

Hardware-in-the-Loop-Prüfstand für den realitätsnahen dynamischen Test von EPS-Motoren und –Steuergeräten

Hardware-in-the-Loop test bench for realistic dynamical testing of EPS-Motors and -ECUs

Emad Farshizadeh, Hermann Henrichfreise, Labor für Mechatronik, Fachhochschule Köln, Institut für Fahrzeugtechnik, 50679 Köln, Deutschland, www.clm-online.de, info@clm-online.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein HiL-Prüfstand zum Test von Motoren und Steuergeräten für elektromechanische Lenksysteme beschrieben. Dabei wird die reale Lenkmechanik durch ein Simulationsmodell ersetzt und für den Motor und das Steuergerät mit Hilfe eines hochdynamisch geregelten HiL-Aktors eine realitätsnahe Testumgebung erzielt. Als HiL-Aktor-Regelung dient eine beobachtergestützte Zustandsregelung mit Erweiterungen zur Kompensation nichtlinearer Eigenschaften des Prüfstands. Damit werden Tests in einer Güte ermöglicht, wie sie mit konventionellen Prüfständen nicht realisierbar ist.

Die realitätsnahe Testumgebung wird durch den Vergleich von Zeitantworten aus der Simulation eines elektromechanischen Lenksystems mit Zeitantworten des realen Prüfstands nachgewiesen.

Abstract

This paper describes a HiL test bench for testing of motors and control units of electrical power steering systems. In this test bench the real steering mechanism is replaced by a simulation model and a realistic testing environment for the motor and control unit is achieved by a highly dynamical controlled HiL actuator. The actuator control consists of an observer-based state space control with extensions for compensation of nonlinear characteristics of the test bench. This allows for a testing quality that can not be achieved with conventional test benches.

The realistic testing environment is proved by comparing time histories from simulation of an electrical power steering system with time histories from the test bench.

1 Einleitung

Im Bereich der Servolenkungen für Personenkraftwagen haben sich in den letzten Jahren elektromechanische Lenksysteme (EPS-Systeme) durchgesetzt. Der Anspruch an Sicherheit und Komfort bei diesen Systemen verlangt sowohl in der Entwicklungsphase als auch für Serienprodukte umfangreiche Tests in einer realen Umgebung. Dabei kommt im Vorfeld zum Fahrversuch immer mehr die Hardware-in-the-Loop-Simulation (HiL-Simulation) zum Einsatz. Zu diesem Zweck hat das Kölner Labor für Mechatronik (Cologne Laboratory of Mechatronics, CLM) einen hochdynamischen HiL-Prüfstand für den Test von EPS-Motoren und -Steuergeräten entwickelt. Dieser schafft abhängig von der Komplexität des verwendeten Modells für die Lenkmechanik eine realitätsnahe Testumgebung und bietet darüber hinaus eine Vielzahl an Erweiterungsmöglichkeiten.

2 HiL-Prüfstand

Bild 1 zeigt ein EPS-System, bestehend aus dem EPS-Motor mit -Steuergerät und der Lenkmechanik. Bei der dargestellten Systemanordnung wird das

Unterstützungsmoment des EPS-Motors über ein Getriebe auf die Zahnstange übertragen.

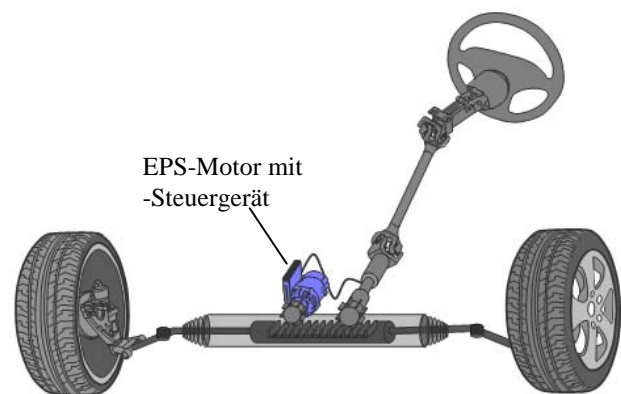


Bild 1 EPS-System

Die sicherheitsrelevanten und zu optimierenden Komponenten des EPS-Systems sind insbesondere der Motor und das Steuergerät mit der entsprechenden Funktionssoftware. Diese sind demnach umfangreichen und möglichst realen Tests zu unterziehen. Dazu werden beide, wie in Bild 2 auf der linken Seite dargestellt, als Hardware in den HiL-Prüfstand integriert.

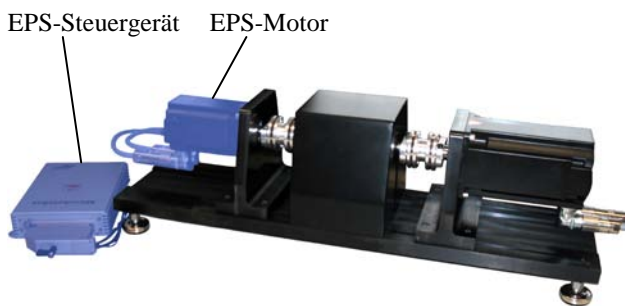


Bild 2 Aufbau des HiL-Prüfstands

Als weitere Komponenten enthält der Prüfstand einen HiL-Aktor, Bauteile zur Drehmomentenübertragung und Sensorik. Die fehlende reale Lenkmechanik wird durch ein detailliertes mathematisches Modell berücksichtigt, das alle für den Test des EPS-Motors und -Steuergeräts relevanten Eigenschaften beinhaltet. Dieses Modell wird auf einem dSPACE-Simulator in Echtzeit ausgeführt. Die beim realen EPS-System auftretenden Schnittgrößen am EPS-Motor werden durch den hochdynamisch geregelten HiL-Aktor eingestellt, so dass dem EPS-Motor die Anbindung an die reale Lenkmechanik vermittelt wird. Um dies zu gewährleisten, müssen die im Prüfstand verwendeten Komponenten besondere Anforderungen erfüllen. Dazu zählen unter anderem geringe Massenträgheitsmomente sowie eine geringe Reibung und geringe Ungleichförmigkeiten im HiL-Aktor. Letzteres wird durch zusätzliche regelungstechnische Maßnahmen unterstützt. Ferner weisen die Sensorsignale eine hohe Güte auf und die Sensor- sowie Aktorschnittstellen enthalten vernachlässigbar geringe Totzeiten. Der HiL-Aktor kann bis zu hohen Lenkwinkelgeschwindigkeiten von 1200 °/s Drehmomente bis zu 30 Nm stellen, wodurch er vielseitig auch für Lenksysteme im Rennsportbereich einsetzbar ist.

Bild 3 zeigt die Struktur des HiL-Prüfstands mit den zuvor beschriebenen Komponenten und deren Zusammenwirken.

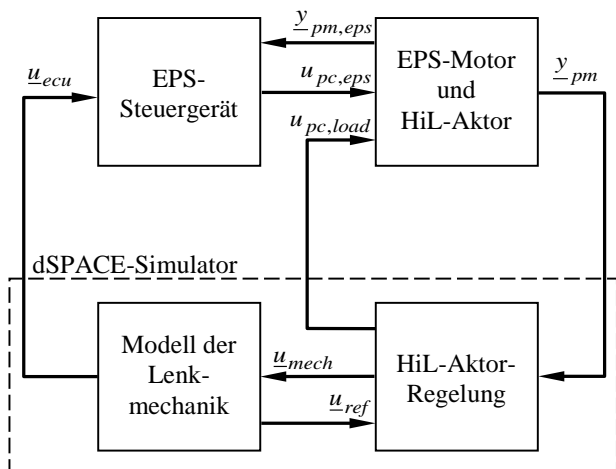


Bild 3 Struktur des HiL-Prüfstands

Auf dem Simulator ist neben dem echtzeitfähigen mathematischen Modell der Lenkmechanik die HiL-Aktor-Regelung implementiert. Diese erzeugt die Stellgröße für den HiL-Aktor und stellt zusätzlich Größen zur Simulation der Lenkmechanik bereit. Letztere wiederum liefert Sollgrößen an die HiL-Aktor-Regelung zurück und die Eingangsgrößen für das EPS-Steuergerät.

3 HiL-Aktor-Regelung

Für die Zielsetzung, dem EPS-Motor und -Steuergerät eine reale Testumgebung zu vermitteln, ist eine hohe Regelungsbandbreite erforderlich. Zudem sollen die Regelgrößen trotz Störeinflüssen, wie Reibung am HiL-Aktor und Messrauschen, den vom Modell der Lenkmechanik berechneten Sollgrößen in einem sehr engen Toleranzband folgen. Um diese Ziele zu erreichen, kommt eine beobachtergestützte Zustandsregelung zum Einsatz.

Darüber hinaus wird der Regler um ein nichtlineares Modell zur Rekonstruktion der Rastmomente am HiL-Aktor erweitert. Bild 4 zeigt die entsprechende Regelungsstruktur.

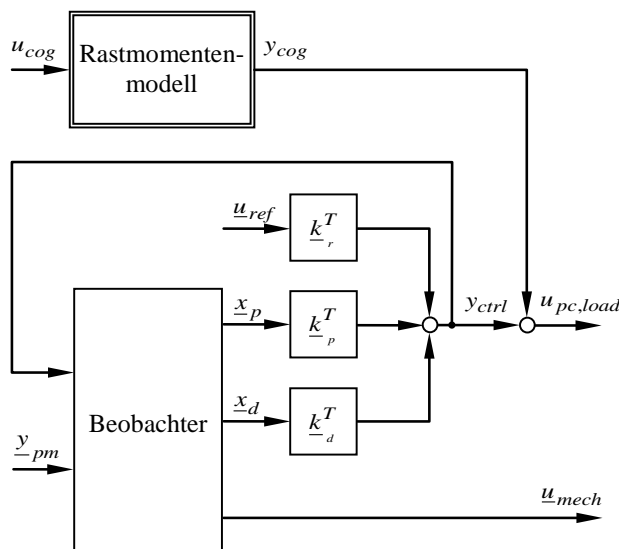


Bild 4 Struktur der HiL-Aktor-Regelung

Die Regelung besteht aus einer statischen Rückführung der geschätzten Zustandsgrößen des HiL-Prüfstands im Vektor \underline{x}_p sowie einer Aufschaltung der Führungsgrößen im Vektor \underline{u}_{ref} und der geschätzten Störgrößen im Vektor \underline{x}_d . Die benötigten Schätzgrößen werden mit Hilfe eines linearen Beobachters aus der Reglerausgangsgröße y_{ctrl} und den Messgrößen im Vektor \underline{y}_{pm} ermittelt. Zusätzlich berechnet der Beobachter Größen im Vektor \underline{u}_{mech} für die Simulation der Lenkmechanik.

Die Regler- und Beobachterverstärkungen werden durch den Entwurf einer optimalen und robusten Regelung nach dem LQG/LTR-Verfahren bestimmt [1], [2].

Zur Kompensation der Rastmomente wird der Ausgang y_{cog} des Rastmomentenmodells auf die Reglerausgangsgröße aufgeschaltet.

4 Ergebnisse aus Simulation und Messung

Für den im Folgenden dargestellten Nachweis der Funktion des entwickelten Konzepts wurde anstelle eines speziellen EPS-Motors ein AC-Synchronmotor mit den Eigenschaften eines typischen EPS-Motors verwendet. Als EPS-Steuergerät diente eine dSPACE MicroAutoBox, auf der als Lenkungsregelung (EPS-Regelung) ein weit verbreiteter Boost-Curve-orientierter Ansatz implementiert wurde.

Bild 5 zeigt Zeitantworten aus der Simulation des EPS-Systems (durchgezogen) und des HiL-Prüfstands (gepunktet) sowie aus dem Experiment mit dem realen HiL-Prüfstand (gestrichelt). Dabei wurde als Führungsanregung eine rampenförmige Lenkwinkeländerung von 90° mit einer Lenkwinkelgeschwindigkeit von $600^\circ/\text{s}$ vorgegeben.

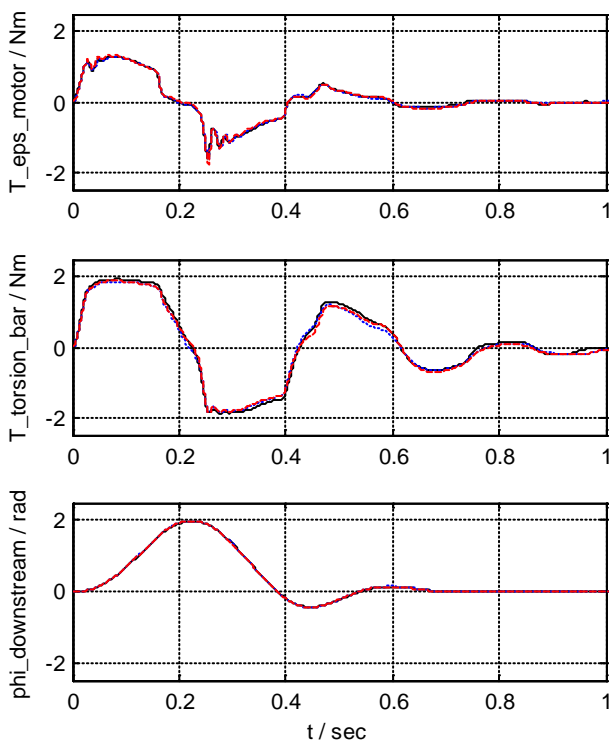


Bild 5 Zeitantworten bei rampenförmiger Führungsanregung, Simulation EPS-System (durchgezogen), Simulation HiL-Prüfstand (gepunktet), realer HiL-Prüfstand (gestrichelt)

Dargestellt sind das EPS-Motormoment, das Torsionsstabmoment und der Winkel am unteren Lenkstrang. Die Zeitantworten aus der Simulation des EPS-Systems sind die Referenzen für die übrigen Verläufe. Diese zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Referenzverläufen.

In einem weiteren Experiment wird das System bei festgehaltenem Lenkrad mit einer Zahnstangenkraft angeregt. Als Verlauf dieser Störangregung wird ein Blockimpuls mit der Amplitude von 15 kN und der Impulsdauer von 0.04 s gewählt. Damit soll das seitliche Anfahren des Vorderreifens eines Fahrzeugs an einen Bordstein nachgebildet werden. Bild 6 zeigt die resultierenden Zeitantworten.

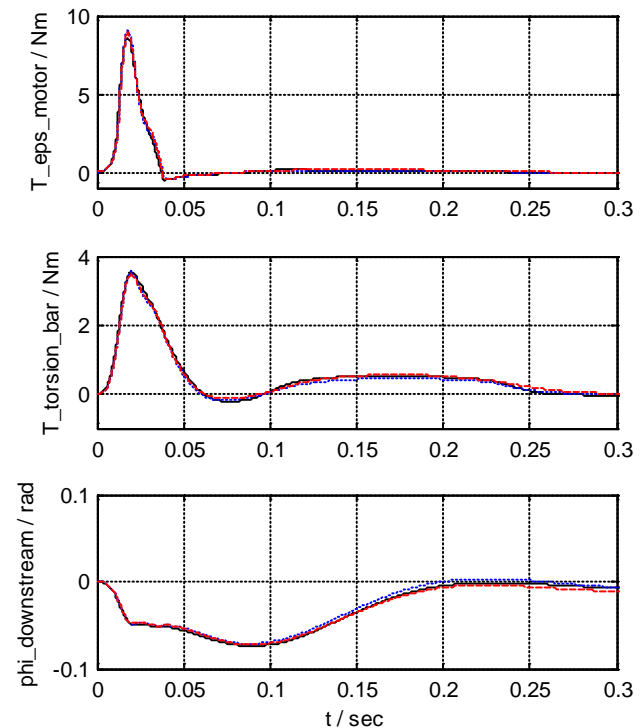


Bild 6 Zeitantworten bei blockförmiger Störangregung, Simulation EPS-System (durchgezogen), Simulation HiL-Prüfstand (gepunktet), realer HiL-Prüfstand (gestrichelt)

Wie bei der Führungsanregung zeigt der HiL-Prüfstand auch hier eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Referenzverhalten.

Eine weitere wichtige Störangregung für EPS-Systeme sind stochastische Zahnstangenkräfte, die zum Beispiel bei der Fahrt auf einer unebenen Fahrbahn auftreten. Zur Nachbildung dieser Anregung wird unter den gleichen Bedingungen wie im vorangegangenen Experiment als Zahnstangenkraft ein gaußverteiltes bandbegrenztetes Rauschen mit einer Standardabweichung von 5000 N und einer Bandbreite von 50 Hz aufgeschaltet. Bild 7 zeigt die entsprechenden Ergebnisse aus der Simulation und vom HiL-Prüfstand.

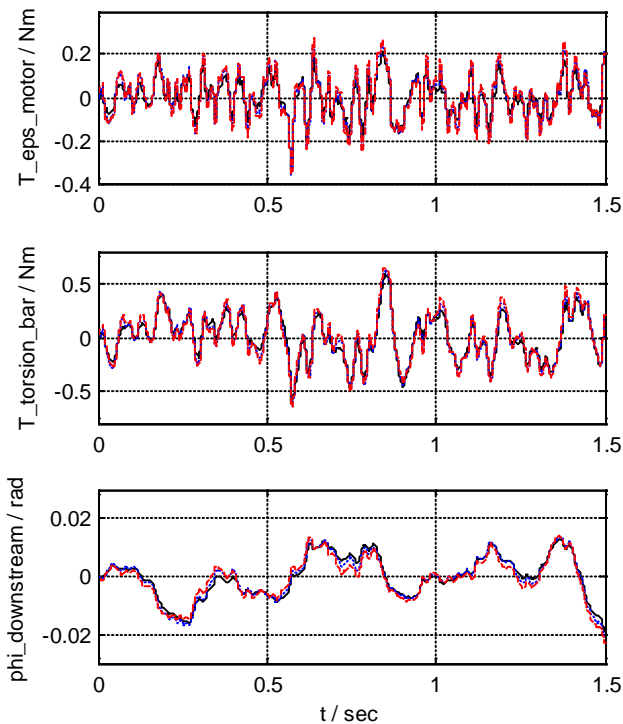


Bild 7 Zeitantworten bei stochastischer Störeregung, Simulation EPS-System (durchgezogen), Simulation HiL-Prüfstand (gepunktet), realer HiL-Prüfstand (gestrichelt)

Auch bei dieser Störeregung mit hochfrequenten Signalanteilen ist eine sehr gute Übereinstimmung der Zeitantworten zu erkennen.

Die mit den vorgestellten Experimenten erzielten Ergebnisse zeigen, dass dem EPS-Motor und -Steuergerät im HiL-Prüfstand unabhängig von der Systemanregung eine realitätsnahe Testumgebung vermittelt wird. Das Verhalten des EPS-Systems wird durch den geregelten HiL-Aktor nicht verfälscht. Damit ermöglicht der HiL-Prüfstand eine detaillierte Analyse der Eigenschaften von Motoren und Steuergeräten und der resultierenden Effekte. Dies soll anhand des nächsten Experiments verdeutlicht werden, bei dem am realen HiL-Prüfstand als Führungsanregung eine rampenförmig Lenkwinkeländerung von 90° mit einer Lenkwinkelgeschwindigkeit von $12^\circ/\text{s}$ vorgegeben wird.

Dabei wird der EPS-Motor mit (durchgezogen) und ohne (gepunktet) Rastmomentenkompensation in der EPS-Reglung betrieben. In Bild 8 sind die zugehörigen Zeitantworten dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bereits ein relativ geringes Rastmoment am EPS-Motor mit einer Amplitude von 0.03 Nm in seiner Wirkung auf das EPS-System (hier an den Zeitantworten des Torsionsstabmoments zu erkennen) im HiL-Prüfstand sichtbar ist und damit untersucht werden kann.

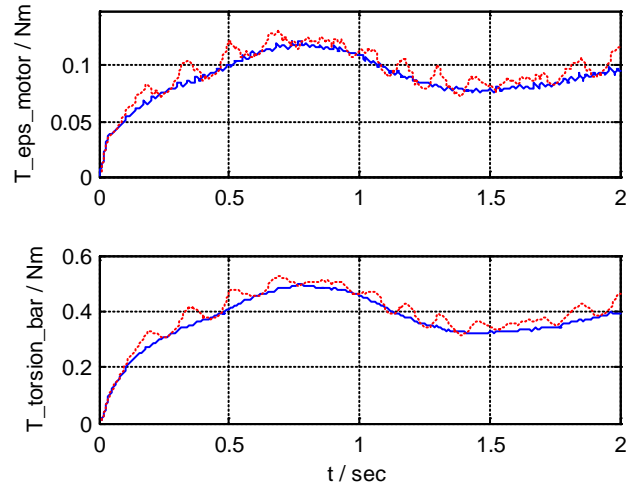


Bild 8 Zeitantworten des realen HiL-Prüfstands mit (durchgezogen) und ohne (gepunktet) Rastmomenten-kompensation am EPS-Motor

5 Anwendungsspektrum

Aus den vorgestellten Ergebnissen wird deutlich, dass sich der entwickelte HiL-Prüfstand besonders für realitätsnahe Tests von EPS-Motoren und -Steuergeräten z.B. in der Fahrdynamiksimulation mit hochdynamischen Fahrmanövern, wie dem Überfahren von Schwellen oder einer Vollbremsung auf unebener Fahrbahn eignet. Dazu ist das Modell der Lenkmechanik in ein echtzeitfähiges Fahrzeugmodell [3] zu integrieren. Bei Verwendung eines Torque-Feedback-Lenkkrads [4], [5] können darüber hinaus die haptischen Eigenschaften einer Serienregelung untersucht werden. Bild 9 zeigt die entsprechende Ausbaustufe des Prüfstands mit dem Fahrzeugmodell und Torque-Feedback-Lenkrad.



Bild 9 HiL-Prüfstand mit Fahrzeugmodell und Torque-Feedback-Lenkrad

Schließlich ermöglicht der HiL-Prüfstand, für ein vorhandenes EPS-Steuergerät übergeordnete Algorithmen für die Fahrdynamikregelung sowie für ein spezielles Lenkgefühl zu entwickeln und bereits vor dem Fahrversuch realitätsnah zu bewerten.

Durch seinen modularen Aufbau ist der Prüfstand für ein weites Spektrum von EPS-Serienmotoren und -Seriensteuergeräten einsetzbar.

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein HiL-Prüfstand für den realitätsnahen dynamischen Test von EPS-Motoren und -Steuergeräten vorgestellt. Im Prüfstand werden die reale Lenkmechanik durch ein Simulationsmodell ersetzt und die Schnittgrößen am EPS-Motor durch einen hochdynamisch geregelten HiL-Aktor eingestellt.

Die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass damit einem EPS-Motor und -Steuergerät abhängig von der Genauigkeit des verwendeten Modells der Lenkmechanik eine reale Testumgebung vermittelt wird.

Durch den hochdynamisch geregelten HiL-Aktor wird das Verhalten der zu testenden Komponenten nicht verfälscht. Somit können auch die Auswirkungen relativ schwacher Phänomene, wie das Rastmoment am EPS-Motor, mit dem HiL-Prüfstand untersucht werden.

Über den Test von EPS-Motoren und -Steuergeräten hinaus, ist der HiL-Prüfstand mit geeigneten Erweiterungen (Fahrzeugmodell, Torque-Feedback-Lenkrad) ebenso für die Entwicklung und Bewertung übergeordneter Algorithmen für die Fahrdynamikregelung sowie eines speziellen Lenkgefühls geeignet.

Das vorgestellte Prüfstandskonzept ist neben dem hier beschriebenen auch für andere Systeme, wie z.B. Bremssysteme mit einem elektromechanisch betätigten Bremskraftverstärker, anwendbar.

7 Literatur

- [1] F. L. Lewis: Applied Optimal Control and Estimation. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.
- [2] H. Henrichfreise: Prototyping of a LQG Compensator for a Compliant Mechanical Drive System with Friction. 1. Workshop TransMechatronik - Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 23, Paderborn 1997.
- [3] S. Klotzbach, T. Herfeld, H. Henrichfreise: Eine flexibel konfigurierbare Modellumgebung für die Fahrdynamiksimulation. AUTOREG 2006, Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren, Wiesloch, 7.-8. März 2006.
- [4] T. Herfeld, H. Henrichfreise, J. Guderjahn, E. Blaj: Hardware-in-the-Loop-Simulation für die Entwicklung von Lenksystemen. 8. Tagung Hardware-in-the-Loop-Simulation 2008, Kassel, 16.-17. September 2008.
- [5] T. Herfeld, J. Guderjahn: Gelenkte Gefühle, HiL-Simulation mit Feedback-Lenkrad für die Entwicklung von Lenksystemen. dSPACE Magazin 1/2010.