

Grundlagenforschung zur Übertragung von Drehmomenten mittels Klemmkörperfreilauf im E-Bike Antriebsstrang

K. Neusser, M. Hamm, F. Halmos, B. Rothhammer, S. Wartzack

INHALT Klemmkörperfreiläufe sind wesentliche Funktionselemente im Antriebsstrang moderner Fahrräder und E-Bikes. Trotz ihrer technischen Relevanz existieren bislang für diesen Anwendungsfall nur wenige empirisch belastbare Kennwerte zu ihrer Auslegung, Bewertung und Optimierung. Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens entwickelten die Paul Müller Industrie GmbH & Co. KG und der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg einen neuartigen Prüfstand, der die maßgeblichen Wirkmechanismen von Klemmkörperfreiläufen unter realitätsnahen Bedingungen abbildet (Bild 1). Der Prüfstand ermöglicht sowohl statische Lastprüfungen als auch hochdynamische Schaltvorgänge und liefert reproduzierbare Daten zu Verdrehfederkennlinien, Schaltverhalten und charakteristischen Versagensmechanismen. Die Ergebnisse bilden eine Grundlage für Simulation, Bauteilauslegung und die Entwicklung langlebiger, effizienter und leichter E-Bike-Antriebssysteme.

Fundamental Research on Torque Transmission Using a Sprag Clutch in the E-Bike Drivetrain

ABSTRACT Sprag clutches are essential functional components in the drivetrain of modern bicycles and especially e-bikes. Despite their technical relevance, only a few empirically reliable characteristic values for the design, evaluation, and optimization of these friction-based machine elements have been available to date. As part of a joint research project, Paul Müller Industrie GmbH & Co. KG and the Chair of Engineering Design (KTmfk) at Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg developed a novel test rig that reproduces the key operating mechanisms of sprag clutches under realistic conditions (Figure 1). The test rig enables both static load tests and highly dynamic switching events and provides, for the first time, reproducible empirical data on torsional spring characteristics, switching behaviour and characteristic failure mechanisms. The results form a foundation for simulation, component design, and the development of durable, efficient, and lightweight e-bike drivetrain systems.

1 Einleitung und Motivation

Die Elektromobilität hat das Fahrrad in den vergangenen Jahren zu einem der dynamischsten Mobilitätsprodukte Europas gemacht. Seit 2014 ist der Bestand an E-Bikes in Deutschland nahezu auf das Achtfache gewachsen und erreichte im Jahr 2024 einen Anteil von rund 17,7 % am Gesamtfahrradbestand. Parallel dazu übersteigt der Absatz von E-Bikes mittlerweile den der klas-

sischen Fahrräder – ein deutlicher Hinweis auf die steigende technische Relevanz dieser Produktgruppe. [1]

Ein zentrales Element im E-Bike-Antriebsstrang ist der Freilauf. Als richtungsabhängige Kupplung sorgt er dafür, dass Drehmomente vom Pedal beziehungsweise Pedal und Mittelmotor zuverlässig und geräuscharm übertragen werden und die Pedalerie im Freilaufbetrieb möglichst widerstandsarm ruhen kann [2]. Kraftschlüssig arbeitende Klemmkörperfreiläufe sind dabei beson-

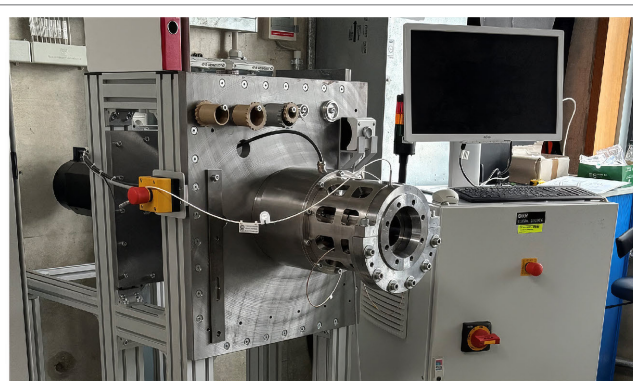
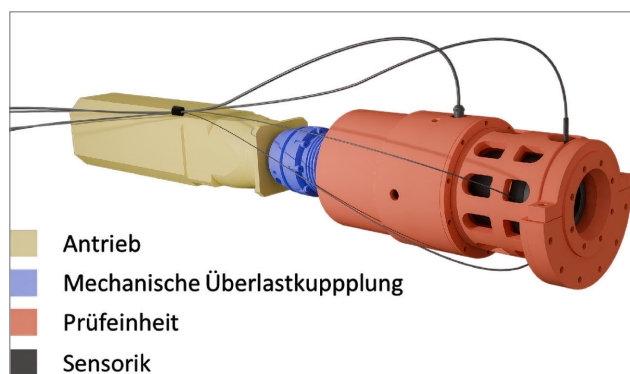


Bild 1 Schematische Darstellung der Haupteinheiten des Freilaufprüfstands (links), Foto des fertiggestellten Prüfstands mit Steuerungs- und Bedieneinheit (rechts). Grafik/Foto: KTmfk

ders kompakt [3] – jedoch auch stark von Klemmkörpergeometrie, Lagetoleranzen, Schmierung und dynamischen Belastungszuständen abhängig. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Freiläufe – allem voran führen E-Bikes zu deutlich höheren Betriebsbelastungen im Antriebsstrang, da zu den Tretkräften der Fahrerinnen und Fahrer die zusätzlichen Drehmomente moderner Mittelmotoren hinzukommen.

In der Fachliteratur zeigen sich deutliche Lücken in der experimentellen Ermittlung belastbarer Kennwerte für Klemmkörperfreiläufe. Bislang existieren nur wenige publizierte Datensätze zu Verdrehfederkennlinien, Hystereseeffekten oder dynamischen Klemmvorgängen. Für eine zuverlässige Auslegung im wachsenden Markt der E-Bike-Antriebe fehlt somit eine empirische Grundlage.

Das vorliegende Forschungsvorhaben zielt daher auf die Entwicklung und Validierung eines umfassenden Prüfstandsystems ab, das sämtliche Schalt- und Belastungsszenarien kraftschlüssiger Freiläufe realitätsnah abbilden kann. Die gewonnenen Daten sollen die Grundlage liefern, um Geometrien, Materialien, Toleranz- und Schmierkonzepte zu optimieren und die Lebensdauer zukünftiger Freilaufgenerationen zu erhöhen.

2 Experimentelle Umsetzung und Messmethodik

Das Schalten dieser Richtungsabhängigen Kupplungen wird zwischen Welle und Nabe durch die spezifische Formgebung der Freilauf-Klemmkörper realisiert, die durch ihre Anfederung in stetiger Berührung stehen. Befindet sich die Welle gegenüber der Nabe im Überholbetrieb, so bewegen sich die Klemmkörper relativ zur Wellenoberfläche und gleiten frei ab. Eine Drehmomentübertragung findet in diesem Zustand nicht statt. Erst wenn sich die Drehrichtungen beziehungsweise die Drehzahl von Welle und Nabe einander angleichen oder umkehren, ändert sich das Vorzeichen der relativen Winkelgeschwindigkeit. In diesem Moment beginnt der Freilauf zu sperren. Ursache dafür ist die Haftreibung zwischen Klemmkörper und den Kontaktflächen, durch die ein Aufstellen der Klemmkörper bewirkt wird [4]. Dadurch entsteht eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Welle und Nabe. Mit weiter steigendem Drehmoment richtet sich der Klemmkörper zunehmend weiter auf, was zu höheren lokalen Pressungen an den Kontaktstellen führt und den Aufbau der erforderlichen Tragfähigkeit ermöglicht. Bei Betrachtung von **Bild 2** würde unter der beispielhaften Annahme einer statischen Nabe und einer im Uhrzeigersinn drehenden Welle keine Drehmomenten Übertragung stattfinden. Die an den Kontaktstellen wirkenden Kräfte können somit idealerweise auf die Reibkräfte F_R tangential zur Wellen- und Nabenoberfläche reduziert werden, die sich im Produkt mit dem jeweiligen Abstand zur Mittelachse der Welle als ein geringes Schleppmoment äußern. Bei einer Umkehrung der Drehrichtung der Welle bedingt die geometrische Gestaltung des Klemmkörpers einen derartigen Anstieg der Reibkräfte, dass das Drehmoment in Pressungen an den Kontaktflächen umgewandelt wird. Die Anschlussgeometrien werden somit durch die Aufnahme der Kräfte zur Übertragung des angelegten Drehmoments gezwungen. Eine zunehmende Erhöhung des Drehmomentes wird dabei in steigende Pressungen und ein steigendes Aufstellen des Klemmkörpers übersetzt.

Diese Pressungen dominieren das Versagensverhalten von Klemmkörperfreilauf-Systemen, etwa durch das Überschreiten

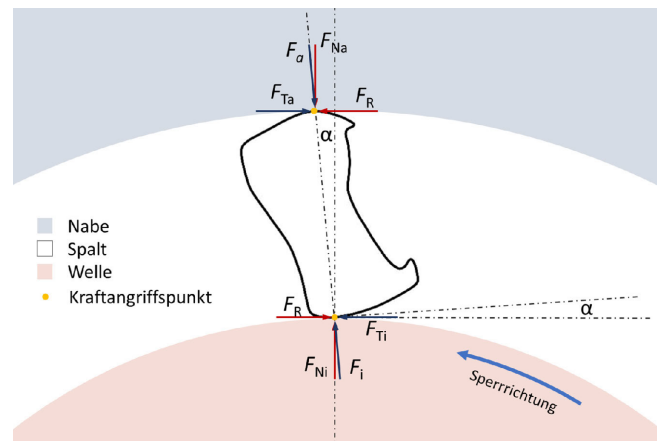


Bild 2 Krafteinwirkung im Freilauf Sperrbetrieb nach [4]. Grafik: KTMfk

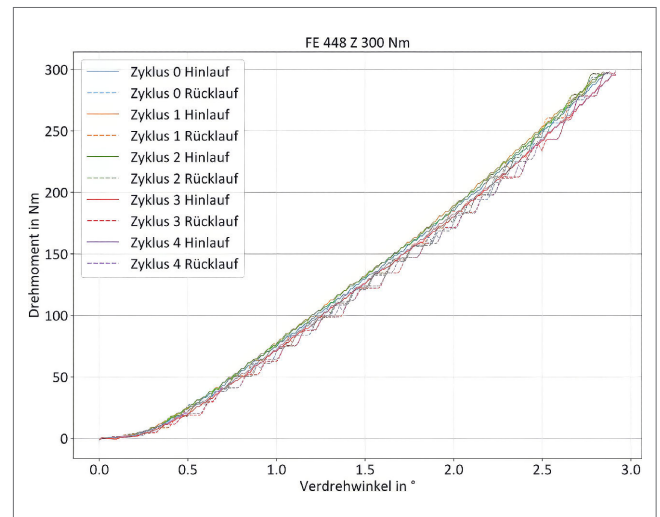


Bild 3 Exemplarische Verdrehfederkennlinien eines FE 448 Z bei einer Belastung von 380 Nm. Grafik: KTMfk

von Materialfließgrenzen oder durch Gewaltbrüche der Klemmkörper. Erste Evaluationen der Spannungsspitzen und -verteilungen in einer neu entwickelten Klemmkörpergeometrie werden somit durch Simulationen erfasst, vgl. **Bild 6**. Der zur Forschungszwecken entwickelte Prüfstand ermöglicht anschließend eine Validierung der Simulationsdaten im Bauteil-Überlastversuch.

Ein weiteres Augenmerk der experimentellen Testung bei der Freilaufprüfung liegt auf dem Verlauf des Drehmoments über dem Verdrehwinkel. Die sogenannte Verdrehfederkennlinie bildet das zentrale Charakteristikum des Freilaufs im Betrieb und ermöglicht Rückschlüsse auf Steifigkeit, Schaltverhalten und Belastungsfähigkeit [5]. Solch eine Abhängigkeit ist exemplarisch in **Bild 3** übereinander aufgetragen.

Somit können Freiläufe sowohl hinsichtlich ihres Verhaltens unter statischen Belastungen und hochdynamischen Schaltvorgängen analysiert werden als auch durch Versagens- und Überlasttests umfassend bewertet werden. In der aktuellen Konfiguration stehen Baugrößen von 25 mm bis 45 mm Wellendurchmesser mit den korrespondierenden Naben im experimentellen Fokus, wobei Effekte der elastischen Verformung in radiale Richtung durch den Einsatz dünnwandiger Nabengeometrien Teil des Spektrums der Untersuchungen sind. **Bild 4** zeigt bei gleichbleibendem Ziel-Nennmoment

die Streuung der Verdrehfederkennlinie bei dynamischen Belastungskurven unterschiedlicher Schaltfrequenzen im Versuch.

Durch die Übersetzung des Drehstrom-Synchronmotor Hauptantriebs mit einem Planetengetriebe sind unabhängig der Baugröße gleichzeitig Schaltfrequenzen bis 5 Hz und Prüfmomente bis zu 450 Nm zuverlässig abbildbar. Zur Sicherheit werden softwareseitig vor jedem Prüflauf überschlägige Grenzwerte für maximales Nennmoment und maximalen Verdrehwinkel der Welle gefordert, die bei ihrer Überschreitung als Abschaltkriterien dienen und zur Entlastung der Prüfeinheit führen. Eine Überlastkupplung sorgt zum Schutz der Komponenten ab 600 Nm für eine mechanische Trennung des An- und Abtriebs.

Der entwickelte Prüfstand bildet somit sämtliche relevanten Betriebszustände von Klemmkörperfreiläufen der E-Bike Baugrößen nach und ermöglicht deren systematische Untersuchung. Ein

zentrales Entwicklungsziel ist es, die Belastungssituation im E-Bike-Antriebsstrang möglichst genau abzubilden. Hierzu wurden sowohl quasistatische Versuche zur Ermittlung grundlegender Kennwerte als auch dynamische Belastungsprofile implementiert, die realitätsnahe Schaltfrequenzen- und Momente als auch Lebensdauertests und zerstörende Versagens- und Überlastprüfungen simulieren.

Der Prüfling wird über eine modular austauschbare Welleneinheit in den Kraftfluss integriert, sodass die beschriebenen Freilaufbaugrößen untersucht werden können. Über einen hochauflösenden Drehmomentsensor sowie inkrementelle Winkelmessung mit einer Auflösung von $0,01^\circ$ werden Verdrehfederkennlinien präzise erfasst. Die Messkette wurde so ausgelegt, dass selbst kurze transient auftretende Spitzenmomente vollständig aufgezeichnet werden können. Diese Messdaten sind essenziell, um Schwin-

Bild 4 Exemplarische Verdrehfederkennlinien eines FE 448 Z bei einer Nennbelastung von 282 Nm im dynamischen Schaltbetrieb mit Schaltfrequenzen von 0,5 Hz, 3 Hz und 5 Hz. Grafik: KTMfk

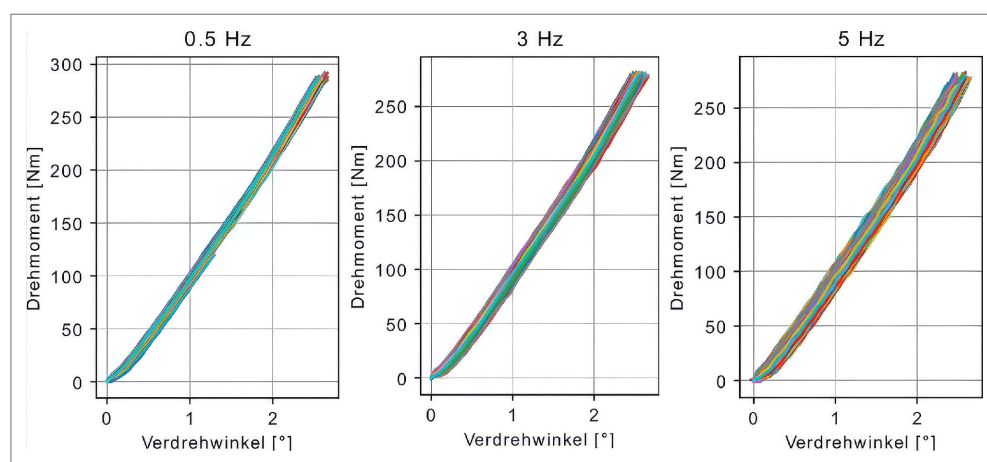
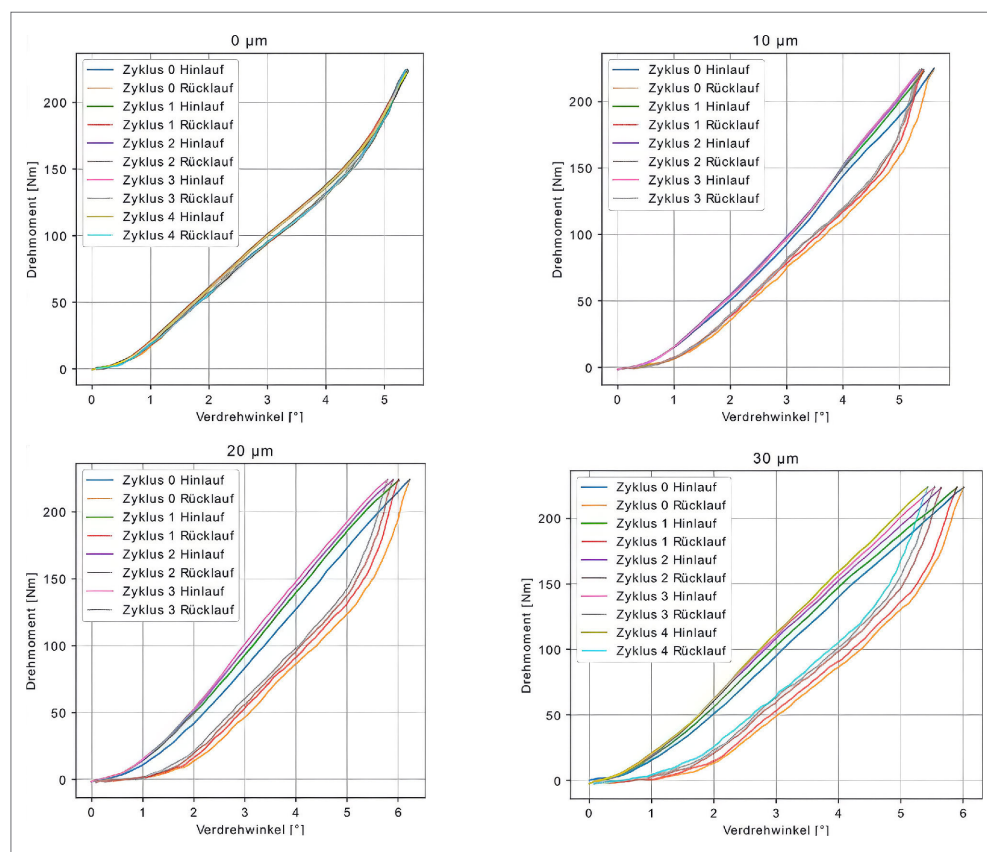


Bild 5 Exemplarische Verdrehfederkennlinien eines FE 433 BZ 12 bei einer Belastung von 220 Nm und beaufschlagten Exzentrizitäten von 0 μm , 10 μm , 20 μm und 30 μm . Grafik: KTMfk



gungseffekte und lokale Schockbelastungen zu identifizieren, welche maßgeblich zu Verschleiß, Geräuschentwicklung oder Funktionsausfällen beitragen können. Dadurch entsteht eine tragfähige Datengrundlage zur Identifikation der für die Funktion eines Freilaufs wichtigsten Einflussfaktoren sowie für die Optimierung der Freilaufgeometrien als auch deren Betriebsbedingungen.

3 Interpretation der Versuchsergebnisse

Die Untersuchungen zeigen, dass die Klemmkörpergeometrie und die Exzentrizität zwischen Welle und Nabe einen signifikanten Einfluss auf die Steifigkeit der Verdrehfederkennlinie und das resultierende Drehmoment haben. In **Bild 5** wird die Hysteresis deutlich, die sich bei steigender Exzentrizität der Mittelachsen zwischen Welle und Nabe einstellt. Es ist zu erwarten, dass bei steigender Exzentrizität eine ungleichmäßige Lastverteilung auf die einzelnen Klemmkörper im Freilauf stattfindet. Klemmkörper mit größeren Startspalten erreichen schneller das Ende ihres Arbeitsbereichs, wodurch eine verstärkte Lastverlagerung auf die übrigen Klemmkörper entsteht. Bei steigenden Drehmomenten führt dies zu lokal erhöhten Pressungen an den Kontaktstellen, die deutlich über den Werten einer ideal gleichmäßigen Lastverteilung liegen.

Ebenso nimmt die Schmierung starken Einfluss auf die Leistung des Freilaufs. Unterschiedliche Schmiermittelviskositäten, Kontaminationen sowie Temperaturänderungen verändern die Mikroreibung an den Kontaktflächen und damit die Schaltcharakteristik. Auch das erreichbare maximale Drehmoment ist stark von der Art der Schmierung abhängig, welches durch charakteristische Rutschvorgänge limitiert ist und in der Datenerhebung deutlich gemacht werden kann. Der Prüfstand erlaubt es, diese Effekte systematisch zu trennen und zu bewerten – ein Aspekt, der in der bisherigen Fachliteratur kaum behandelt wurde.

Auch die Anschlussgeometrie spielt eine entscheidende Rolle: Bei dünnwandigen Naben kommt es zu einer stärkeren elastischen Radialverformung. Dadurch vergrößert sich der Stellungswinkel der Klemmkörper, was eine Veränderung ihrer lokalen Beanspruchung und damit ihres Betriebsverhaltens zur Folge hat. Der Prüfstand ermöglicht es, diese elastischen Effekte experimentell zu untersuchen und mit numerischen Simulationen abzugleichen. Dadurch entsteht das Potential eines Brückenschlags zwischen FEM-Modellierung und realem Bauteilverhalten. Ebenso können Versagenserscheinungen an Klemmkörpern mit berechneten Pressungsmaxima verglichen und somit etwaige Simulationsansätze validiert werden. Eine derartige Simulation der Lastverteilung zwischen Welle und Klemmkörper während der Drehmomentübertragung ist in **Bild 6** gezeigt. Dies ermöglicht einen iterativen Prozess der Optimierung von Klemmkörper Geometrien und eine holistische Erschließung der Bauteil Auslegung.

4 Anwendungen, Optimierungspotenziale und industrielle Relevanz

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen deutliche Potenziale zur künftigen Gewinnung empirischer Kennwerte und somit für die Optimierung von Klemmkörperfreiläufen in der E-Bike-Mobilität durch das Schaffen einer belastbaren Grundlage für:

- die geometrische Optimierung von Klemmkörpern, etwa durch Variation von Radien an den Anlaufkanten und der Kontaktzone,

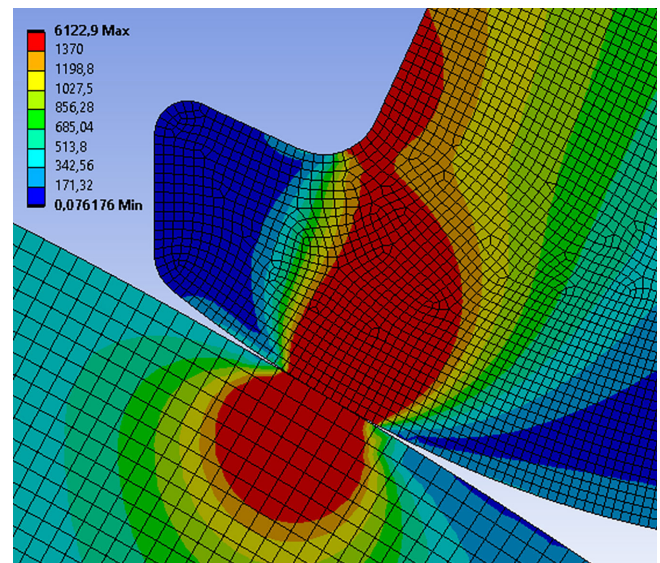


Bild 6 FEM Simulation der Lastverteilung in der Kontaktzone zwischen Klemmkörper und Welle. Grafik: KTMfk

- die beanspruchungsgerechte Auslegung dünnwandiger Nabengeometrien für die leichtbaugerechte Dimensionierung von Fahrradkomponenten,
- die Entwicklung materialeffizienter Designs, welche trotz geringerer Wandstärken hohe Drehmomente sicher übertragen können,
- die Optimierung der Schmierung, insbesondere in Hinblick auf temperatur- und alterungsbedingte Veränderungen,
- die Identifizierung von Toleranzeinflüssen auf die Freilauf Funktion vor dem Hintergrund der Welle-Nabe Konzentrizität
- die Reduktion von Wartungsaufwand, Verschleiß und Geräuschentwicklung.

Der Prüfstand ermöglicht somit eine vollständige Validierung neu entwickelter Geometrien, bevor diese in die Serienproduktion übergehen. Durch die Kombination von Simulation und experimenteller Datenerhebung wird der Entwicklungszyklus verkürzt und die Funktionssicherheit der Bauteile erhöht. Gerade in Zeiten steigender Drehmomentanforderungen und wachsender Marktanteile von E-Bikes gewinnt diese Entwicklung an großer Bedeutung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem entwickelten Prüfstand wurde ein Werkzeug geschaffen, das die Grundlagenforschung im Bereich der kraftschlüssigen Freiläufe entscheidend voranbringt. Alle relevanten Einflussgrößen von Geometrie über Schmierung bis hin zu dynamischen Lastprofilen können reproduzierbar und quantitativ untersucht werden. Dies ermöglicht eine präzise Bewertung bestehender Freilaufkonstruktionen sowie eine fundierte Grundlage für eine systematische Weiterentwicklung zukünftiger Designs.

Im nächsten Schritt sollen zusätzliche Module zur Untersuchung thermischer Effekte implementiert werden, um die Temperaturabhängigkeit der Schaltcharakteristik umfassend zu erfassen. Ebenso ist die Erweiterung des Prüfstands um variabel definierbare Lastkurven vorgesehen, die ein tieferes Verständnis der Verschleißmechanismen unter realitätsechter Belastungskollektive ermöglichen. Durch die fortlaufende Integration empirischer Daten

in die numerische Simulation entsteht ein iterativer Entwicklungsprozess, der Freilauftechnologien im E-Bike-Antriebsstrang langfristig effizienter, zuverlässiger und ressourcenschonender machen wird.

Damit leistet das Projekt einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis und zur Optimierung eines zentralen Bauteils moderner Mobilität und liefert gleichzeitig die wissenschaftliche Grundlage für zukünftige Innovationen im Bereich der Fahrrad- und E-Bike-Technik.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken den Herren Elbacher und Radke für das den Autoren entgegengebrachten Vertrauen im Bau des Prüfstands und die fortwährende Unterstützung im gemeinsamen Forschungsprojekt.

Literatur

- [1] ZIV – Die Fahrradindustrie, Marktdaten Fahrräder und E-Bikes 2024. <https://www.ziv-zweirad.de/wp-content/uploads/2025/03/ZIV-Marktdatenpraesentation-2025-fuer-GJ-2024.pdf> (Abruf:10.12.2025).
- [2] *Rossmann, P.*: Untersuchungen zum dynamischen Betriebsverhalten von Freilaufkupplungen. Hannover, Universität Hannover, Dissertation, 1991.
- [3] *Hinzen, H.*: Funktionsfähigkeit und Gebrauchsdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb. Aachen, RWTH Aachen, Dissertation, April 1985.
- [4] *Stolze, K.; Hart, S.*: Konstruktionsbücher. Bd. 19: Freilaufkupplungen; Berechnung und Konstruktion: Berechnung und Konstruktion. CHAM: Springer, 1961. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-51093-9>.
- [5] *Dietz, P.*: Tragfähigkeitssteigerungen von Maschinenelementen durch teilplastische Verformungen; Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen, Nr. 23, TU Clausthal, 1998; ISSN 0947-2274.

Kevin Neusser, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Michael Hamm, M.Sc.

Forschung und Entwicklung
GMN Paul Müller Industrie GmbH & Co. KG
info@gmn.de | www.gmn.de

Fabian Halmos, M.Sc.

Ehemalig wissenschaftlicher Mitarbeiter

Dr.-Ing. Benedict Rothhammer

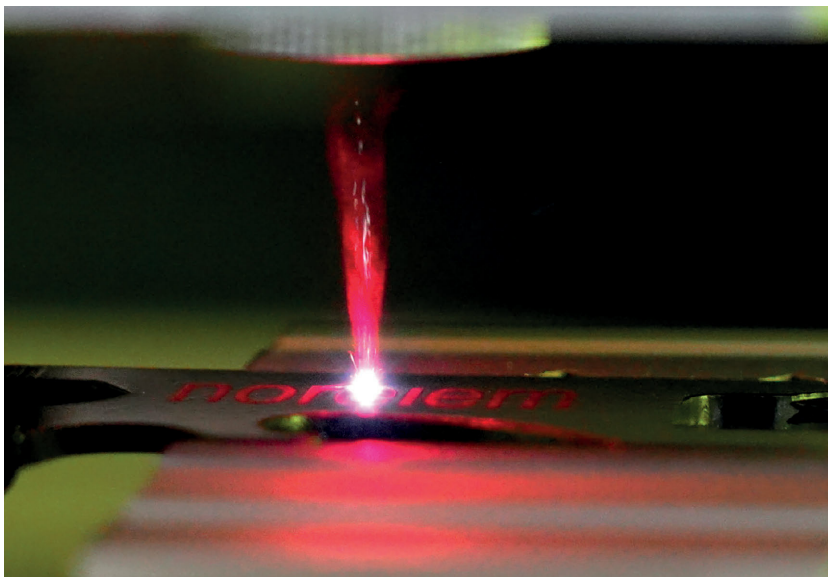
Fachgruppenleiter Maschinenelemente und Tribologie

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Lehrstuhlinhaber

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
wartzack@mfk.fau.de | www.mfk.tf.fau.de

Vorschau 9-2026



Der **Lasergravierer** arbeitet berührungslos mit einem Infrarot-Faserlaser, mit dem unterschiedliche Materialien bearbeitet werden können. Bild: norelem

Lasergraviermaschine

Eigentlich ging es nur um ein Highlight für den nächsten Messeauftritt. Dann wurde daraus eine Technikerarbeit, in der auf Basis von Normteilen eine kompakte Lasergraviermaschine entwickelt wurde. Das Gerät musste mobil sein und unterschiedlichste Materialien gravieren können.

Spannungen in Federn

Bisher gibt es keine Methodik für den rechnerischen Festigkeitsnachweis in Schraubzugfedern. Im Rahmen des Beitrages werden Lösungsansätze für die Bestimmung der vorhandenen Spannungen aufgezeigt, welche für die Durchführung eines Ermüdungsfestigkeitsnachweises für Zugfedern benötigt werden.

Fachteil Ingenieur-Werkstoffe



Am Fraunhofer IAP entwickelte programmierbare Materialien reagieren auf kritische Temperaturanstiege, indem sie von einem Folien- in einen Schaumstoff-Zustand umschalten und so selbsttätig Schutzmechanismen auslösen.
Foto: Jadwiga Galties/Fraunhofer IAP

STAHLPRODUKTION

Grüner Stahl
braucht klare
Rahmenbedingungen

KLEBEN

Wenn Klebstoff
erst beim Fügen
aktiviert wird

KUNSTSTOFFRECYCLING

Wie aus Folien wieder
hochwertiger
Kunststoff wird