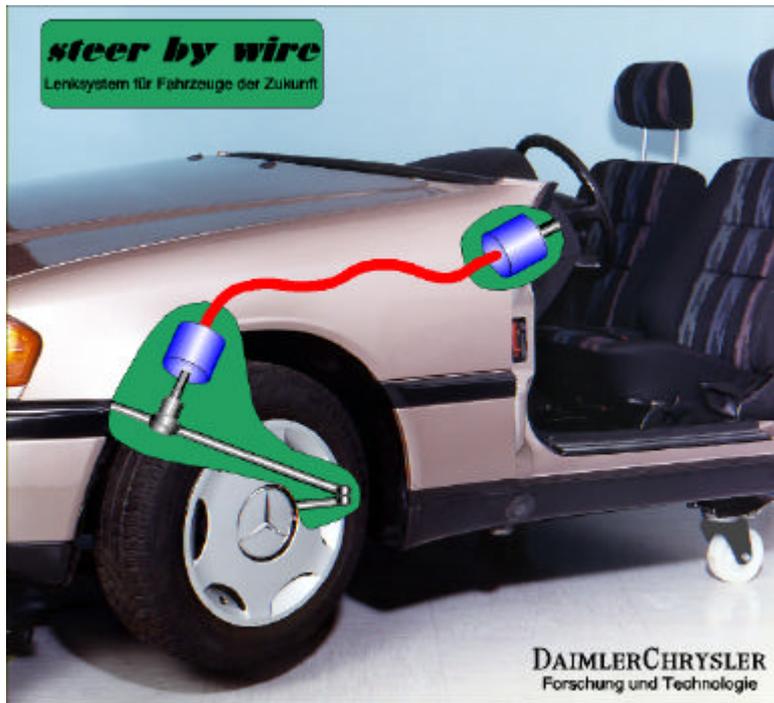


# Elektrisch lenken: Handkraftfaktor für steer-by-wire

Dipl.-Ing. A. Krautstrunk, Dr.-Ing. R. Uhler, Dr.-Ing. M. Zimmer, Prof. Dr.-Ing. P. Mutschler

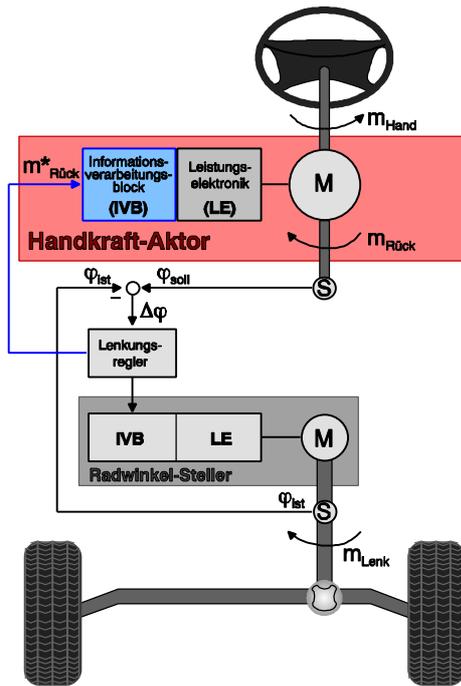


## Einleitung

Heutige Kraftfahrzeuge werden je nach Leistungsbedarf mit hydraulischen, elektrohydraulischen oder elektrischen Lenkhilfen 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 der mechanische Durchgriff besteht. Das Fahrzeug lässt sich mit einem erhöhten Kraftaufwand nach wie vor zuverlässig steuern.

Verzichtet man wie bei dem hier vorgestellten elektrischen Lenksystem auf diese mechanische Rückfallebene, so gewinnt man konstruktive und funktionale Freiheitsgrade:

- Keine Intrusion der Lenksäule und des Lenkrades im Crash-Fall,
- Aufhebung konstruktiver Restriktionen im Bereich des Triebstranges,
- Vereinfachung der Konstruktion für Rechts-/Linkslenker-Ausstattung,
- Realisierung einer variablen Lenkübersetzung,
- Einbeziehung der Lenkung in die Fahrdynamikregelung,
- Basis für zukünftige Bedienkonzepte (z.B. side-stick-Lenkung).



**Bild 1: Die elektrische Lenkung**

**Figure 1: Electrical Steering System**

Das in Bild 1 dargestellte elektrische Lenksystem arbeitet vergleichbar dem Steuerungssystem moderner Großraum-Flugzeuge, bei denen die Vorgaben des Piloten via Steuerleitung als Stellbefehle an die entsprechenden Aktoren übertragen und dort in Bewegungen umgesetzt werden. An die Stelle der mechanischen Kopplung treten bei der hier beschriebenen Lenkung ein Aktor zur Positionierung der Räder – der Radwinkelsteller – sowie ein Motor zur Simulation der Rückstellkräfte am Lenkrad – der Handkraftaktor. Die Koordination zwischen Handkraftaktor und Radwinkelsteller übernimmt der überlagerte Lenkungsregler. Die Lenksäule wird quasi durch Kommunikationsleitungen ersetzt, der Fahrer lenkt – analog zum Flugzeug – "by-wire".

Der Fahrzeugführer kann mit dem Lenkrad ein gewünschtes Lenkmanöver einleiten, indem er ein Drehmoment  $m_{\text{Hand}}$  aufbringt. Diesem entgegen wirkt das vom Handkraftaktor erzeugte Rückstellmoment  $m_{\text{Rück}}$ . Die Aufgabe des Handkraftaktors besteht 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 bzgl. Geschwindigkeit, Ansprechen der Lenkung sowie Straßenzustand bzw. Griffigkeit der Fahrbahn. Bedingt durch die Achsgeometrie erzeugen die Räder beispielsweise bei Geradeausfahrt Rückstellkräfte, die als Zentriermoment am Lenkrad spürbar sein müssen. Ebenso muss die Reaktionskraft, die bei

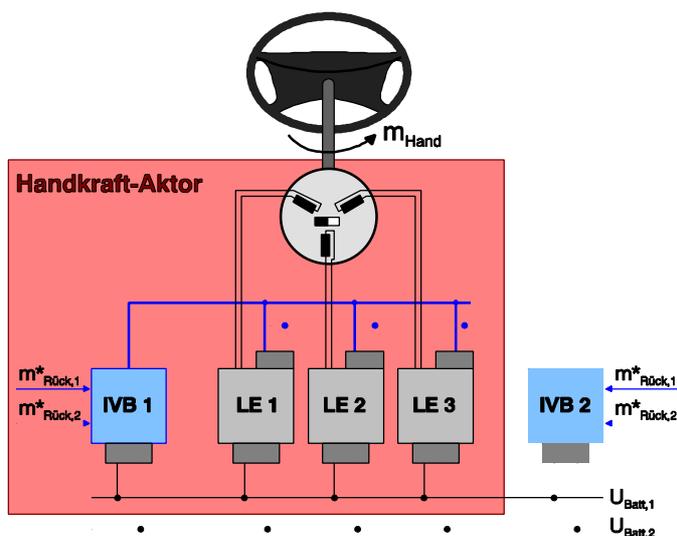
einer Kurvenfahrt an den Rädern wirkt, am Lenkrad modelliert werden. Der heutige Fahrer ist diese Rückmeldungen gewohnt und kann nicht ohne weiteres auf sie verzichten.

Der an der Lenksäule resultierende Lenkradwinkel wird von einem Sensor erfasst und als Sollwert  $\varphi_{\text{Soll}}$  dem Lenkungsregler zugeführt. Aus der Regelabweichung  $\Delta\varphi$  zwischen dem Lenkradwinkel und dem Lenkwinkel wird die Stellgröße für den Radwinkelsteller ermittelt und von diesem in Form des Lenkmomentes  $m_{\text{Lenk}}$  eingestellt. Neben der beschriebenen Winkelregelung ermittelt der Lenkungsregler zusätzlich ein dem Moment  $m_{\text{Lenk}}$  des Radwinkelstellers proportionales Sollmoment  $m_{\text{Rück}}^*$ . Dieses Soll Drehmoment wird dem Handkraftaktor zugeführt und von diesem als Rückstellmoment  $m_{\text{Rück}}$  am Lenkrad eingestellt.

Der Sicherheitsaspekt ist bei der Kraftfahrzeuglenkung von herausragender Bedeutung. Besonders ein neues Konzept wie die elektrische Lenkung wird nur dann Akzeptanz – und auch seine Zulassung – finden, wenn zumindest der gleiche Sicherheitsstandard wie bei der herkömmlichen Lenkung nachgewiesen wird. Ausgehend von der in Bild 1 beschriebenen Gesamtkonfiguration wird nachfolgend für den eingesetzten Handkraftaktor beispielhaft ein redundantes Aktorkonzept vorgestellt, das folgende Anforderungen erfüllt:

Bei Auftreten eines beliebigen Einzelfehlers darf:

- das Lenkrad nicht blockieren – d.h. der Fahrer muss immer lenken können,
- das Lenkrad sich nicht selbständig bewegen – d.h. einen vermeintlichen Lenkwunsch vorgeben,
- die Krafrückmeldung nicht ausfallen – d.h. dem Fahrer steht immer die Rückstellkraft des Handkraftaktors zur Verfügung.



**Bild 2: Das Redundanzkonzept**

**Figure 2: Conception of redundancy**

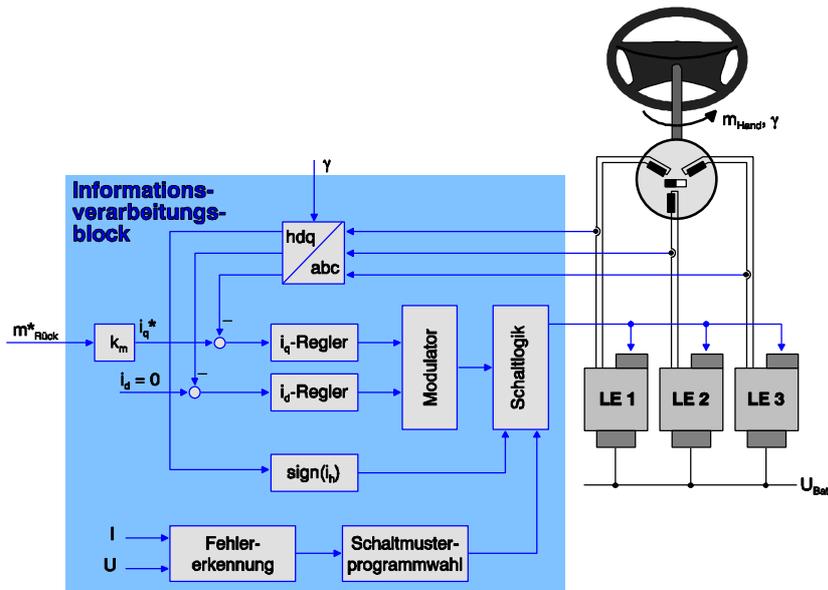
Zur Gewährleistung der Sicherheit und Erfüllung der o.a. Forderungen wurde ein redundantes Aktorkonzept (Bild 2) gewählt, das sich zweier Prinzipien bedient:

Für die Informationsverarbeitung, die Stromversorgung und die Sensorik wurde das zweikanalige "fail-silent"-Prinzip gewählt. Es sieht vor, dass sich jeder Kanal permanent selbst überwacht und sich im Fehlerfall abschaltet und still (silent) verhält. Der zweite Kanal übernimmt in diesem Fall alleine die vollständige Funktion.

Der Motor mit der Leistungselektronik wurde dagegen "fail-operational" ausgelegt [1]. Der Wechselrichter ist dazu in drei Einheiten (LE1, LE2, LE3) aufgeteilt, die je einen Motorstrang versorgen. Dazu sind alle Wicklungsenden der Maschine herausgeführt und mit den entsprechenden Wechselrichtereinheiten verbunden. Auf die übliche Stern- oder Dreieckschaltung der Stränge wurde hier bewusst verzichtet. Mit dieser Wicklungsanordnung und dieser Topologie der Leistungselektronik sind die Stränge voneinander elektrisch entkoppelt. Im Falle eines Fehlers besteht damit die Möglichkeit den fehlerbehafteten Strang abzuschalten und dennoch die gleiche Durchflutung im Motor und damit das gleiche Drehmoment wie im fehlerfreien Fall zu erzeugen. Dies ist möglich, da auch nach dem Abschalten eines Strangs zwei um  $120^\circ$  versetzte, voneinander unabhängige Wicklungssysteme zur Verfügung stehen. Die Strangströme müssen selbstverständlich an den neuen Betriebsmodus angepasst werden. Das betrifft zum einen die Phasenlage der verbleibenden Ströme und zum anderen ihre Amplituden. Diese sind im zweiphasigen Betrieb um den Faktor  $\sqrt{3}$  größer als im dreiphasigen.

Die hier beschriebene 2-aus-3-Redundanz hat den Vorteil, dass der elektromechanische Wandler nicht zweikanalig ausgeführt werden muss. Es wird die inhärente Redundanz einer Standard-Maschine ausgenutzt. Aufgrund der im zweiphasigen Betrieb höheren Stromamplituden muss die Maschine allerdings mit Rücksicht auf Sättigungseffekte im Eisenkreis größer dimensioniert werden.

Im Folgenden wird das Verhalten des Handkraftaktors im zweiphasigen Betrieb näher untersucht. Bei dem verwendeten Versuchsaufbau (s. Bild 3) wurde auf die Zweikanaligkeit der Informationsverarbeitung, der Leistungsversorgung und der Sollwertvorgabe verzichtet. Für den zweiphasigen Betrieb spielen sie keine Rolle.



**Bild 3: Informationsverarbeitungsblock**

**Figure 3: Information processing**

Die Regelung der Motorströme kann sowohl in einem ständerfesten als auch in einem läuferfesten Koordinatensystem durchgeführt werden. In dem vorliegenden Beispiel wurde ein läuferfestes System mit linearen Reglern in d- und q-Achse gewählt. Der drehmomentbildende Strom in der q-Achse wird proportional zum Sollwert des Rückstellmoments  $m^*_{\text{Rück}}$  geregelt. Der Sollwert der feldbildenden Stromkomponente in der d-Achse wird aufgrund der Permanentmagneterregung zu null vorgegeben. Ein Modulator setzt die Reglerausgänge in Schaltsequenzen für die Leistungselektronik um. Ein solches System lässt sich leicht auf einem  $\mu$ -Rechner implementieren. Zusätzlich zu den dq-Komponenten muss aufgrund der hier vorliegenden Schaltungstopologie auch die Homopolarkomponente des Stroms berücksichtigt werden. Während bei einer Sternschaltung der Maschinenstränge die Summe der Strangströme nach der Knotenregel immer null ergibt, muss bei getrennten Strängen diese Nullkomponente aktiv zu null geregelt werden. Zu diesem Zweck wird dem Vorzeichen der Homopolarkomponente entsprechend in der Schaltlogik auf die Schaltsequenzen, die der Modulator erzeugt hat, eingewirkt. Die Schaltlogik hat die Aufgabe, die Schaltsequenzen des Modulators in Schaltbefehle für die Leistungselektronik umzuwandeln.

Die Fehlererkennung überwacht die Ströme und Spannungen im Antrieb und detektiert mögliche Abweichungen vom Normalbetrieb [2]. Tritt ein Fehler auf, wird eine Fehlermeldung an die Schaltmusterprogrammwahl gegeben. Daraufhin werden die Schaltsequenzen in der Form abgeändert, dass der betroffene Strang abgeschaltet wird. Mit den verbleibenden beiden intakten Stränge wird dann der zweisträngige Notbetrieb ausgeführt. Anschließend wird der

Fehler vom  $\mu$ -Rechner genau identifiziert und es wird geprüft, ob in den Normalmodus zurückgekehrt werden kann.

Messungen, die am realisierten Laborprüfstand durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass der Handkraftaktor im dreiphasigen Betrieb das gewünschte Rückstellmoment mit hoher Regelgüte einstellt. Im zweiphasigen Betrieb dagegen entsteht ohne zusätzliche Korrekturmaßnahmen eine rotorwinkelabhängige Drehmomentwelligkeit. Diese Welligkeit ist für den Fahrer am Lenkrad deutlich spürbar und für das Lenkgefühl nicht akzeptabel. Die Ursache hierfür wird nachfolgend erläutert.

Das Drehmoment  $m_{el}$  einer elektrischen Maschine kann allgemein als das Integral über das Produkt aus Durchflutungsverteilung  $\Theta(\Gamma, \gamma)$  und Flussdichteverteilung  $b(\Gamma, \gamma)$  über den Ständerumfang aufgefasst werden:

$$m_{el}(\mathbf{g}) = r \cdot l \cdot \int_0^{2p} \mathbf{q}(\Gamma, \mathbf{g}) \cdot b(\Gamma, \mathbf{g}) d\Gamma \quad (1)$$

Dabei beschreibt  $\Gamma$  den Ständerwinkel,  $\mathbf{g}$  den Rotorwinkel,  $r$  den Rotorradius und  $l$  die aktive Motorlänge. Die Durchflutung  $\Theta(\Gamma, \gamma)$  kann als Summe über die Fourierreihen der Strangdurchflutungen aufgefasst werden.

$$\mathbf{q}(\Gamma, \mathbf{g}) = \sum_{i=1}^3 i_i(\mathbf{g}) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} c \mathbf{q}_n \cdot \cos(n(\Gamma - \mathbf{j}_i)) \quad (2)$$

Die Durchflutungverteilung eines Stranges wird durch den Strangstrom  $i_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) und eine Summe, die die Wicklungsanordnung in der Maschine repräsentiert, beschrieben.

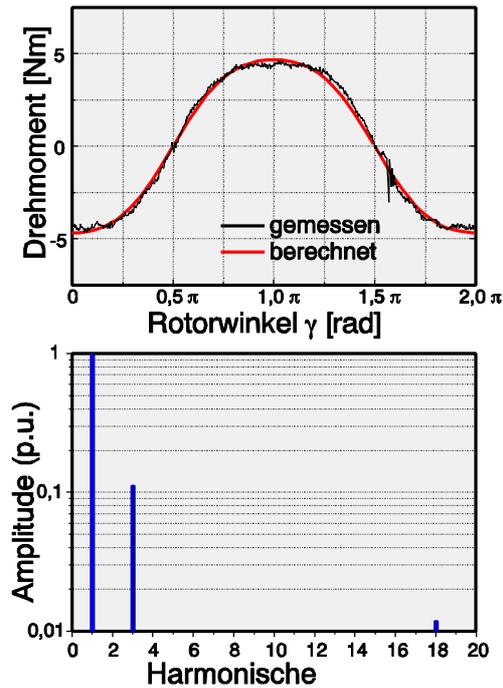
Die Flussdichteverteilung  $b(\Gamma, \gamma)$ , die von den Permanentmagneten hervorgerufen wird, liefert die Fourierreihe:

$$b(\Gamma, \mathbf{g}) = \sum_{n=1}^{\infty} c b_n \cdot \cos(n(\Gamma - \mathbf{g})) \quad (3)$$

Setzt man die Gleichungen (2) und (3) in Gleichung (1) ein, erhält man nach einigen Umrechnungsschritten die Beziehung

$$m_{el}(\mathbf{g}) = p \cdot l \cdot r \sum_{i=1}^3 i_i(\mathbf{g}) \sum_{n=1}^{\infty} c \mathbf{q}_n \cdot c b_n \cdot \cos(n(\mathbf{g} - \mathbf{j}_i)) \quad (4)$$

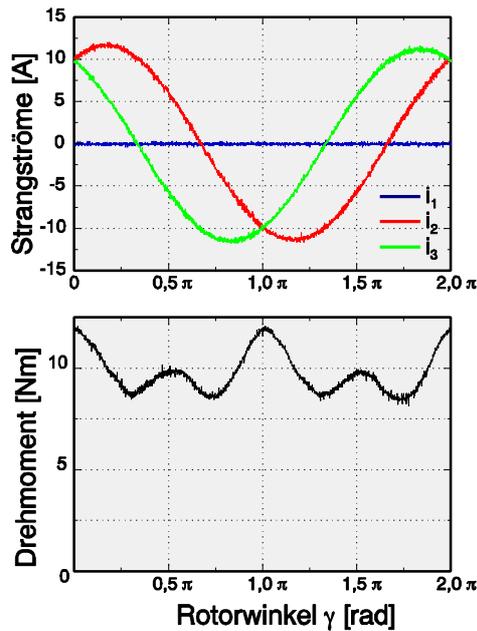
für das von der Maschine erzeugte Drehmoment. Es kann aufgefasst werden als die Summe der Drehmomentbeiträge der einzelnen Stränge.



**Bild 4: Rotorwinkelabhängiges Strangdrehmoment und Fourieranalyse**

**Figure 4: Rotor-angle-dependent phase torque and Fourier analysis**

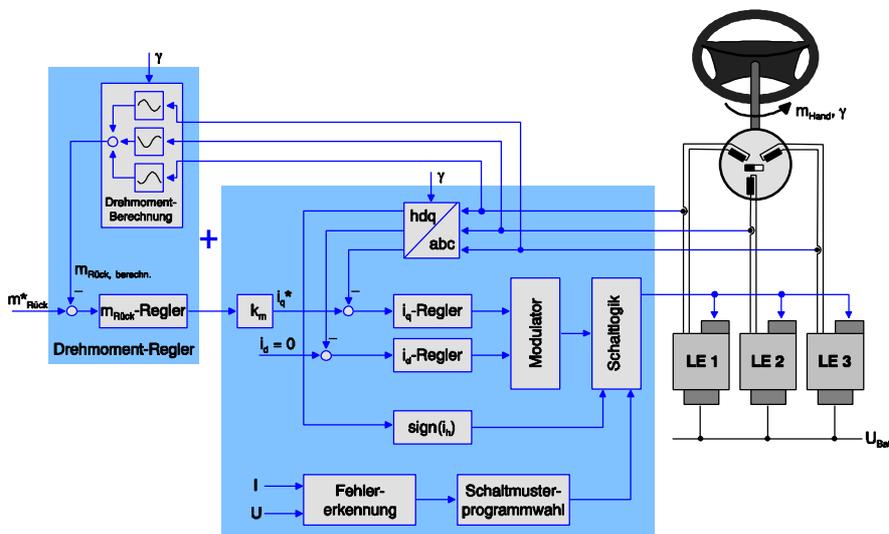
Betrachtet man den in Bild 4 dargestellten Zeitverlauf des Drehmoments eines Stranges bei konstantem Strangstrom und zweiphasiger Speisung, so erkennt man eine Abweichung zwischen dem gemessenen und dem theoretisch berechneten Drehmomentverlauf. Die ebenfalls dargestellte Fourieranalyse des gemessenen Zeitverlaufs zeigt, dass neben der Grundwelle die 3. Harmonische mit ca. 11% Amplitude eine erhebliche Rolle spielt. Die 18. Harmonische, die von der Nutung des Stators herrührt, ist dagegen zu vernachlässigen. Die Ursache für das Auftreten einer 3. Harmonischen im Drehmomentverlauf eines Stranges ist konstruktionsbedingt: Die Wicklung kann aufgrund der endlichen Anzahl an Nuten nicht optimal verteilt werden. Bei symmetrischer, sinusförmiger Speisung der drei Stränge heben sich die Anteile der 3. Harmonischen jedoch gegenseitig auf, bei zweiphasigem Betrieb mit sinusförmiger Speisung wird der Beitrag der 3. Harmonischen dagegen sehr deutlich. Das resultierende Gesamtdrehmoment der Maschine (Bild 5) enthält dann nach den Additionstheoremen für trigonometrische Funktionen einen Oberwellenanteil mit einer 2. und 4. Harmonischen.



**Bild 5: Rotorwinkelabhängige Strangströme und Gesamtdrehmoment im zweiphasigen Betrieb**

**Figure 5: Rotor-angle-dependent phase currents and torque with two-phase operation mode**

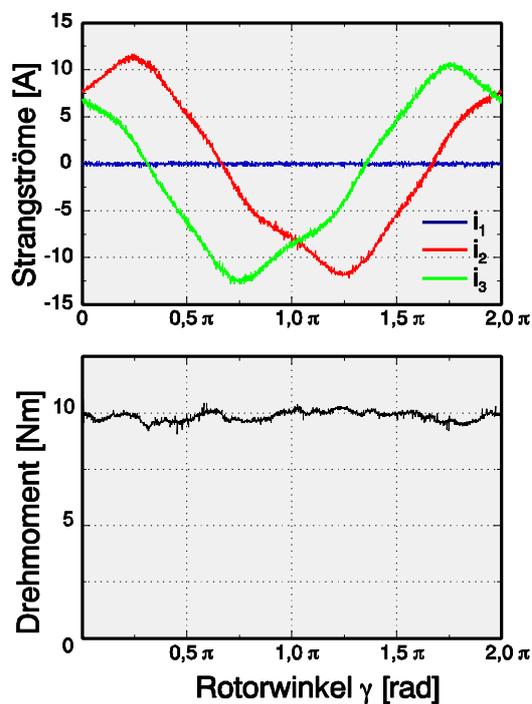
Zur Kompensation dieses Oberwellenanteils müssen die Kurvenverläufe der Strangströme abweichend von der Sinusform entsprechend angepasst werden. Die gewünschte Reduktion der im zweiphasigen Betrieb aufgetretenen Drehmomentwelligkeit kann durch eine überlagerte Drehmomentregelung erreicht werden. Da die Messung des Moments aus Gründen des Aufwands nicht vertretbar ist, wird eine Berechnung des Maschinenmomentes nach Gleichung (4) durchgeführt. Bild 6 zeigt die Struktur des realisierten Laboraufbaus.



**Bild 6: Drehmomentregelung des Handkraftaktors**

**Figure 6: Torque control of the force feedback actuator**

Eingangsgrößen für die Berechnung des Drehmoments sind der Rotorlagewinkel  $\gamma$  und die Strangströme  $i_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Der berechnete Wert des Drehmoments wird als Istwert der Drehmomentregelung zugeführt. Die so realisierte Drehmomentregelung arbeitet unabhängig von der realisierten unterlagerten Stromregelung für beliebige Formen der Strangströme. Somit muss zwischen den beiden Betriebsarten dreiphasiger Betrieb und zweiphasiger Betrieb keine Umschaltung der überlagerten Regelungsstruktur erfolgen. Bild 7 zeigt die Messergebnisse der Drehmomentregelung im zweiphasigen Betrieb. Aufgrund des überlagerten Drehmomentregelkreises wird das resultierende Rückstellmoment des Handkraftaktors ohne störende Drehmomentwelligkeiten ausgeregelt.



**Bild 7: Rotorwinkelabhängige Strangströme und Gesamtdrehmoment im zweiphasigen, drehmomentgeregelten Betrieb**

**Figure 7: Rotor-angle-dependent phase currents and torque with two-phase operation mode and torque control**

### Zusammenfassung

Der Ersatz der mechanischen Lenkung durch ein elektrisches Lenksystem ohne mechanische Rückfallebene bringt konstruktive und funktionale Vorteile, die der Steigerung des Komforts und der aktiven Sicherheit dienen. Die für ein solches steer-by-wire System notwendige Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Komponenten kann durch Redundanzkonzepte erfüllt werden. In dem vorliegenden Artikel wird für den Handkraftaktor, der innerhalb eines steer-by-wire Systems dem Fahrer eine fahrsituationsabhängige Rückstellkraft am Lenkrad

entgegenbringt, beispielhaft eine 2-aus-3-Redundanz untersucht. Dieses Redundanzkonzept erlaubt es, aufgrund der Schaltungstopologie für den Motor eine Standardmaschine einzusetzen. Lediglich die drei Stränge der Drehfeldmaschine werden elektrisch getrennt. Im Falle eines Fehlers in einem Strang kann der Handkraftaktor mit den verbleibenden beiden Strängen betrieben werden. Eine überlagerte Drehmomentregelung stellt dabei sicher, daß sowohl im dreiphasigen als auch im zweiphasigen Betrieb des Handkraftaktors keine Drehmomentwelligkeit am Lenkrad spürbar ist.

#### Literatur

- [1] Krautstrunk, A.; Mutschler, P.: Remedial Strategy for a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive. Proc. EPE'99, Lausanne/Switzerland, 1999
- [2] Krautstrunk, A.; Mutschler, P.: Fault Detection and Identification for a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive. Proc. PCIM'99, Nuremberg/Germany, 1999