

Bischofberger, Arne; Bause, Katharina; Ott, Sascha; Albers, Albert

## **Einflüsse des Tribosystems auf die Schwingungsreduzierungs Wirkung in nasslaufenden Lamellenkupplungen – Gestaltungsempfehlungen für eine gezielte Auslegung des Friktionssystems**

### **Zusammenfassung:**

Um das Tribosystem nasslaufender Lamellenkupplungen gezielt auch für die effiziente Schwingungsreduzierung auszuliegen, sind Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen den wirkenden schwingungsreduzierenden Mechanismen im Friktionskontakt und dem Reibungszahlverhalten unabdingbar. Um diese Zusammenhänge zu ergründen, wird ein Simulationsmodell aufgebaut und erweitert, welches die Untersuchung der Schwingungsreduzierungs Wirkung einer schlupfgeregelten Kupplung unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen mit dem Restantriebsstrang ermöglicht. Die Eingangsgröße Tribosystem wird im Modell durch das dynamische Reibungszahlverhalten charakterisiert. Das dynamische Reibungszahlverhalten stellt somit eine zentrale Eingangsgröße dar. Zusammenhänge zwischen diesem und der Schwingungsreduzierungs Wirkung (Ausgangsgröße) können hiermit simulativ ergründet werden. In den im Beitrag vorgestellten Simulationen werden die beiden Parameter Reibungszahlgradient und Hysteresenausdehnung variiert und deren Effekt auf die Schwingungsreduzierungs Wirkung untersucht. Ergänzend werden hiermit Aussagen über die wirkenden Mechanismen im Kontakt und die daraus resultierenden Potentiale in der gezielten Gestaltung des Friktionssystems herausgearbeitet.

### **Abstract:**

In order to ensure that the tribological system of wet multi-plate clutches is also designed for an efficient vibration reduction as functional extension, knowledge of the relationships between the reducing mechanisms in the friction contact and the friction coefficient behavior is essential. To understand these relationships more in detail, a simulation model is being developed and extended that can be used to investigate the vibration reduction effect of a slip-controlled clutch regarding interactions with the rest drive system. The input variable tribological system is characterized in the model by the dynamic friction coefficient behavior. The dynamic friction coefficient behavior thus represents a key input variable. Correlations between this and the vibration reduction effect (output variable) can hereby be investigated by simulation. In the simulations presented in this contribution, the two parameters friction coefficient gradient and hysteresis expansion are varied and their impact on the vibration reduction effect is investigated. Additionally, conclusions are made about the reducing mechanisms in the friction contact and thus the resulting potentials in targeted design of the friction system.

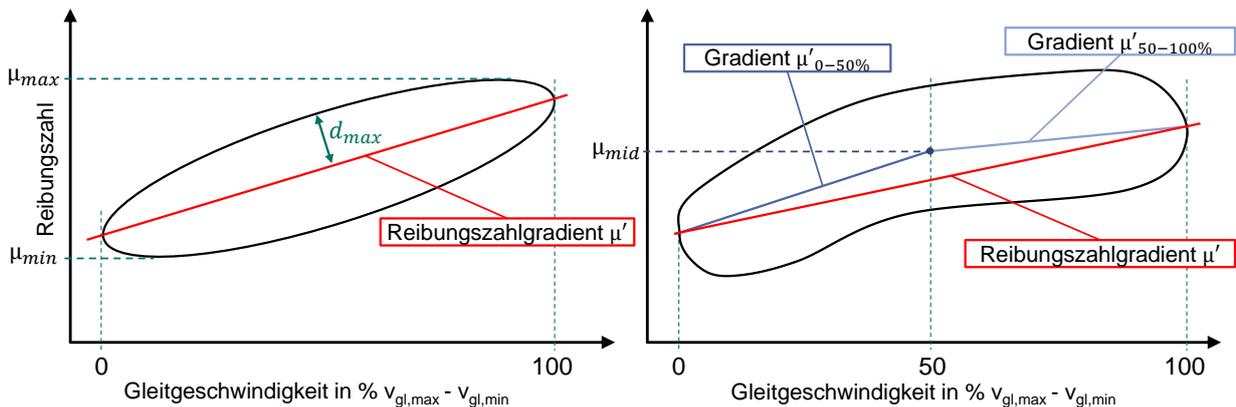
### **Einleitung**

Durch den Mobilitätswandel bedingte Maßnahmen wie Elektrifizierung, Downsizing oder Downsizing stellen Entwickler und Entwicklerinnen hybrider Antriebssysteme vor immer neue Herausforderungen. Veränderte Betriebszustände führen zu neuen, unerwünschten Schwingungsphänomenen im Antriebsstrang. Gleichzeitig nimmt der Kundenwunsch nach komfortabler Mobilität weiter zu. Neben herkömmlichen Komponenten zur Schwingungsreduzierung in Antriebssystemen, wie ZMS und FKP, bietet auch das moderne, nasslaufende Kupplungssystem die Möglichkeit Schwingungen reduzieren zu können. Dieses bietet dabei den Vorteil die Schwingungsreduzierung durch geregelten Dauerschlupfbetrieb bedarfsgerecht zuschalten und so eine Komforthöhung situationsangepasst herbeiführen zu können. [1 bis 5]

Die mit einer Erhöhung der Schlupfdrehzahl einhergehende erhöhte Dämpfungswirkung führt zwar zu einer Komfortsteigerung, geht jedoch auch mit Effizienzeinbußen einher. Ein gezieltes Auslegen des Friktionssystems auf derartige Betriebsmodi ermöglicht eine Verbesserung dieses Zielkonflikts. Hierfür sind Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Tribosystem und Wirkmechanismen im Friktionskontakt unabdingbar. [6, 7]

In vorherigen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Gestaltung des nasslaufenden, tribologischen Systems einen erheblichen Einfluss auf die wirkenden Mechanismen in diesem nimmt. So konnte gezeigt werden, dass eine Veränderung der Öladditivierung andere schwingungsmindernde Mechanismen neben der Dämpfung begünstigt, und somit Schwingungen effizienter reduziert werden können. [8, 9] Außerdem konnte

das Tribosystem durch eine Charakterisierung des dynamischen Reibungszahlverhaltens anwendungsnah beschrieben werden. Durch die antriebsseitig aufgeprägte Sinusanregung, und damit nicht konstanten Gleitgeschwindigkeit, verläuft die Reibungszahl periodisch. Der in diesem dynamischen Dauerschlupfzustand resultierende Reibungszahlverlauf wird hier als dynamisches Reibungszahlverhalten (dyn. RZV) bezeichnet. [10] Ein exemplarischer Verlauf und Kennwerte zur Charakterisierung dessen sind in **Abbildung 1** dargestellt.



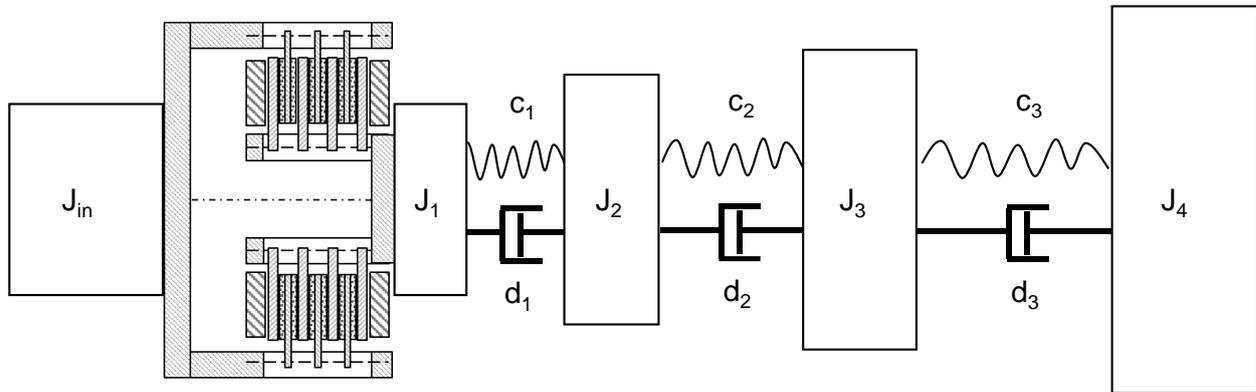
**Abbildung 1:** Kennwerte dynamisches Reibungszahlverhalten, aufgezeigt anhand zweier exemplarischer dynamischer Reibungszahlverläufe [10]

In [11] konnte gezeigt werden, dass die Veränderung der Öladitivierung auch auf das dynamische Reibungszahlverhalten Einfluss nimmt und somit eine Anpassung der Reibungszahlkurve möglich ist. Bisher unzureichend bekannt sind jedoch Zusammenhänge zwischen den wirkenden schwingungsreduzierenden Mechanismen im Friktionskontakt und dem Reibungszahlverhalten.

Um diese Zusammenhänge zu ergründen, wird ein Simulationsmodell aufgebaut und erweitert, welches die Untersuchung der Schwingungsreduzierwirkung einer schlupfgeregelten Kupplung ermöglicht. Die Eingangsgröße Tribosystem wird im Modell durch das dyn. RZV charakterisiert. Das Dynamische Reibungszahlverhalten stellt somit eine zentrale Eingangsgröße dar. Zusammenhänge zwischen dem dyn. RZV und der Schwingungsreduzierwirkung (Ausgangsgröße) können somit simulativ ergründet werden. In den hier vorgestellten Simulationen werden die beiden Parameter Reibungszahlgradient und Hysteresenausdehnung variiert und deren Effekt auf die Schwingungsreduzierwirkung untersucht. Ergänzend werden hiermit Aussagen über die wirkenden Mechanismen im Kontakt und die daraus resultierenden Potentiale in der gezielten Gestaltung des Tribosystems herausgearbeitet.

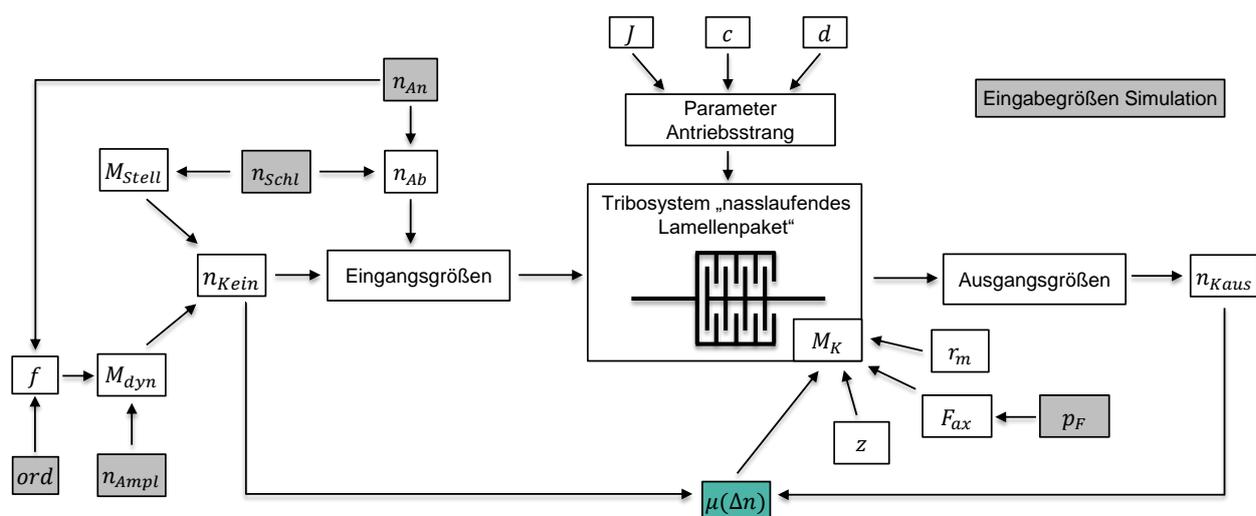
## Modellbildung

Für die simulative Untersuchung wird ein Mehrmassenschwingermodell eines konventionellen Antriebsstrangs in MATLAB Simulink auf Basis der Ausgangsmodellierung in [12] aufgebaut und erweitert. Der grundlegende Aufbau ist in **Abbildung 2** dargestellt.



**Abbildung 2:** Reduziertes Mehrmassenschwingermodell des Antriebsstrangs mit Kupplung [12]

Das Modell wird um ein Teilmodell des Kupplungssystems sowie die Möglichkeit das Tribosystemverhalten dynamisch zu beschreiben, erweitert. Das Teilmodell der Kupplung wird aus dem Simscape Modell *Fundamental Friction Clutch* und einem Subsystem zur Berechnung der Drehmomente im Kupplungsmodell aufgebaut. Zur Beschreibung des tribologischen Verhaltens wird ein dynamischer Reibungsverlauf, i. d. R. ermittelt aus einer experimentellen Untersuchung, oder für nachfolgende Untersuchung ein gezielt erzeugter Verlauf vorgegeben. Weitere Eingangsgrößen im Modell sind in **Abbildung 3** ersichtlich. Mittels der Eingangsgrößen wird ein Betriebszustand vorgegeben.



**Abbildung 3:** Eingangsgrößen im Simulationsmodell (grau), hervorgehoben ist auch die Eingangsgröße „Reibverhalten Tribosystem“ (grün), welche über den dynamischen Reibungsverlauf vorgegeben wird.

## Simulation: Einfluss des dynamischen Reibungszahlverhaltens auf die Schwingungsreduzierungs Wirkung

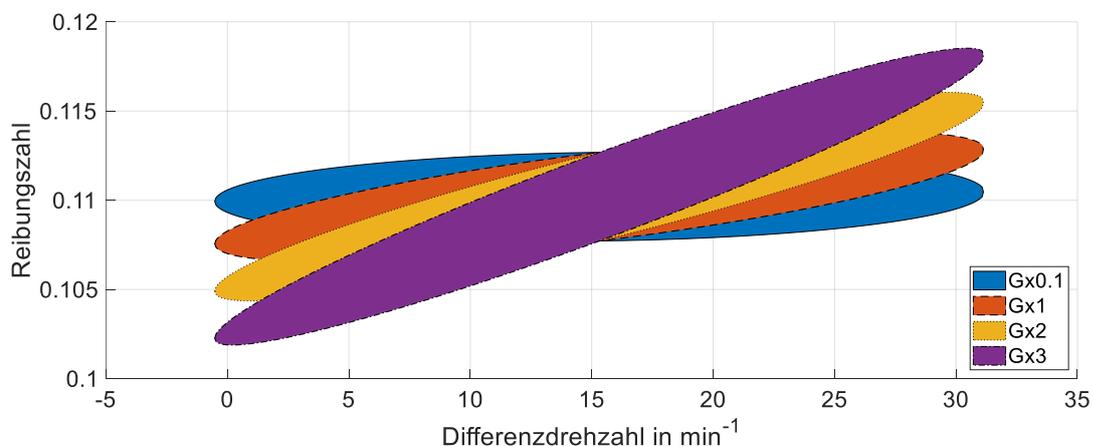
Im folgenden Abschnitt wird der simulierte Betriebszustand und die vorgenommene Parametervariation vorgestellt. Ziel der hier simulativ durchgeführten Untersuchung ist es, herauszufinden, inwieweit Kenngrößen des dynamischen Reibverhaltens die Schwingungsreduzierungs Wirkung beeinflussen. Hierfür werden dynamische Reibungszahlverläufe erstellt, in welchen die beiden in [10] vorgestellten Kenngrößen *Reibungszahlgradient* sowie *Hysteresenausdehnung* gezielt verändert werden. Anschließend wird mit den erzeugten Reibungszahlverläufen im gewählten Betriebszustand ein dynamischer Dauerschlupfbetrieb im Modell eingestellt und das Schwingungsreduzierungsverhalten beobachtet.

Der grundlegende Betriebszustand wird möglichst anwendungsnah gewählt und setzt sich in erster Linie aus den in **Tabelle 1** aufgeführten Beanspruchungsgrößen, welche im Modell als Eingangsgrößen vorgegeben werden (vgl. **Abbildung 3**), zusammen. Die Antriebsdrehzahl wird mit einer Sinusschwingung überlagert, so, dass Drehschwingungen im Kupplungssystem resultieren.

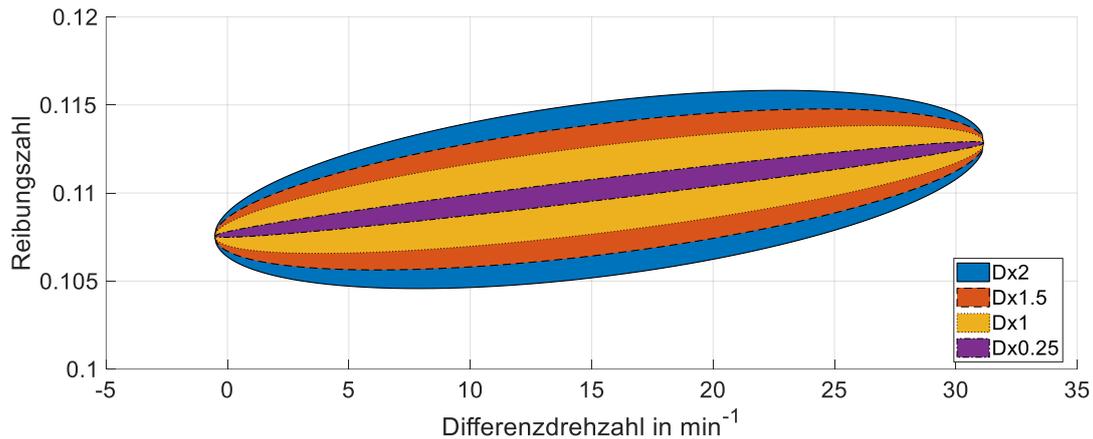
**Tabelle 1:** Beanspruchungsgrößen im simulierten Betriebszustand

Antriebsdrehzahl in $\text{min}^{-1}$	1.200
Grundsclupfdrehzahl in $\text{min}^{-1}$	15
Drehzahlamplitude der Anregung in $\text{min}^{-1}$	30
Ordnung der Anregung / Frequenz der Anregung in Hz	1,5. Ord. / 30
Flächenpressung (netto) in $\text{N}/\text{mm}^2$	0,7

Die Variation der Kenngrößen und die daraus resultierenden verschiedenen dynamischen Reibungszahlverläufe sind in **Abbildung 4** (Reibungszahlgradient  $\mu'$ ) und **Abbildung 5** (Hysteresenausdehnung  $d_{max}$ ) abgebildet. „Gx“ (Gradient) und „Dx“ (Hysteresenausdehnung) sind dabei die Bezeichnungen der unterschiedlichen Varianten.



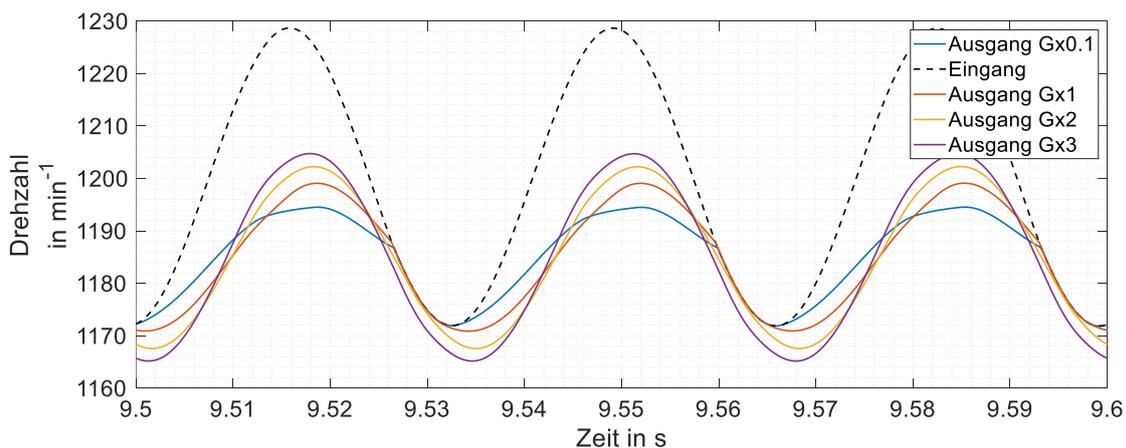
**Abbildung 4:** Dynamische Reibungszahlverläufe mit verschiedenen Reibungszahlgradienten: Veränderung des Reibungszahlgradienten  $\mu'$  bei festgehaltener Hysteresenausdehnung sowie festgehaltener mittleren Reibungszahl



**Abbildung 5:** Dynamische Reibungsverläufe mit verschiedenen Hysteresenausdehnungen: Veränderung der Hysteresenausdehnung  $d_{max}$  bei festgehaltenem Reibungszahlgradienten sowie festgehaltener mittlerer Reibungszahl

## Ergebnisse

In nachfolgenden Abbildungen wird der Drehzahlverlauf am Ausgang mit der eingebrachten Drehzahlschwingung gegenübergestellt. Der Verlauf der Eingangsdrehzahl bleibt dabei für jede Variation des dynamischen Reibungsverhaltens gleich. Durch die Veränderung des dynamischen Reibungsverhaltens resultieren unterschiedliche Reduzierungswirkungen (verschiedene Amplitudenausprägungen) sowie Phasenverschiebungen im Kupplungssystem. Ergänzend wird die mittlere Verlustleistung aus der Differenz von abgehender und eingebrachter Leistung ermittelt, um genauere Aussagen zu wirkenden schwingungsmindernden Mechanismen ableiten zu können. **Abbildung 6** zeigt das Ergebnis der Variation des Reibungszahlgradienten (vgl. **Abbildung 4**).

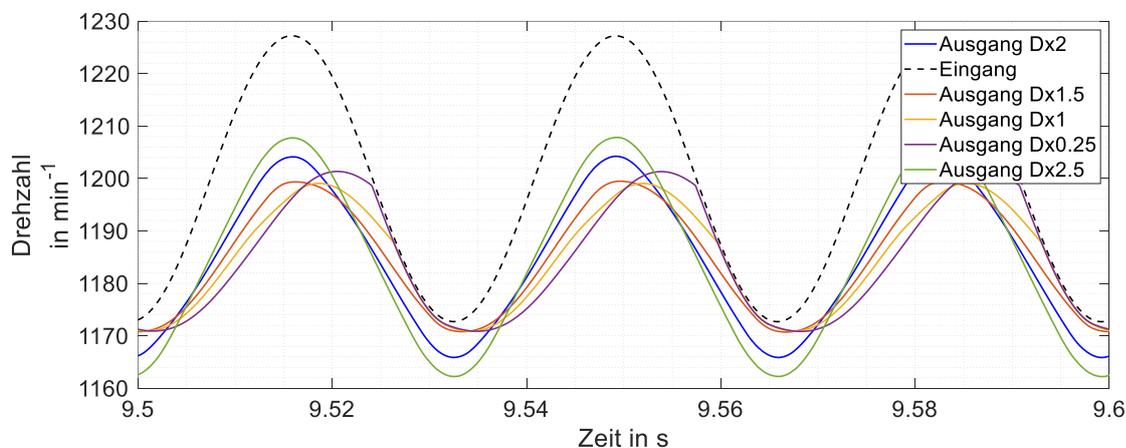


**Abbildung 6:** Verlauf der Drehzahlen an Eingang (schwarz) und Ausgang für verschiedene Reibungszahlgradienten des dynamischen Reibungsverlaufs

Die Untersuchung zeigt einen Einfluss des Reibungszahlgradienten auf die Schwingungsreduzierwirkung im Kontakt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die vor-

genommene Reduzierung des hier durchgängig positiven Reibungszahlgradienten zu einer Verbesserung der Schwingungsreduzierungs Wirkung führt. Außerdem führt die Reduzierung des Gradienten zu einer größeren Phasenverschiebung zwischen An- und Abtrieb. Das System Gx1 (rot) zeigt gegenüber dem System mit höherem Reibungszahlgradienten Gx3 (lila) eine um ca. 30 % reduzierte Winkelbeschleunigung am Kupplungsausgang. Die reduzierte Winkelbeschleunigung führt zu einer geringeren Anregung im Antriebsstrang und resultiert daher in einer direkten Komfortsteigerung im Fahrzeug. Ergänzend kann ermittelt werden, dass die Verlustleistung bei den beiden Systemen annähernd gleich groß ist (Abweichung < 1 %).

**Abbildung 7** zeigt das Ergebnis der Variation der Hysteresenausdehnung (vgl. **Abbildung 5**).



**Abbildung 7:** Verlauf der Drehzahlen an Eingang (schwarz) und Ausgang für verschiedene Hysteresenausdehnungen des dynamischen Reibungszahlverlaufs

Die Untersuchung zeigt, dass auch die Hysteresenausdehnung einen Einfluss auf die Schwingungsreduzierungs Wirkung im System nimmt.

Die Schwingungen scheinen mit Abnahme der Hysteresenausdehnung stärker reduziert, jedoch bei Hysteresenausdehnung < Dx1 wieder weniger stark (größere Amplituden) reduziert zu werden. Ab Hysteresenausdehnungen von ungefähr Dx1, ausgeprägter auch bei Dx0.25 zu erkennen, würde im realen System bereits der Betriebszustand „Zug-Schub-Betrieb“ auftreten. Die Abtriebsdrehzahl „überholt“ hierbei (Kurven schneiden sich) kurzzeitig die Antriebsdrehzahl, was zu einer negativen Differenzdrehzahl führt (Schub-Betrieb). [13] Dieser hochfrequente Wechsel zwischen Zug- und Schubbetrieb wird im Kupplungsmodell nicht abgedeckt, weswegen dieser Betriebszustand eine Modellgrenze darstellt. Es kann im Rahmen dieser Simulationen daher keine gültige Aussage zur Schwingungsreduzierungs Wirkung für die Hysteresen  $\leq$  Dx1 getroffen werden.

Um jedoch eine Tendenz im Bereich der Gültigkeit des Modells festzuhalten, wurde eine zusätzliche, größere Hysteresenausdehnung Dx2.5 (grün) untersucht. Die Tendenz zeigt bei Hysteresen > Dx1 eine Abnahme der Schwingungsreduzierungs Wirkung mit Zunahme der Hysteresenausdehnung. Außerdem hat die hier vorgenommene Vergrößerung der Hysteresenausdehnung tendenziell keinen Einfluss auf eine mögliche Phasenverschiebung zwischen An- und Abtrieb. Daraus lässt sich die Aussage ableiten, dass bei

größer werdender Reibungszahlschwankung in der Hysterese, also bei großer Schwankung der Reibungszahl zwischen Zu- und Abnahme der Gleitgeschwindigkeit, Schwingungen schlechter reduziert werden, dabei jedoch tendenziell keine Veränderung in der Phase zwischen An- und Abtrieb vorliegt.

Auf Basis der in diesem Beitrag generierten Erkenntnisse lässt sich festhalten, dass das Tribosystem möglichst

- mit geringer Reibungszahlschwankung zwischen Zu- und Abnahme der Reibungszahl bei hochfrequenter periodischer Änderung der Gleitgeschwindigkeit (Hysteresenausdehnung), sowie
- mit einem möglichst geringen, jedoch positiven Reibungszahlgradienten

ausgelegt werden sollte um eine effizientere Schwingungsreduzierung zu ermöglichen.

## Zusammenfassung & Ausblick

Es wird ein Simulationsmodell aufgebaut und erweitert, welches die Untersuchung des Schwingungsreduzierungsverhaltens im Kupplungssystem anwendungsnah für verschiedene Tribosysteme ermöglicht. Das anwendungsnah Verhalten der Tribosysteme wird durch die Implementierung von dynamischen Reibungszahlverläufen umgesetzt. Außerdem werden in der Modellbildung Wechselwirkungen mit dem Restantriebsstrang berücksichtigt. Mit dem Simulationsmodell werden verschiedene dynamische Reibungszahlverläufe, respektive verschiedene Tribosysteme, untersucht um Zusammenhänge zwischen dem dynamischen Reibungszahlverhalten und der Schwingungsreduzierungswirkung im Kupplungssystem zu ermitteln.

Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass **das dynamische Reibungszahlverhalten die Schwingungsreduzierungswirkung im Kupplungssystem beeinflusst**. Hervorzuheben ist dabei insbesondere, dass durch die Simulation ersichtlich wird, dass **bei nahezu gleichbleibender Verlustleistung unterschiedlich stark Schwingungen im System reduziert werden**. Dies zeigt, dass die Reduzierungswirkung im Kontakt **nicht alleinig durch dämpfende Wirkung (Energiedissipation) erzielt wird**. Ein **gezieltes einstellen des Reibungszahlverhaltens im Tribosystem kann andere schwingungsmindernde Mechanismen begünstigen** und somit den Zielkonflikt zwischen Komfort und Effizienz bei einer bedarfsgerecht schlupfgeregelten Funktionserweiterung der Kupplung optimieren.

In zukünftigen Untersuchungen gilt es nun zu zeigen, dass durch Anpassungen im Tribosystem (Ölveränderungen und Veränderungen der Reibpartner) und den daraus resultierenden Änderungen im dynamischen Reibungszahlverhalten im experimentellen Versuch auch die Schwingungsreduzierungswirkung im Friktionskontakt beeinflusst wird. Dabei gilt und wird es ermöglicht Wissen zu den Zusammenhängen zwischen den „Einstellparametern“ der Tribosystembestandteilen und den Wirkmechanismen im Friktionskontakt zu erforschen und herauszuarbeiten. Welche Gestaltmerkmale des Tribosystems (z. B. Öleigenschaften) Einfluss nehmen und ob die Tendenz zur Korrelation zwischen dyn. RZV und Schwingungsreduzierung in experimentellen Untersuchungen mit verschiedenen Tribosystemvarianten verifiziert werden kann, ist Teil zukünftiger Veröffentlichungen. In [11] konnte hierfür bereits grundlegend gezeigt werden, dass eine Veränderung der Öladditivierung sich auch auf den Reibungszahlgradienten und die Hysteresenausdehnung auswirkt.

## Literatur

- [1] Lutz, D. u. Verein Deutscher Ingenieure: Kupplungsmanagement - ein Baustein zur Dreh-schwingungsdämpfung. VDI Berichte 697 (1988), S. 219–256
- [2] Abbassi, M. B.: Steigerung des Antriebsstrangkomforts im Kfz durch elektronisches Kupp-lungsmanagement. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 101 (1999) 2, S. 118–126
- [3] Drexl, H.-J. u. Verein Deutscher Ingenieure: Der Torsionsdämpfer in der Kupplungs-scheibe. VDI Berichte 697 (1988), S. 133–158
- [4] Reik, W., Friedmann, O., Agner, I. u. Werner, O.: Die Kupplung - das Herz des Doppel-kupplungsgetriebes. In: Getriebe in Fahrzeugen 2004. Tagung Friedrichshafen, 22. und 23. Juni 2004. VDI-Berichte, 1827, Buch. Düsseldorf: VDI-Verl. 2004, S. 65–88
- [5] Jürgens, G. u. Fischer, R.: Vergleich verschiedener Systeme zur Verringerung von Triebstrangschwingungen (1988), S. 233–256
- [6] Bischofberger, A., Ott, S. u. Albers, A.: Die nasslaufende Kupplung als Stellglied zur Schwingungsreduzierung im Antriebsstrang – Einflüsse eines veränderten Tribosystems. Forschung im Ingenieurwesen (2020) 85, S. 1–10
- [7] Bischofberger, A., Ott, S. u. Albers, A.: Einfluss von Betriebsgrößen auf die Schwingungs-reduzierungswirkung im nasslaufenden Kupplungssystem: Empirische Modellbildung – Kennfelder und Skalierbarkeit. Forschung im Ingenieurwesen (2021) 85, S. 933–944
- [8] Bischofberger, A., Ott, S. u. Albers, A.: Die nasslaufende Kupplung als Stellglied zur Schwingungsreduzierung im Antriebsstrang - Einflüsse eines veränderten Tribosystems. VDI-Berichte 2366. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2019
- [9] Albers, A., Bischofberger, A. u. Ott, S.: Wet clutch as an enabler of cost-efficient hybrid drive systems Decoupling as functional extension. 20. Internationales Stuttgarter Sympo-sium. Automobil- und Motorentchnik. Wiesbaden: Springer Vieweg 2020, S. 251–265
- [10] Bischofberger, A., Bause, K., Ott, S. u. Albers, A.: Untersuchung des anwendungsnahen, dynamischen Reibverhaltens nasslaufender Lamellenkupplungen am Beispiel zweier Tribosystemvarianten. Tribologie und Schmierungstechnik 69 (2022) 2, S. 26–39
- [11] Bischofberger, A., Bause, K., Ott, S. u. Albers, A.: How friction modifier influences the dy-namic friction behavior in wet-running clutch systems and its potential for extended use in hybrid drive trains. 23rd International Colloquium Tribology 2022, Bd. 23. Esslingen 2022
- [12] Albers, A., Ott, S. u. Basiewicz, M.: Influencing factors on the decoupling of induced rota-tional oscillation by wet-running multi-plate-packages in controlled slip mode. In: 44. Leeds-Lyon Symposium on Tribology. Lyon 2017
- [13] Kemper, C., Wantzen, K., Bischofberger, A., Ott, S. u. Albers, A.: Vergleich von Reibungs-zahlverläufen von nasslaufenden Friktionskontakten im gezielten Schlupfbetrieb unter dy-namischer Anregung. Forschung im Ingenieurwesen 83 (2019) 2, S. 239–246

Autoren:

M.Sc. Arne Bischofberger\*; Dipl.-Ing. Katharina Bause; Dipl.-Ing. Sascha Ott; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie, Kaiserstr.10, 76131 Karlsruhe

\*arne.bischofberger@kit.edu