

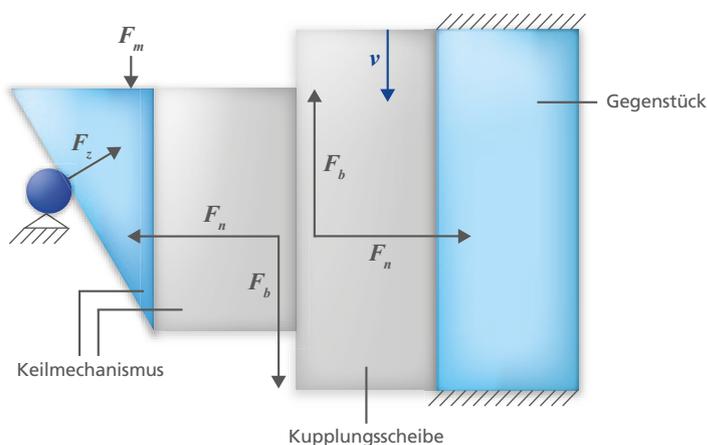
Bisherige Versuche mit Keilkupplungen in Automatikgetrieben scheiterten oft an unschönen Schaltrucken. Forscher der Jiaotong-Universität Shanghai wollen dieses Problem durch einen präzise gesteuerten Elektromotor lösen. Dessen Validierung baut auf Hard- und Software-Werkzeuge von dSPACE.

Der aktuelle Trend der Automobilindustrie zur Elektrifizierung des Antriebsstranges geht auch an den Getrieben nicht spurlos vorbei. In Automatikgetrieben könnten elektrische Aktuatoren beispielsweise die herkömmlicherweise hydraulisch betriebenen Kupplungen ablösen. Zum einen sind elektrische Stellantriebe in der Regel kompakter und leichter als hydraulische, zum anderen können sie die aufgebaute Kraft auch ohne den permanent laufenden Verbrennungsmotor aufrechterhalten. Weil dadurch eine signifikante Menge Kraftstoff gespart werden kann, evaluierten Forscher der Jiaotong-Universität Shanghai (SJTU) kürzlich eine elektrisch betriebene Keilkupplung.

#### Herausfordernde Übergangsphase

Der namensgebende Keil wird dabei zwischen die rotierende Kupplungsscheibe und ein fixiertes Widerlager getrieben (Abbildung 1). Je weiter der Elektromotor den Keil vorantreibt, desto fester wird die Kupplungsscheibe an ihr Gegenstück gepresst. Mit einem unveränderlichen Keilwinkel wird dabei allerdings irgendwann ein kritischer Punkt erreicht, an dem das Verhältnis zwischen der Antriebskraft des elektrischen Stellmotors und der Reibkraft an der Kupplungsscheibe enorm groß wird. Das heißt, schon eine geringe Betätigungskraft kann plötzlich eine sehr große Normalkraft an den Kupplungsscheiben verursachen. Im Getriebeausgangsmoment äußert sich dieser >>

Abbildung 1: Kräfteanalyse an einem vereinfacht dargestellten Keilkupplungsmechanismus. Schon eine geringe Betätigungskraft  $F_m$  kann eine enorm hohe Normalkraft  $F_n$  zwischen den Kupplungsscheiben hervorrufen. Ein daraus entstehender Ruck würde den Fahrkomfort beeinträchtigen.



# Ruckfrei und e-ffizient

Mit einer elektrischen Keilkupplung  
zu mehr Schaltkomfort

D  
-  
N  
-  
Z  
-  
R  
-  
P

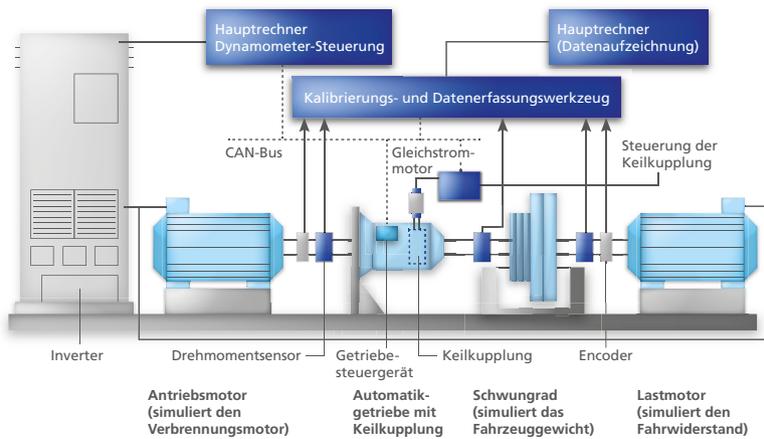


Abbildung 2: Der Dynamometer-Prüfstand simuliert einen Mittelklasse-Pkw zur effizienten Validierung des Keilkupplungssystems.

plötzliche Übergang zwischen „Rutschen“ und vollem Kraftschluss dann in Form eines deutlichen Rucks, der den Fahrkomfort stark beeinträchtigen und damit die Serienchancen der Keilkupplung zunichtemachen würde.

#### Validierung auf dem Prüfstand

Durch eine optimale Steuerung des elektrischen Stellantriebs wollen die

Forscher der SJTU genau das verhindern und es der Keilkupplung ermöglichen, bei niedrigerem Drehmoment und geringen Leistungsverlusten ruckfrei ein- und auszukuppeln. Um die Machbarkeit einer solchen Steuerung, und damit der Keilkupplung selbst, schnell und präzise auf ihrem Dynamometer-Prüfstand zu validieren, setzten die Ingenieure

die dSPACE MicroAutoBox II in Verbindung mit einem sogenannten PID-Regler (Proportional-Integral-Derivative Controller) ein. Dessen Aufgabe ist es, die Schwankungen der Normalkraft an den Kupplungsscheiben binnen weniger Millisekunden zu steuern und so das Schaltverhalten zu optimieren.

#### Simulation eines Mittelklasse-PKW

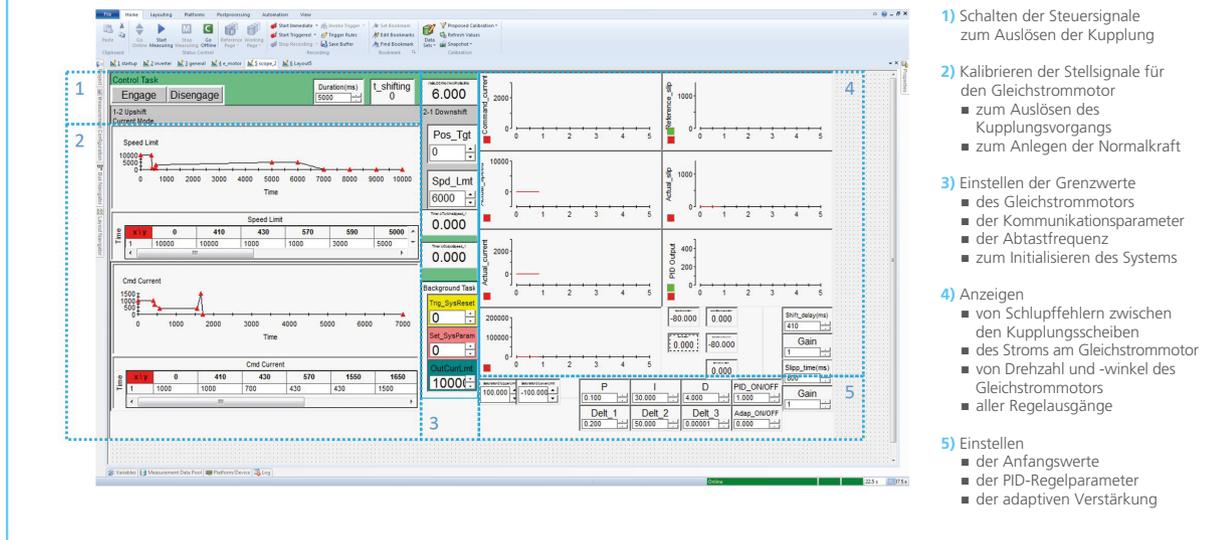
Als Eingangsgröße verwendet der PID-Regler dafür die Abweichung zwischen vorgegebener Soll- und Ist-Normalkraft an der Kupplungsscheibe, auf deren Basis die Spannung des mit Gleichstrom betriebenen Stellmotors als Ausgangsgröße geregelt wird. Diese wird gemeinsam mit dem Drehwinkel in ein entsprechendes Lastmoment auf die Keilkupplung umgesetzt. Letztere ist in die Getriebegehäuse in der Mitte des Dynamometer-Prüfstands (Abbildung 2) eingebaut. Auf deren Antriebsseite emuliert ein schnell ansprechender Elektromotor Pkw-Verbrennungsmotoren mit bis zu 1,6 Liter Hubraum und einem Drehmoment von bis zu 297 Nm bei etwa 6500 U/min. Auf der Abtriebsseite sitzen dagegen ein Schwungrad, das die Massenträgheit eines Mittelklasse-Pkw simuliert, und ein Lastmotor zur Abbildung unterschiedlicher Fahrwiderstände.

#### Adaptive PID-Regler im Einsatz

Durch den Einsatz des PID-Reglers im Closed-Loop-Verfahren ließen sich Schlupfabweichungen zwischen den Kupplungsscheiben der An- und Abtriebsseite in kurzer Zeit auf ein Minimum reduzieren, so dass die Gänge reibungslos wechseln können. Da herkömmliche PID-Regler bei komplexen Fahrbedingungen und variierenden

„Unsere Forscher waren beeindruckt von der nahtlosen Integration der dSPACE Werkzeuge. So konnten sie sich gleich voll auf die Algorithmen-Entwicklung konzentrieren.“

Jian Yao, Jiaotong-Universität Shanghai



- 1) Schalten der Steuersignale zum Auslösen der Kupplung
- 2) Kalibrieren der Stellsignale für den Gleichstrommotor
  - zum Auslösen des Kupplungsvorgangs
  - zum Anlegen der Normalkraft
- 3) Einstellen der Grenzwerte
  - des Gleichstrommotors
  - der Kommunikationsparameter
  - der Abtastfrequenz
  - zum Initialisieren des Systems
- 4) Anzeigen
  - von Schlupffehlern zwischen den Kupplungsscheiben
  - des Stroms am Gleichstrommotor
  - von Drehzahl und -winkel des Gleichstrommotors
  - aller Regelausgänge
- 5) Einstellen
  - der Anfangswerte
  - der PID-Regelparameter
  - der adaptiven Verstärkung

Abbildung 3: ControlDesk Next Generation half den Entwicklern, eine umfangreiche Benutzeroberfläche für die Signalüberwachung und -verwaltung ihrer Testumgebung herzustellen.

Systemparametern instabile Ergebnisse produzieren, verwendeten die Forscher hier adaptive PID-Regler mit arbeitspunktabhängiger Parametersteuerung, um den realen Stellmotor auf dem Prüfstand zu steuern.

### Tests wie unter realen Fahrbedingungen

Die Regelungskonzepte wurden von den Forschern in MATLAB®/Simulink® entwickelt und während des Tests auf einer dSPACE MicroAutoBox II kompiliert und ausgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass der PID-Regler dabei ein sehr robustes Verhalten aufweist und alle Referenzkennlinien beim Ändern der Systemparameter und Fahrbedingungen voll einhält. So konnte das Getriebe wie unter realen Fahrbedingungen gesteuert werden. Neben der MicroAutoBox, deren zahlreiche I/O-Schnittstellen leicht integrierbar waren, profitierte der SJTU-Prüfstand auch von der dSPACE Experimentier- und Visualisierungssoftware ControlDesk® Next Generation.

### Umfangreiche Testinstrumentierung

Mit den zahlreichen Instrumenten von ControlDesk schufen die Forscher der SJTU für ihre Versuchs-

umgebung eine umfassende Benutzeroberfläche für die Signalüberwachung und -verwaltung (Abbildung 3). Damit konnten sie unter anderem die Kalibrierung der Stellsignale für den Gleichstrommotor oder die Einstellung wichtiger Anfangswerte und Parameter des PID-Reglers bequem am Bildschirm vornehmen. Darüber hinaus ließen sich alle wichtigen Signale detailliert wiedergeben und analysieren, von Schlupffehlern zwischen den Kupplungsscheiben über Strom, Drehzahl und -winkel des Gleichstrommotors bis hin zu verschiedenen Regelausgängen.

### Wegbereiter für zukünftige Tests

Vor allem von der nahtlosen Verknüpfung zwischen den dSPACE Werkzeugen und MATLAB/Simulink waren die Forscher der SJTU angezogen. In der Folge konnten sie dem kompakten und robusten Hardware-System voll und ganz vertrauen und sich auf die Algorithmen-Entwicklung konzentrieren. Aufgrund der guten Erfahrungen sind weitere Tests geplant, um die entwickelten Regelalgorithmen zu vervollständigen und einen realen Regler

für die vielversprechende Keilkupplung zu entwickeln. In deren fortschreitender Entwicklung sollen dann auch weitere dSPACE Werkzeuge wie der Seriencode-Generator TargetLink® oder ein Hardware-in-the-Loop (HIL)-Simulator eingesetzt werden. ■

Jian Yao,  
Jiaotong-Universität Shanghai

Jian Yao

Jian Yao ist Doktorand an der Jiaotong-Universität Shanghai (SJTU) und forscht schwerpunktmäßig an der Steuerung von Automatikgetrieben, mit besonderem Augenmerk auf der Elektrifizierung von Aktuatoren und Getrieben.

