

Sutschet, Alexander; Bischofberger, Arne; Bause, Katharina; Ott, Sascha

## Untersuchung eines axialen Gleitlagers als Ausrücklager in einer Hochdrehzahlkupplung im Fahrzeugantrieb

### Zusammenfassung:

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Untersuchung des Ausrücksystems einer Hochdrehzahlkupplung. Die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des Betätigungssystems dieser Hochdrehzahlkupplung ist das primäre Untersuchungsziel. Für die Betätigung der Kupplung ist das Ausrückelement von zentraler Bedeutung. Es wurde ein axiales Gleitlager als Ausrückelement entwickelt. Zur dessen Untersuchung wurde eine Untersuchungsumgebung entwickelt und aufgebaut, welche nun die Untersuchungen des Gleitlagers bei bis zu 20.000 1/min unter gezielter Einstellung verschiedener Pressungen ermöglicht. Diese beiden Größen wurden variiert und so Beanspruchungskollektive erstellt, mit welchen das Gleitlager beaufschlagt wurde. Zur Beurteilung des Gleitlagerverhaltens und -zustandes werden Kriterien zur Bewertung des Ausrücklagerverhaltens im Betrieb festgelegt, welche durch Temperaturüberwachungen im Gleitkontakt oder auch durch optische Prüfungen erhoben werden. So können Sensitivitäten der Konfigurationen experimentell ermittelt und gezeigt werden, dass Kühlkanäle einen positiven Einfluss im Hinblick auf die festgelegten Kriterien haben. Dieser Beitrag zeigt auf, dass sich axiale Gleitlager prinzipiell als Ausrückelement in schnelldrehenden Kupplungssystemen eignen und so gegenüber herkömmlichen Ausrücklagern mit Wälzkörpern neben Bauraum auch Kosten eingespart werden.

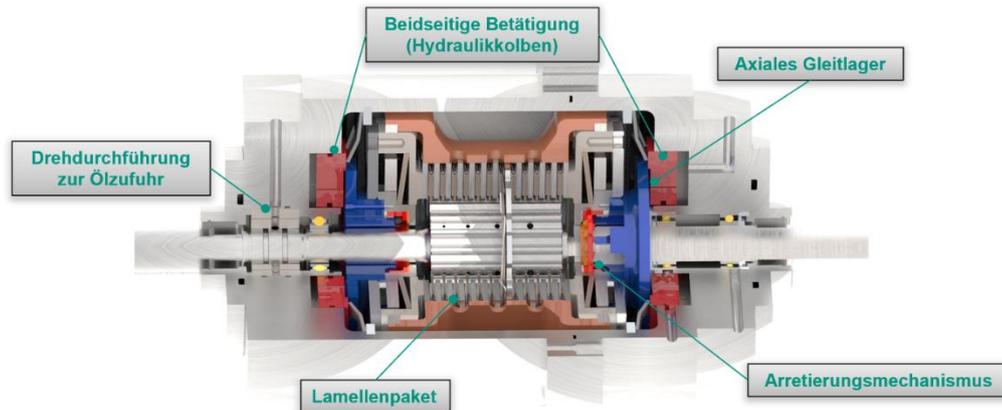
### Abstract:

The shift from internal combustion engine drives to electric motor drives is progressing, with an emerging trend toward high-speed electric motors. Previous research has shown that increasing the speed to 30,000 rpm can significantly increase the power density of traction drives. A multispeed transmission is then used to cover the power requirements at the wheel. As part of a consortium project, a powershift-capable high-speed clutch was developed which enables gear changes in a corresponding transmission. This paper deals with the investigation of the disengagement system of this high-speed clutch. Ensuring the operability of the actuation system of the high-speed clutch is the primary objective of the investigation. The release element is of central importance for the actuation of the clutch. Under the conditions outlined above, an axial plain bearing was developed as a release element. For its examination an investigation configuration was developed and set up, which now enables performing tests of the sliding bearing at up to 20,000 rpm with targeted setting of different pressures. These two variables were varied to create stress collectives with which the plain bearing was subjected. Criteria for evaluating the release bearing behavior and condition in operation are defined, which are collected by monitoring the temperature in the sliding contact or also by optical tests. In this way, sensitivities of the configurations can be determined experimentally and it can be shown that cooling channels have a positive influence with regard to the defined criteria. The authors show that axial plain bearings are suitable in principle as disengaging elements in high-speed clutch systems, thus saving not only installation space but also costs compared with conventional disengaging bearings with rolling elements.

### Einleitung

Der Wandel von verbrennungsmotorischen Antrieben hin zu elektromotorischen schreitet weiter voran. Elektromotoren arbeiten dabei zur Steigerung der Leistungsdichte meist in signifikant höheren Drehzahlbereichen als Verbrennungsmotoren. Dadurch ergeben sich aufgrund der entstehenden Fliehkräfte höhere Anforderungen an die Drehzahlfestigkeit aller Komponenten im Antriebsstrang. Auch stellen Schmierungs-, Lager- und Dichtungskonzepte bspw. im Getriebe eine besondere Herausforderung dar. In aktuellen Forschungsvorhaben werden Antriebssysteme mit maximaler Drehzahlen der Elektromotoren mit bis zu 50.000 1/min untersucht [1]. Dadurch kann die Baugröße der elektrischen Maschine bei gleicher Leistung reduziert werden und somit die Leistungsdichte erhöht werden. Konventionelle Antriebsstränge elektrischer Fahrzeuge sind meist starr übersetzt, sprich sie besitzen nur einen Gang. Jedoch führen immer weiter steigende Anforderungen an eine hohe Zugkraft und eine hohe Endgeschwindigkeit in allen Fahrzeugklassen zum Bedarf leistungsstärkerer Antriebe. Durch die starre Übersetzung kann jedoch nur eine der beiden Anforderungen (bei gleichbleibender Leistung) erfüllt werden, wodurch es zum Zielkonflikt kommt. Um dem entgegenzuwirken, kann ein Mehrganggetriebe mit bspw. zwei oder drei Gängen eingesetzt werden. So kann im ersten Gang (hohe Übersetzung) mit hoher Zugkraft angefahren werden und im zweiten Gang (niedrige Übersetzung) eine hohe Endgeschwindigkeit erreicht werden [2]. Um den Gangwechsel zu realisieren, bedarf es einer lastschaltfähigen Kupplung. An diese Kupplung werden

aufgrund der hohen Drehzahl von bis zu 30.000 1/min im Vergleich zu konventionellen Kupplungen besondere Anforderungen gestellt. Dies betrifft bspw. das Dichtungskonzept, das Kühlkonzept und die Drehzahlrobustheit in Bezug auf Unwuchten. Gemeinsam mit Partnern der Industrie entwickelte das IPEK eine Kupplung, welche die Anforderungen zum Gangwechsel unter hohen Drehzahlen in einem Elektrofahrzeug erfüllt [3], [4].



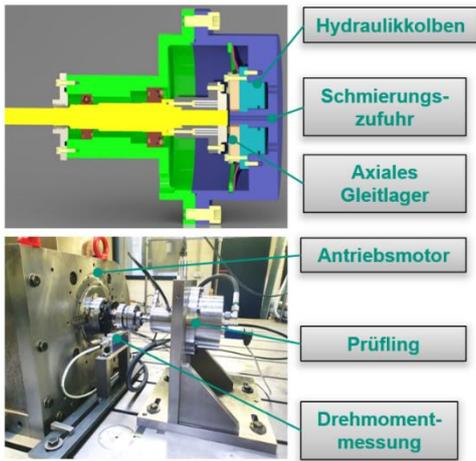
**Abbildung 1** Schnittbild der HighSpeedClutch

Die Hochdrehzahlkupplung, welche in **Abbildung 1** zu sehen ist, ist eine nasslaufende Lamellenkupplung, welche sich durch eine kompakte radiale Bauweise auszeichnet. Um dennoch ein ausreichend hohes Drehmoment übertragen zu können, werden 13 Stahl- und 12 Reiblamellen eingesetzt, wodurch sich 24 Reibpaarungen ergeben. Um die aufgrund der hohen Anzahl an Lamellen entstehenden Axialkraftverluste in der Mitnehmerverzahnung zu minimieren, wird die Kupplung beidseitig betätigt. Die Betätigung zeichnet sich durch einen speziellen Arretierungsmechanismus aus, der einem Kugelschreiber nachempfunden ist.

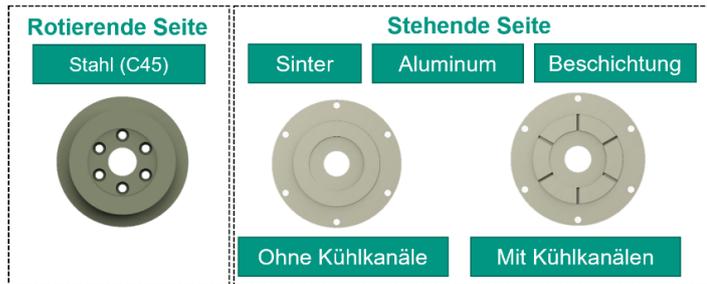
Betätigungsenergie wird nur benötigt, um zwischen den Zuständen „offen“ und „geschlossen“ zu wechseln. Diese Betätigungskraft wird durch einen Hydraulikkolben wie in **Abbildung 1** zu sehen in das System eingeleitet. Die Betätigungszeit der Kupplung liegt bei ca. 0,5 ms. In dieser Zeit kommt es zum Kontakt zwischen dem drehenden Teil (Welle) und dem stehenden Teil (Hydraulikkolben) der Kupplung. Aufgrund der hohen Relativgeschwindigkeiten und zu übertragenden Betätigungskraft, stellt das axiale Gleitlager eine kritische Stelle in der Konstruktion dar. Deshalb bedarf es einer gesonderten Sicherstellung der Funktion, was das primäre Untersuchungsziel dieses Beitrags ist.

### Untersuchungsumgebung und -gegenstand

Um das Betätigungssystem der HSC zu untersuchen, wird eine eigens entwickelte Untersuchungsumgebung gemäß dem IPEK-XiL Ansatz aufgebaut [5]. Die Konstruktion ist in **Abbildung 3** oben zu sehen. Die Prüfstandsmaschine mit der maximalen Drehzahl von 20.000 1/min treibt die Welle an. Sobald die eingestellte Drehzahl erreicht ist, wird eine definierte Kraft über den Hydraulikkolben beaufschlagt und so die Aktuierung der Hochdrehzahlkupplung vorgenommen. Das an der Welle anliegende Drehmoment wird stets über ein Telemetriemesssystem übertragen. Steigt das Drehmoment stark während der Betätigung an, kann davon ausgegangen werden, dass ein direkter Kontakt zwischen den beiden Reibpartnern vorherrscht und der Schmierpalt nicht aufrechterhalten werden kann. Dies wird ebenfalls mit eingebetteten Thermoelementen, welche 1 mm unter der Kontaktzone der stehenden Seite die Temperatur messen erfasst.



**Abbildung 3** CAD Bild der Prüfumbauung (oben) und physischer Prüfstands-aufbau (unten)



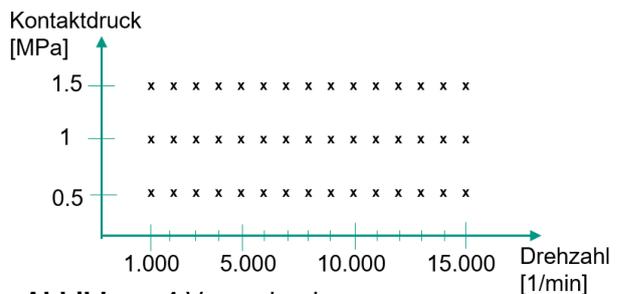
**Abbildung 2** Untersuchungsobjekte mit verschiedenen Materialien und Gestaltmerkmalen

In den Untersuchungen werden verschiedene Gestaltmerkmal (mit/ ohne Kühlkanäle) und verschiedenen Materialien untersucht, um deren Einfluss auf das Systemverhalten zu untersuchen. Auf der rotierenden Seite wird stets ein C45 Stahl eingesetzt. Auf der stehenden Seite wurden die drei Materialien unbeschichtetes Sinter, unbeschichtetes Aluminium und beschichtetes Aluminium eingesetzt.

Ebenfalls wurde auf der stehenden Seite Varianten mit und ohne Kühlkanäle untersucht.

**Versuchsplan**

Die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des Betätigungssystems der Hochdrehzahlkupplung ist das primäre Untersuchungsziel. Deshalb werden verschiedenste Pressungen und Drehzahlen miteinander kombiniert, um je nach Schaltstrategie der Kupplung eine umfassende Betrachtung der Belastungsfälle vorzunehmen. Die maximalen Pressungen leiten sich aus der benötigten Anpresskraft der HighSpeedClutch ab. Die maximalen Drehzahlen von 20.000 1/min stellen die Grenze des Antriebsmotors dar. In vorangehenden Untersuchungen wurden Versuche bis 15.000 1/min durchgeführt [4]. In **Abbildung 4** ist der Versuchsplan zu sehen. Die Anpresskraft und somit der Kontaktdruck wurden für ca. 1 s aufrecht gehalten.

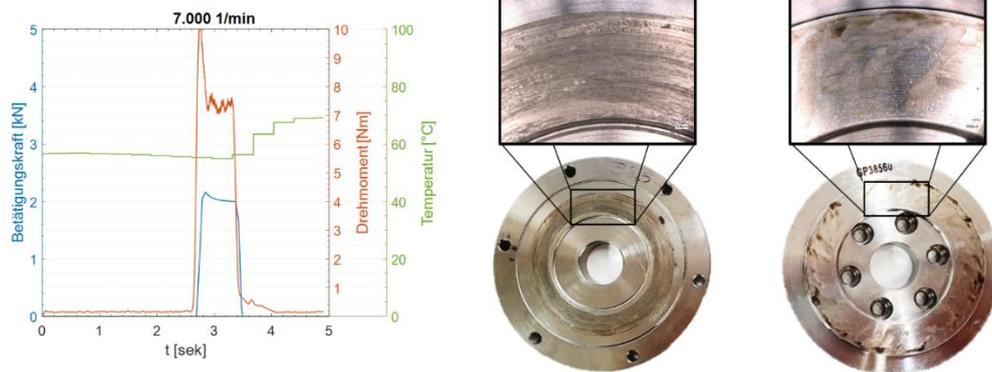


**Abbildung 4** Versuchsplan

Es werden die einzelnen Drehzahl- Kontakt-druckstufen chronisch durchlaufen. Kommt es während der Betätigung zum Anstieg des anliegenden Drehmoments, kann davon ausgegangen werden, dass der Schmierfilm und somit die Flüssigkeitsreibung nicht aufrechterhalten werden kann. Durch die eingebetteten Temperatursensoren sowie die dauerhafte Erfassung des Drehmomentes kann Rückschlüsse auf die Reibung im Kontakt während der Betätigung geschlossen werden. Der Versuch wird abgebrochen, sobald es zum Anstieg des Drehmomentes und der Temperatur kommt.

**Ergebnisse**

Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse am Beispiel einer Materialpaarung (C45 / Sinter) vorgestellt. Dafür wurde der Prüfplan wie in **Abbildung 4** sehen durchlaufen, wobei unten links, sprich bei 0,5 MPa und 1.000 1/min gestartet wurde und die Drehzahl in 1000 1/min Schritten erhöht wurde. In **Abbildung 5** links sind die Zeitverläufe der Betätigungskraft (blau), des anliegenden Drehmoments (orange) und der Temperatur (grün) der letzten Versuchsstufe zu sehen.



**Abbildung 5** Ergebnisse der sintermetallischen Paarung ohne Kühlkanäle (links) und optische Begutachtung (rechts) nach den Versuchen

Es ist zu erkennen, dass es bei Beaufschlagung der Betätigungskraft zum Anstieg des Drehmoments und der Temperatur kommt. Der Versuch wurde bei 7.000 U/min und 1,5 MPa abgebrochen. Die Vermutung liegt nahe, dass der Schmier-spalt nicht aufrecht-erhalten wurde und es zum Festkörperkontakt der beiden Seiten gekommen ist. Dies wird, wie in **Abbildung 5** rechts zu sehen, auch durch die optische Auswertung bestätigt. Es sind thermische Hot Spots auf der rotierenden Seite beobachtbar und abrasives Verhalten auf der stehenden Seite zu erkennen.

### Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird eine Prüfumgebung vorgestellt, in der das Betätigungssystem mit speziellen Anforderungen einer hochdrehenden Kupplung untersucht wird. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass es bei einer geschlossenen Fläche des axialen Lagers zu einem Abriss des Schmier-spalts kommt, was Festkörperkontakt und somit ein frühzeitiger Ausfall des Lagers zur Folge hat. Deshalb bedarf es einer Optimierung der Geometrie. Dafür eignen sich Kühlkanäle in der Lagerfläche, welche eine Erhaltung des Schmier-spalts im Kontakt sicherstellen.

Autoren:

M.Sc. Alexander Sutschet, M.Sc. Arne Bischofberger, Dipl.-Ing. Katharina Bause; Dipl.-Ing. Sascha Ott: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie, Kaiserstr.10, 76131 Karlsruhe  
\*alexander.sutschet@kit.edu

### Literatur

- [1] B. Morhard, D. Schweigert, M. Mileti, M. Sedlmair, T. Lohner, und K. Stahl, *Forsch Ingenieurwes*, S.443–456, 2021, doi: 10.1007/s10010-020-00423-0.
- [2] A. Albers, U. Reichert, S. Ott, and A. Radimersky, Eds., *Software supported development of a Battery Electric Vehicle powertrain considering the efficiency: 16th International VDI Congress – Drivetrain for Vehicles 2016*: VDI-Verlag, 2016.
- [3] H. Gürbüz, S. Ott, und A. Albers, “Entwicklungsansätze für innovative Hochdrehzahlkupplung in E-Fahrzeugen,” in *VDI Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2019*.
- [4] H. Gürbüz, S. Ott, A. Sutschet, und J. Kern, “Highly efficient clutch system for multispeed BEV,” in *VDI-Berichte*, vol. 2373, *20th International VDI Congress Dritev: June 24 and 25, 2020*, VDI Wissensforum GmbH, Ed., Düsseldorf: VDI VERLAG GMBH, 2020, S.119–131.
- [5] A. Albers, M. Behrendt, S. Klingler, und K. Matros, “Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess,” in *Handbuch Produktentwicklung*, U. Lindemann, Ed., München: Carl Hanser Verlag, 2016, S.541–569.