

Variable Lenkunterstützung für eine elektromechanische Servolenkung

O. Graßmann, H. Henrichfreise,
Cologne Laboratory of Mechatronics (CLM), Fachhochschule Köln
H. Niessen, K. v. Hammel,
Mercedes-Benz Lenkungen GmbH (MBL), Esslingen

CLM, Fachhochschule Köln
Betzdorfer Straße 2
50679 Köln

Tel: 0221 8275-2956
Fax: 0221 8275-2957
Email: info@clm-online.de
<http://www.clm-online.de>

Variable Lenkunterstützung für eine elektromechanische Servolenkung

O. Graßmann, H. Henrichfreise, H. Niessen, K. v. Hammel

1 Einleitung

In modernen Fahrzeugen werden konventionelle hydraulische Servolenkungen zunehmend durch elektrohydraulische und elektromechanische Lenkungen ersetzt. Dieser Trend wird durch Forderungen nach mehr Fahrsicherheit und Lenkkomfort sowie der Reduktion von Variantenvielfalt und Kosten bestimmt. Durch aktiven Eingriff in die Lenkung über Elektronik und Informationsverarbeitung kann in modernen Lenksystemen das Lenkgefühl an den Fahrzeugtyp und die jeweilige Fahrsituation angepasst werden. Zudem kann durch höherwertige Funktionen wie automatisches Einparken, Spurhalten sowie durch Überlagerung eines zusätzlichen Lenkwinkels eine Verbesserung von Fahrkomfort, Fahrdynamik und Sicherheit erreicht werden.

Die primäre Funktion einer Lenkung besteht in der Querführung des Fahrzeugs [1]. Dabei soll sie dem Fahrer ein sicheres und komfortables Lenkgefühl vermitteln. Ein sicheres Lenkgefühl zeichnet sich durch guten Kontakt zur Fahrbahn aus. Die Komforteigenschaften werden durch das Ansprechverhalten der Lenkung auf den Fahrereingriff bestimmt. Dazu muss das Lenksystem entsprechend der Abstimmung auf sich ändernde Fahrbahneigenschaften und Lenkeingriffe des Fahrers reagieren. Bei elektrohydraulischen und elektromechanischen Servolenkungen ist eine wichtige Forderung die Robustheit des Regelungssystems.

In einem Kooperationsprojekt des Labors für Mechatronik der Fachhochschule Köln (Cologne Laboratory of Mechatronics, CLM) mit der Mercedes-Benz Lenkungen GmbH wurde eine elektromechanische Servolenkung (Electric Power Assisted Steering, EPAS) mit variabler, an den jeweiligen Fahrzustand angepasster Lenkunterstützung entwickelt, welche die oben genannten Forderungen erfüllt. Der Beitrag beschreibt den Aufbau der Lenkung und das verwendete Regelungskonzept. Dabei wird besonders auf die Bereitstellung einer variablen Lenkunterstützung durch die Vorgabe eines angepassten Lenkgefühls eingegangen.

2 Elektromechanische Servolenkung

Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau der entwickelten elektromechanischen Servolenkung für Fahrzeuge mit hohen Zahnstangenkräften, z.B. einer C-Klasse von Mercedes-Benz, und einem Bordnetz mit 42 V Versorgungsspannung.

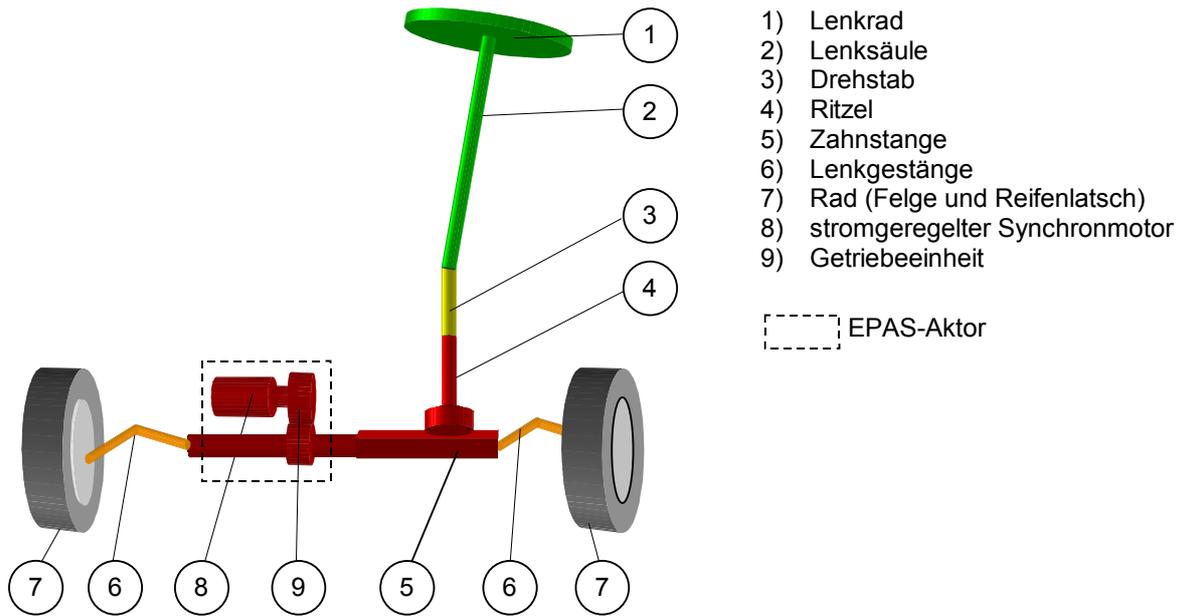


Bild 1: Elektromechanische Servolenkung

Das vom Fahrer am Lenkrad eingeleitete Handmoment wird über die Lenksäule und einen elastischen Drehstab auf ein Ritzel-Zahnstange-System übertragen. Die resultierende Kraft bewegt die Zahnstange und über die beiden Lenkgestänge die Räder. Diese Bewegung wird durch den so genannten EPAS-Aktor unterstützt. Er besteht aus einem stromgeregelten Synchronmotor und einer spielfreien Getriebeeinheit, die das Unterstützungsmoment des Motors in eine Unterstützungskraft an der Zahnstange übersetzt. Die betrachtete Lenkung ist ein schwingungsfähiges System. Der elastische Drehstab bewirkt eine Schwingung mit einer Frequenz von ca. 9 Hz.

Zusammen mit dem EPAS-Regler bildet die vorgestellte Lenkung das so genannte EPAS-System. Dieses ist im folgenden Bild eingebettet in das Fahrer-/Fahrzeugsystem dargestellt.

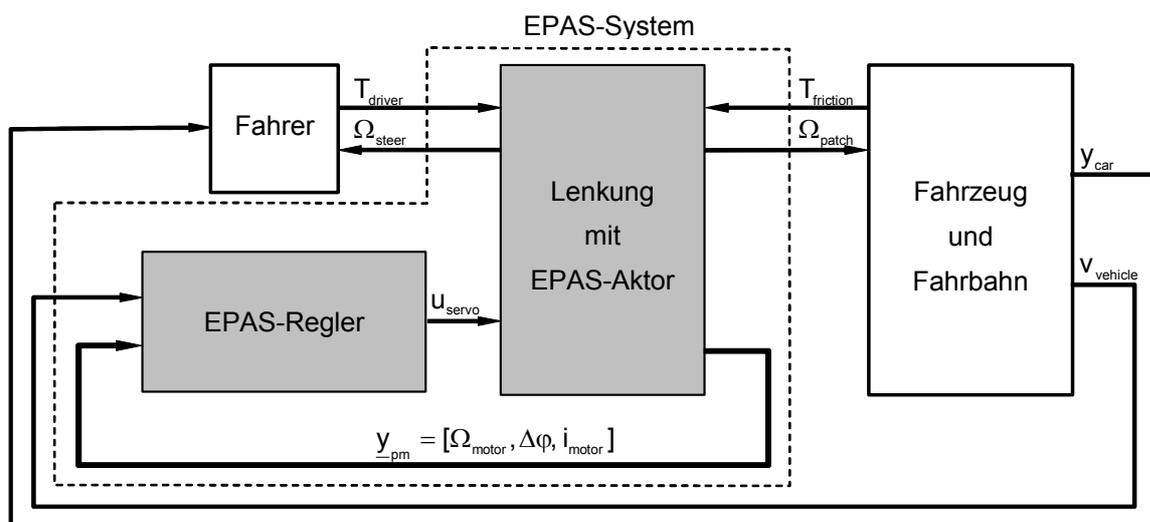


Bild 2: EPAS-System im Fahrer-/Fahrzeugsystem

Die Lenkung ermöglicht dem Fahrer die Querführung und Stabilisierung des Fahrzeugs. Dabei schließt der Fahrer einen äußeren Regelkreis für die Querposition y_{car} des Fahrzeugs auf der Fahrbahn. Die Stellgröße des äußeren Regelkreises ist das vom Fahrer eingeleitete Handmoment T_{driver} . Dieser äußeren Regelung durch den Fahrer ist ein innerer Regelkreis für das EPAS-System unterlagert, in dem der EPAS-Aktor das Unterstützungsmoment für die Servowirkung erzeugt. Die Ansteuerung des EPAS-Aktors erfolgt über eine Spannungsschnittstelle mit der Eingangsspannung u_{servo} für den drehmomentbildenden Motorstrom i_{motor} . Als Messgrößen stehen die Motorwinkelgeschwindigkeit Ω_{motor} , der Verdrehwinkel $\Delta\varphi$ am Drehstab sowie der Strom i_{motor} zur Verfügung.

Für die Querführung des Fahrzeugs ist die Summe der zwischen den Reifenlatschen und der Fahrbahn auftretenden Reibmomente in der Größe $T_{friction}$ durch das Handmoment des Fahrers und das unterstützende Motormoment zu überwinden. Die Regelgröße für den EPAS-Regler ist das Moment T_{sensor} am elastischen Drehstab, das proportional zum Verdrehwinkel $\Delta\varphi$ ist. Es ist bei konstantem Lenkwinkel gleich dem am Lenkrad eingeleiteten Handmoment, das dem Fahrer das Lenkgefühl vermittelt. Das Handmoment T_{driver} und das Reibmoment $T_{friction}$ stellen für den Entwurf des EPAS-Reglers Störgrößen dar (vgl. Bild 2).

Der entwickelte EPAS-Regler setzt sich aus den in Bild 3 dargestellten Subsystemen zusammen.

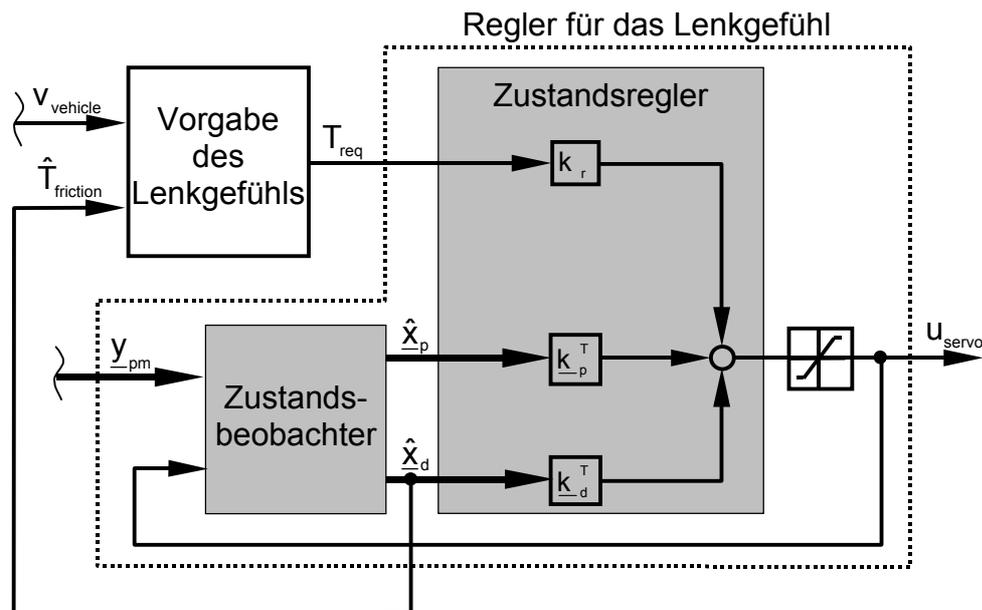


Bild 3: Subsysteme des EPAS-Reglers

Eine beobachterbasierende Zustandsregelung mit Führungs- und Störgrößenaufschaltung [2,3,4] sorgt für das schnelle und genaue Einstellen eines Lenkgefühls über die Regelgröße T_{sensor} . Das gewünschte Lenkgefühl wird dem Fahrer durch die Aufschaltung eines geeigneten Sollhandmoments T_{req} als Führungsgröße vermittelt.

Die Rückführung der durch einen linearen Zustandsbeobachter geschätzten Zustandsgrößen \hat{x}_p der Regelstrecke und die Aufschaltung der geschätzten Störgrößen \hat{T}_{driver} und $\hat{T}_{friction}$ im Vektor \hat{x}_d lassen das Sensormoment T_{sensor} dem Sollhandmoment T_{req} in einem engen Toleranzband folgen.

Die Regelung weist eine hohe Bandbreite von 70Hz auf, die durch die aktive Dämpfung der durch den elastischen Drehstab bedingten Schwingungen erreicht wird.

Die Vorgabe des gewünschten Lenkgefühls erfolgt durch ein überlagertes Subsystem, dessen Funktionsweise und Realisierung in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben wird.

3 Vorgabe des Lenkgefühls und Lenkunterstützung

Das Subsystem zur Vorgabe des Lenkgefühls im EPAS-Regler erzeugt für den Fahrer ein in jeder Fahrsituation sicheres Gefühl und eine bestimmte Lenkungscharakteristik. Ein sicheres Lenkgefühl wird durch guten Kontakt zur Fahrbahn vermittelt. Guter Fahrbahnkontakt bedeutet, dass sich die Reibungsverhältnisse an den Kontaktflächen zwischen den Reifenlatschen und der Fahrbahn im Lenkgefühl wiederfinden. Ein Schätzwert für die Reibungsverhältnisse wird in Form des Moments $\hat{T}_{\text{friction}}$ vom Beobachter der unterlagerten Regelung bereitgestellt. Dieser Schätzwert wird mit Hilfe der Übersetzung der Lenkgestänge in eine äquivalente Zahnstangenkraft \hat{F}_{rack} umgerechnet und für die Vorgabe eines Sollhandmoments T_{req} verwendet. Es wird in Abhängigkeit von der Zahnstangenkraft mit Hilfe so genannter Feeling-Kennlinien gebildet und als Führungsgröße auf die unterlagerte Regelung für das Lenkgefühl aufgeschaltet. Die gewählte Form der Feeling-Kennlinien bestimmt dabei die Charakteristik der Lenkung.

Bild 4 zeigt Feeling-Kennlinien für eine komfortable und eine sportliche Charakteristik der Lenkung. Dabei gilt im Stillstand des Fahrzeugs jeweils eine andere Kennlinie als bei maximaler Fahrzeuggeschwindigkeit. Für die übrigen Geschwindigkeiten wird zwischen diesen Kennlinien anhand eines geschwindigkeitsabhängigen Faktors interpoliert.

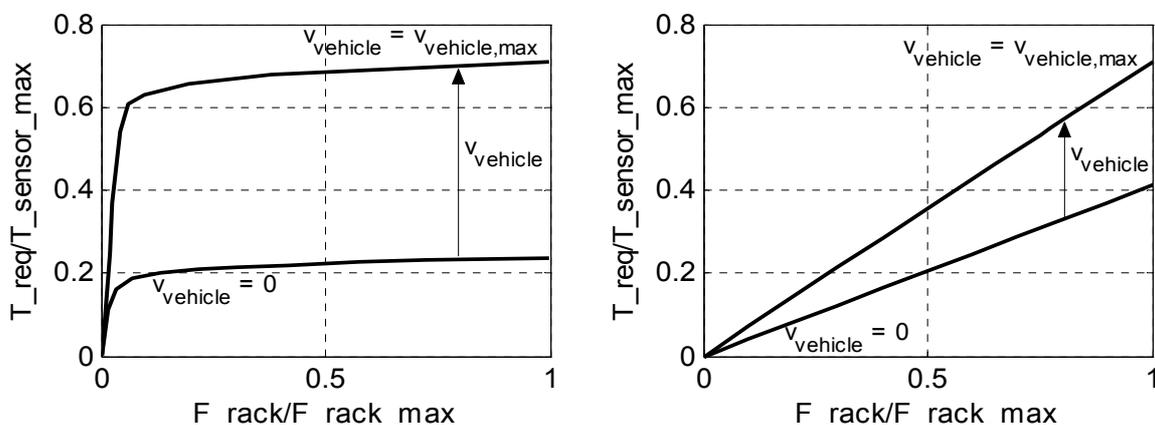


Bild 4: Feeling-Kennlinien der Lenkung mit einer komfortabel und einer sportlich eingestellten Charakteristik für geringe und hohe Fahrzeuggeschwindigkeiten

Ersetzt man in den Kennlinien aus Bild 4 das Moment T_{req} durch T_{sensor} und vertauscht man die abhängigen und unabhängigen Veränderlichen, erhält man die von konventionellen hydraulischen Servolenkungen bekannten Unterstützungskennlinien.

Dieser Zusammenhang soll mit Hilfe des Funktionsprinzips servounterstützter Zahnstangenlenkungen im Folgenden verdeutlicht werden. Sowohl bei hydraulischen Servolenkungen als auch beim EPAS-System wird der Lenkeingriff des Fahrers

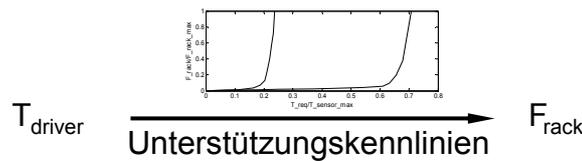
durch eine Kraft an der Zahnstange unterstützt. Im stationären Fall halten sich die Unterstützungskraft und die vom Fahrer über die Ritzel-Zahnstange-Verbindung eingeleitete Kraft mit den von außen auf die Zahnstange wirkenden Kräften das Gleichgewicht. Das vom Fahrer zu spürende Handmoment stellt sich mit der Federsteifigkeit des verwendeten elastischen Drehstabs abhängig vom Verdrehwinkel $\Delta\varphi$ ein.

Bei konventionellen hydraulischen Lenkungen bewirkt der Verdrehwinkel im Drehschieberventil, dass sich in den Kammern des hydraulischen Stellers eine Druckdifferenz mit einer dazu proportionalen Kraft an der Zahnstange aufbaut. Das Verhältnis zwischen Verdrehwinkel und hydraulischer Unterstützungskraft ist durch die Unterstützungskennlinien gegeben, deren Form durch die Gestaltung der Steuerkanten im Drehschieberventil festgelegt ist.

Beim EPAS-System sind die Verhältnisse umgekehrt. Hier bewirkt die geschätzte Kraft an der Zahnstange die Einstellung des vom Fahrer zu spürenden Handmoments. Die vom EPAS-Aktor aufgebrachte Unterstützungskraft an der Zahnstange stellt sich entsprechend ein. Das Verhältnis zwischen geschätzter Zahnstangenkraft und einzustellendem Handmoment ist durch die Feeling-Kennlinien gegeben, deren Form mit Hilfe von Software vorgebar ist.

Diese Umkehr von Ursache und Wirkung beim EPAS-System gegenüber der hydraulischen Lenkung verdeutlicht Bild 5 mit Hilfe der funktionalen Abhängigkeiten.

a) Hydraulische Lenkung



b) EPAS-System

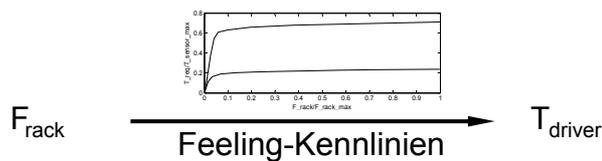


Bild 5: Funktionale Abhängigkeiten bei konventionellen hydraulischen Lenkungen und beim EPAS-System

Mit dem vorgestellten Regelungskonzept für das EPAS-System kann das Verhalten einer konventionellen hydraulischen Lenkung mit steilen Unterstützungskennlinien ohne Stabilitätsprobleme für die Regelung nachgebildet werden. In Bild 5 ist dies anhand der geringen Steigungen der Feeling-Kennlinien im Bereich hoher Zahnstangenkräfte nachvollziehbar. Für kleine Zahnstangenkräfte weisen die Feeling-Kennlinien dagegen große Steigungen auf. Hier ist die maximale Steigung zur Sicherstellung einer robusten Regelung begrenzt. Wie den Ergebnissen aus Kapitel 5 zu entnehmen ist, stellt dies jedoch keine Einschränkung für die Realisierung der typischen Lenkungscharakteristika dar.

Der Vorteil des vorgestellten Regelungskonzepts ist die direkte Vorgabe des Lenkgefühls für den Fahrer. Es lässt sich über die Feeling-Kennlinien leicht an den

jeweiligen Fahrzustand anpassen und wird von der unterlagerten Regelung schnell und genau eingestellt.

Im Folgenden wird auf die programmtechnische Implementierung des Subsystems zur Vorgabe des Lenkgefühls in der Entwicklungsumgebung MATLAB/Simulink mit dSPACE Prototyping Hardware eingegangen.

4 Programmtechnische Implementierung

Das EPAS-System wurde vor der Inbetriebnahme im Fahrzeug durch nichtlineare Simulation auf dem Digitalrechner getestet. Zu diesem Zweck wurde ein hierarchisch strukturiertes Simulationsmodell mit Subsystemen für die elektromechanische Servolenkung, den Regler sowie für ein einfaches Fahrermodell aufgebaut [2]. In Bild 6 ist das Subsystem des EPAS-Reglers dargestellt, welches den Zustandsregler, den Zustandsbeobachter und das „feeling system“ zur Vorgabe des Lenkgefühls enthält.

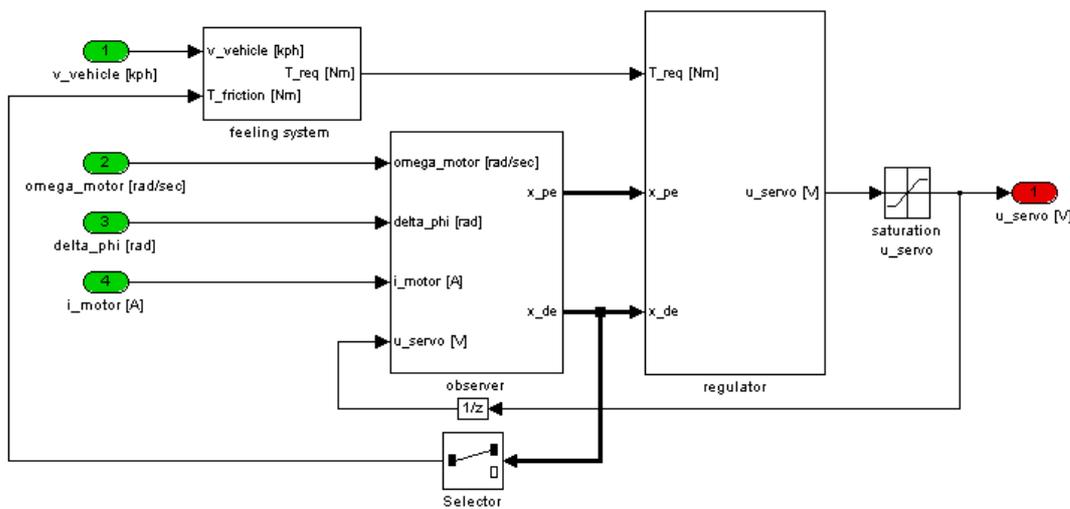


Bild 6: Subsystem des EPAS-Reglers mit Zustandsregler, Zustandsbeobachter und „feeling system“

Das „feeling system“ beinhaltet Kennfelder mit den in Kapitel 3 vorgestellten Feeling-Kennlinien und liefert durch Interpolation für jeden Fahrzustand ein angepasstes Sollhandmoment T_{req} .

Die Inbetriebnahme des EPAS-Reglers und der Test verschiedener Lenkungscharakteristika im Fahrzeug erfolgte durch Rapid Control Prototyping mit einer MicroAutobox der Firma dSPACE. Ein wichtiges Werkzeug hierbei ist die in Bild 7 dargestellte zugeschnittene grafische Benutzeroberfläche, die eine anwenderfreundliche, interaktive Einstellung der Lenkungscharakteristik (Lenkungsabstimmung) ermöglicht.

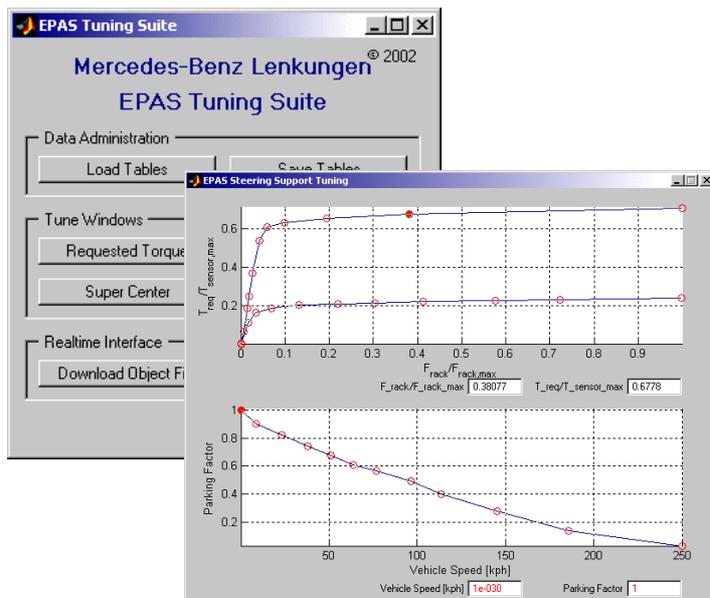


Bild 7: Graphische Benutzeroberfläche für die Lenkungsabstimmung

Die Lenkungsabstimmung erfolgt in intuitiver und komfortabler Art und Weise durch Ziehen der Kennlinien mit der Maus. Die Kennlinien können direkt im Fahrzeug eingestellt und ohne neue Codegenerierung auf die Prototyping Hardware geladen werden. Die Änderung einer Kennlinie kann somit in Sekunden vollzogen werden. Ein Softwarespezialist ist für Änderungen an den Kennlinien nicht erforderlich, so dass Testfahrer die Abstimmung der Lenkung mit Hilfe der Benutzeroberfläche selbstständig durchführen können. In Bild 8 ist dieser Vorgang exemplarisch dargestellt.



Bild 8: Lenkungsabstimmung im Fahrzeug

Mit Hilfe des vorgestellten Werkzeugs wurden zur Einstellung und Verifikation von Lenkungscharakteristika unterschiedliche Experimente am Fahrzeug durchgeführt.

5 Experimentelle Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse für eine komfortable Lenkungscharakteristik (vgl. Bild 4 links) vorgestellt. Dazu werden Experimente im Stillstand und im Fahrbetrieb herangezogen. Das Verhalten der Lenkung wird dabei im Wesentlichen anhand der Zeitverläufe der geschätzten Kraft \hat{F}_{rack} an der Zahnstange und des am Drehstab gemessenen Moments T_{sensor} beurteilt.

Zunächst soll ein Experiment zur Aufnahme der Feeling-Kennlinien betrachtet werden. Für dieses Experiment wurden bei Stillstand des Fahrzeugs die Lenkbewegungen der Räder blockiert. Durch einen Lenkeingriff baut sich im Drehstab das Sensormoment T_{sensor} und an der Zahnstange die Kraft F_{rack} auf (vgl. Bild 1). Stellt man das gemessene Sensormoment über der Zahnstangenkraft dar, erhält man die Feeling-Kennlinien. Die äquivalenten Unterstützungskennlinien liefert die Darstellung des zum Unterstützungsmoment des EPAS-Aktors proportionalen Stroms i_{motor} über dem Sensormoment. Bild 9 zeigt die Kennlinien für Fahrzeuggeschwindigkeit Null und eine am Eingang des „feeling systems“ vorgetäuschte maximale Fahrzeuggeschwindigkeit.

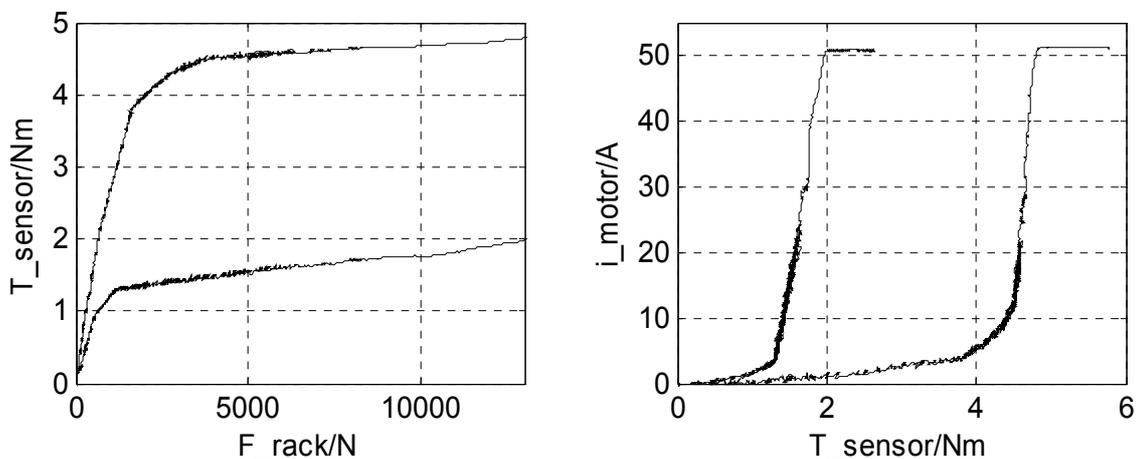


Bild 9: Gemessene Feeling- und Unterstützungskennlinien

Die gemessenen Kennlinien für T_{sensor} in Bild 9 links ergeben sich mit den Feeling-Kennlinien für das Sollhandmoment T_{req} aus Bild 4 links. Die unterlagerte Regelung führt das Sensormoment für das Lenkgefühl schnell und genau dem Sollhandmoment nach, wodurch sich die gewünschte Lenkungscharakteristik einstellt. Die äquivalenten Unterstützungskennlinien rechts im Bild weisen die Form konventioneller hydraulischer Unterstützungskennlinien mit großer Steigung auf.

Für ein sicheres Lenkgefühl ist ein guter Fahrbahnkontakt wichtig. Dies wurde anhand von Experimenten im Fahrbetrieb untersucht. Dabei handelte es sich um eine langsame stationäre Kreisfahrt über zwei Fahrbahnbeläge hinweg sowie Geradeausfahrten auf verschiedenen Belägen.

Zunächst wird die Kreisfahrt betrachtet. Die Kreisbahn führt hierbei von einem groben Betonbelag auf feinen Asphalt, getrennt durch eine Regenrinne.

In Bild 10 sind die gemessenen Verläufe der geschätzten Zahnstangenkraft und des Sensormoments über der Zeit aufgetragen.

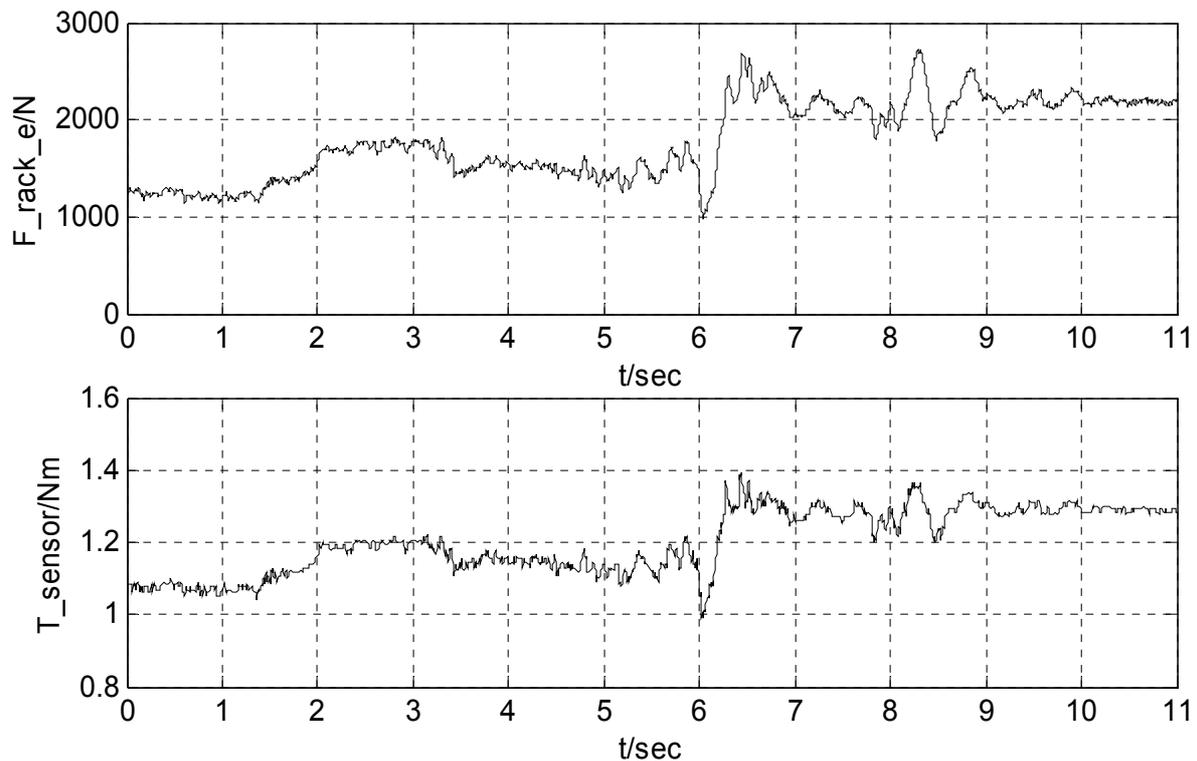


Bild 10: Zahnstangenkraft und Sensormoment für eine stationäre Kreisfahrt über zwei verschiedene Bodenbeläge hinweg.

Der Verlauf der geschätzten Zahnstangenkraft zeigt deutlich das Überfahren der Regenrinne zum Zeitpunkt $t = 6$ sec und den darauf folgenden Wechsel auf feinen Asphalt mit der zugehörigen Erhöhung der Reibung. Im Sensormoment für das Fahrgefühl ist das beschriebene Verhalten ebenfalls sichtbar. Der Fahrer spürt den Wechsel auf einen anderen Fahrbahnbelag im Handmoment.

Mit einem weiteren Experiment soll gezeigt werden, dass auch bei Geradeausfahrt ein guter Fahrbahnkontakt vermittelt wird. Bei diesem im täglichen Fahrbetrieb am häufigsten vorkommenden Fahrzustand sind Zahnstangenkraft und Sensormoment sehr klein. Zur Darstellung des Verhaltens der Lenkung bei Geradeausfahrt dienen die Zeitverläufe für die Fahrt über einen groben Betonbelag in Bild 11 und über feinen Asphalt in Bild 12.

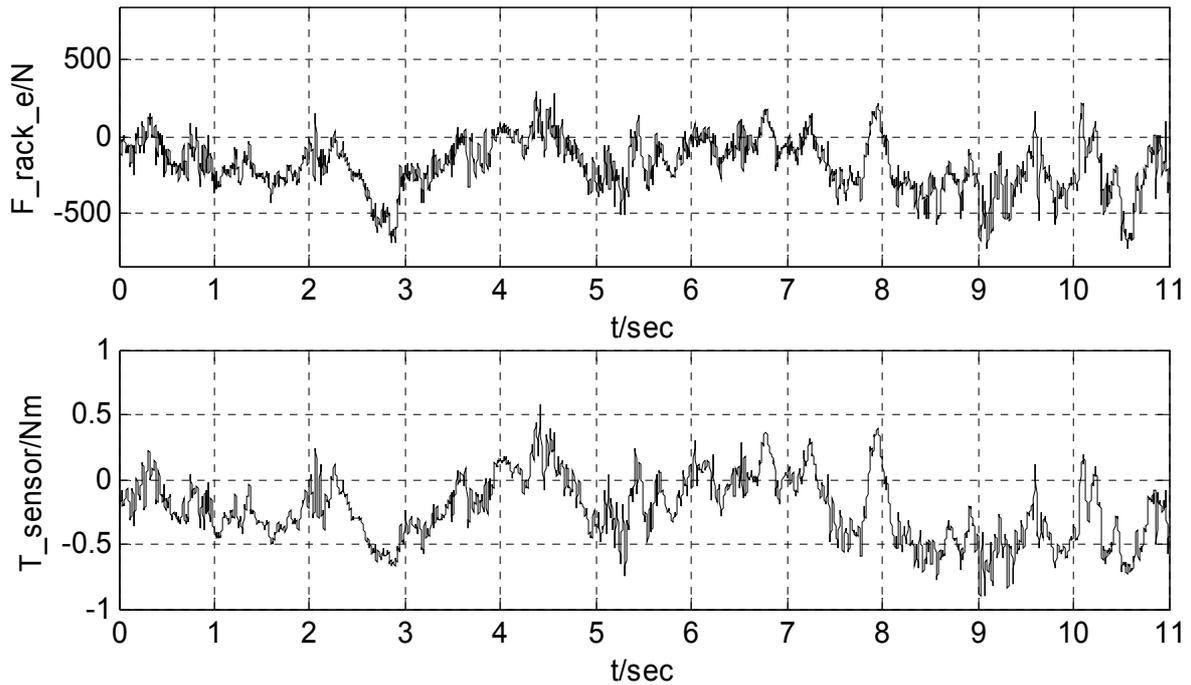


Bild 11: Zahnstangenkraft und Sensormoment für Geradeausfahrt über groben Betonbelag

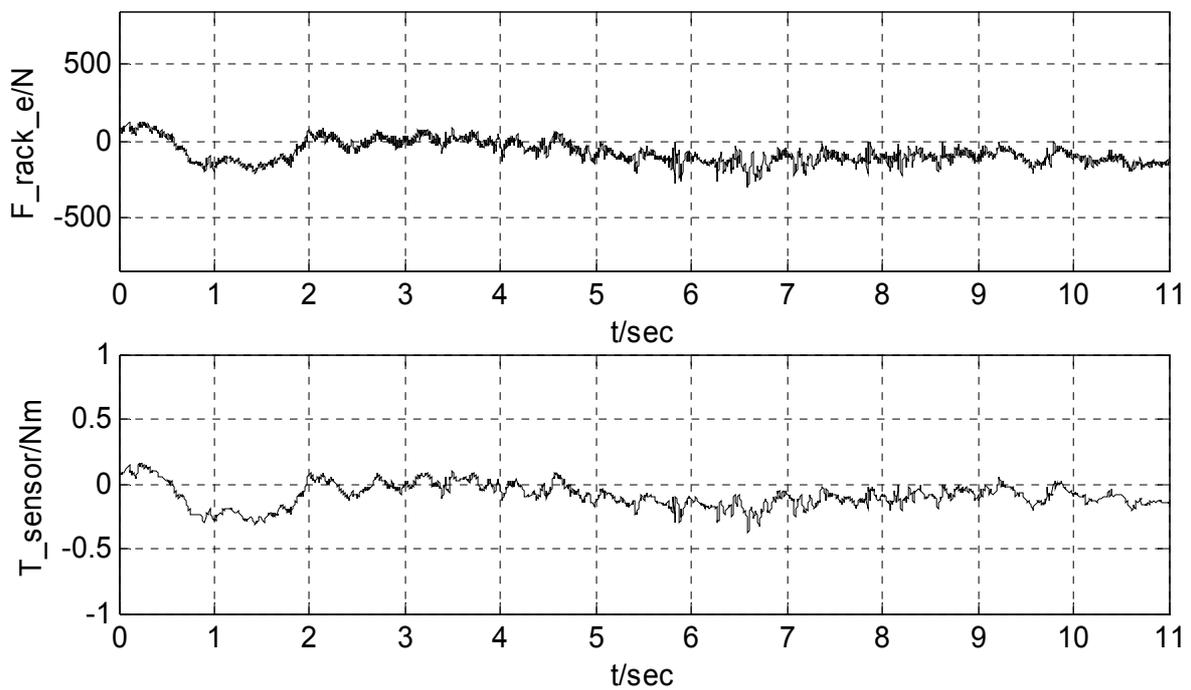


Bild 12: Zahnstangenkraft und Sensormoment für Geradeausfahrt über feinen Asphalt

Die Zahnstangenkräfte in den Bildern 11 und 12 sind erheblich geringer als bei der stationären Kreisfahrt in Bild 10. Für den groben Betonbelag sind die Ausschläge jedoch größer als für den feinen Asphalt, was sich auch im Sensormoment widerspiegelt. Die Unterschiede im Straßenbelag werden dem Fahrer damit auch bei Geradeausfahrt vermittelt.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass mit dem beschriebenen Ansatz für die EPAS-Regelung mit Feeling-Kennlinien stets ein guter Fahrbahnkontakt gegeben ist.

Zusätzlich zur Vorgabe des Lenkgefühls wurden in der überlagerten Regelung weitere Funktionen zur aktiven Rückstellung und Lenkungsdämpfung realisiert, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird. Damit konnte neben einem guten Fahrbahnkontakt eine hinreichend gedämpfte Mittenzentrierung für guten Geradeauslauf sowie ein komfortables Mittengefühl erreicht werden. Die Lenkung wurde insgesamt von verschiedenen Probanden als sehr angenehm in der Handhabung und natürlich im Lenkgefühl bewertet.

6 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschreibt einen Ansatz zur Realisierung einer variablen Lenkunterstützung für eine elektromechanische Servolenkung. Es wird ein neuartiges Konzept für die Regelung vorgestellt, das die direkte Vorgabe eines gewünschten Lenkgefühls für den Fahrer mit Hilfe so genannter Feeling-Kennlinien ermöglicht. Diese sind vergleichbar mit den Unterstützungskennlinien von konventionellen hydraulischen Lenkungen.

Wie bei den Unterstützungskennlinien kann mit Hilfe der Feeling-Kennlinien die Lenkungscharakteristik (komfortabel, sportlich) über die Kennlinienform eingestellt und an den jeweiligen Fahrzustand angepasst werden. Für die Abstimmung der Lenkungscharakteristik im Fahrversuch wurde eine zugeschnittene grafische Benutzeroberfläche entwickelt. Mit Hilfe von Rapid Control Prototyping und dieser Benutzeroberfläche kann die Abstimmung innerhalb kürzester Zeit von Testfahrern selbst durchgeführt werden. Ein Softwarespezialist ist hierfür nicht erforderlich.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass das EPAS-System einen guten Fahrbahnkontakt und ein natürliches Lenkgefühl vermittelt. Durch die Einstellung der Lenkungscharakteristik per Software werden die Variantenvielfalt von Lenkungs-komponenten und Kosten reduziert.

Das EPAS-System stellt ein mechatronisches Funktionsmodul dar, welches leicht durch höherwertige Funktionen wie automatisches Einparken und Spurhalten erweitert werden kann.

7 Literatur

- [1] Fleck, R.; Hennecke, D.; Pauly, A.: "Active Front Steering (AFS) - Das Steer-by-Wire System der BMW-Group zur Optimierung von Lenkkomfort, Fahrzeugagilität und -stabilität", PKW Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen, Haus der Technik, Essen, 3./4.4.01.
- [2] Jusseit, J.; Henrichfreise, H.; Niessen, H.: "Optimale Regelung einer elektro-mechanischen Servolenkung", 5. VDI-Mechatroniktagung 2003, Fulda, 7./8.5.03
- [3] Lewis, F.L.: "Applied Optimal Control and Estimation", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1992
- [4] Henrichfreise, H.: "Prototyping of a LQG Compensator for a Compliant Positioning System with Friction", TRANSMECHATRONIK – Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik, HNI Verlagsschriftenreihe, Vol. 23, 1. Edition, Paderborn 1997. Aufsatz verfügbar auf der CLM-Homepage www.clm-online.de