler“) zugekauft und die Rahmen nach der oben beschriebenen Prozedur geprüft. Die Rahmenmodelle von „Kettler“ und „Rabeneick“ wiesen am Ende der Prüfung Beschädigungen auf, jedoch weder am Unterrohr- oder Sattelrohr noch an einer Schweißstelle, sondern an Kettenstreben (siehe Abbildung 25).



Abbildung 25:

Bruch der Kettenstreben nach Beendigung der erweiterten Prüfprozedur

4.1.5 KOMBINIERTE PRÜFUNG (SCHWEBUNG)

Im Anschluss wurde an dem „LadyLite“-Rahmen die kombinierte Prüfung (Schwebung) durchgeführt. Bei der Schwebungsprüfung werden die Pedalkräfte mit leicht unterschiedlicher Frequenz (in diesem Fall: $f_1=1$ Hz, $f_2=1,1$ Hz) eingeleitet. Dies führt zu einer mit der Zeit veränderlichen Phasenverschiebung zwischen den Pedalkraftamplituden und dies wiederum zu einem mit der Zeit veränderlichen Anteil von Torsions- und Vertikalbelastung des Rahmens. Konstante Pedalkraftamplituden führen im Fall der Schwebungsprüfung zu einem Mehrstufenkollektiv der Torsions- und der Vertikalbelastung des Rahmens. Die Frequenzdifferenz bestimmt dabei die Form des Kollektivs. Über den Hebelarm b kann das Torsionsmoment und über den Zylinderanstellwinkel α die Vertikalkraft eingestellt werden (siehe Abbildung 26).

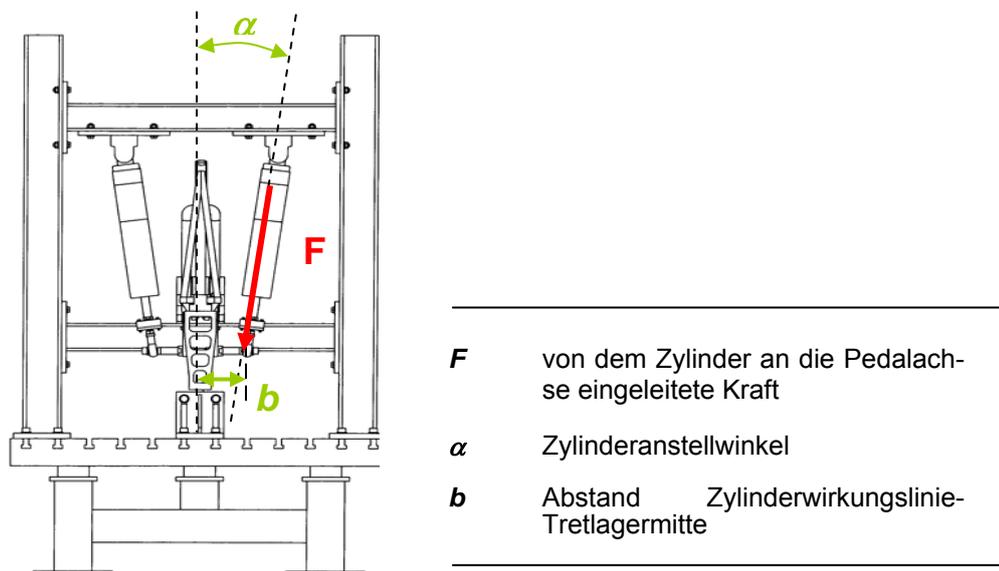


Abbildung 26: schematischer Prüfaufbau von Rahmen-/Gabeleinheit

Die Schwebungsversuche an den Einrohrrahmen wurden mit einer Kraft F in Höhe von 1200 N und Frequenzen $f_1=1$ Hz (rechte Seite), $f_2=1,1$ Hz (linke Seite) durchgeführt. Da die Kräfte (Amplituden) an beiden Pedalen übereinstimmen, handelt es sich dabei um eine „vollkommene Schwebung“. Das heißt, mit der Zeit löschen die beiden Schwingungen einander immer wieder aus und die Kraft (Amplitude) der resultierenden Schwingung schwankt zwischen den Werten 0 und $2F$. Dies spiegelt sich in dem Verformungsverhalten des Rahmens wider, wie in Abbildung 27 dargestellt.

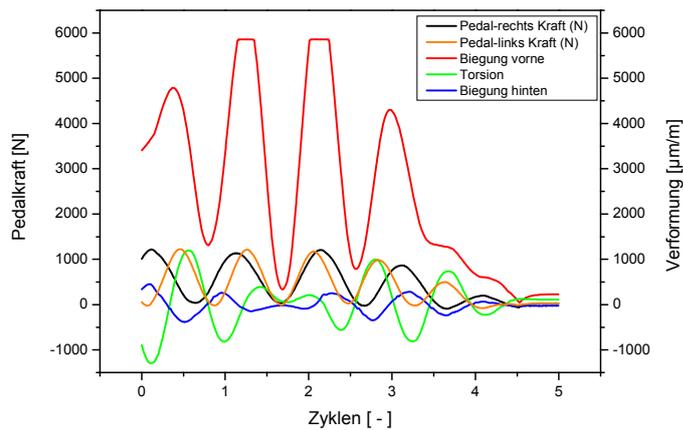


Abbildung 27:

Verformungsverhalten des Rahmens im Schwebungsversuch

Durch die Kraftüberlagerung wirkt im Extremfall (bei 2F) eine Kraft von 2400 N auf die Pedale, dadurch entstehen im Rahmen hohe Spannungen und Spannungsspitzen an den Kerben, welche letztendlich zum Versagen führen. Trotz Erwarten treten die Beschädigungen nicht an den Schweißnähten, sondern an den Bohrungen der Gewindenieten für die Kabelführung auf, wie in Abbildung 28 dargestellt.



Abbildung 28: *Beschädigungen am Rahmen nach der Schwebungsprüfung*

4.2 STEUERKOPFROHRKNOTEN / T-STOß-PROBEN

Parallel zu den Experimenten am kompletten Rahmen wurde für Untersuchungen an bauteilähnlichen Proben eine T-Stoß-Probe konzipiert. Als typischer, sicherheitsrelevanter Rohrknötten wird der Steuerrohrknötten des Einrohrrahmens ausgewählt. Die T-Stoß-Proben wurden unter branchenüblichen Herstellungsbedingungen in Auftrag gegeben.

4.2.1 PROBENGEOMETRIE

Aus der Vermessung zahlreicher Einrohrrahmen („Lady Lite“) wurde die Geometrie der T-Stoß-Proben festgelegt (siehe Abbildung 29). In Zusammenarbeit mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) wurde die Legierung Al 6061 gewählt.

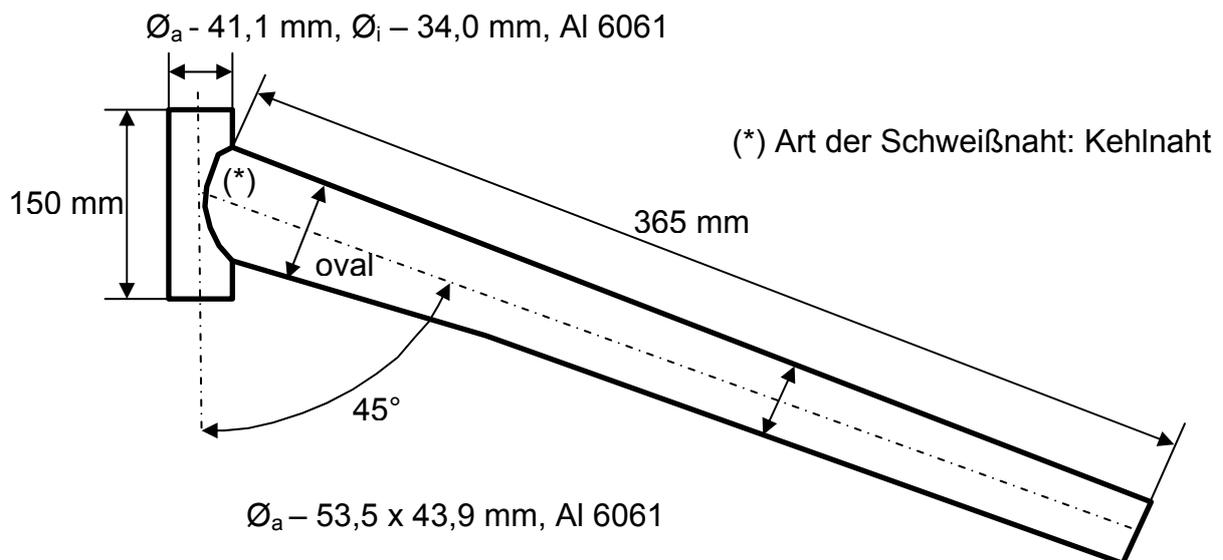


Abbildung 29: Geometrie der T-Stoß-Probe

Die T-Stoß-Proben werden auf einem servohydraulischen Prüffeld separat auf Biegung und Torsion geprüft.

4.2.2 BIEGEPRÜFUNGEN

Die Biegeprüfung soll die Belastungen im Rohrknotten, wie sie in Normalfahrt und bei Bremsen auftreten, simulieren. In-plane-Biegung wird dabei durch Zug-Druck-Aktion der Prüfzylinder erzielt. In Abbildung 30 ist eine Darstellung der Biegevorrichtung zu sehen.

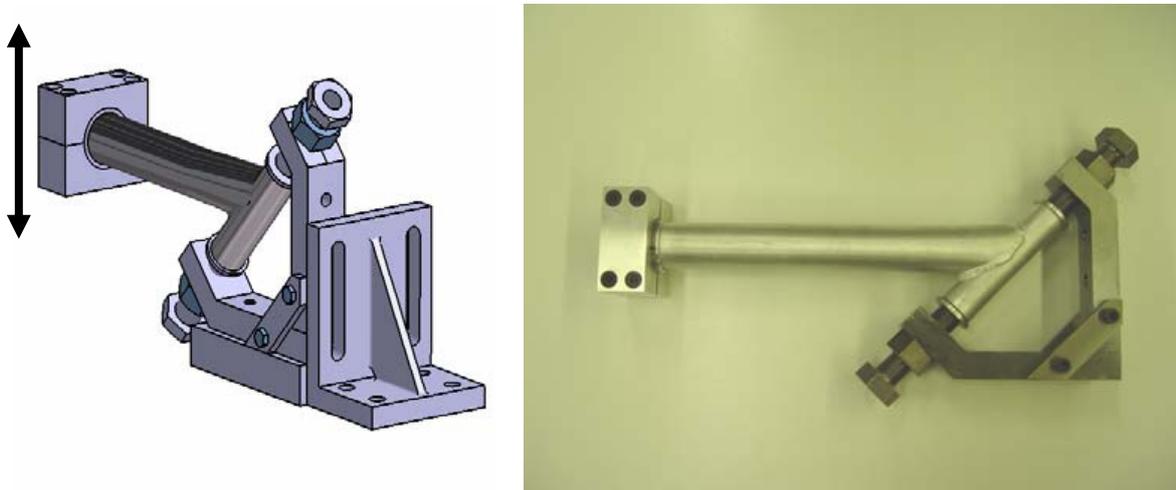


Abbildung 30: Biegevorrichtung T-Stoß-Probe

Die Biegeproben wurden einer rein schwellenden Belastung unterzogen, aus Vorversuchen an einer T-Stoß-Probe wurden drei Lastniveaus (siehe Tabelle 6) festgelegt, wobei für jeden Durchgang jeweils drei Proben eingesetzt wurden. Geprüft wurde an einer servohydraulischen Prüfmaschine mit einer Prüffrequenz $f = 3$ Hz.

Tabelle 6: Belastungsniveaus bei der Biegeprüfung

	Mittlere Kraft F_M [N]	Kraftamplitude F_A [N]
Durchgang 1	450	± 400
Durchgang 2	350	± 300
Durchgang 3	300	± 250

Nach Durchlaufen einer bestimmten Lastspielzahl zeigten alle Proben auf allen drei Kraftniveaus das gleiche Versagensverhalten: es trat ein Riss an der Schweißnaht auf der Zugseite des Unterrohrs (siehe Abbildung 31) auf.

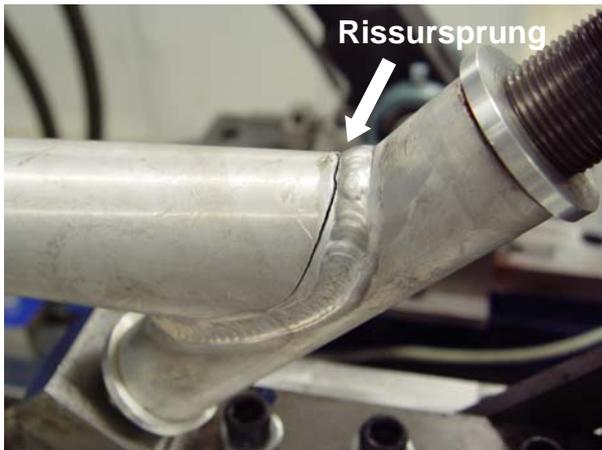


Abbildung 31: Versagensverhalten einer T-Stoß-Biegeprobe

In Abbildung 32 ist eine schematische Zeichnung des Unterrohrs mit entsprechenden Schnittkräften dargestellt. Aus der Geometrie der Probe können somit die Biegespannungen an dem Ort des Rissbeginns berechnet werden.

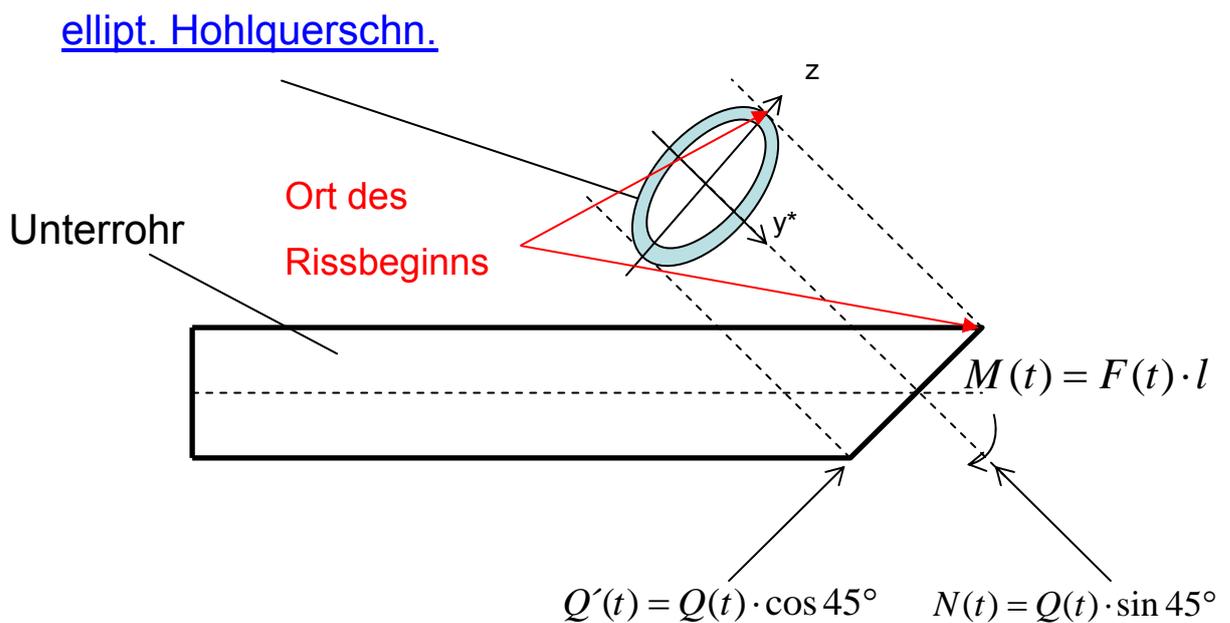


Abbildung 32: Innere Kräfte am Unterrohr infolge der Biegebelastung

Der Maximalwert der Biegespannung σ_b tritt am Rand des Querschnitts auf, d.h. im maximalen Randabstand z_{max} :

$$\sigma_b(z) = \frac{N}{A} + \frac{M}{I_y} \cdot z \quad (1)$$

A: Querschnittsfläche
 I_y : Flächenträgheitsmoment

Der zeitliche Verlauf der Spannung unter Zugrundelegung einer sinusförmigen Schwingung lässt sich folgendermaßen darstellen:

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

σ_m : Mittelspannung
 σ_a : Spannungsamplitude
 $\sigma_{O/U}$: Ober- /Unterspannung
 $\Delta\sigma$: Schwingbreite

Bei einem konventionellen Wöhler-Diagramm, bei dem die Mittelspannung σ_m konstant gehalten wird, wird die Spannungsamplitude σ_a in Abhängigkeit der ertragbaren Schwingspielzahl N in einer halb- oder doppellogarithmischen Form aufgetragen. Bei diesem Biegeversuch wird die Unterspannung σ_U konstant gehalten und die Oberspannung σ_O variiert, was eine veränderliche Mittelspannung σ_m ergibt. Aus diesem Grund wird die Formel (2) wie folgt umgeformt und die Schwingbreite $\Delta\sigma$ in Abhängigkeit der Lastspielzahl N dargestellt (siehe Abbildung 33).

$$\sigma(t) = \sigma_u + \frac{1}{2} \cdot \Delta\sigma \cdot \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_O - \sigma_U \quad (4)$$

Aufgrund der großen Streuung der Versuchsergebnisse werden diese einer statistischen Auswertung unterzogen. Als Verteilungsgesetz für die Lebensdauerstreuungen wird die Gaußsche Normalverteilung gewählt. Der logarithmische Mittelwert $\lg N_{50}$ der logarithmierten Bruchschwingspielzahlen N_i auf einem bestimmten Lasthorizont berechnet sich wie folgt:

$$\lg N_{50} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \lg N_i \quad (5) \quad m: \text{Probenanzahl}$$

Für eine bestimmte Ausfallwahrscheinlichkeit P_A ($P_A = 5\%$, $P_A = 95\%$) unter Verwendung der Sicherheitsspanne u und der Standardabweichung s ergibt sich die zu erwartende Lebensdauer:

$$\lg N_{P_A} = \lg N_{50} + u \cdot s \quad (6)$$

Im Folgenden ist die Wöhlerlinie in halblogarithmischer Darstellung für die Biegebeanspruchung an den T-Stoß-Proben mit Linien für 5 % und 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit dargestellt.

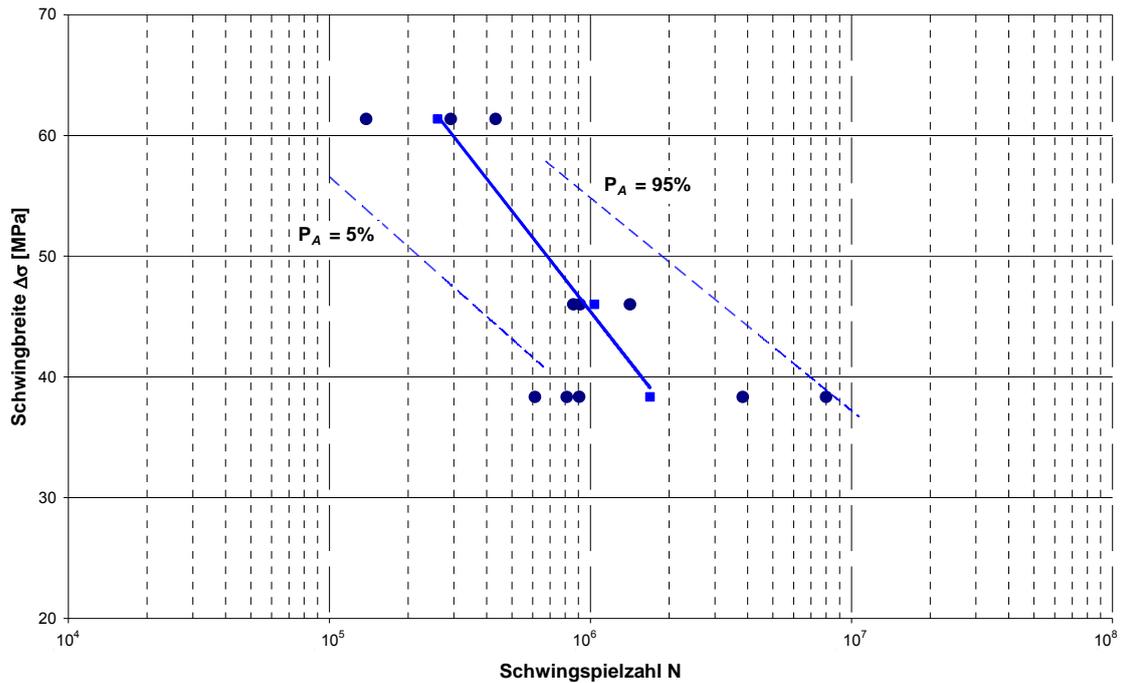


Abbildung 33: Wöhler-Diagramm / Biegung

In dem geprüften Festigkeitsbereich ($38,4 \text{ MPa} \leq \sigma_a \leq 61,4 \text{ MPa}$) liegt die ertragbare Schwingspielzahl N zwischen $3 \cdot 10^6$ Lastwechsel bis $2 \cdot 10^7$ Lastwechsel, wobei sehr große Streuungen der Versuchsergebnisse innerhalb eines Belastungsniveaus beobachtet werden. Dies liegt zum einen an der geringen Probenanzahl. Allgemein wird für eine ausreichend statistisch abgesicherte Belegung der Wöhlerlinie mindestens vier Lastniveaus mit jeweils fünf Prüflingen empfohlen, was aber in Rahmen dieses Projektes nicht möglich gewesen war. Zum anderen sind gerätetechnische Prozessabweichungen beim Schweißen (Oberflächenpräparation, Schutzgas, Erfahrung des Schweißers usw.) denkbar, was zu Inhomogenitäten innerhalb einer Probenmenge führt. Eine Einflussnahme auf diese Bedingungen war im Rahmen des Projektes nicht möglich.

4.2.3 TORSIONSPRÜFUNGEN

Die Torsionsprüfung an den T-Stoß-Proben führt zu ähnlichen Beanspruchungen im Steuerrohrkopf wie sie beim Wiegetritt auftreten. In Abbildung 34 ist die servohydraulische Prüfvorrichtung mit der eingebauten Probe dargestellt.

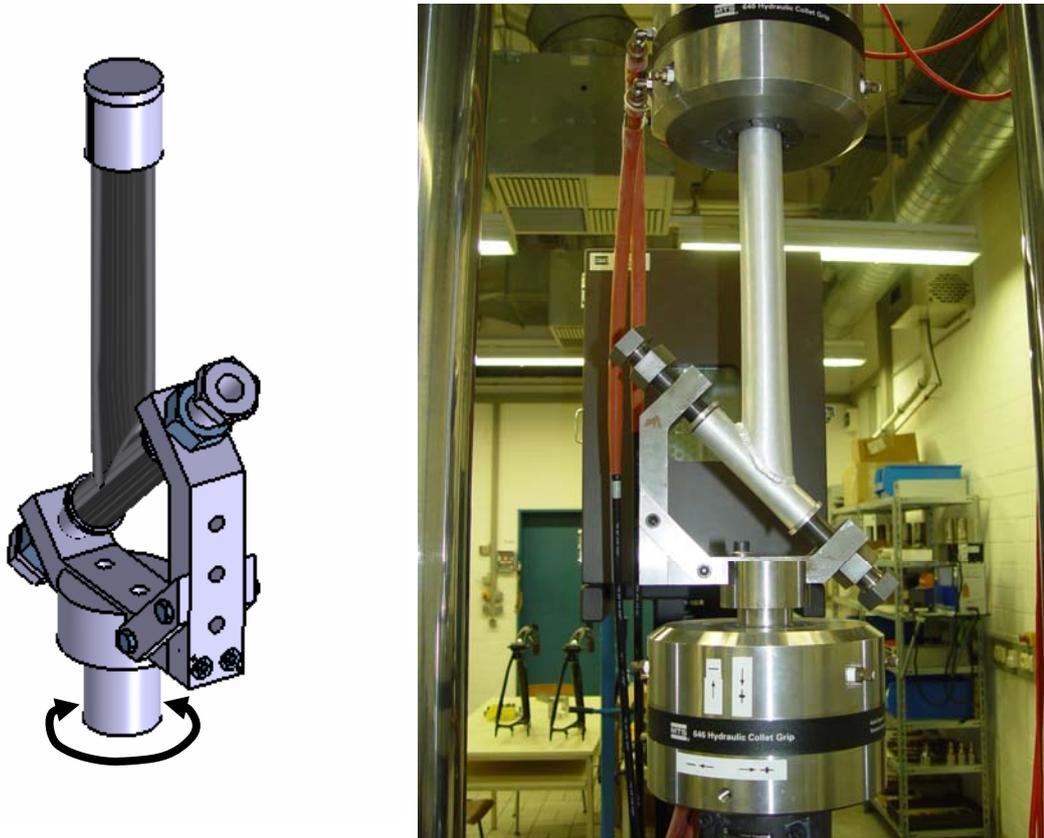


Abbildung 34: Anordnung der Torsionsprüfung an der T-Stoß-Probe

Die drei Lastniveaus für die Torsion wurden aus der Aufspannung beim Prüfstandtest nach DINplus aus der maximal auf die Pedale eingeleiteten Kraft F von 1300 N und dem Hebelarm b vom Lasteinleitungspunkt bis zur Mitte des Unterrohrs abgeschätzt. Das mittlere Drehmoment wurde bei allen Durchgängen auf 0 Nm gehalten und die Amplitude betrug ± 100 Nm, ± 150 Nm, ± 200 Nm, das heißt in diesem Fall handelt es sich um rein wechselnde Belastung.

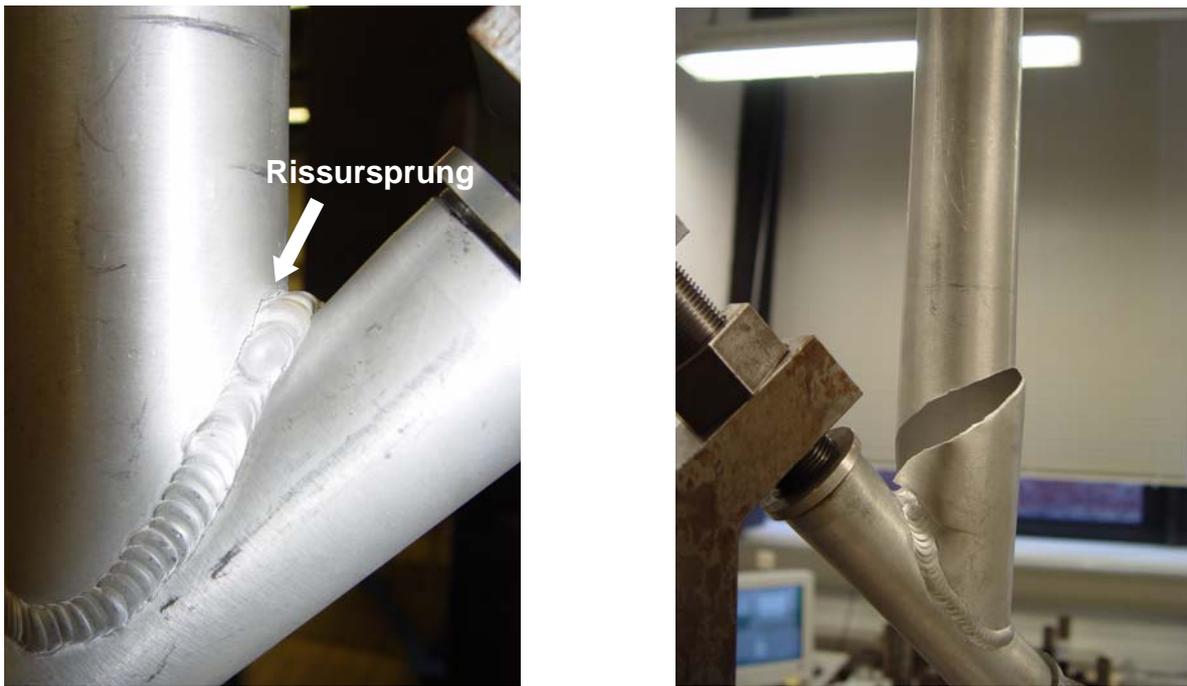


Abbildung 35: Versagensverhalten der T-Stoß-Probe infolge der Torsionsbelastung

Nach der Prüfung zeigten alle Proben das gleiche Bruchverhalten: infolge der Belastung bildete sich ein Riss an der Schweißnaht im Unterrohr.

Aus den geometrischen Gegebenheiten der T-Stoß-Proben werden entsprechende Spannungen an der Schweißnaht abgeschätzt und im Wöhler-Diagramm dargestellt.

ellipt. Hohlquerschn.

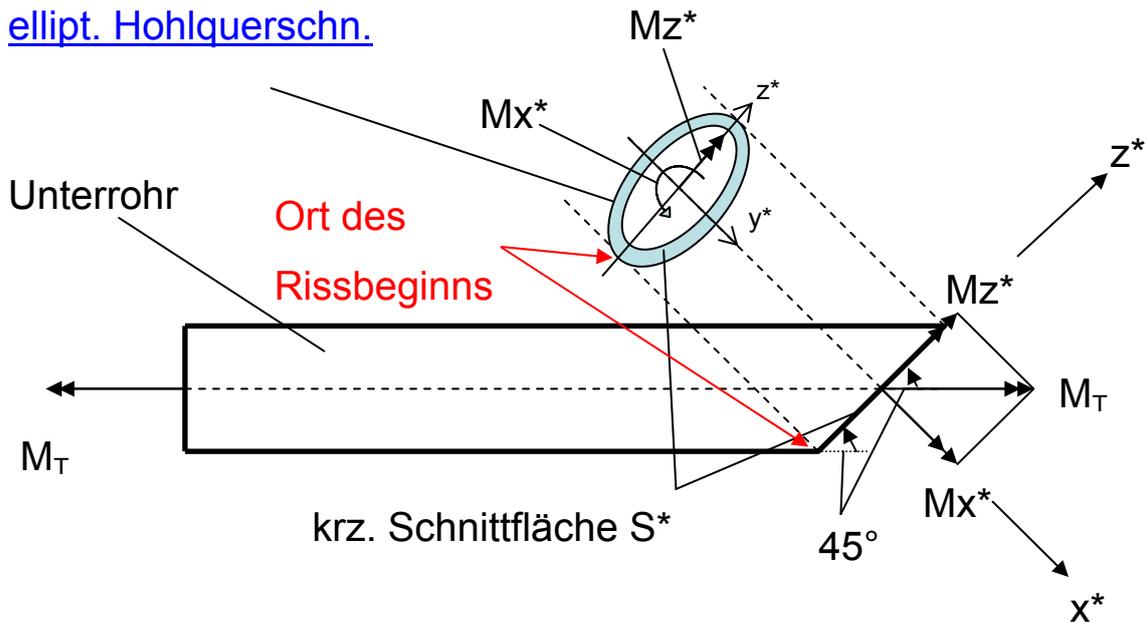


Abbildung 36: Innere Momente am Unterrohr infolge der Torsionsbelastung

Bei der Torsionsbeanspruchung sind an der Oberfläche auftretende Schubspannungen entscheidend für das Versagen des Bauteils (siehe Abb. 31). In diesem speziellen Fall werden diese wie folgt berechnet:

$$Mx^* = M_T \cdot \sin 45^\circ \quad (7)$$

$$\tau_{T^*} = \frac{Mx^*}{2 \cdot Am^* \cdot t^*} = const. \quad (8)$$

Am^* : Fläche des ellipt. Hohlquerschnitts

t^* : Dicke des Querschnitts

Aufgrund der großen Streuung der Versuchsergebnisse werden diese analog der Vorgehensweise beim Biegeversuch einer statistischen Auswertung unterzogen.

Im Folgenden ist die Wöhlerlinie in halblogarithmischer Darstellung für die Torsionsbeanspruchung an den T-Stoß-Proben mit Linien für 5 % und 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit dargestellt.

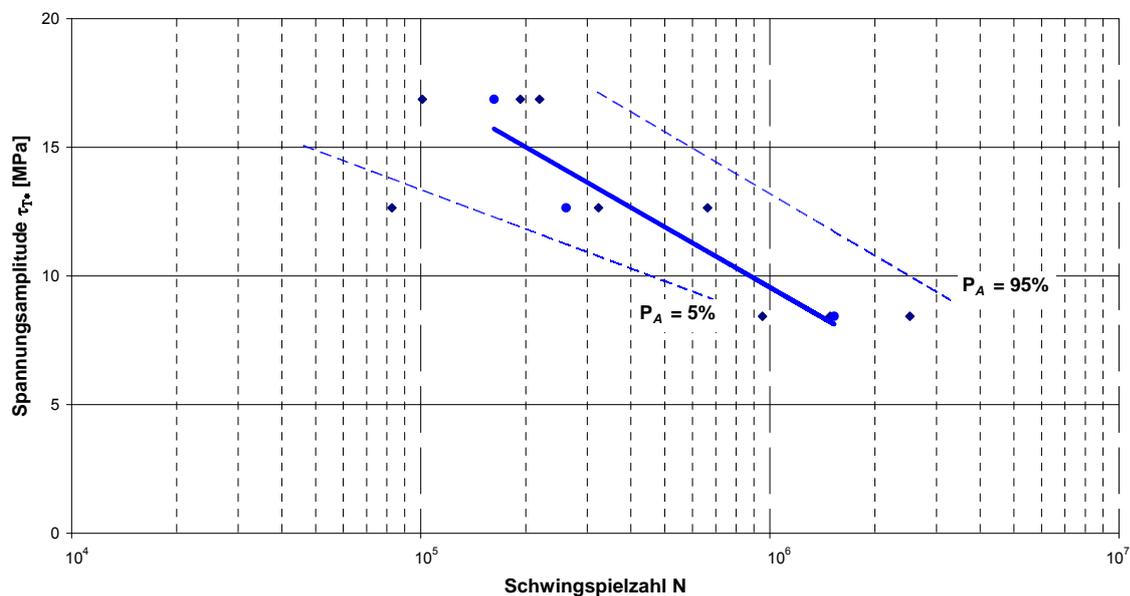


Abbildung 37: Wöhler-Diagramm / Torsion

Bei einer Schubspannungsamplitude τ_T zwischen 8,4 MPa und 16,9 MPa reicht die maximal ertragbare Lastspielzahl N von ca. 10^5 Lastwechsel bis 10^6 Lastwechsel und es wird ebenfalls, wie bei der Biegebelastung, eine große Streuung der Werte innerhalb eines Belastungsniveaus beobachtet.

5 ÜBERTRAGBARKEIT DER VERSUCHSERGEBNISSE

Im Hinblick auf die Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse sollte untersucht werden, in wie weit die Ergebnisse aus der Rahmenprüfung auf geänderte Rahmengeometrien angewendet und ob aus den Ergebnissen aus der Rohrknottenprüfung Aussagen über die Beanspruchbarkeit des Gesamtrahmens getroffen werden können.

Nach Abschluss der nach der DIN EN 14764 durchgeführten Wiegetritt-Prüfung (vereinfachtes Verfahren) erwiesen die verwendeten Rahmen keine Beschädigungen auf. Im Laufe der weiterführenden Entwicklungen wurde der Prüfstands Aufbau um weitere Elemente (Bremsvorrichtung, Lenker- und Sattellasten), welche den Realbetrieb eines Fahrrads abbilden, erweitert. Nach mehreren Durchläufen der Prüfprozedur überstanden die Rahmen diese ohne jegliche Beschädigungen. Des Weiteren wurde an den Rahmen eine kombinierte Prüfung (Schwebungsprüfung) realisiert, bei welcher im Extremfall das Doppelte der aufgebrachten Kraft auf die Pedale wirkte (erhöhte Torsionsbelastung). Infolgedessen sind Risse an den Bohrungen der Gewindenieten für die Kabelführung auf der Zugseite des Unterrohrs aufgetreten (siehe Abbildung 28). Diese Art der Beschädigung unterscheidet sich von den in der Öffentlichkeit bekannten Fällen (Abbildung 38).



Abbildung 38: Bruch des Al-Hauptrohres eines Einrohrrahmens in der WEZ der Steuerkopfschweißnaht

Bei dem gezeigten Beispiel handelt es sich um ein handelsübliches Markenfahrrad, das zu keiner Zeit extremen Belastungen ausgesetzt war. Der Rahmen brach während einer Bergauffahrt ohne vorherige Anzeichen von Beschädigungen.

Ein anderes Beispiel findet sich bei den Fahrrädern in Diamantbauweise. Es findet ein Bruch des Rahmens an den geschweißten Knotenpunkten infolge schwingender Belastung durch Risse in der Schweißnaht bzw. in dem Schweißnahttrand in der Wärmeeinflusszone statt (Abbildung 39) [Bik99, War99, TOU97, TOU99].

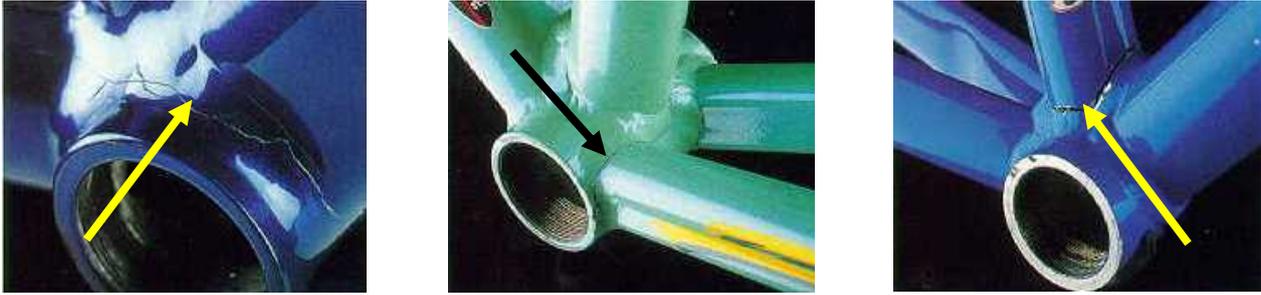


Abbildung 39: Brüche im Tretlagerbereich an geschweißten Aluminiumrahmen in Diamantbauweise

Im Endeffekt lässt sich aufgrund der Schadensart keine Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen den durchgeführten Prüfungen und dem Realfall feststellen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die im Institut geprüften Rahmen ein Verstärkungsblech (Gusset) aufwiesen, welches zur Erhöhung der Bruchfestigkeit zusätzlich am Steuerrohrkopf angeschweißt wurde. Im Rahmen dieses Projektes war es nicht möglich, die Modelle der Fahrräder mit bekannten Schadensfällen zu erwerben.

Beim Vergleich der Untersuchungsergebnisse am Rohrknoten und am Fahrradrahmen (erweiterter Prüfaufbau) wurde festgestellt, dass bei den T-Stoß-Proben Risse in der Schweißnaht auftreten. Diese Tatsache lässt zwei Interpretationen zu: einerseits unterliegen die Rohrknoten einer schärferen Prüfung als dies ausgehend von Belastungen am Steuerkopf im Rahmen angenommen wurde; andererseits erzielt das Verstärkungsblech am Steuerkopf im Rahmen den gewünschten Effekt und die Schwachstellen am Rahmen stellen die Kabelführungshalter dar. Auf jeden Fall sollte eine Detailanalyse der geschweißten Rohrknoten stattfinden.

Der rechnerische Nachweis (Lebensdauerabschätzung) mit den Methoden der Schadensakkumulation und der Bruchmechanik unter Anwendung der Nenn- und/oder Strukturspannungskonzepte (kurze Darstellung s. Anhang **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) würde, wie bereits im Forschungsantrag erläutert, den Rahmen des Vorhabens sprengen und ist bei dem zur Zeit herrschenden Kenntnisstand nicht möglich.

Bei der Prüfung der geschweißten Al-Fahrradrahmen mit geänderter Geometrie (Modelle „Bocas“, „Kettler“ und „Rabeneick“) auf dem erweiterten Prüfstand sind trotz Erwarten keine Beschädigungen am Unterrohr, sondern an den Kettenstreben aufgetreten, d.h. es gibt keine allgemeingültigen Aussagen über das Versagensverhalten der Rahmen mit komplexen Geometrien. Demzufolge ist keine

Aussage über die Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Rahmentyp der Firma „Maxcycles“ auf die anderen Einrohrrahmen möglich.

Als Zielrichtung für künftige Forschungsarbeiten wird an dieser Stelle, mithilfe der in diesem Projekt erzielten Ergebnisse, folgende Vorgehensweise vorgeschlagen (Abbildung 40).

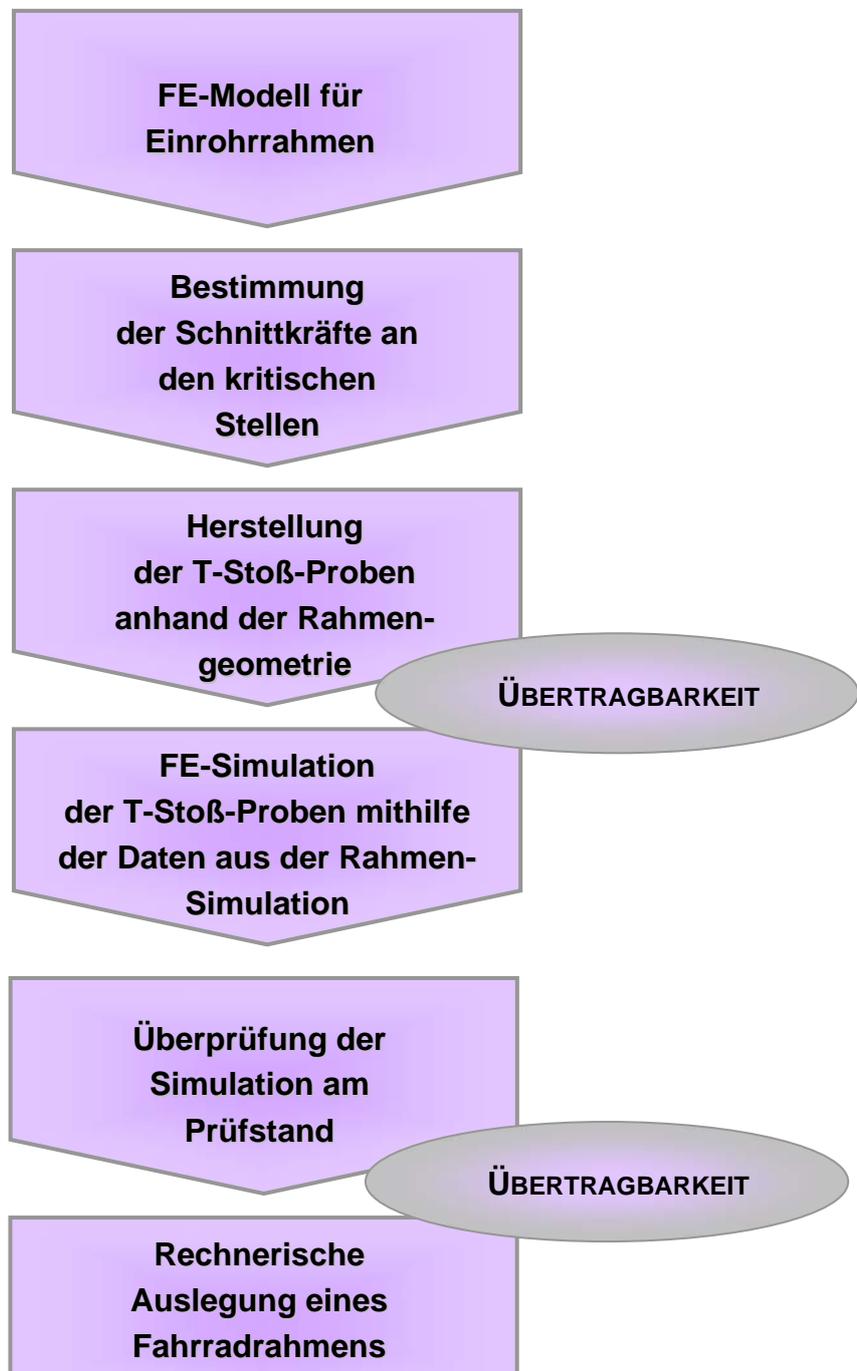


Abbildung 40: Vorgehensweise bei der Untersuchung der Fahrradrahmen und der Rohrknoten unter Einhaltung der Übertragbarkeit

Der Vorteil bei diesem Vorgehen, trotz des höheren Arbeitsaufwandes, liegt in der vollständigen Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Rahmen auf den Steuerkopfrrohrknoten. Infolgedessen erlaubt die vereinfachte Simulation am Rohrknoten (im Gegensatz zum Gesamtrahmen) eine flexible Berechnung der Belastungen am Steuerkopfknoten im Fahrrad. Mit Hilfe des bekannten Belastungskollektivs und der Materialparameter ist eine Bauteildimensionierung direkt mit der Software möglich, wobei die Ergebnisse jederzeit mit dem einfachen Prüfungsaufbau für Rohrknoten überprüfbar sind. Mit diesem Werkzeug sind Materialeinsparungen und somit auch die Gewichtsreduktion bereits in der Konstruktionsphase eines Fahrradrahmens möglich. Die vorgestellte Vorgehensweise (Abbildung 40) könnte auf weitere Rahmentypen erweitert und somit die Übertragbarkeit sowie die Verallgemeinerung überprüft werden.

6 LITERATUR

- [Bik99] **Bike, Das Mountainbike Magazin**
Achtung! So leicht brechen Lenker, 5/99
- [Bri90] **N.N.**
British Standard BS 5400: Steel, Concrete and Composite Bridges. Part 10, Code of Practice for Fatigue, BSI, 1990
- [DIN98] **DINplus**
Richtlinien für die Zertifizierung, Gesellschaft für die Konformitätsbewertung, 1998
- [DIN05] **DIN EN 14764**
City- und Trekking-Fahrräder – Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren; S. 83-84, 2005
- [Eur92] **N.N.:**
Eurocode Nr. 3: Design of Steel Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings. ENV 1993-1-1: 1992, Brussels
- [Eur98] **N.N.:**
Eurocode Nr. 9: Design of Aluminium Structures, Part 2: Structures to Fatigue. ENV 1992-2: 1998 E, Brussels
- [Gro97] **Groß, E.:**
Betriebslastenermittlung, Dimensionierung, strukturmechanische und fahrwerkstechnische Untersuchungen von Mountainbikes, VDI-Fortschrittsbericht Nr. 308, Reihe 12, 1997
- [Ost07] **Ostremann, F.:**
Anwendungstechnologie Aluminium, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [Rad98] **Radaj, D., Sonsino, C.M., Flade, D.:**
Prediction of Service Fatigue Strength of Welded Tubular Joint on the Basis of the Notch Strain Approach; International Journal of Fatigue, Vol. 20, No. 6, S. 471-480, 1998

- [Rad07] **Radaj, D., Vormwald, M.:**
Ermüdungsfestigkeit, Grundlagen für Ingenieure, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [Son05] **Sonsino, C.M., Kaßner, M.:**
Übersicht über die Konzepte zur schwingfesten Bemessung von Schweißverbindungen, DVS-Berichte Bd. 236, Düsseldorf, 2005
- [Spa96] **Spahl, E.:**
Lastkollektivbezogene Prüftechnik von Sicherheitsbauteilen an Fahrzeugen, Diss. RWTH Aachen, D 82, 1996
- [StB07] **Pressemitteilung des Statistischen Bundesamtes**
Statistisches Bundesamt meldet aktuelle Zahlen zum Fahrradbestand, Zweigstelle Bonn, Auskunftsdienst Wirtschaftsrechnungen und Zeitbudgets, 2007
- [War96] **Stiftung Warentest**
Weniger Bruch bei teureren Bikes, test 5/96
- [TOU97] **TOUR**
Leichtrahmen im Bruchtest, 19/97
- [TOU99] **TOUR**
Wie sicher sind Voll-Carbongabeln, 5/99

7 ANHANG

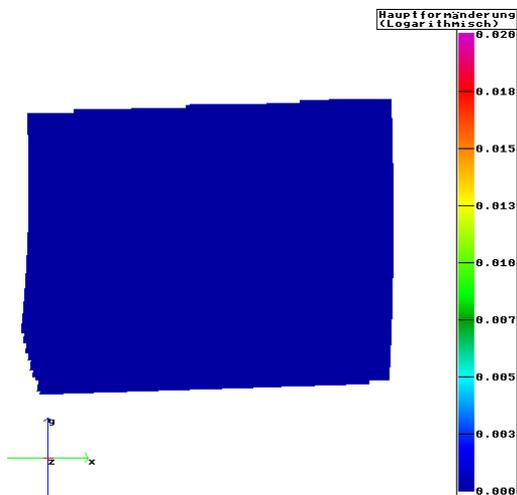
Im Folgenden sind ausgewählte relevante Messergebnisse aus dem Versuchfeld dargestellt.

7.1 MESSERGEBNISSE DES GRAUWERT-KORRELATIONSVERFAHRENS (GOM)

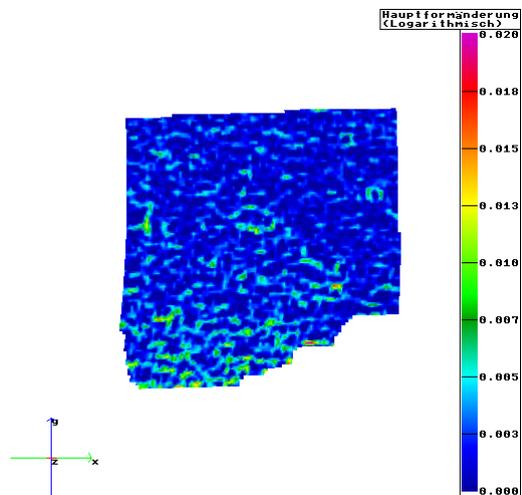
Verformungsbilder an Position 1

Hauptformänderung log

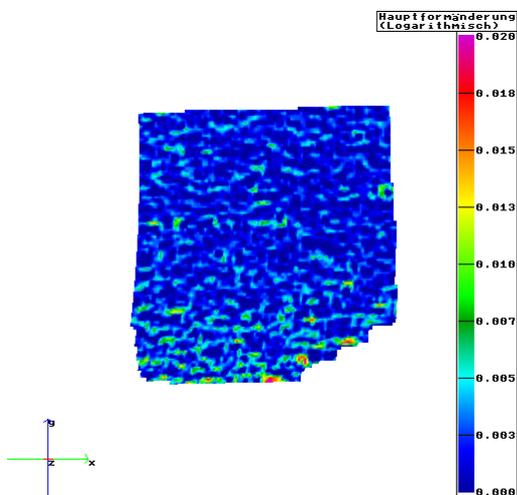
beide Seiten unbelastet



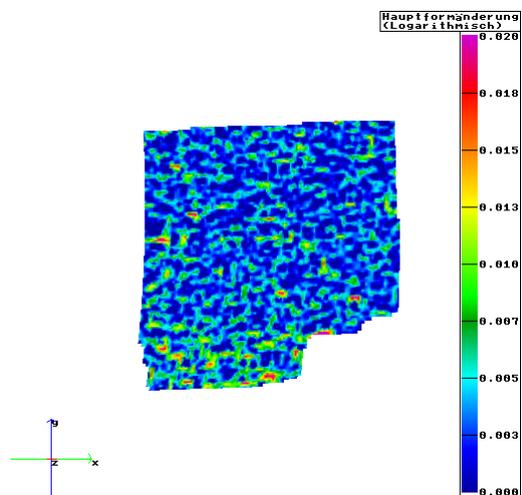
beide Seiten belastet mit 650 N



*rechte Seite belastet mit 1300 N
linke Seite unbelastet*



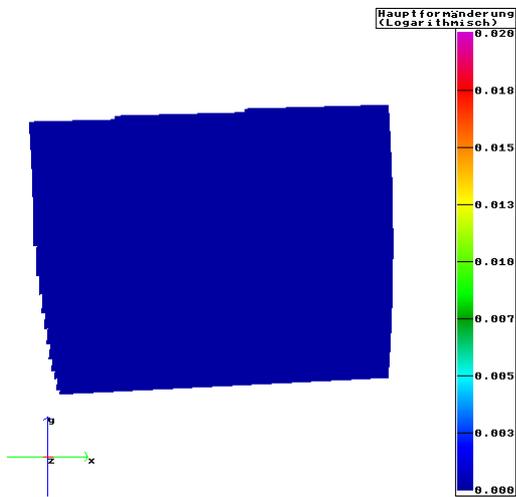
*linke Seite belastet mit 1300 N
rechte Seite unbelastet*



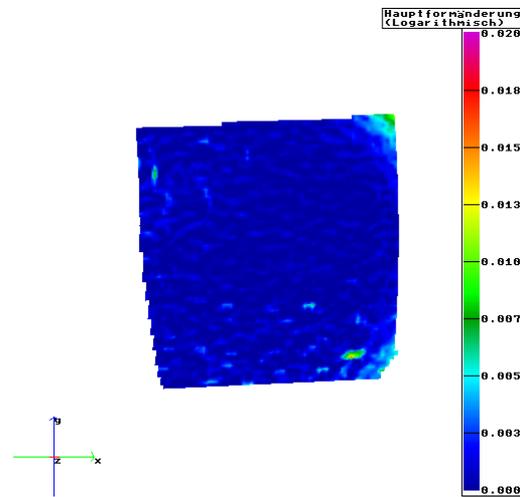
Verformungsbilder an Position 2

Hauptformänderungen log

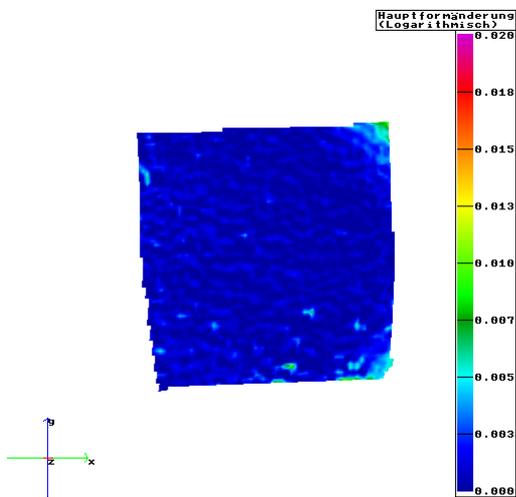
beide Seiten unbelastet



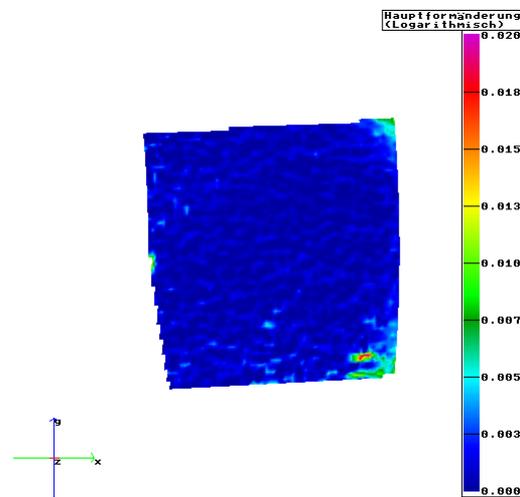
beide Seiten belastet mit 650 N



*rechte Seite belastet mit 1300 N
linke Seite unbelastet*



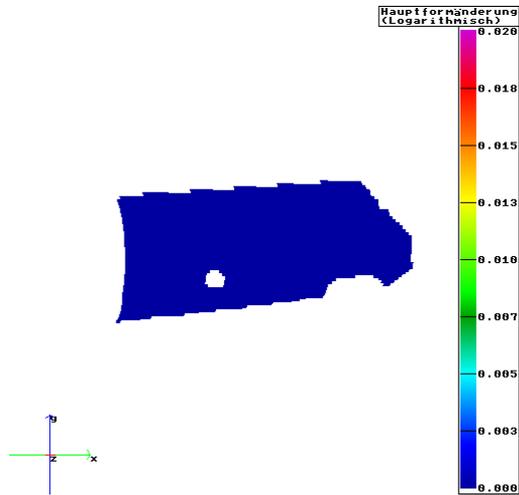
*linke Seite belastet mit 1300 N
rechte Seite unbelastet*



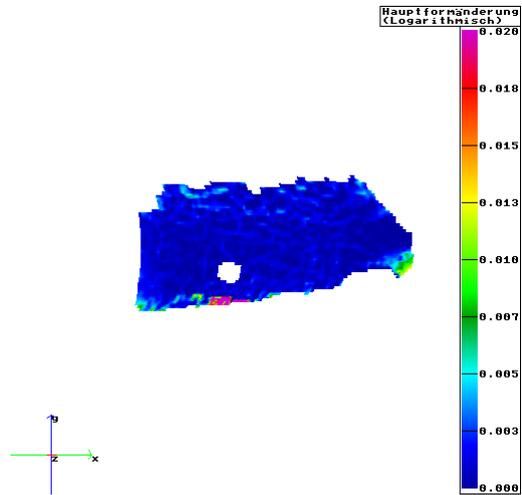
Verformungsbilder an Position 3

Hauptformänderungen log

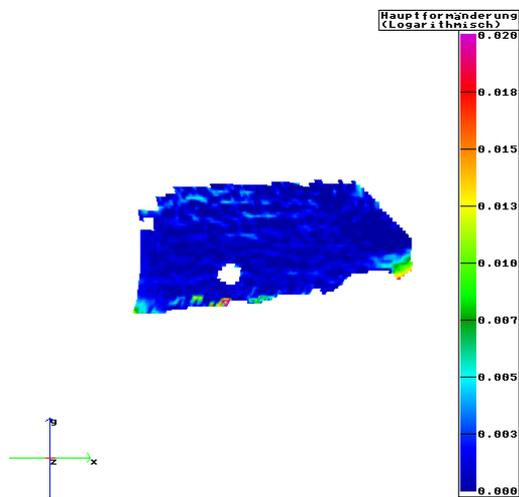
beide Seiten unbelastet



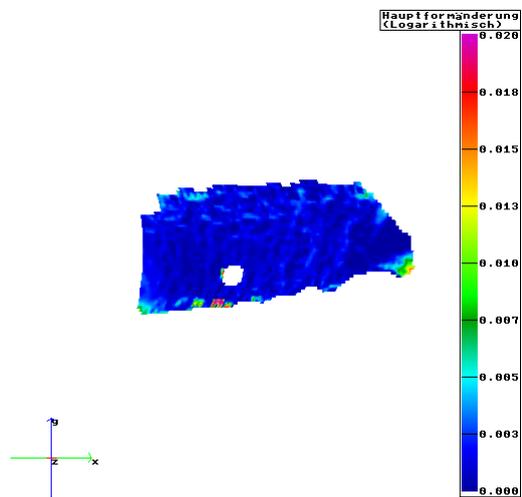
beide Seiten belastet mit 650 N



*rechte Seite belastet mit 1300 N
linke Seite unbelastet*



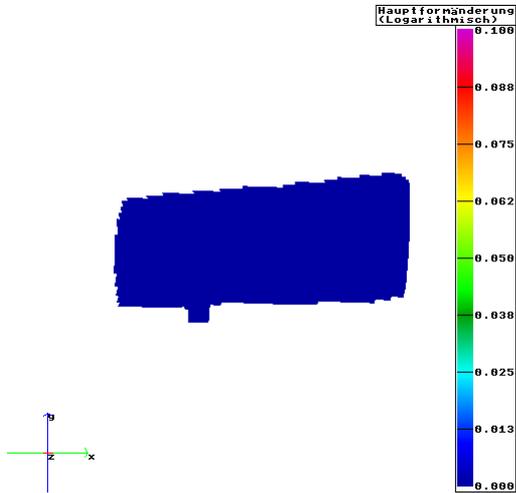
*linke Seite belastet mit 1300 N
rechte Seite unbelastet*



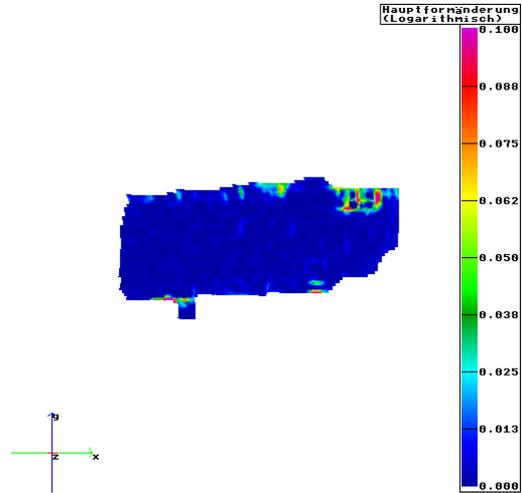
Verformungsbilder an Position 4

Hauptformänderungen log

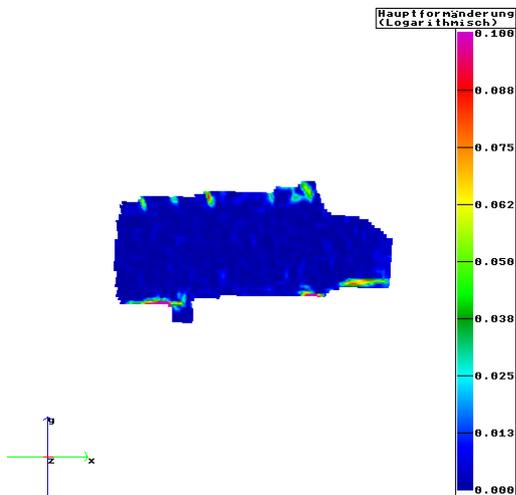
beide Seiten unbelastet



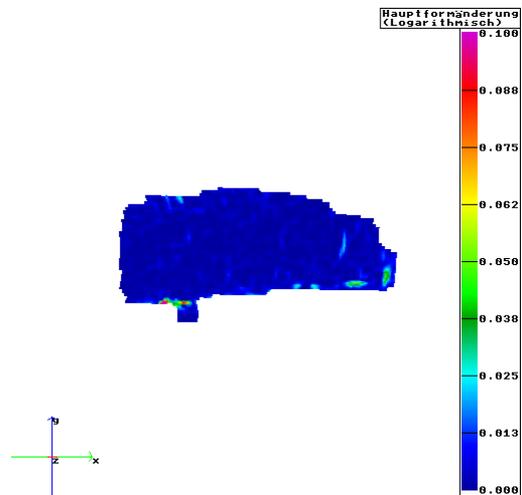
beide Seiten belastet mit 650 N



*rechte Seite belastet mit 1300 N
linke Seite unbelastet*



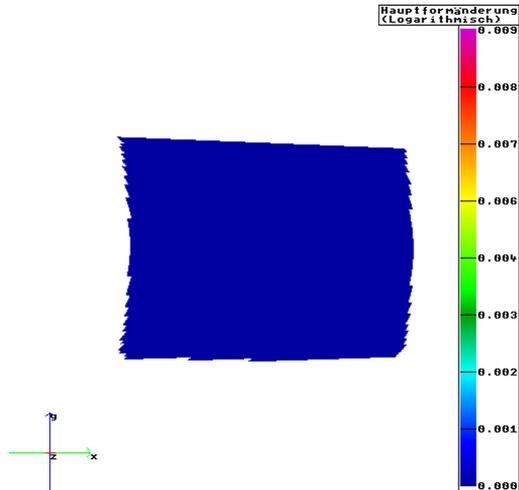
*linke Seite belastet mit 1300 N
rechte Seite unbelastet*



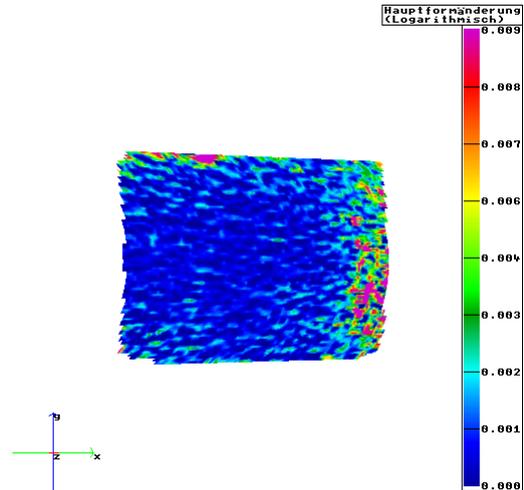
Verformungsbilder an Position 5

Hauptformänderungen log

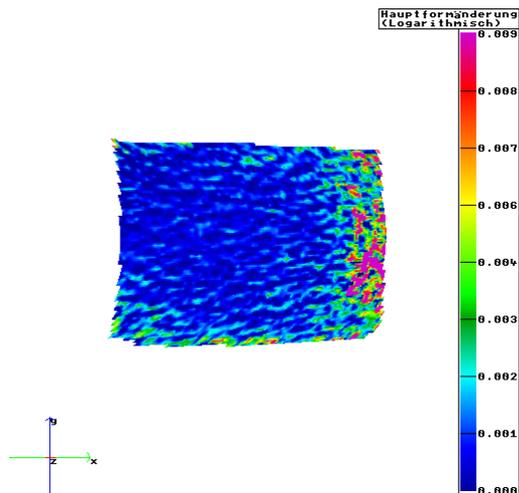
beide Seiten unbelastet



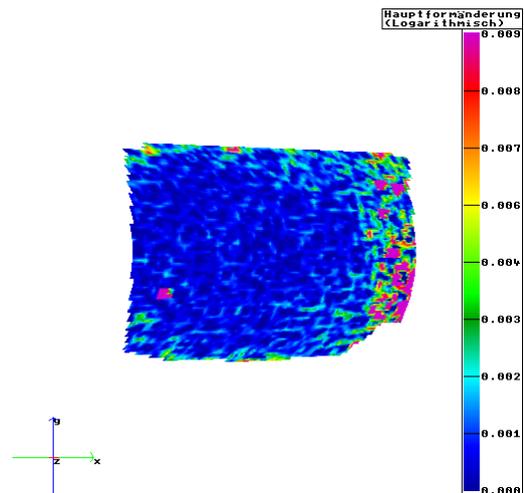
beide Seiten belastet mit 650 N



*rechte Seite belastet mit 1300 N
linke Seite unbelastet*

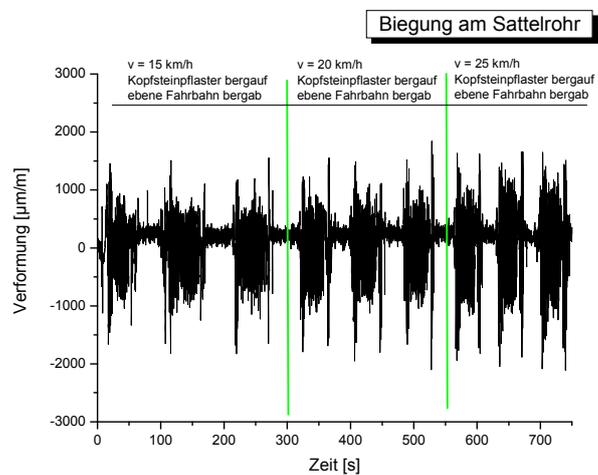
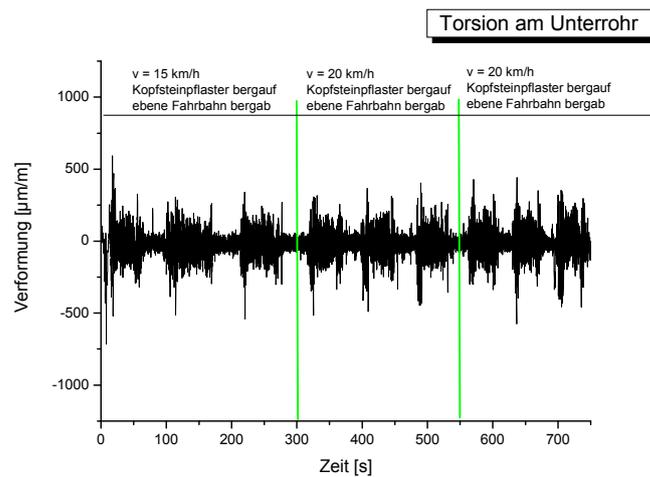
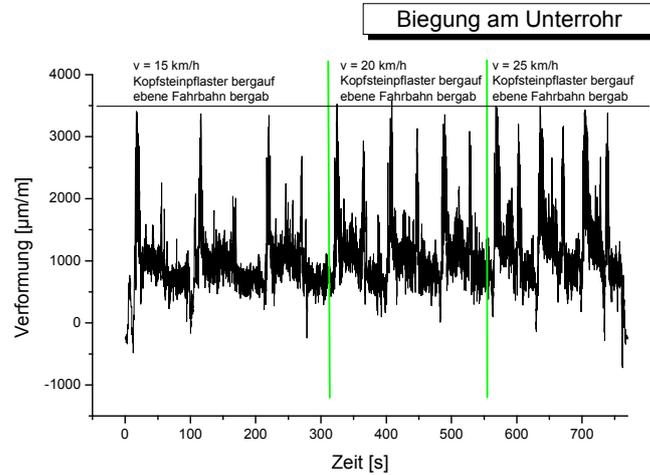


*linke Seite belastet mit 1300 N
rechte Seite unbelastet*

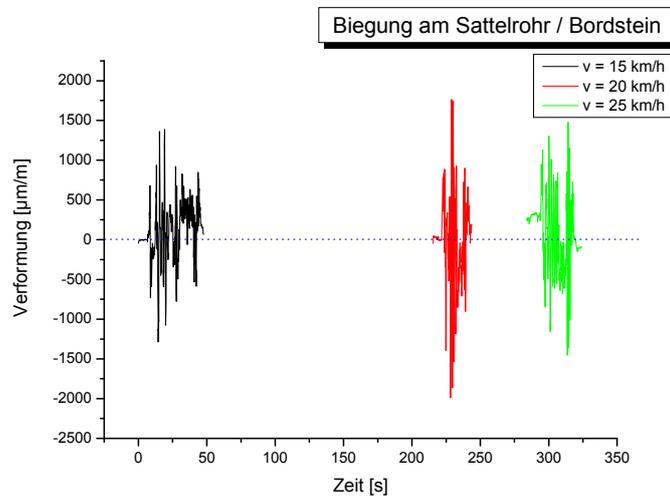
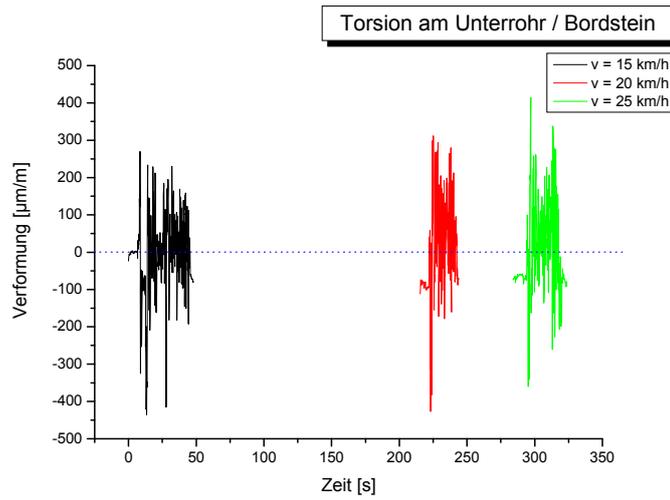
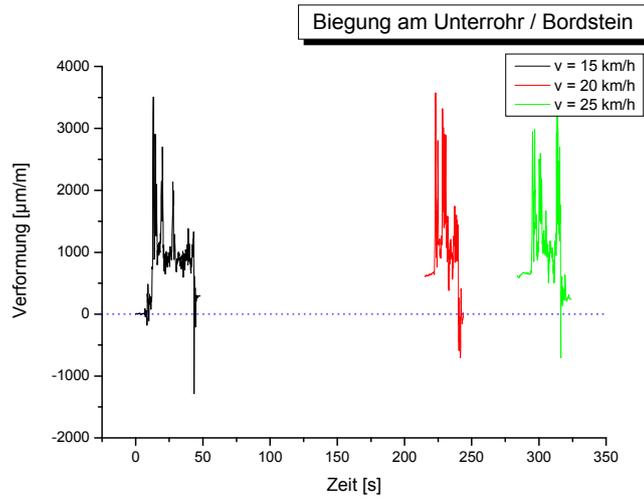


7.2 VERFORMUNGSDIAGRAMME AUS DEM REALVERSUCH

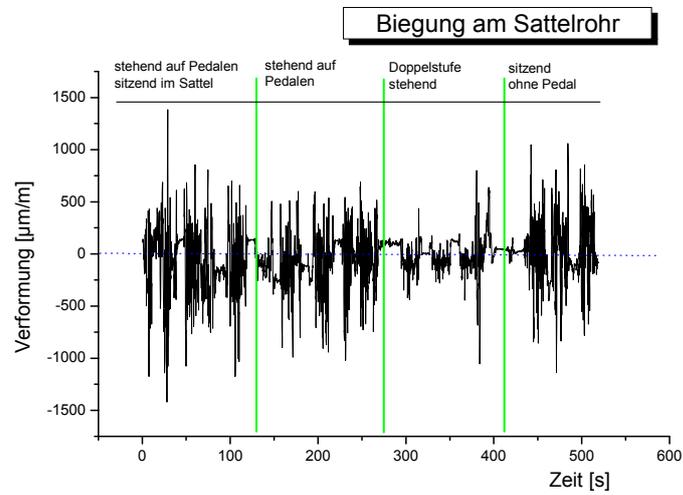
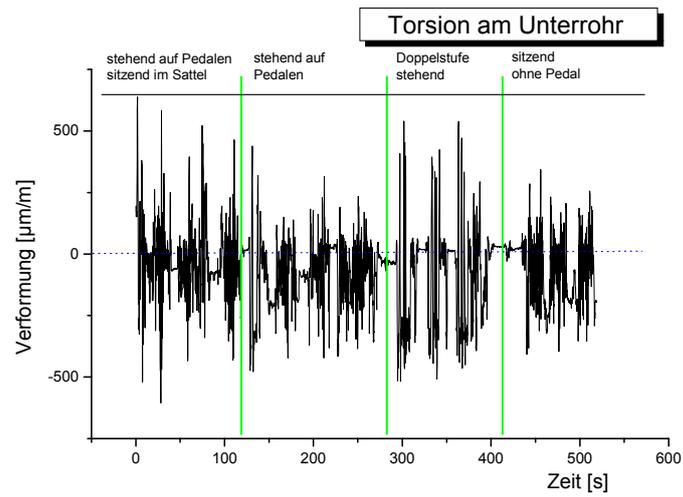
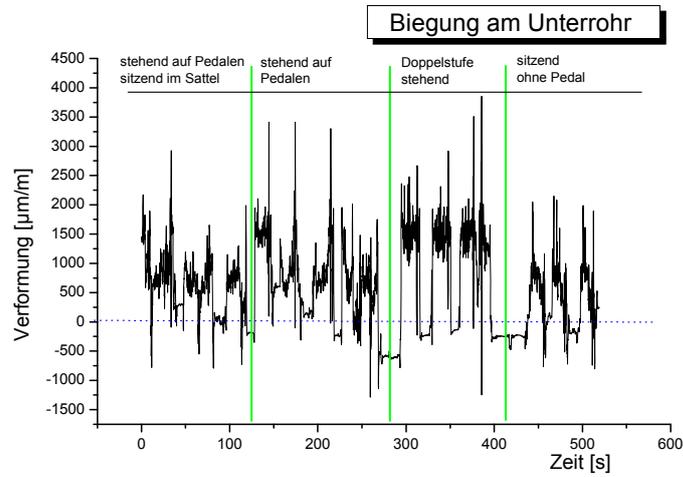
7.2.1 EBENE FAHRBAHN / KOPFSTEINPFLASTER



7.2.2 BORDSTEINKANTE



7.2.3 STUFE



7.2.4 VOLLBREMSUNG

