

# Aufbau einer numerischen Prüfstandumgebung für Fahrräder mittels Mehrkörpersimulation

## Establishment of a numerical test rig environment for bicycles by means of multi-body simulation

Johannes Bolk\*, M. Sc., Bolk@igmr.rwth-aachen.de

Matthias Kiesewetter\*, B. Sc. Kiesewetter@igmr.rwth-aachen.de

Burkhard Corves\*, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c., Corves@igmr.rwth-aachen.de

\*RWTH Aachen University, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, 52062, Aachen, Deutschland

### Kurzfassung

Die Mehrkörpersimulation ist ein vielversprechendes Werkzeug zur Entwicklung und Auslegung von Fahrradstrukturen und Komponenten. Es können sowohl komplexe Fahrscenarien als auch klar definierte Tests simuliert werden, wodurch die Kosten und der Aufwand für Prototypen und Hardwaretests reduziert werden können. In diesem Paper wird die Eignung der Mehrkörpersimulation für die Berechnung aktueller Rahmenprüfstände untersucht. Hierfür werden verschiedene Prüfstände in einer Mehrkörpersimulationsumgebung implementiert und simuliert. Es werden unterschiedliche Modellierungsansätze vorgestellt, welche die klassische Starrkörpermodellierung um elastische Bauteileigenschaften erweitern. Darauf aufbauend werden die Auswirkungen der verschiedenen Modellierungsmethoden auf die Verläufe, Orientierungen und Beträge der wirkenden Belastungen analysiert.

### Abstract

Multi-body simulation is a promising tool for the development and design of bicycle structures and components. Both complex riding scenarios and clearly defined tests can be simulated, reducing the cost and effort of prototyping and hardware testing. In this paper, the suitability of multi-body simulation for the calculation of current frame test rigs is investigated. For this purpose, different test benches are implemented and simulated. Furthermore, different modelling approaches are presented, which extend the classical rigid body modelling by elastic component properties. Based on this, the effects of the different modelling methods on the trajectories, orientations and amounts of the acting loads are analysed.

## 1 Einleitung

Mit weltweit steigenden Verkaufszahlen von Fahrrädern erlebt der Transportsektor derzeit eine globale Revolution. Allein im Jahr 2020 wurden in Deutschland knapp über 5 Millionen Fahrräder verkauft [1]. Nicht nur die Anzahl der verkauften Fahrräder steigt stetig, sondern auch der durchschnittliche Verkaufspreis eines Fahrrads. Dem Zweirad-Industrie-Verband zufolge ist dieser zwischen den Jahren 2016 und 2021 um 215% gestiegen [1]. Dieser Trend adressiert die Notwendigkeit, die Umweltverschmutzung zu reduzieren, oder die Schwierigkeit, sich in großen Metropolen bequem und schnell fortzubewegen. Darüber hinaus steigt auch das Interesse an der Nutzung des Fahrrads als Freizeitgerät. Aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten sowie der gestiegenen Nachfrage und Ansprüche steigt die Komplexität der Fahrräder und damit die Anforderungen an den zugrundeliegenden Konstruktions- und Entwicklungsprozess. Für die Fahrradhersteller gilt es, den Zielkonflikt zwischen einer zeit- und kosteneffizienten Konstruktion und einem preiswerten, aber sicheren Produkt zu lösen. Gleichzeitig spielt das Gewicht des Fahrrades eine immer größere Rolle, so dass neue Leichtbaukonstruktionen entwickelt werden müssen.

In der Fahrradindustrie haben Prüfstandsversuche an Prototypen derzeit einen hohen Stellenwert [2]. Normen wie die internationale DIN ISO 4210 schreiben die Erprobung von Fahrradkomponenten in Form von Prüfstandsversuchen vor [3, 4]. Diese Prüfungen an realen Bauteilen erlauben Rückschlüsse auf die Steifigkeit und Festigkeit dieser Bauteile. Dies wird mit der Detektion elastischer bzw. plastischer Verformungen oder sichtbarer Risse und Brüche erreicht. Die in Prüfständen nachgebildeten Lastfälle basieren in der Regel auf Belastungsmessungen einzelner Strukturpunkte in Messfahrten. Die unter realen Einsatzbedingungen wirkenden Beanspruchungen werden mit Hilfe eines detailliert beschriebenen Prüfstandsbaus und der entsprechenden Durchführung nachgebildet. Dazu werden statische Belastungstest, Fallversuche oder dynamische Tests mit Aktuatoren an Lasteinleitungspunkten eingesetzt. Diese Normen werden ständig weiterentwickelt und an neue Fahrradtypen angepasst. Diese Art der Prüfung bietet die Möglichkeit, die gegenseitige Beeinflussung mehrerer Komponenten abzubilden und somit auch das aus einer Vielzahl von Teilsystemen bestehende Gesamtsystem zu prüfen.

Ein prüfstandzentrierter Auslegungsprozess zeigt jedoch sowohl bei Neukonstruktionen als auch in der Varianten-



entwicklung gravierende Defizite im Vergleich zu einer simulationszentrierten Entwicklung. Prototypentests sind mit hohem Zeit- und Kostenaufwand verbunden, ermöglichen jedoch nur oberflächliche Einblicke in das Strukturverhalten. Zwar kann das prinzipielle Standhalten der Struktur gegen die wirkenden Belastungen nachgewiesen werden, detaillierte Kenntnisse über die Beanspruchung als Spannungszustand im Bauteil können jedoch nicht erhoben werden. In der Automobil- und Schienenfahrzeugindustrie schon lange Stand der Technik, ermöglicht der Einsatz von Mehrkörpersimulationen (MKS) reale Prüfstandsversuche für Fahrzeuge simulativ abzubilden [5, 6]. Mit dieser Methode kann das Beanspruchungsverhalten verschiedener Konstruktionen schnell und einfach bewertet werden. Im Vergleich zu einer prototypenzentrierten Auslegung lassen sich auf diese Weise signifikant Zeit und Kosten einsparen. In der Auslegung von Fahrrädern bleibt das Potential von MKS jedoch bisher weitestgehend ungenutzt [5].

Ziel dieses Papers ist es, die Eignung von Simulationsmethoden im Allgemeinen und MKS im Speziellen für den Einsatz in der Fahrradindustrie am Beispiel der geltenden Prüfnormen zu bewerten. Die MKS bietet langfristig ein hohes Potential für die Fahrradentwicklung in Form von virtuellen Entwicklungsumgebungen. Nach dem Vorbild der Automobil- und Schienenfahrzeugindustrie können komplexe Streckengeometrien mit passiven oder aktiven Fahrermodellen sowie gefederten oder ungefederten Rahmenkinematiken befahren und für die Auslegung oder Komponentenentwicklung genutzt werden. Um die Eignung von MKS für die Fahrradentwicklung zu untersuchen, werden verschiedene Rahmenprüfstände in einer MKS-Software modelliert und simuliert. Im Zuge dessen werden notwendige Simulationsbedingungen und angewandte Methoden dokumentiert und diskutiert. Wie im folgenden Verlauf des Papers gezeigt wird, stellen Prüfstandsversuche für die MKS eine besondere Herausforderung dar. Aufgrund des Fehlens oder Arretierens von Kraftelementen kann die klassische Starrkörpermodellierung zu extrem hohen Beschleunigungen und somit zu überproportional hohen Kräften führen (vgl. Kapitel 3.1). Besonderer Fokus liegt in diesem Kontext auf der Beantwortung der Frage, ob eine elastische Modellierung des Rahmens die Simulationsgüte der MKS signifikant beeinflusst.

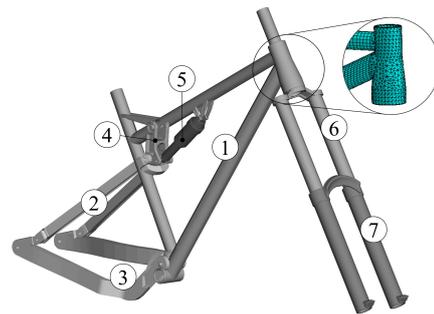
## 2 Systemmodellierung

Im Folgenden werden die genutzten Modellierungsmethoden und eingesetzten Modelle vorgestellt. Neben den getroffenen Modellierungsentscheidungen wird insbesondere auf die Unterscheidung zwischen Starrkörper- und elastischer Modellierung eingegangen. In einem simulativen Auslegungsprozess ist das Zusammenspiel mehrerer Simulationsmethoden erforderlich. Eine einfache und weit verbreitete Methode zur Ermittlung komplexer und in der Regel statischer Beanspruchungszustände in Bauteilen ist die Finite Elemente Analyse (FEA). Eingangsgrößen dieser Methode sind die wirkenden Bauteilbelastungen. Für die Simulation hochdynamischer Lastwechsel mit mehreren Körpern und Kraftelementen sowie vielen Freiheitsgra-

den ist die FEA jedoch nur bedingt geeignet. Die MKS wird an dieser Stelle eingesetzt, um ausgehend von den Belastungen des Gesamtsystems die für die Auslegung benötigten Belastungen der Einzelkomponenten auch bei dynamischen Lastszenarien zu ermitteln. Je nach Art des Simulationsszenarios werden die so berechneten zeitabhängigen Belastungen mit Methoden der Festigkeitsauslegung für die Überführung in eine FEM weiterverarbeitet. [7]

### 2.1 Fahrradmodell

Das in dieser Veröffentlichung verwendete Fahrradmodell ist in **Abbildung 1** dargestellt. Das Fahrradmodell besitzt einen gefederten Rahmen und eine Federgabel und besteht aus acht Körpern. Die Rahmenstruktur besteht aus dem Hauptrahmen (1), der Sitzstrebe (2) und der Kettenstrebe (3). Zur Umsetzung der Rahmenfederung ist der Umlenker (4) eingebaut, der die Sitzstrebe mit dem Kraftelement (5) verbindet. Der Vorbau besteht aus zwei individuellen Gabelkomponenten (6) und (7). Ausgehend von dieser Struktur werden abhängig vom Prüfstandaufbau weitere Anbauteile modelliert. Die Baueileigenschaften des Fahrrades definiert durch Anbindungspunkte, Schwerpunkte, Massen und Massenträgheitstensoren entsprechen den Angaben aus [8]. Die Kraftelemente sind für die Prüfstandtests zwar blockiert, können jedoch für weitere Versuche geöffnet werden.



**Abbildung 1** Verwendetes Rahmenmodell eines vollgederten Fahrradrahmens ohne Anbauteile. Die Detailansicht zeigt die für die eMKS verwendeten Vernetzung eines Bauteilausschnitts.

In der Regel wird eine MKS aus Bindungs- und Kraftelementen sowie Starrkörpern aufgebaut. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die Berücksichtigung des elastischen Bauteilverhalten kritischer Bauteile hohes Potential zur Verbesserung der Ergebnisqualität besitzt [9]. Zur Modellierung der elastischen Bauteileigenschaften des Fahrradrahmens wird in dieser Arbeit die Craig-Bampton-Reduktion verwendet [10]. Bei diesem physikalischen Reduktionsverfahren wird das elastische Verhalten des Bauteils anhand seiner Eigenmoden bis zu einer Grenzfrequenz  $f_{\max, \text{CBR}}$  abgebildet. Die maximale Eigenfrequenz der berücksichtigten Eigenmoden des Hauptrahmens beträgt  $f_{\max, \text{CBR}} = 20 \text{ kHz}$ . Zur Vorbereitung wird der Rahmen in einer FEA-Software vernetzt, vgl. Abbildung 1. Neben der Möglichkeit, das elastische Bauteilverhalten in der MKS abzubilden, erhöht sich jedoch der Implementierungsaufwand und die Simulationszeit. Zusätzlich zu den

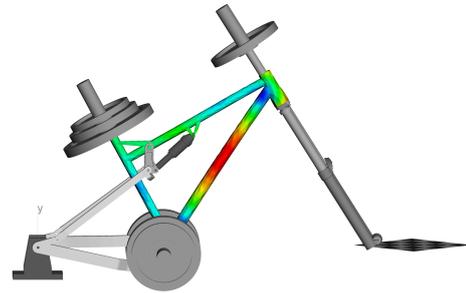
bereits beschriebenen Informationen, wird die Bauteilgeometrie einschließlich der Wandstärken benötigt. Die Simulationsdauer der in dieser Veröffentlichung vorgestellten Modelle hat sich aufgrund der zusätzlichen Freiheitsgrade in Form der abgebildeten Eigenmoden der elastischen Körper teilweise um den Faktor 100 erhöht.

## 2.2 Prüfstandsmodelle

In diesem Beitrag wird die Umsetzung der Prüfnorm DIN EN ISO 4210 in der MKS-Software Simpack anhand von drei repräsentativen Modellen präsentiert. Bei den drei gezeigten Prüfständen handelt es sich um einen Maximallastversuch mit Vertikalbelastung, einen Dauerfestigkeitsversuch mit Torsionsbelastung und einen allgemeinen Versuch, welcher das Fahrrad als Gesamtsystem prüft. Die Bindungen des Rahmens sowie die zusätzlichen Komponenten wurden entsprechend den Vorgaben der Norm modelliert und implementiert.

Zur Absicherung des Rahmens gegen hohe vertikale Lasten wird im Versuch DIN 4210-6 eine Stoßprüfung mit fallendem Rahmen durchgeführt [4]. Diese Art von Last tritt z.B. bei Sprüngen im Mountainbikesport auf. In diesem Versuch wird die Struktur einmalig mit einer Maximallast belastet. In der Mehrkörpersimulationsumgebung wird die Rahmenstruktur entsprechend der Vorgaben aus der Norm drehbar an der Hinterradaufnahme gelagert und die Kraftelemente werden arretiert, vgl. **Abbildung 2**. Der Kontakt zwischen der Prüfrolle am Ende der Federgabel und dem Stahlamboss, dargestellt als ebene Fläche, kann nach der Hertzschen Pressung an der Kontaktfläche modelliert werden. Diese Modellierung bietet zwar eine qualitativ hochwertige Abbildung der Kontakteigenschaften, für den Fallversuch mit arretierten Kraftelementen stellt jedoch die im Kontaktpunkt berechnete Steifigkeit das einzige Kraftelement dar. Aufgrund der daraus resultierenden hohen Steifigkeit des Gesamtmodells ist bei dieser Modellierung mit hohen Beschleunigungen und somit hohen Kräften im Aufprall zu rechnen. Um dies zu vermeiden, kann das Starkkörpermodell um ein Kraftelement im Kontaktpunkt erweitert werden, das mit einer Ersatzsteifigkeit und Ersatzdämpfung die elastischen Eigenschaften des Gesamtsystems abbildet. Die Eigenschaften dieses Kraftelements können anhand vergleichbarer Vorversuche, der Reduktion aus einer eMKS oder auf Basis von Erfahrungswerten ermittelt werden. Die Kennwerte dieses Kraftelements wurden in dem hier vorgestellten Modell nach dem Verformungs- und Schwingungsverhalten eines vergleichbaren Fahrradtyps in einem realen Prüfstandsversuch modelliert. Es konnten Sprunghöhe der Prüfrolle sowie das Dämpfungsverhalten dieser Schwingung gut reproduzieren werden. Die Steifigkeit des realen Prüfstandes kann alternativ auch mit der elastischen Modellierung des Hauptrahmens im Mehrkörpermodell abgebildet werden. Für die Auswertung wird somit zwischen einem Modell mit Starrkörpern, einem Modell mit Starrkörpern und Kraftelement mit Ersatzsteifigkeit bzw. Ersatzdämpfung sowie einem Modell mit elastischem Rahmen unterschieden. **Abbildung 2** zeigt den

Prüfstandaufbau mit einem elastischen Hauptrahmen im Moment der größten Belastung.



**Abbildung 2** Mehrkörpermodell eines Fahrradrahmens mit elastischem Hauptrahmen im Prüfstandsversuch nach DIN EN ISO 4260-6 4.2 Stoßprüfung [4]. Dargestellt ist der Rahmen im Zeitpunkt der größten Belastung.

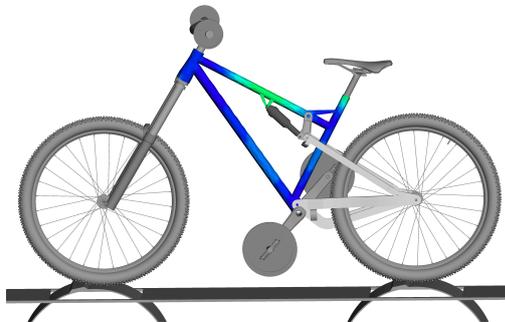
Zur Beanspruchungsuntersuchung des Rahmens bei starkem Pedalieren wird im Dauerfestigkeitsprüfstand nach DIN EN ISO 4210-6 eine wechselnde Belastung auf die Kurbel aufgeprägt [4]. Hierdurch wird die Rahmenstruktur periodisch mit wechselnder Richtung um die Längsachse des Fahrrades tordiert. Die Norm schreibt vor, dass die Struktur  $n = 10^6$  Prüfzyklen standhalten muss. Für den Nachweis der Dauerfestigkeit eines Bauteils mit den Methoden der Festigkeitsrechnung wird die maximal auftretende Spannungsamplitude an kritischen Strukturstellen benötigt. Die maximalen Belastungen bzw. Beanspruchungen zur Berechnung dieser Spannungsamplitude treten in diesem Versuch an den jeweiligen Lastumkehrpunkten der Kurbellasten auf. **Abbildung 3** zeigt den Prüfstandaufbau mit einem elastischen Hauptrahmen in einem Moment der größten Belastung.



**Abbildung 3** Mehrkörpermodell eines Fahrradrahmens mit elastischem Hauptrahmen im Prüfstandsversuch nach DIN EN ISO 4260-6 4.3 Dynamische Prüfung mit pedalerenden Kräften [4]. Dargestellt ist der Rahmen im Zeitpunkt der größten Belastung.

Als dritter Prüfstand wird das Modell eines allgemeinen Prüfverfahrens untersucht. Hierbei wird die Festigkeit des gesamten Fahrrades während der Fahrt auf einer unebenen Oberfläche geprüft. **Abbildung 4** zeigt den Aufbau des Prüfstandes mit elastisch modelliertem Hauptrahmen. Das Ausgangsmodell wurde hierfür mit mehreren Komponenten wie Räder, Lenker, Prüfrollen sowie Gewichten er-

weitert. Die CAD-Dateien stammen aus öffentlichen Datenbanken [11]. Das Fahrrad fährt im Versuch mit Vorder- und Hinterrad auf sich drehende Trommeln mit Schlagleisten. Der Kontakt zwischen Rädern und Rollen besitzt eine Steifigkeit von  $c_R = 10^6 \text{ N/m}$  und eine Dämpfung von  $d_R = 10^2 \text{ Ns/m}$ . Das resultierende Modell zeigt ein komplexes Zusammenspiel einer Vielzahl von Bauteilen über einen längeren Zeitverlauf.



**Abbildung 4** Mehrkörpermodell eines Fahrradrahmens mit elastischem Haupttrahmen im Prüfstandsversuch nach DIN EN ISO 4260-3 Allgemeine Prüfverfahren [4]. Dargestellt ist der Rahmen im Zeitpunkt der größten Belastung infolge des ersten Überfahrens einer Schlagleiste.

Neben den in der Norm beschriebenen Versuchsaufbauten bietet die Modellierung als Mehrkörpersystem, im Gegensatz zu realen Prüfständen oder einer Modellierung in einer FEA die Möglichkeit, eine Vielzahl weiterer Belastungsszenarien zu untersuchen. Hierbei ist sowohl die Anregung mit komplexen Tretlagerbelastungen, wie in [12] beschrieben, als auch die Durchführung von Simulationen auf repräsentativen Streckengeometrien mit komplexen gefederten Rahmenkinematiken möglich.

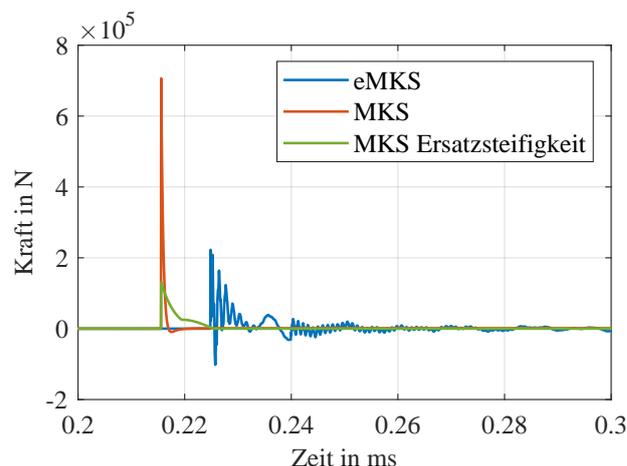
### 3 Auswertung

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse dargestellt und diskutiert. Um den Einfluss der elastischen Rahmenmodellierung auf die Bauteilbelastungen zu untersuchen, werden zunächst die Kraftverläufe für verschiedene Modellierungsarten ausgewertet. Anschließend werden am Beispiel von drei Referenzpunkten im Mehrkörpermodell Betrag und Richtung der Kräfte zwischen MKS und eMKS verglichen.

#### 3.1 Simulationsergebnisse

Am Beispiel der Kräfte, die zwischen Rahmen und Gabel während des Stoßversuch wirken, werden im Folgenden die Einflüsse der verschiedenen Modellierungsansätze auf die Kraftverläufe vorgestellt, vgl. **Abbildung 5**. Der Einfluss der unterschiedlichen Modellierungsansätze ist hier besonders groß, da Kraftelemente in Form von Reifen oder Rahmenfedern fehlen oder arretiert sind. Untersucht werden die Modellierung mit elastischen Körpereigenschaften des Hauptrahmens (*blau*), die Modellierung ausschließlich mit Starrkörpern (*orange*) und die Modellierung mit Starrkörpern und Ersatzsteifigkeit bzw. Ersatzdämpfung im

Kontaktpunkt (*grün*). Die Abbildung zeigt, dass bei der Starrkörpermodellierung mit Hertzscher Pressung extreme Kraftspitzen auftreten. Dies ist auf die hohe Steifigkeit bzw. Dämpfung des Mehrkörpermodells zurückzuführen, wodurch beim Aufprall der Prüfrolle hohe Beschleunigungen und damit hohe Kräfte auftreten. Die Starrkörpermodellierung mit Ersatzmodell sowie die elastische Rahmenmodellierung zeigen deutlich geringere, dafür aber zeitlich länger andauernde Belastungen. Trotz des ähnlichen Bewegungsverhaltens, ist das Modell mit Ersatzsteifigkeit nur bedingt in der Lage die Kraftverläufe der eMKS zu reproduzieren. Die Modellierung mit elastischem Rahmenverhalten zeigt das plausibelste Verhalten und ist daher potentiell am besten geeignet, Fallversuche ohne Kraftelemente zu simulieren. Das Modell weist ein Nachschwingen der Struktur in unterschiedlichen Frequenzen auf. Dies kann mit der Anregung von Eigenformen des Rahmens erklärt werden. Zudem tritt eine leichte Verformung des Rahmens infolge der im Fallen wirkenden Beschleunigung auf, was zu einem zeitlich verzögerten Aufprall in der eMKS von wenigen Millisekunden führt.



**Abbildung 5** Dargestellt ist der Absolutkraftverlauf aufgetragen gegen die Versuchszeit in der unteren Gabelaufnahme für den Fallversuch. Simulationen für eine Modellierung mit elastischem Verhalten des Hauptrahmens (*blau*), einer reinen Starrkörpermodellierung (*orange*) sowie einer Modellierung mit Ersatzsteifigkeit (*grün*) durchgeführt.

Der Einfluss einer Starrkörpermodellierung ist bei Fahrrädern mit aktiven Kraftelementen sowie einer direkten Kraftaufprägung wie in Versuch 2 geringer. Neben den im folgenden Kapitel dargestellten Auswirkungen auf Kraftgröße und Krafttrichtung zeigen Dauerfestigkeitsversuche (vgl. Versuch 2 und Versuch 3) mit Starrkörpermodellierung einen deutlich unstetigeren Kraftverlauf bei ähnlichen Kraftspitzen. Bei periodischer Anregung tritt zudem eine Oberschwingung auf, welche die Amplituden der Lastspitzen um wenige Prozent beeinflussen kann. Eine mögliche Erklärung ist die Lage der Anregungsperiode in einem Vielfachen einer Eigenfrequenz.

### 3.2 Einfluss der elastischen Modellierung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Mehrkörper-simulation mit elastischer und starrer Modellierung des Hauptrahmens für die in Kapitel 2.2 beschriebenen Versuche vorgestellt. Die quantitative Bewertung der Einflüsse erfolgt an drei Knotenpunkten des Mehrkörpermodells. Anhand von Kennwerten wird die Übereinstimmung von Richtung und Betrag der wirkenden Kraftvektoren verglichen. Zur Bestimmung der Richtungsübereinstimmung zweier Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  wird mit Hilfe des Kennwerts  $K_\theta$  die Kosinusähnlichkeit berechnet. Hierfür wird der kleinste Winkel zwischen den Kraftvektoren anhand der Gleichung 1 ermittelt. Die Lösungsmenge dieses Kennwertes liegt zwischen minus eins und eins, wobei minus eins eine entgegengesetzte Orientierung und plus eins eine exakte Übereinstimmung anzeigt. Ein Wert von Null entspricht einer orthogonalen Ausrichtung der Vektoren.

$$K_\theta = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{\|\vec{a}\| \|\vec{b}\|} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{a}_i \cdot \vec{b}_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\vec{a}_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (\vec{b}_i)^2}} \quad (1)$$

Neben der Kraftorientierung wird mithilfe des Kennwertes  $K_{||}$  die Höhe der Kraft betrachtet. Die Beträge der Kraftvektoren aus MKS und eMKS werden hierfür anhand der Gleichung 2 zueinander ins Verhältnis gesetzt. Der Betrag eines Vektors wird mit Hilfe der euklidischen Norm bestimmt. Ein Wert von  $K_{||} = 1$  gibt die exakte Übereinstimmung der Vektorlänge an. Werte  $K_{||} > 1$  weisen auf eine höhere Kraft in der elastischen Simulation des Rahmens hin,  $K_{||} < 1$  bedeuten eine größere Kraft in der Starrkörper-simulation.

$$K_{||} = \frac{\|\vec{a}\|}{\|\vec{b}\|} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\vec{a}_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\vec{b}_i)^2}} \quad (2)$$

Die Kennwerte werden jeweils für drei Kontenpunkte im Mehrkörpermodell berechnet. Der Punkt  $P_1$  befindet sich in der Verbindung zwischen der unteren Gabelaufnahme und dem Rahmen. Der Punkt  $P_2$  ist definiert zwischen Rahmen und Kettenstrebe, Punkt  $P_3$  befindet sich in der Aufnahme des Dämpferelements am Rahmen. In Tabelle 1 ist die Auswertung der Kennwerte an den drei Referenzmesspunkten für die drei vorgestellten Prüfstandsversuche dargestellt. Die für die Auswertung verwendeten Kraftvektoren beschreiben den maximalen Belastungszustand infolge der Einleitung der Prüfstandlasten. Für Prüfstandsversuch 1 wird das Modell mit starrem Rahmen und Ersatzsteifigkeit verwendet.

Für die Krafrichtung kann im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung zwischen MKS und eMKS festgestellt werden. Zur Bestimmung der Kraftorientierung sind daher sowohl Starrkörperverfahren als auch Modellierungen mit elastischen Körpereigenschaften geeignet. Abweichungen in der Orientierung korrelieren mit der Höhe der Prüflast sowie der Steifigkeit des Rahmens entgegen dieser Belastung. Die Kraft auf der Kurbel (Versuch 2) ist zwar geringer als die Belastung im Stoßversuch, da der Rahmen aber einen geringeren Widerstand gegen die Torsionsbelastung als gegen ebene Lastenleitung aufweist, treten hier grö-

**Tabelle 1** Auswertung der elastischen Bauteileigenschaften für die drei vorgestellten Prüfversuche.  $P_1$ : Gabelaufnahme - Hauptrahmen,  $P_2$ : Kettenstrebe - Hauptrahmen,  $P_3$ : Dämpfereaufnahme - Hauptrahmen

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
$P_1 K_\theta$	0.97	0.83	0.99
$P_1 K_{  }$	2.13	1.29	1.19
$P_2 K_\theta$	0.97	0.97	0.99
$P_2 K_{  }$	0.93	1.05	0.75
$P_3 K_\theta$	1.00	1.00	0.99
$P_3 K_{  }$	0.71	1.00	0.76

ßere Verformungen auf. Die Folge sind Abweichungen in den angreifenden Krafrichtungen. MKS und eMKS weisen dagegen zum Teil deutliche Abweichungen in den Beträgen der Kräfte auf. Insbesondere die Kräfte in der Gabelaufnahme weisen über alle Versuche eine erhöhte Kraft in der eMKS auf. Die übrigen Messstellen zeigen bis auf die Messstelle  $P_2$  in Versuch 2 erhöhte Kräfte für die Starrkörpermodellierung.

## 4 Zusammenfassung

Die Mehrkörpersimulation ist ein vielversprechendes Werkzeug für die Auslegung und Entwicklung von Fahrrädern. Im Gegensatz zu einem prüfstands-zentrierten Vorgehen bietet eine virtuelle Entwicklungsumgebung ein hohes Potential, Fahrradstrukturen und Komponenten sowohl in komplexen Fahrsituationen als auch in klar definierten Prüfstandsversuchen zu testen. Dadurch kann der Entwicklungsprozess beschleunigt und der Aufwand für die Realisierung von Prototypen und Hardwaretests reduziert werden. Da durch die Vorgaben der Prüfstandsversuche Kraftelemente wie Reifen oder Federungen fehlen oder arretiert sind, stellt die Mehrkörpersimulation solcher Modelle eine Herausforderung in der Berechnung der am Bauteil wirkenden Belastung dar. In diesem Paper wird die Eignung der Mehrkörpersimulation für die Simulation und Auswertung von aktuell geltenden Rahmenprüfstandsversuchen untersucht. Zu diesem Zweck werden verschiedene Prüfstandsversuche in einer Mehrkörpersimulationsumgebung modelliert und simuliert. Neben der klassischen Starrkörpermodellierung erfolgt die Implementierung weiterer Modellierungsansätze wie die Erweiterung mit einer Ersatzsteifigkeit bzw. Ersatzdämpfung oder elastischen Bauteileigenschaften. Aufbauend auf diesen Modellen werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Modellierungsansätze auf die Kraftverläufe sowie die Höhe und Orientierung der Kraftvektoren analysiert. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Mehrkörpersimulation prinzipiell für die Simulation von Prüfständen geeignet ist, jedoch gewählte Modellierungsentscheidungen zum Teil hohen Einfluss auf die Ergebnisse besitzen. Die Modellierung von elastischen Bauteileigenschaften nach Craig-Bampton-Reduktion war bei Stoß- und Torsionsbelastungen in der Lage deutlich plausiblere Kräfte zu berechnen.

Diese Ergebnisse müssen jedoch zukünftig im Rahmen weiterer Forschungen mit realen Prüfstandsversuchen verifiziert und validiert werden. Mehrkörpersimulationen mit geringen Kräften oder dem Vorhandensein von Kraftelementen zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Starrkörpermodellierung und Modellen mit elastischen Körpereigenschaften. Abgesehen von einigen wenigen anspruchsvolleren Versuchen ist die Simulation von Prüfständen mittels Mehrkörpersimulation als geeignet anzusehen. Eine elastische Mehrkörpersimulation ermöglicht es darüber hinaus auch diese anspruchsvollen Prüfstandsversuche zu simulieren. Allerdings steigen Implementierungsaufwand und Rechendauer der Simulation mit bei der Einbindung elastischer Bauteileigenschaften.

In: DuEPublico: Duisburg-Essen Publications Online, Universität Duisburg-Essen, Deutschland (2022). DOI: 10.17185/duepublico/75445.

## 5 Literatur

- [1] Zweirad-Industrie-Verband: *Marktdaten Fahrräder und E-Bikes 2021*. In: Pressekonferenz am 16. März 2022 in Berlin/digital. (2022)
- [2] Brust, E.: *Betriebsfestigkeit fertig montierter Fahrräder*. In: *Materials Testing*, 52 (2010) 3, S. 148–151.
- [3] Stecker, W.: *Einsatz am Limit, Prüfung sicherheitsrelevanter Bauteile an Fahrrädern*. In: *Konstruktion*, (2020) S. 11-12.
- [4] DIN EN ISO 4210: *Fahrräder - Sicherheitstechnische Anforderungen an Fahrräder*. In: Norm, Deutsche Norm, Breuth: Breuth Verlag GmbH. (2015).
- [5] Bruni, S.; Meijaard, J. P.; Rill, G.; Schwab, A. L.: *State-of-the-art and challenges of railway and road vehicle dynamics with multibody dynamics approaches*. In: *Multibody system dynamics*, 49 (2020) 1, S. 1–32. DOI: 10.1007/s11044-020-09735-z
- [6] Johannesson, P.; Speckert, M. (Hrsg.): *Guide to load analysis for durability in vehicle engineering*. In: Chichester West Sussex United Kingdom: Wiley (2014). ISBN: 9781118648315
- [7] Knothe, K.; Wessels, H.: *Finite Elemente, Eine Einführung für Ingenieure*. In: Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 5. Aufl. (2017). ISBN: 3540721886
- [8] Ingenlath, P.: *Mehrkörpersimulationsgestützte Fahrradentwicklung*. Dissertation, RWTH Aachen University, (2019). DOI: 10.18154/RWTH-2020-00454.
- [9] Rong, B., Rui, X., Tao, L., and Wang, G.: *Theoretical modeling and numerical solution methods for flexible multibody system dynamics*. In: *Nonlinear Dynamics*, 98(2), pp. 1519-1553 (2019). DOI: 10.1007/s11071-019-05191-3.
- [10] Craig, R. R.O.Y. and Bampton, M. C. C.: *Coupling of substructures for dynamic analyses*. In: *AIAA Journal*, 6 (7), 1313–1319 (1968). DOI: 10.2514/3.4741.
- [11] GrabCAD. <https://grabcad.com/>, (2023). Zugriff am 01.02.2023.
- [12] Steck, M., Husung, S., and Hassler, J.: *Determination and systematization of load situations for eBike drive units as basis for their design and optimization*.

# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub | universitäts  
bibliothek

In: Neunte IFToMM D-A-CH Konferenz 2023

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

**DOI:** 10.17185/duepublico/77389

**URN:** urn:nbn:de:hbz:465-20230314-150805-4



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 Lizenz (CC BY 4.0) genutzt werden.