

Steer-by-Wire Lenkung: Algorithmen, Aktuatorik und Rapid-Control-Prototyping

Naim Bajcinca*

Markus Hauschild[†]

Lutz Bose[‡]

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
Institut für Robotik und Mechatronik
82234 Weßling, Oberpfaffenhofen

Zusammenfassung

Für die Erhöhung von Fahrsicherheit, Komfort und Wirtschaftlichkeit werden in Straßenfahrzeugen zunehmend mechanische und hydraulische durch entsprechende mechatronische Komponenten und Baugruppen ersetzt. Zu den gegenwärtigen Entwicklungszielen der Fahrzeugindustrie gehört beispielsweise das Ersetzen der mechanischen Verbindung zwischen Lenkrad und Vorderrädern durch vernetzte mechatronische Komponenten. Eine derartige Lenkungstechnologie wird als Steer-by-Wire (SbW) bezeichnet. Auf dem Weg dorthin sind jedoch noch eine Reihe von komplexen Aufgaben bezüglich Aktuatorik, Sensorik, Fehlertoleranz und Regelung zu lösen.

Die Regelungsaufgaben bei einer Steer-by-Wire-Lenkung können in zwei unterschiedlichen Ebenen definiert werden. Während die Aufgaben in der Aktuatorikebene beinhalten das Führungsverhalten mit Reib- und Störkompensation, die Aufgabe in der Funktionsebene ist das Erreichen einer definierten Wunsch-Lenkreaktion des Fahrzeugs und eines Wunschgefühls des Fahrers unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der Fahrer- und Fahrzeugdynamik.

In dem vorliegenden Beitrag werden Komponenten und Algorithmen eines Steer-by-Wire-Prüfstandes vorgestellt. Im Wesentlichen beinhaltet dies die Interaktion eines Force-Feedback- und eines Radstellaktuators mit dem Menschen (Fahrer) und einem in Echtzeit simulierten Fahrzeugdynamikmodell. Die dazu verwendete Aktuatorik und Sensorik stellt eine neuartige Technologie dar, die ursprünglich in der Robotik angewandt wurde. Der Steer-by-Wire-Prüfstand wird in der Rapid-Control-Prototyping Entwurfsphase der Steer-by-Wire Systeme verwendet um mechatronische Komponenten und regelungstechnische Algorithmen wirklichkeitsnah zu entwickeln und zu erproben.

1 Einführung

Heutige Kraftfahrzeuge werden je nach Leistungsbedarf mit hydraulischer, elektro-hydraulischer oder elektrischer Lenkunterstützung ausgerüstet. Unabhängig von der Art der Lenkunterstützung besitzen diese Systeme über die Lenksäule eine mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Spurstange, so dass auch bei Ausfall der Servounterstützung weiterhin die mechanische Kopplung erhalten bleibt, [11]. Verzichtet man nun auf diese mechanische Rückfallebene, so gewinnt man konstruktive Freiheitsgrade: (1) Platzersparnis und Aufhebung konstruktiver Restriktionen im Bereich des Motorraums, (2) Vereinfachung der Konstruktion für Rechts-/Linkslenker-Ausstattung, (3) keine Intrusion der Lenksäule und des Lenkrades im Crash-Fall, (4) Gewichtsreduktion, (5) Kostenreduktion, usw. Um das Potenzial von SbW vollständig auszuschöpfen, können, darauf aufbauend, weitere Funktionen hinzugefügt werden: (6) eine variable Lenkübersetzung (beispielsweise angepasst an Fahrgeschwindigkeit und Lenkradwinkel), (7) die Verbesserung des Ansprechverhaltens durch Vorkhaltlenkung, (8) die Implementierung von Fahrdynamikregelungssystemen (z. B. für Schleuder- und Kippvermeidung) durch Rückführung dynamischer Zustände auf den Vorderradlenkwinkel sowie (9) die Ausnutzung der haptischen Schnittstelle, um zusätzliche Informationen, beispielsweise über fahrdynamisch kritische

*E-Mail naim.bajcinca@dlr.de, Telefon (0 81 53) 28-24 53

[†]E-Mail markus.hauschild@dlr.de, Telefon (0 81 53) 28-29 12

[‡]E-Mail lutz.bose@dlr.de, Telefon (0 81 53) 28-18 33

Zustände, dem Fahrer zugänglich zu machen. In Abb. 1 werden Systemkomponenten eines SbW-Systems gezeigt. Der Fahrzeugführer kann mit dem Lenkrad ein gewünschtes Lenkmanöver einleiten, indem er ein Drehmoment auf das Lenkrad aufbringt. Diesem entgegen wirkt das vom Force-Feedback-Aktuator erzeugte Rückstellmoment. Die Aufgabe des Force-Feedback-Aktuators besteht zunächst darin, dem Fahrzeugführer das gleiche Fahr- bzw. Lenkgefühl zu vermitteln, wie er es beim Steuern eines Fahrzeugs mit herkömmlicher Lenkung und Servounterstützung gewohnt ist. Die Rückstellkraft vermittelt dem Fahrer ein Gefühl für den Fahrzustand seines Autos bezüglich Geschwindigkeit, Ansprechen der Lenkung sowie Straßenzustand bzw. Griffigkeit der Fahrbahn. Bedingt durch die Achsgeometrie erzeugen die Räder beispielsweise bei Kurvenfahrt Rückstellkräfte, die am Lenkrad spürbar sein müssen. Der heutige Fahrer ist diese Rückmeldungen gewohnt und kann nicht ohne weiteres auf sie verzichten.

Ein SbW-System kann als ein klassisches Master-Slave-System aufgefasst werden. Der Fahrer entspricht dabei dem Operator, das Fahrzeug und die Fahrbahn der Umgebung, der Force-Feedback-Aktuator dem Master und schließlich der Lenkaktuator dem Slave. Regelungstechnisch beinhaltet ein SbW-System zwei innere Regelkreise: einen Momentenregelkreis für den Force-Feedback-Aktuator und einen Momenten- oder Positionsregelkreis für den Lenkaktuator. Um die notwendige Lenkdynamik zu erzielen sind beide Regelkreise über den SbW-Regler miteinander gekoppelt.

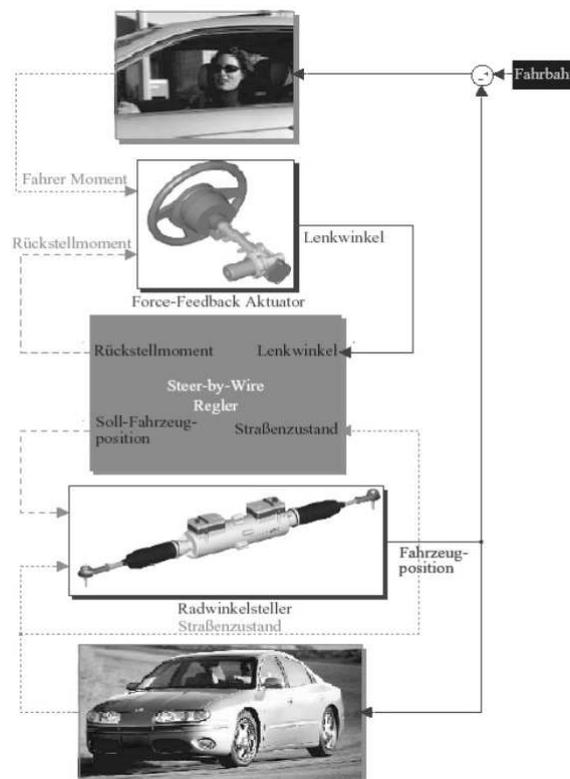


Abbildung 1: Die Steer-by-Wire Wechselwirkung

2 Der Steer-by-Wire Prüfstand

In diesem Abschnitt wird das Steer-by-Wire Gesamtsystem bestehend aus *Lenkradaktuator (Master)* und *Radstellaktuator (Slave)*, sowie einer Simulations- und Visualisierungsumgebung vorgestellt, siehe Abb. 2, [8]. Der Prüfstand wird zur realitätsnahen Simulation von Steer-by-Wire Systemen verwendet. Das System wird mittels xPC-Echtzeithard- und Software betrieben und ist an eine *Virtual Reality Umgebung* angebunden, um in Echtzeit simulierten fahrdynamischen Situationen auch visuell darstellen zu können. Im Wesentlichen wird

er für die Rapid-Control-Prototyping Entwurfsphase der Steer-by-Wire Systeme verwendet. Dies beinhaltet in erster Linie die Untersuchung und Entwicklung der mechatronischen Aktuator-Komponenten (Hardware und Modellbildung) und regelungstechnischen Algorithmen.

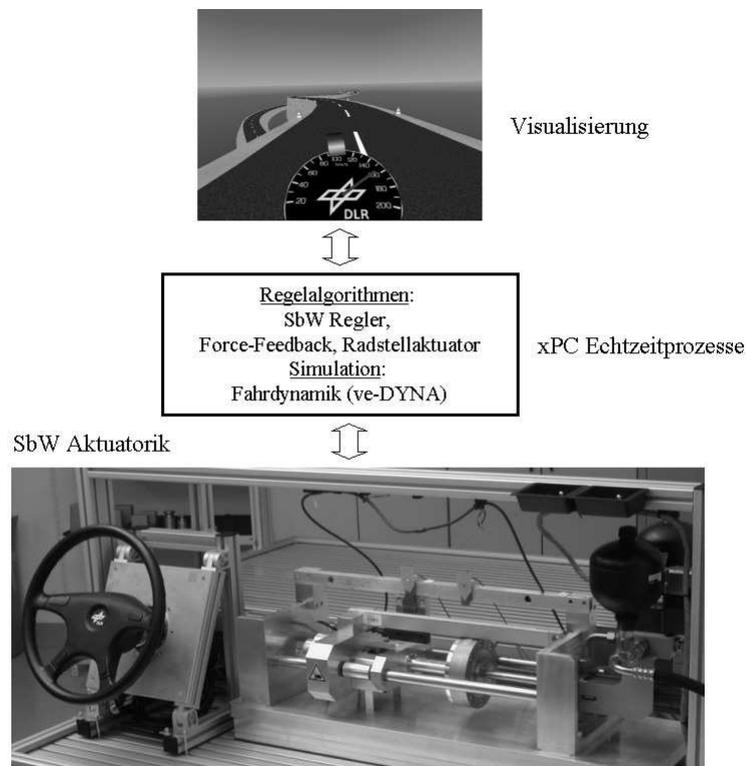


Abbildung 2: Der Steer-by-Wire Prüfstand

2.1 Der Lenkradaktuator

Zur Validierung der theoretisch und simulativ erlangten Ergebnisse wird der in Abb. 3 Kraftrückkopplungs-Prüfstand verwendet. Hauptbestandteil des Lenkradaktuators ist ein Harmonic Drive FHA Hohlwellenantrieb, der aus einem Sinus-kommutierten AC-Servo-Motor mit eingebautem Inkremental-Encoder und einem Harmonic Drive Getriebe besteht.

Die Bauteile eines Harmonic-Drive Getriebe sind in Abb. 4 gezeigt. Die Zähne des elastischen *Flexspline* und des steifen *Circular Spline* sind in permanentem Eingriff. Da das Flexspline zwei Zähne weniger als das Circular Spline hat, verursacht eine Umdrehung am Getriebeeingang (*Wave Generator*) eine Relativbewegung um zwei Zähne zwischen Flexspline und Circular Spline. Bei fixiertem Circular Spline dreht sich das Flexspline in die dem Getriebeeingang entgegengesetzte Drehrichtung. Diese Relativbewegung wird bei Betrachtung von einem Einzelzahn des Flexspline während einer halben Getriebeeingangsumdrehung wie in Abb. 5 verständlich: Der Zahn ist in vollem Eingriff, wenn die Hauptachse des Wave Generators bei einem Winkel von 0° steht. Nach Drehung der Hauptachse des Wave Generators um 90° ist dieser Zahn nicht mehr im Eingriff. Voller Eingriff des benachbarten Circular Spline Zahns erfolgt erst nach einer Drehung der Hauptachse um insgesamt 180° . Bei einer vollen Umdrehung entsteht somit eine Relativbewegung um insgesamt zwei Zähne.

Das Lenkrad ist direkt am Getriebeausgang montiert. Durch die einstufige Getriebeuntersetzung kann somit eine kompakte Einheit entwickelt werden, welche dennoch die erforderlichen Lenkradmomente bereitstellen kann. Wesentlicher Vorteil des Kraftrückkopplungssystems ist, daß das Harmonic Drive Getriebe fast spielfrei und zudem auch rücktreibbar ist, was beispielsweise beim Ausfall des Lenkradantriebs dennoch

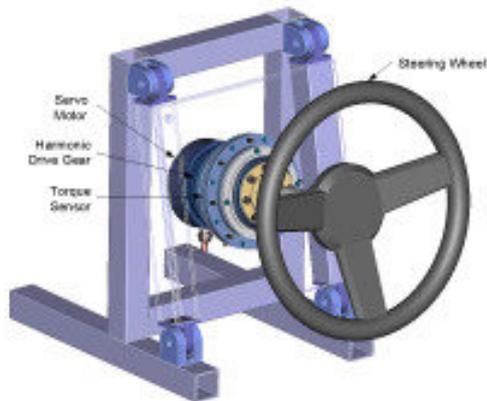


Abbildung 3: Der Lenkradaktuator im CAD Modell

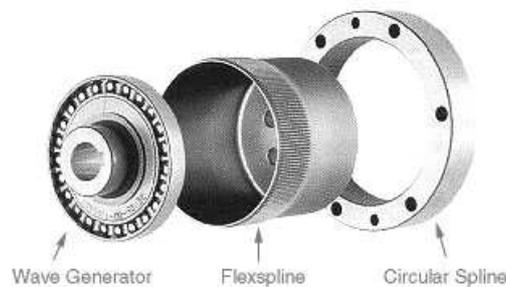


Abbildung 4: Die Hauptbestandteile des Harmonic Drive Getriebes im Überblick

Lenkbewegungen erlauben würde. Verschiedene Effekte wie Reibung, Motorträgheit oder der für Harmonic Drive Getriebe typische Getrieberipple müssen allerdings regelungstechnisch kompensiert werden, um ein Lenkgefühl, vergleichbar mit dem derzeitiger Lenkmechanismen, erreichen zu können.

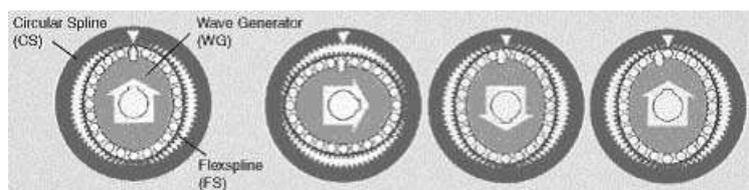


Abbildung 5: Funktionsprinzip des Harmonic Drive Getriebes

Die Funktionsweise des eingesetzten Drehmomentsensor basiert dabei auf Dehnmeßstreifen. Somit wird prinzipbedingt eine weitere Elastizität in das mechanische System eingeführt, welche für ungefähr ein Drittel der Gesamtgetriebeelastizität verantwortlich ist, [12]. Der Einsatz von zwei unabhängigen Meßbrücken ermöglicht Redundanz und erlaubt eine Kompensation von Temperaturschwankungen und anderen Störungen.

2.2 Der Radstellaktuator

Der Lenkaktuatorprüfstand, wie in Abb.6 gezeigt, besteht aus der am DLR entwickelten *Planeten-Wälz-Gewindespindel* (PWG), [14], die durch einem BLDC-Servo-Motor mit angekoppeltem Inkrementalgeber

angetrieben wird, einem inkrementellen Längenmeßsensor, Kraftsensor und den Linearführungselementen. Als Last zur Simulation von an den Rädern wirkenden Kräften dient ein Hydraulikzylinder, welcher Kräfte mit sehr hoher Bandbreite erzeugen kann. Vergleichbar mit einer Spurstange sollen mit dem Spindelaktuator die Lenkwinkel der Räder eingestellt werden.

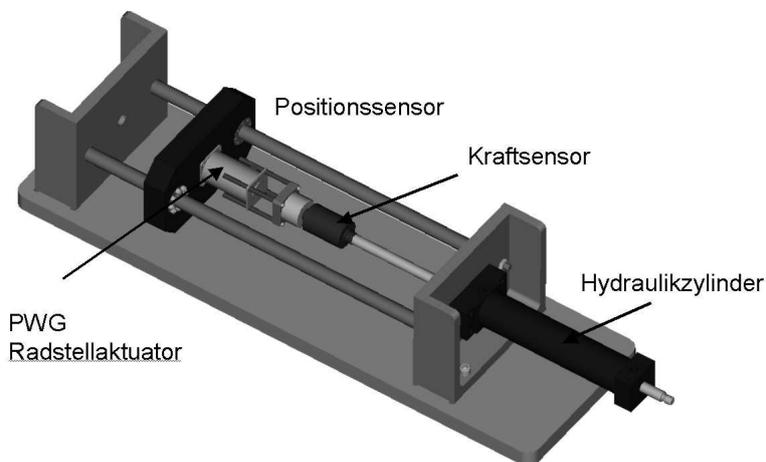


Abbildung 6: Der Radstellaktuator im CAD Modell

Die PWG ist ein Reibungsgetriebe, das für die Umsetzung der rotatorischen auf translatorische Bewegungen genutzt wird. Es unterscheidet sich von anderen Vorschubgetrieben dadurch, daß die PWG grundsätzlich mit beliebig niedrigen Gesamtsteigungen ausgeführt werden kann. Somit kann eine hohe Antriebsdrehgeschwindigkeit mit niedrigem Moment auf langsame Vorschubbewegungen mit hoher Kraft umgesetzt werden. Die PWG besteht, wie in Abb.7 gezeigt, aus drei Elementen. Die Planeten wälzen auf der Spindelmutter ab und verursachen dabei den Vorschub des Getriebes. Die Wälzplaneten übertragen dabei Kräfte in axialer Richtung. Wesentliche Merkmale der PWG sind ihr geringer Bauraumbedarf, einfacher mechanischer Aufbau und ihre hohe Laufruhe bei hohem Wirkungsgrad. Ebenfalls charakteristisch für die PWG ist eine mögliche Abweichung der Systemsteigung von der nominellen Systemsteigung. Diese Abweichungen sind, wie bei jedem Reibgetriebe, dadurch zu erklären, daß höhere Übertragungsleistungen mit höherem Schlupf einhergehen.

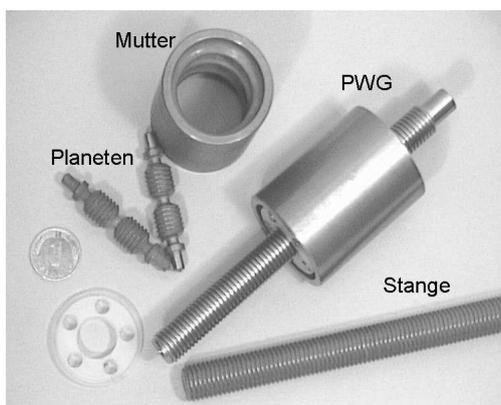


Abbildung 7: Die Bestandteile der PWG-Spindel

Die Umsetzungsformel der rotatorischen auf die translatorische Bewegung eines idealen PWG-Getriebe ist in [7] hergeleitet worden. Dort wird anhand von der Bedingung der kontinuierlichen Berührung zwischen der Planeten und der Spindelstange gezeigt, dass sowohl für die muttergetriebene als auch für die spindelge-

triebene PWG gilt

$$v_A \approx \omega_{AS} r_S \tan \beta \delta. \quad (1)$$

Dabei ist v_A die translatorische Vorschubgeschwindigkeit, ω_A die Antriebsdrehzahl, β die Öffnung eines Gewindes der Spindelstange und δ der charakteristische Winkel eines Kontaktpunktes zwischen dem Planeten und der Spindelstange. Das wesentliche Merkmal dieser Formel ist die proportionale Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v_A von δ . Der Winkel δ wird durch die Geometrie der PWG-Körper bestimmt und kann einen sehr kleinen Wert annehmen so dass eine extrem niedrige kinematische v/ω -Übersetzung möglich ist.

3 Regelungsaufgaben

Die Regelungsaufgaben des SbW-Systems können in zwei Ebenen definiert werden: in der Aktuatorikenebene handelt es sich um Folgeverhalten unter Reib- und Störkompensation und in der Funktionsebene um die Transparenz einer gewünschten Referenzkopplung zwischen dem Fahrer und dem Fahrzeug. In den beiden Ebenen müssen Robustheitsbedingungen bezüglich a) variierender bzw. unsicherer biomechanischer Dynamik der Fahrerhand (Fahrer-Impedanz) und b) unsicherer Dynamik des Fahrzeugs und des Reifen/Fahrbahn-Kontakts (Fahrzeug-Impedanz) berücksichtigt werden. Der Fahrer hält das Lenkrad lose oder fest und kann deswegen als variierende bzw. unsichere Impedanz aufgefasst werden. Die Fahrdynamik und damit die Fahrzeug-Impedanz hängt wesentlich vom Fahrzeugtyp, von der Fahrgeschwindigkeit, der Beladung und vom Straßenzustand ab. Hieraus und aus der Unterdrückung von Störgrößeneinflüssen und Messrauschen sowie aus der Berücksichtigung der bei der Modellierung vernachlässigten Dynamik ergeben sich die wesentlichen Robustheitsanforderungen für SbW.

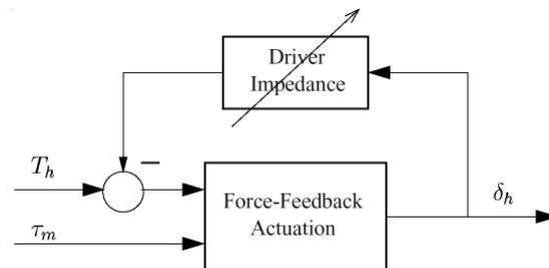


Abbildung 8: Force-Feedback in einem Steer-by-Wire Fahrzeug

3.1 Mensch-Maschine Interaktion

Ziel ist es eine Momentenregelung zu realisieren, die sich gegenüber Unsicherheiten, hier im Speziellen gegenüber dem unvorhersehbaren Fahrerverhalten, robust und stabil verhält: Je nachdem, wie fest der Fahrer das Lenkrad hält, kann dieser durch eine große oder geringe Steifigkeit modelliert werden. Ferner kann der Fahrer ein Lenkmanöver einleiten, indem er aktiv ein Moment auf das Lenkrad aufbringt. Dieses wirkt als Störung auf den Momentenregelkreis. Es wird gezeigt, dass höhere Fahrersteifigkeiten die Kreisverstärkung des Kraftrückkopplungskreises erhöhen und damit einen destabilisierenden Effekt auf diesen Kreis ausüben, Abb. 5.

Die Wechselwirkung des Fahrers mit einem Steer-by-Wire-Fahrzeug kann grundsätzlich auf zwei verschiedenen Weisen realisiert werden, [5]. Bei einer Admitanz-Struktur des SbW Reglers, bei der das Drehmoment des Fahrers den Eingang darstellt, (2), wird dem Fahrer die Kraftrückkopplung durch eine direkte Force-Feedback Regelung vermittelt. Im Gegensatz dazu wird bei einer Impedanz-Struktur des Reglers, bei der der Lenkradwinkel den Eingang darstellt, die Wechselwirkung indirekt durch eine Positionsregelung realisiert. Während theoretisch die beiden Strukturen äquivalent sind, wird dennoch in diesem Aufsatz die direkte Kraftrückkopplung bevorzugt.

In Abb. 8 wird ein grobes Interaktionsschema zwischen dem Fahrer und dem Force-Feedback Aktuator dargestellt. Dabei stellt T_h die am Arm muskel des Fahrers wirkende Kraft, τ_m das vom SbW-Regler berechnete Rückkopplungsdrehmoment und δ_h den Lenkradwinkel dar. Dies wird in einer detaillierten Form in Abb. 9 gezeigt. Man beachte, dass die Fahrer- und Drehmomentregelkreise durch gegenseitige Stör-Komponenten gekoppelt sind. Beispielsweise erläutert Abb. 10 die durch den Lenkradwinkel δ_h störende Wirkung der Armdynamik auf den Drehmomentregelkreis. Dabei beschreibt der Block *Fixed Force-Feedback Actuator* die Situation des festgehaltenen Lenkrades (unendliche Fahrersteifigkeit).

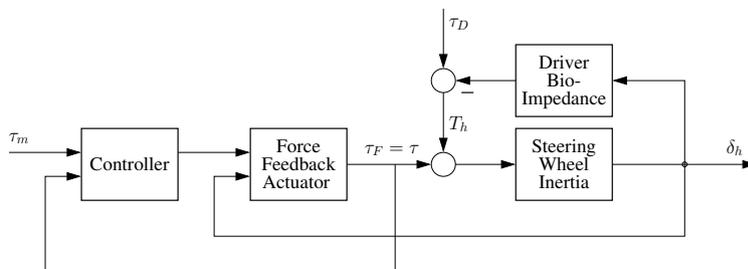


Abbildung 9: Die Kopplung des Fahrer- und Drehmomentregelkreises

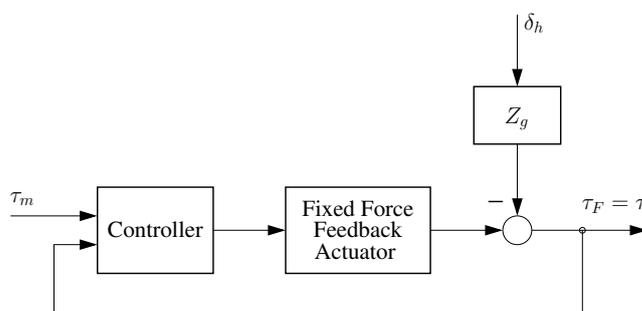


Abbildung 10: Drehmomentregelkreis

Der Einfluss der Fahrersteifigkeit auf den Drehmomentregelkreis wird physikalisch in Abb. 11 aufgeführt. Bezogen auf das Drehmoment am Wave-Generator sind das Getriebe und die Fahrersteifigkeit in Serie geschaltet, Abb. 11. Dadurch, dass die Fahrersteifigkeit viel kleiner als die Getriebesteifigkeit ist, spielt sie die wesentliche Rolle.

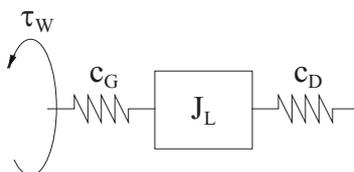


Abbildung 11: Getriebe- und Fahrersteifigkeit bezogen auf das Motormoment

Umgekehrt, zeigt Abb. 12 den Einfluss des Drehmomentregelkreises auf den Fahrer-Aktuator-Regelkreis. Dabei wird angenommen, dass das kommandierte Drehmoment Null ist. S_{inf} stellt die Sensitivitätsfunktion des Drehmomentregelkreises mit dem festgehaltenen Lenkrad dar. Es gibt zwei Hauptgründe für die Untersuchung dieses Regelkreises: (a) die Robustheit gegenüber der unsicheren Fahrerimpedanz Z_d , und (b) Anpassung des Fahrgefühls. Dies sind zusätzliche Anforderungen für den Entwurf des Kraftrückkopplungs-Regelkreises. Deshalb muss sie so angepasst werden, dass Robustheits- und Fahrgefühl Anforderungen gleichzeitig getroffen werden. Diesbezüglich wurden mehrere Methoden erfolgreich eingesetzt: *Disturbance-Observer*, [3], *Active-Observer*, [4], und *Sliding-Mode*, [13].

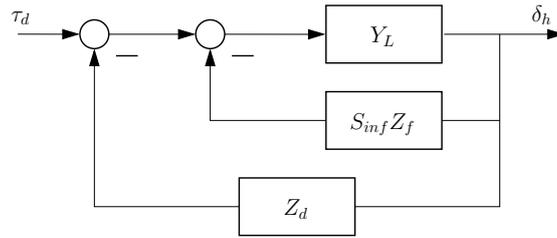


Abbildung 12: Fahrer-Aktuator-Regelkreis

3.2 Funktionsebene

Neben den Stabilitäts- und Robustheitsanforderungen muss der SbW-Regler dem Fahrer über ein kraftreflektierendes Lenkrad ein adäquates Lenkgefühl und dem Fahrzeug eine adäquate Lenkreaktion vermitteln, so dass Übereinstimmung zu einer konventionellen Lenkung erreicht wird. Das konventionelle Lenksystem, das hier als Referenzkopplung für SbW vorgesehen ist, kann entweder eine manuelle Lenkung ohne Lenkunterstützung sein, eine hydraulische Servo-Lenkung (HPS) oder eine elektromechanische Servo-Lenkung (EPS). Prinzipiell verschiedene Qualitäten des dynamischen wechselseitigen Übertragungsverhaltens zwischen dem Fahrer und Fahrzeug können realisiert werden durch a) bidirektionale Positionsrückführung (Admittanzdarstellung), b) bidirektionale Krafrückführung (Impedanzdarstellung), und c) bidirektionale Positions- und Krafrückführung (Hybriddarstellung). Bei den SbW-Systemen muss auf die konservative Entwurfsmethodik in der Telerobotik, die auf der Passivitätstheorie beruht, aus zwei Gründen verzichtet werden: (1) die Umgebung, d. h. die Fahrzeugimpedanz ist aufgrund der kinetischen Energie nicht, wie in der Regel angenommen, passiv, [3], und (2) die Fahrdynamik kann als nicht beliebig angenommen werden. Die hier verwendete Methodik besteht aus einem *Model-Matching*-Entwurfsschritt und einer Analyse im Parameterraum der relevanten unsicheren physikalischen Parameter. Es kann dadurch beispielsweise gezeigt werden, dass Fahrersteifigkeit in der Funktionsebene einen stabilisierenden Effekt hat, siehe Abb. 14.

3.3 Referenzkopplung

Der erste Schritt beim Entwurf eines Steer-by-Wire Systems ist es, ein Referenzverhalten festzulegen, d.h. zu bestimmen, wie die Lenkung sich anfühlen soll, bzw. wie das Fahrzeug auf einen Lenkeingriff reagieren soll, [5]. Dabei ist es naheliegend, zunächst eine konventionelle Lenkung mittels Steer-by-Wire nachzubilden, Abb. 13.

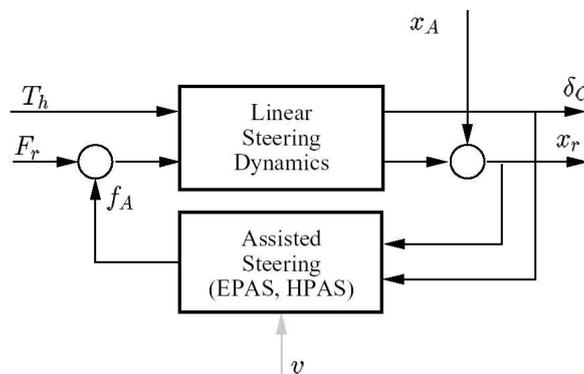


Abbildung 13: Dynamik der Lenksysteme

Zur Erhöhung des Komforts sind derzeitige Lenkungssysteme in der Regel mit einer Kraftunterstützung, f_A (sog. *boost curve*) ausgestattet. Zusätzlich wird neuerdings zur Verbesserung der Fahrdynamik ein Zusatzlenkwinkel, x_A , eingebracht.

Die lineare Dynamik in Abb. 13 kann mittels einer *Admitanz* Struktur,

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_h \\ \dot{x}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_h \\ F_r \end{bmatrix}, \quad (2)$$

oder durch eine äquivalente *Hybrid-* bzw. *Impedanzdarstellung* beschrieben werden. Dadurch, dass die Lenksäulendynamik in dem linearen Anteil des Lenkungsystems in Abb. 13 enthalten ist, ist es offensichtlich, dass, um die Gesamtdynamik der Referenzkopplung genau nachzubilden, es notwendig ist, die Lenksäulendynamik mittels einer geeigneten Steer-by-Wire Aktuatorik zu reproduzieren.

3.4 Die Reglerstruktur

Grundsätzlich gibt es vier verschiedene Regelungsstrukturen, [5], welche auf Steer-by-Wire angewendet werden können. Abhängig davon welche Variablen zurückgeführt werden, kann man zwischen Admitanz-, Hybrid- und Impedanzregelung unterscheiden. Bei einer Admitanzdarstellung (2), werden die Lenkradwinkel-Stellgeschwindigkeit, $\dot{\delta}_h$, und die Spurstangen-Stellgeschwindigkeit, \dot{x}_r , zurückgeführt. Die Reglerstruktur in diesem Fall ist

$$\begin{bmatrix} \tau_m \\ f_s \end{bmatrix} = C_y \begin{bmatrix} \dot{\delta}_h \\ \dot{x}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ f_A \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Bei der Hybriddarstellung wird die Spurstangenkraft, F_r anstelle der Spurstangen-Stellgeschwindigkeit, \dot{x}_r , zurückgeführt. Dies ergibt folgende Reglerstruktur

$$\begin{bmatrix} \tau_m \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} = C_h \begin{bmatrix} \dot{\delta}_h \\ F_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{x}_A \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Der offene Regelkreis eines Steer-by-Wire Systems in der Admitanzdarstellung kann mit der folgenden Gleichung beschrieben werden,

$$v_a = Y (r_a - A_1 \tau_1), \quad (5)$$

wobei,

$$Y = \begin{bmatrix} y_h & 0 \\ 0 & y_r \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} \alpha_h & 0 \\ 0 & \alpha_r \end{bmatrix}. \quad (6)$$

und

$$v_a = \begin{bmatrix} \dot{\delta}_h \\ \dot{x}_r \end{bmatrix}, \quad r_a = \begin{bmatrix} T_h \\ F_r \end{bmatrix}, \quad \tau_1 = \begin{bmatrix} \tau_m \\ f_s \end{bmatrix}, \quad (7)$$

Dabei sind die Aktuatorik, Sensorik und Regelung in den Komponenten α_h und α_r , sowie y_h und y_r enthalten. Wird nun dieser Kreis durch (3) geschlossen, so ergibt sich

$$v_a = Y (r_a - A_1 C_y v_a), \quad (8)$$

deren Lösung

$$v_a = (I + Y A_1 C_y)^{-1} Y r_a \quad (9)$$

ist.

Die Regelungsaufgabe besteht nun darin den Regler C_y so zu entwerfen, dass das Übertragungsverhalten $r_a \rightarrow v_a$ mit der Referenzkopplung, (2), möglichst nah übereinstimmt. Dieses Problem wurde in [5] durch H_∞ -Optimierung und in [6] durch aktive Beobachter gelöst.

3.5 Robustheitsanalyse

In Abb. 14 werden die Stabilitätsgrenzen des SbW-Systems im Parameterraum der Fahrersteifigkeit, Fahrzeuggeschwindigkeit und des Kraftschlusses gezeigt. Es wird hier erläutert, dass im Gegensatz zum destabilisierenden Effekt in der Aktuatorebene, steigende Fahrersteifigkeit in der Funktionsebene stabilisierend wirkt. Man beachte, dass dabei für die Berechnung der Fahrzeugimpedanz das Einspurmodell verwendet wurde.

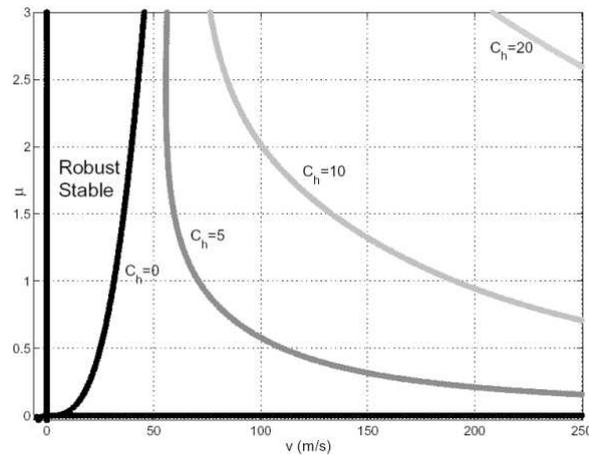


Abbildung 14: Stabilitätsgrenzen im Parameterraum der Fahrersteifigkeit, der Fahrzeuggeschwindigkeit und des Kraftschlusses

Literatur

- [1] BAJCINCA,N. Systematischer regelungstechnischer Entwurf für Steer-by-Wire Haus der Technik, PKW-Lenksysteme-Vorbereitung auf die Technik von morgen, 2003 Essen.
- [2] BAJCINCA,N. Regelung und Aktuatorik von Steer-by-Wire Systemen IIR Innovationen bei Lenksystemen, Nürtingen, 2003.
- [3] BAJCINCA,N;HAUSCHILD,M;CORTESAO,R; Robust Torque Control for Steer-by-Wire Vehicles ICAR 2003, Coimbra, Portugal.
- [4] BAJCINCA,N;CORTESAO,R;HAUSCHILD,M; Haptic Control for Steer-by-Wire Systems IROS 2003, Las Vegas, USA.
- [5] BAJCINCA,N;CORTESAO,R;HAUSCHILD,M; Robust Control for Steer-by-Wire Vehicles Special Issue of Autonomous Robots Journal, 2004.
- [6] CORTESAO,R;BAJCINCA,N; Model-Matching Control for Steer-by-Wire Vehicles with Under-Actuated Structure Sub. IROS 2004, Sendai, Japan.
- [7] BAJCINCA,N; Regelungstechnische Modellierung eines Aktuators mit Planeten-Wälz-Gewindespinndel-Getriebe DLR Internal Report, 1999.
- [8] BAJCINCA,N; A Driving Simulator for Steer-by-Wire Control Design International Automotive Conference, 2002 Stuttgart.
- [9] HU,Z;SALCUDEAN,S;LOEWEN,P; Optimization-based teleoperation controller design in Proc. 13th IFAC World Congress, (San Francisco), S. 405-410, 1996.
- [10] DOYLE,J.C.;FRANCIS,B.A.;TANNENBAUM,A.R.; Feedback control theory New York: MacMillan Publishing Company, 1992.
- [11] HEITZER,D.; Entwicklung eines fehlertolerantes Steer-by-Wire Lenksystems Haus der Technik, PKW-Lenksysteme- Vorbereitung auf die Technik von morgen, 2003, Essen
- [12] HAUSCHILD,M.; Torque Control of Harmonic-Drive Gears using the DLR Torque Sensor Diploma Thesis, FH München, 2002.

- [13] PEER,A.; Modellierung und Regelung eines Force-Feedbacks Aktuators für Steer-by-Wire Systeme Diplomarbeit, TU München, 2003.
- [14] BALAZS,M.; Analyse und Modellierung einer Planeten-Wälz-Gewindespindel Doktorarbeit, TU München, 2000.
- [15] COLGATE,J.; Robust impedance shaping telemanipulation IEEE Transactions on Robotics and Automation, Bd. 9, S. 374-384, 1993.