

HiL-Simulation für die Entwicklung und den Test von Algorithmen für Lenksysteme

Dipl.-Ing. **Thorben Herfeld**,
DMecS - Development of Mechatronic Systems GmbH & Co. KG, Köln;
Dipl.-Ing. **Jan Guderjahn**, Dipl.-Ing. **Thomas Schubert**,
Prof. Dr.-Ing. **Hermann Henrichfreise**,
CLM - Cologne Laboratory of Mechatronics, FH Köln

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird die Entwicklung von Algorithmen für elektromechanische Lenksysteme beschrieben. Diese Algorithmen erzeugen für ein momentengeregeltes Lenksystem aus verschiedenen fahrdynamischen Größen, wie Reifenkräften oder Schräglaufwinkeln, die Sollgröße für das dem Fahrer vermittelte Lenkmoment. Die Algorithmen sind somit für das wahrgenommene Lenkgefühl verantwortlich und können des Weiteren den Fahrer in kritischen Fahrsituationen unterstützen.

Für die Entwicklungsarbeit kommt ein HiL-Prüfstand mit Feedback-Lenkrad zum Einsatz. Dieser HiL-Prüfstand wird aufgrund der haptischen Rückmeldung an den Fahrer für die konzeptionelle Entwicklung und Vorabstimmung der Algorithmen genutzt. Damit werden aufwendige Tests vom Fahrversuch in die frühere Entwicklungsphase der Simulation verlagert.

1. Einleitung

Stetig steigende Ansprüche an Energieeffizienz, Komfort und Sicherheit sind die treibenden Kräfte in der Entwicklung mechatronischer Systeme im Kraftfahrzeug. Diese Anforderungen gelten besonders für den Bereich der Lenksysteme. Hier setzen sich zunehmend elektrische Servolenkungen (electric power steering, EPS) durch, die in ihrer Funktionalität durch den Einsatz von Software (Steuerung und Regelung) ständig erweitert werden.

Ein solches EPS-System bietet gegenüber einer konventionellen Lenkung den Vorteil, dass ein gewünschtes Lenkmoment und damit das Lenkgefühl über einen geeigneten Algorithmus eingestellt werden kann. Der Algorithmus kann dabei z.B. auf Größen der fahrdynamischen Situation wie Lenkwinkel, Fahrzeuggeschwindigkeit oder Reifenkräfte zurückgreifen.

Für eine effiziente Entwicklung solcher Algorithmen kommt in diesem Beitrag ein HiL-Prüfstand mit einem Feedback-Lenkrad zum Einsatz [1]. Dieses Feedback-Lenkrad ermöglicht aufgrund der haptischen Rückmeldung eine Analyse der Akzeptanz des vermittelten Lenkgefühls durch den Entwickler. Eine Vorabstimmung des Lenkgefühls erfolgt somit bereits am HiL-Prüfstand vor der Durchführung von Fahrversuchen.

2. HiL-Prüfstand für Lenksysteme

Bild 1 zeigt die Struktur des HiL-Prüfstands mit seinen Komponenten und deren Zusammenwirken.

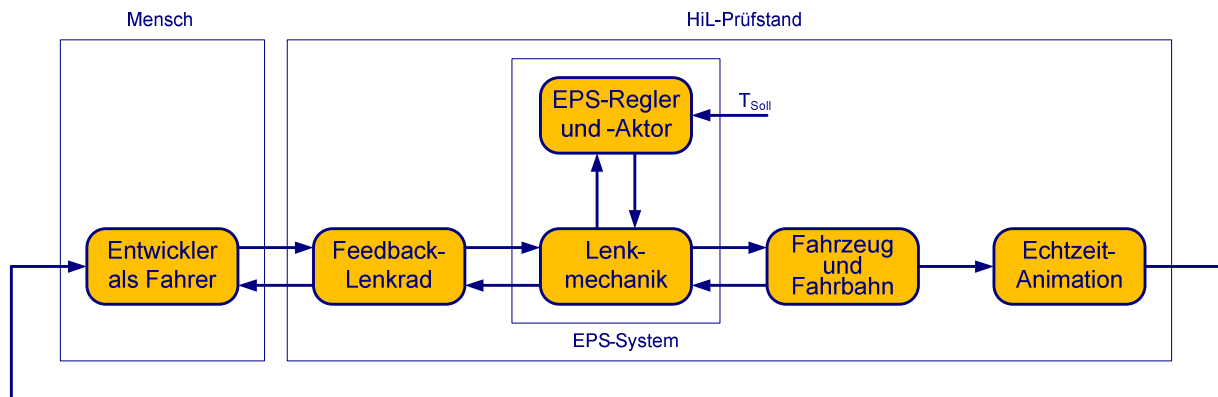


Bild 1: Struktur des HiL-Prüfstands mit Fahrer

Der HiL-Prüfstand besteht aus dem Feedback-Lenkrad als Hardware-Komponente sowie aus Modellen für Fahrzeug und Fahrbahn und für das EPS-System. Diese Modelle sind auf einem dSPACE-Simulator implementiert.

Das Feedback-Lenkrad als Schnittstelle zwischen Mensch und Echtzeitsimulation ermöglicht dem Entwickler über die haptische Rückmeldung die unmittelbare Untersuchung des vermittelten Lenkgefühls. Damit unterstützt der HiL-Prüfstand die Beurteilung des Lenkgefühls und die Formulierung von Anforderungen an das zugehörige Lenkmoment. Das Feedback-Lenkrad basiert auf einem geregelten elektrischen Aktor. Aufgrund der Regelung wirken sich Störungen durch Reibung und Ungleichförmigkeiten, wie sie z.B. durch Rastmomente entstehen, nicht auf das vermittelte Lenkgefühl aus. Zusätzlich erhält der Fahrer eine visuelle Rückmeldung des dynamischen Verhaltens des Fahrzeugs über die Echtzeitanimation.

Für Fahrzeug und Fahrbahn kommt ein Modell aus dem Virtual Automotive Environment [2] zum Einsatz. Das Modell für die Lenkmechanik des EPS-Systems berücksichtigt sämtliche sich auf das Lenkmoment auswirkende Effekte. Der verwendete EPS-Regler stellt unabhängig von den auf das Lenksystem wirkenden äußeren Kräften und Momenten über den EPS-Aktor ein Lenkmoment für den Fahrer ein [3]. Sollwerte T_{Soll} für dieses Lenkmoment können mit Hilfe von geeigneten Algorithmen erzeugt werden.

In Bild 2 ist der HiL-Prüfstand im Einsatz für die Entwicklung solcher Algorithmen zu sehen.



Bild 2: HiL-Prüfstand im Entwicklungseinsatz

3. Algorithmen für Lenkgefühl

In [4] wird ein Algorithmus vorgestellt, mit dem ein Lenkgefühl ähnlich einer hydraulischen Servounterstützung vorliegt. Dieser Algorithmus wird hier bei geringen Fahrzeuggeschwindigkeiten zur Vermittlung eines Grundlenkgefühls genutzt.

Für höhere Fahrzeuggeschwindigkeiten kommt in diesem Beitrag ein alternativer Ansatz zur Anwendung. Der zugehörige Algorithmus erzeugt ein Solllenkmoment aus den Reifenseitenkräften an den Vorderrädern, da diese wesentliche Größen für die Rückmeldung der Fahrbahnverhältnisse an den Fahrer darstellen [5]. Mit diesen Kräften und einem synthetischen Nachlauf wird ein die Lenkung zentrierendes Moment berechnet, aus dem mit Hilfe von Kennlinien ein Solllenkmoment für den Fahrer erzeugt wird. Der synthetische Nachlauf und damit das mittenzentrierende Verhalten der Lenkung kann dabei abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit variiert werden.

Bild 3 zeigt für einen doppelten Fahrspurwechsel die Summe der Reifenseitenkräfte an den Vorderrädern und den Verlauf des zugehörigen Solllenkmoments für einen synthetischen Nachlauf im Vergleich zum Solllenkmoment der EPS-Regelung aus [4] ohne synthetischen Nachlauf.

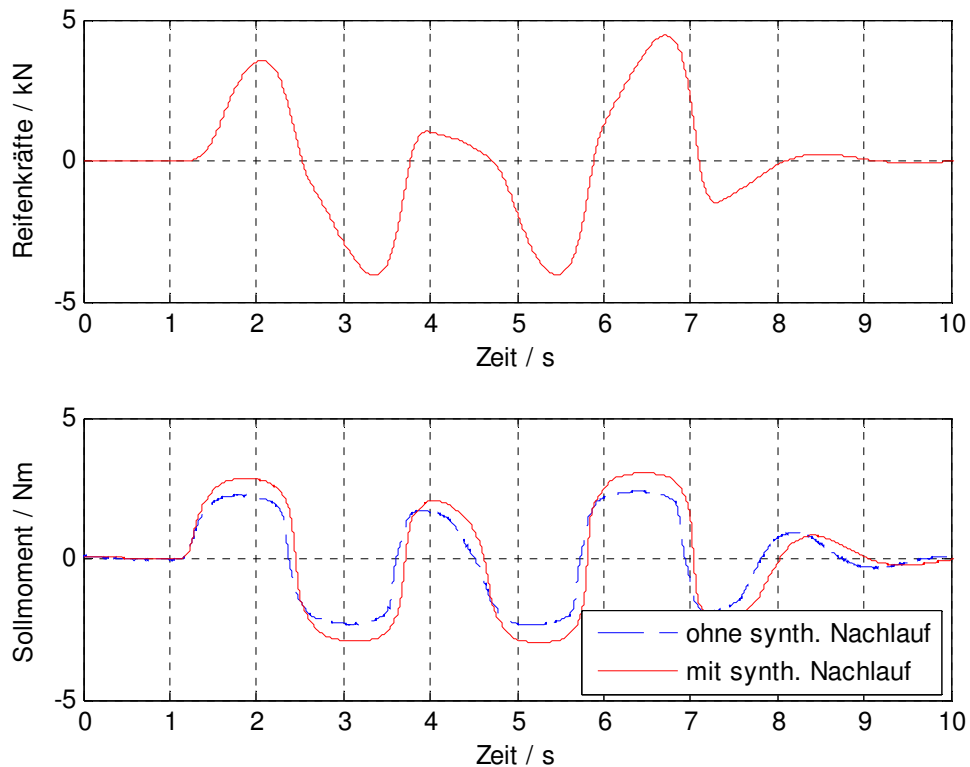


Bild 3: Summe der Reifenseitenkräfte und Solllenkmomente für einen doppelten Fahrspurwechsel

Weiterhin können Algorithmen für eine gezielte Beeinflussung der fahrdynamischen Situation über ein bestimmtes Solllenkmoment genutzt werden. Dazu wurde für das betrachtete EPS-System ein Algorithmus entwickelt, der den Fahrer in fahrdynamisch kritischen Situationen über ein entsprechendes Lenkmoment warnen und unterstützen soll. Der Algorithmus wertet fahrdynamische Größen wie Schräglaufwinkel und Fahrzeuggeschwindigkeit aus und erzeugt bei Erkennen des Beginns eines Schleuderzustands ein zusätzliches Solllenkmoment zur Stabilisierung des Fahrzeugs. Die Akzeptanz eines solchen Lenkmoments durch den Fahrer ist von mehreren Kriterien abhängig. Das erzeugte Moment muss unabhängig von der Reaktion des Fahrers, so auch beim Loslassen des Lenkrads, dazu beisteuern, den Fahrzustand zu stabilisieren. Des Weiteren ist ein solcher Eingriff so auszulegen, dass der Fahrer stets die Kontrolle über das Fahrzeug behält und nicht durch sich zu schnell oder un stetig ändernde und zu hohe Lenkmomente irritiert wird. Ebenso ist es wichtig, das Solllenkmoment abzuschwächen, wenn der Fahrer bereits selbst eine stabilisierende Lenkreaktion einleitet, sowie das Moment zu verstärken, wenn er destabilisierend reagiert. Der Eingriff muss dabei zu jeder Zeit vom Fahrer überstimmt werden können. Nach Stabilisierung des Fahrzustands wird das zusätzliche Sollmoment wieder ausgeblendet.

An den Zeitverläufen in Bild 4 erkennt man den stabilisierenden Einfluss des geschilderten Lenkeingriffs. Das Fahrzeug beginnt auf regennasser Fahrbahn bei etwa einer Sekunde und einer

Geschwindigkeit von 100 km/h zu übersteuern. Der Lenkeingriff durch den Algorithmus erfolgt bei einem freien Lenkrad.

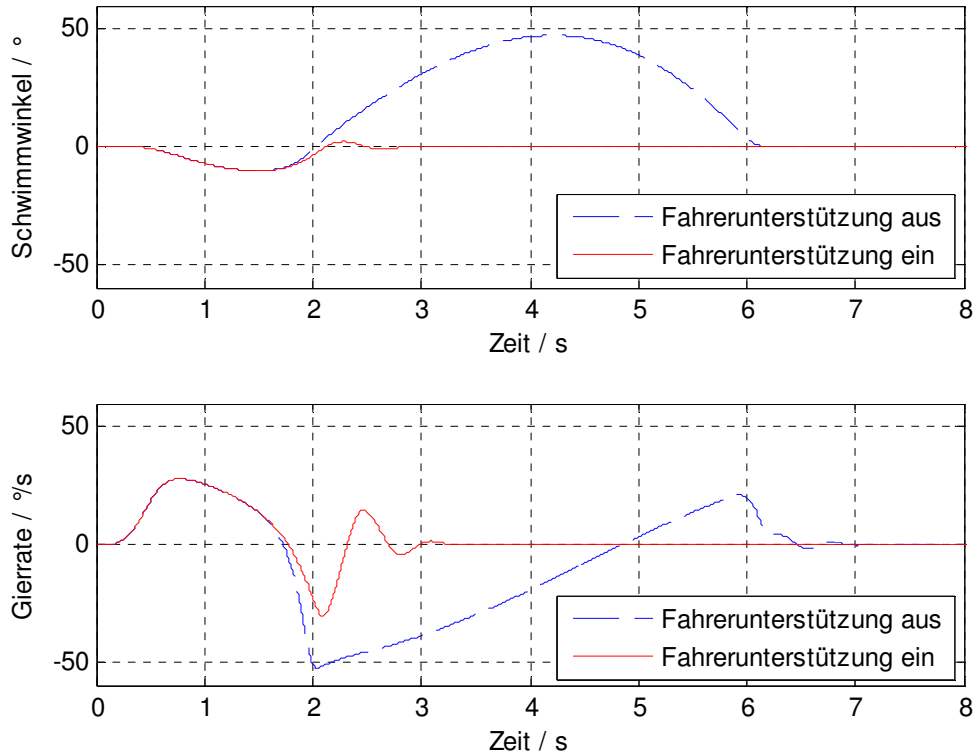


Bild 4: Schwimmwinkel und Gierrate während einer fahrdynamisch kritischen Situation

Ein Ausbrechen des Fahrzeugs wird durch den Lenkeingriff vermieden und das Fahrzeug befindet sich bereits nach etwa zwei Sekunden wieder in einem stabilen Fahrzustand.

Bild 5 zeigt den Zeitverlauf des zugehörigen vom Algorithmus erzeugten stabilisierenden Solllenkmoments.

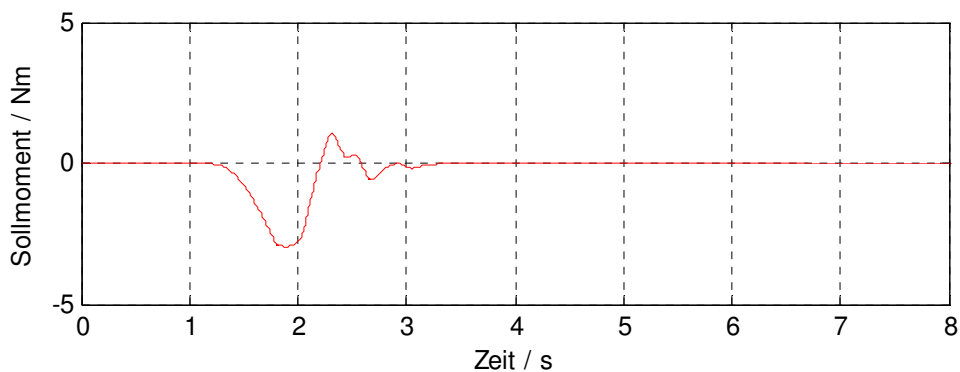


Bild 5: Solllenkmoment zur Stabilisierung einer fahrdynamisch kritischen Situation

Jeder der oben vorgestellten Algorithmen erzeugt ein eigenes Solllenkmoment $T_{\text{Soll,Alg } i}$. In Bild 6 ist deren Zusammenführung zu einem resultierenden Solllenkmoment für den Fahrer abhängig von der fahrdynamischen Situation dargestellt. Dies geschieht mit Hilfe eines Mischers durch die Bildung einer variabel gewichteten Summe der einzelnen Solllenkmomente. Auf diese Weise wird das resultierende Lenkmoment kontinuierlich an die jeweilige Fahrsituation angepasst.

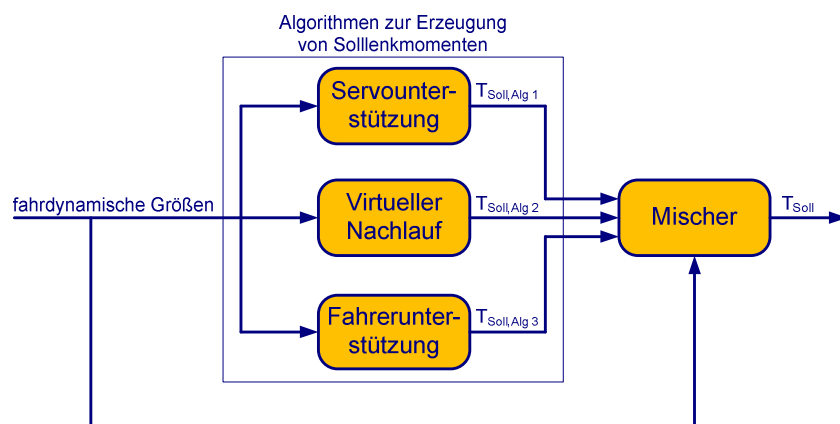


Bild 6: Erzeugung des resultierenden Solllenkmoments

Der Struktur in Bild 6 können leicht weitere Algorithmen für Solllenkmomente hinzugefügt werden.

4. HiL-gestützte Vorabstimmung der Algorithmen

Das mit Hilfe des Feedback-Lenkrads vermittelte Lenkgefühl wird vom Entwickler bewertet und durch Anpassen von Struktur, Kennlinien und Parametern der Algorithmen in einem iterativen Prozess für geeignete Fahrstrecken und Fahrmanöver optimiert. Dies betrifft zum einen die Lenkunterstützungen für niedrige und hohe Fahrzeuggeschwindigkeiten sowie die Charakteristik für den geschwindigkeitsabhängigen synthetischen Nachlauf. Sie werden am HiL-Prüfstand erarbeitet und auf das jeweilige Fahrzeug und die verwendete Lenkung abgestimmt. Darüber hinaus wird der Algorithmus für den stabilisierenden Lenkeingriff so ausgelegt, dass er die oben beschriebenen Anforderungen an das erzeugte Solllenkmoment und das damit vermittelte Lenkgefühl erfüllt. Schließlich sind noch die Gewichtungen für den Mischer auszulegen.

Um zusätzlich den Einfluss von Realisierungseffekten auf die Funktion der Algorithmen und das Lenkgefühl zu analysieren, werden sukzessive verschiedene Ausbaustufen des HiL-Prüfstands realisiert.

Das Ziel der ersten Ausbaustufe ist die Sicherstellung der grundlegenden Funktionalitäten unter idealen Bedingungen. Dazu werden den Algorithmen alle benötigten Größen, wie Reifenkräfte und Schräglaufwinkel, direkt vom Fahrzeugmodell zur Verfügung gestellt.

In der zweiten Ausbaustufe des HiL-Prüfstands wird ein Fahrdynamikbeobachter [6] zur Ermittlung nicht gemessener Größen eingesetzt. Die Struktur des HiL-Prüfstands mit der entsprechenden Erweiterung des EPS-Systems ist in Bild 7 dargestellt.

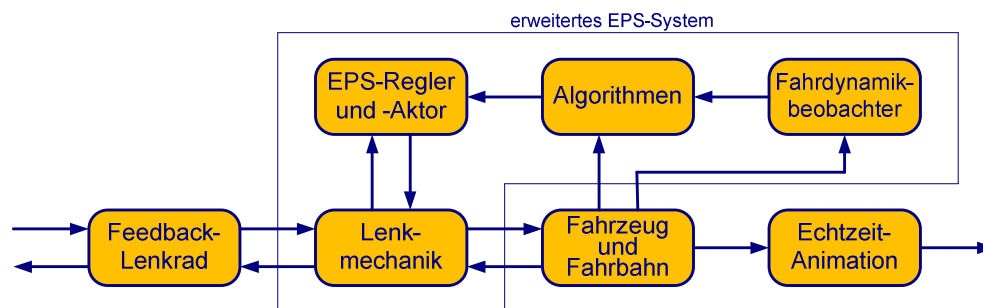


Bild 7: Struktur des HiL-Prüfstands mit erweitertem EPS-System

Der hier eingesetzte Fahrdynamikbeobachter verwendet anstelle von Reifenmodellen sogenannte Signalmodelle für die Reifenkräfte. Damit werden vor allem die Reifenkräfte unabhängig von den tatsächlichen Reifen- und Fahrbahnverhältnissen immer gut geschätzt. Zusätzlich sind in den Echtzeitmodellen des HiL-Prüfstands für die Messgrößen Rauschprozesse, Offsets, Quantisierung und Laufzeiten nachgebildet und die betrachteten Algorithmen diskret realisiert. Damit werden die Auswirkungen der damit verbundenen Realisierungseffekte auf das erzeugte Lenkgefühl untersucht und ggf. durch Anpassungen der Algorithmen abgeschwächt.

Die in Bild 8 gezeigte dritte Ausbaustufe sieht die Auslagerung des EPS-Reglers mit seinen Erweiterungen für die Erzeugung von Solllenkmomenten aus Bild 7 auf ein externes Steuergerät vor. Damit werden schließlich alle verbleibenden Realisierungseffekte durch Serienhardware und Seriensoftware, z.B. durch eine Implementierung mit Festkomma-Arithmetik, in die Analyse und Abstimmung der Algorithmen einbezogen.

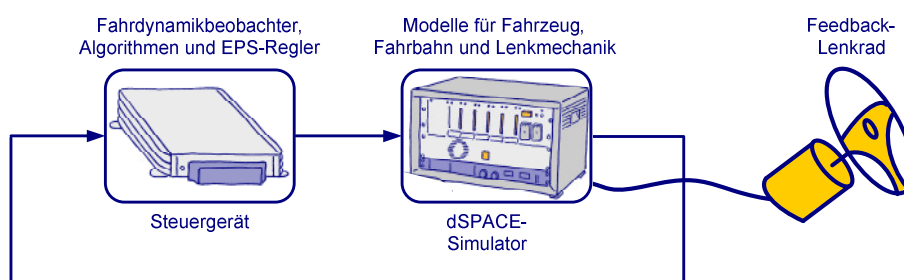


Bild 8: HiL-Prüfstand mit externem Steuergerät

Mit dieser Ausbaustufe erfolgt die letzte Abstimmung der Algorithmen und des resultierenden Lenkgefühls vor dem Fahrversuch. Das Ergebnis ist ein gut vorabgestimmtes Lenksystem, das im Fahrversuch lediglich noch feinabzustimmen ist.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die beschriebene Anwendung für ein Lenksystem zeigt, dass der Einsatz eines HiL-Prüfstands bei der frühen konzeptionellen Entwicklung von Funktionen zu einer verbesserten Produktqualität und kürzeren Entwicklungszeit beitragen kann. Neue Konzepte für Algorithmen können schon sehr früh in der Entwicklung auch hinsichtlich ihrer Akzeptanz durch den Fahrer realistisch getestet und bewertet werden. Durch die modellbasierte Analyse und Synthese unter Berücksichtigung des haptischen Verhaltens des Lenksystems wird ein gut vorabgestimmtes System entwickelt. Der Abstimmungs- und Testaufwand im Fahrversuch wird damit reduziert. Das System ist nach der Realisierung im Fahrzeug nur noch feinabzustimmen.

Über die Entwicklung von Lenksystemen hinaus kann die gezeigte Vorgehensweise mit dem Einsatz geeigneter HiL-Prüfstände zur Vorabstimmung eines gewünschten Gefühls auf unterschiedliche Systeme, in denen eine haptische Rückmeldung vorliegt, übertragen werden. Dazu zählen zum Beispiel Bremssysteme oder im Flugzeugbau verwendete Sidesticks und Pedale mit Krafrückkopplung.

Literatur

- [1] Herfeld, T., Henrichfreise, H., Guderjahn, J., Blaj, E.: Hardware-in-the-Loop-Simulation für die Entwicklung von Lenksystemen. 8. Tagung HiL-Simulation, Kassel, 16.-17. September 2008
- [2] Klotzbach, S., Herfeld, T., Henrichfreise, H.: Eine flexibel konfigurierbare Modellumgebung für die Fahrdynamiksimulation. AUTOREG 2006, S. 259-270, Wiesloch, 07.-08. März 2006
- [3] Henrichfreise, H., Jusseit, J., Niessen H.: Optimale Regelung einer elektromechanischen Servolenkung. 5. VDI-Tagung Mechatronik 2003, S. 381-400, Fulda, 7.-8. Mai 2003
- [4] Graßmann, O., Henrichfreise, H., Niessen, H., v. Hammel, K.: Variable Lenkunterstützung für eine elektromechanische Servolenkung. 23. Tagung Elektronik im Kfz, Stuttgart, 17.- 18. Juni 2003
- [5] v. Groll, M.: Modifizierung von Nutz- und Störinformationen am Lenkrad durch elektromechanische Lenksysteme. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 630, Düsseldorf, 2006
- [6] Schubert, T., Henrichfreise, H.: Schätzung querdynamischer Größen von Fahrzeugen ohne die Verwendung von Reifenmodellen. www.clm-online.de, FH Köln, 2009