



Aktoren für anspruchsvolle Fahrwerke – Clevere Mechanik entlastet Elektromotoren

Manfred Kraus



FAG

Einleitung

Der Trend zum trockenen Chassis und die bedarfsorientierte Ansteuerung von Aktoren zur Verringerung des Kraftstoffverbrauches („Avoiding of parasitic losses“) sind wichtige Gründe für die Entwicklung von elektromechanischen Aktoren.

Der zunehmende Fortschritt auf dem Gebiet der Mikroelektronik und die Kombination/Integration von Sensorik, elektromechanischer Aktorik und Software eröffnen vollständig neue Möglichkeiten zur Steigerung der aktiven Sicherheit von Fahrzeugen und zur weiteren Ausnutzung von Funktionspotenzialen im Fahrwerk.

Die elektromechanische Aktorik für Fahrwerke beinhaltet u.a. neben Brems- und Lenkungssystemen auch adaptive Dämpfersysteme in Vertikalrichtung sowie Aktoren zur Einstellung von Sturz-, Vorspur- und Wankwinkel. Darüber hinaus wird es neue Anwendungsfelder im Fahrwerksbereich für elektromechanische Aktoren geben, z.B. als aktive Tilger zur Entkopplung des Hilfsrahmens gegenüber dem Fahrzeugaufbau.

Die heute noch vorhandene Leistungsgrenze aufgrund des 12-V-Bordnetzes wird in zunehmendem Maß verschoben, wenn in naher Zukunft Hybrid-Fahrzeuge und leistungsfähigere Bordnetze mit mehr als 12 V zur Verfügung stehen. Dies entbindet aber nicht von einer noch effektiveren Nutzung der vom Verbren-

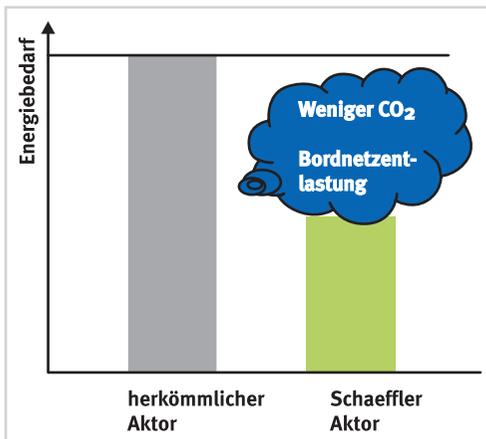


Bild 1 Zielsetzung bei der Entwicklung von Schaeffler Aktoren

nungsmotor bzw. dem Bordnetz zur Verfügung gestellten Energie.

Die Schaeffler Gruppe hat sich zum Ziel gesetzt – neben der bedarfsgerechten Betätigung der Aktoren – weitere Potenziale zu untersuchen und Aktoren mit einer besseren Energiebilanz zu entwickeln. Ziel dieser Veröffentlichung ist es, aufzuzeigen, wie u.a. durch intelligente Mechanik diese Systeme/Aktoren weiterentwickelt und energetisch besser genutzt werden können (siehe Bild 1).

Randbedingungen in der Schaeffler Gruppe

In der Schaeffler Gruppe sind Erfahrungen und Kompetenzen nicht nur für mechanische, sondern auch elektrotechnische Produkte und Fertigungsprozesse in hohem Maße vorhanden (Bild 2). Darüber hinaus stellt ein integrierter Entwicklungsprozess die sinnvolle und ganzheitliche Zusammenführung von Mechanik, Elektrotechnik, Sensorik und Software sicher. Die Bündelung dieser Erfahrungen bei Schaeffler hat für den Kunden nur Vorteile, da das über lange Jahre hinweg gesammelte mechanische Wissen so optimal und ohne Verluste in die Software bzw. das mechatronische System integriert werden kann, und dabei alle Stärken ohne Schnittstellenverlust in das System eingebracht werden können. Die folgenden Ausführungen zeigen exemplarisch Beispiele dieser Entwicklungen und machen deutlich, welcher Kompetenzen es bedarf und wie diese zielgerichtet zusammengeführt werden müssen, damit ein erfolgreiches Produkt entsteht.

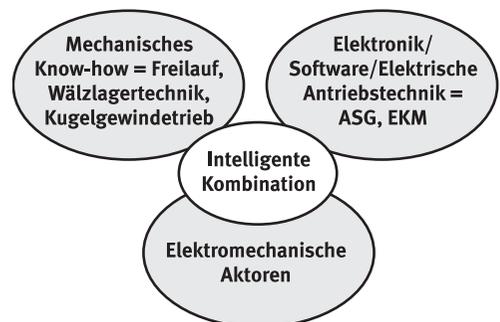


Bild 2 Randbedingungen für die Entwicklung mechatronischer Aktoren

Wankstabilisierung

Merkmale, Aufbau, Funktion

Der passive Stabilisator ist als Drehstabfeder ausgeführt. Er muss den Zielkonflikt zwischen ausreichender Steifigkeit zur Verringerung der Seitenneigung (Wankbewegung/-winkel) bei Kurvenfahrt und ausreichender Nachgiebigkeit bei einseitiger Störanregung z.B. beim einseitigen Überfahren einer Schwelle (zur Verringerung der Vertikalbewegung der Karosserie) lösen.

Als aktive Aktoren werden heute hydraulische Aktoren eingesetzt, die einen geteilten Drehstab während der Kurvenfahrt in Abhängigkeit von der Querbeschleunigung verdrehen und so die Karosserieneigung spürbar verringern (Bild 3). Bei Geradeausfahrt und einseitiger Störanregung muss der Stabilisator „offen“ wirken, was ein Komfortgewinn gegenüber einem passiven Stabilisator darstellt. Die Karosserieneigung kann auch durch radselektiv hydraulisch verstellbare Federbeine verhindert werden, die neben der Wank- auch die Nickbewegung beim Bremsen und Beschleunigen eliminieren können. Luftgedeferte Systeme sind aufgrund der hohen Kompressibilität der Luft dazu nicht geeignet.



- **Fahrzeuggewicht = 1 700 kg**
- **Betätigungszeit = 0,2 s**
- **Verspannmoment = 800 Nm**
- **Max. Strom = 50 A**

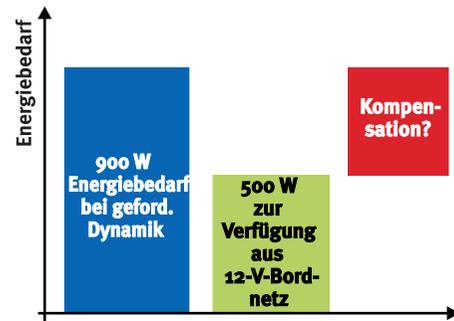


Bild 4 Anforderungen an eine Wankstabilisierung für ein Fahrzeug der oberen Mittelklasse

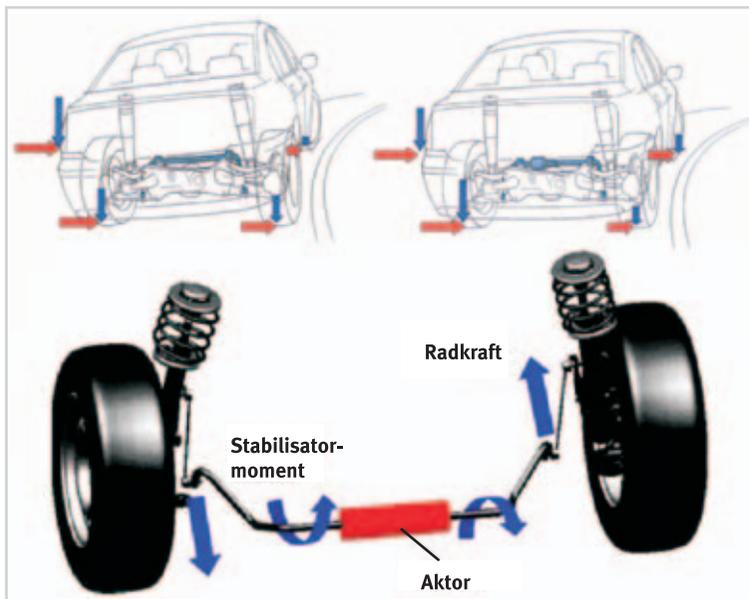


Bild 3 Funktion der Wankstabilisierung

Die Anforderungen an ein Wankstabilisierungssystem für die obere Mittelklasse sind in Bild 4 zusammengefasst.

Der Ansatz, den Aktor nur noch bedarfsgerecht anzusteuern, führt zu einem elektrischen Wankstabilisator bestehend aus E-Motor mit ECU (Electronic Control Unit = Steuergerät) und einem Rotativgetriebe mit hoher Übersetzung (Bild 5).

Die Schaeffler Gruppe hat sich zum Ziel gesetzt, die Energiebilanz des Aktors

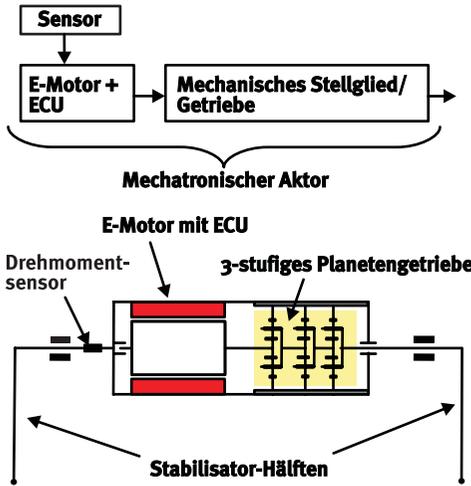


Bild 5 Aufbau eines Aktors zur Wankstabilisierung ohne Kompensation

weiter zu verbessern bzw. die Anwendungsgrenzen basierend auf einem 12-V-Bordnetz „nach oben“ zu erweitern. Dazu wird der elektrische Antrieb mit einem von der Schaeffler Gruppe entwickelten Kompensationsmodul kombiniert und damit entlastet. Bild 6 zeigt die prinzipielle Darstellung.

Bild 6 zeigt ein Chassis mit Tragfedern. Der Drehstab ist symbolisch dargestellt als Pendelbalken mit beidseitig angeordneten Druckfedern. Bringt man in der Mitte dieses Balkens ein Kurvenprofil an, auf dem eine federvorgespannte Rolle abwälzen kann, dann könnte bei einer Kurvenfahrt die mit einer Kompensationsfeder vorgespannte Rolle an diesem Kurvenprofil abwälzen. Dies führt zu einer Drehung des Pendelbalkens, und die Federenergie der Kompensationsfeder wird in die linke und rechte Feder des Stabilisators umverteilt. Somit wird der Stabilisator vorgespannt und die Seitenneigung des Fahrzeuges verringert. Bei Geradeausfahrt

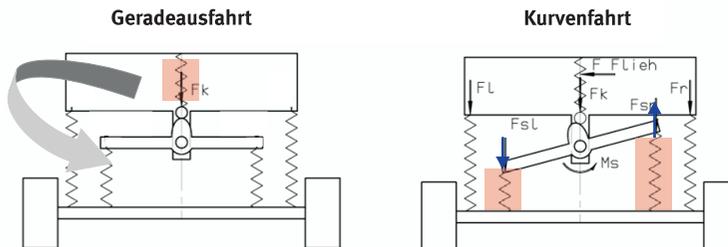


Bild 6 Prinzipielle Funktion der Kompensation

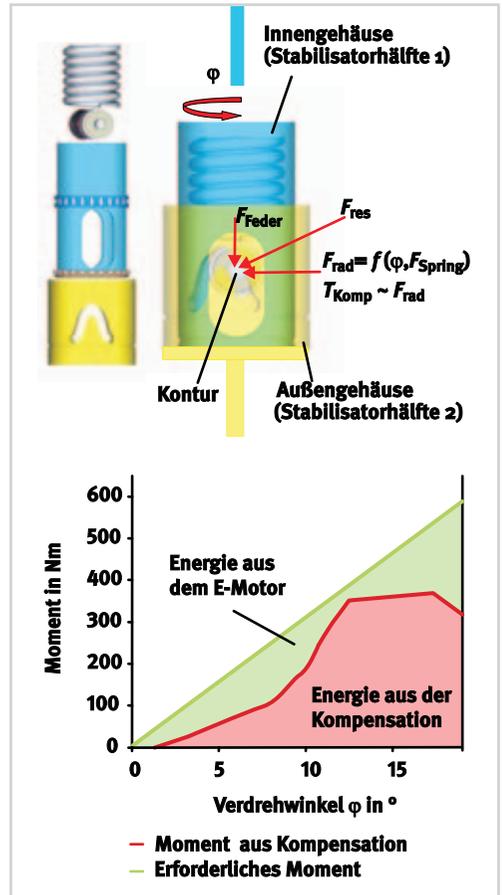


Bild 7 Aufbau des Kompensationsmoduls und Einsparung durch die Kompensation

wird – wenn alles reibungsfrei wäre – die Energie aus der linken und rechten Druckfeder des Stabilisators wieder in der Kompensationsfeder gespeichert.

In Bild 7 sind oben links die Einzelteile des Kompensationsmoduls bestehend aus Innenhülse (blau), Außenhülse (gelb), der Kompensationsfeder und der Rolle dargestellt. Wird nun das Kompensationsmodul in den geteilten Drehstab integriert, so ist die Rolle mit der Kompensationsfeder in der Innenhülse vorgespannt, die wiederum mit der oberen Stabilisatorhälfte verbunden

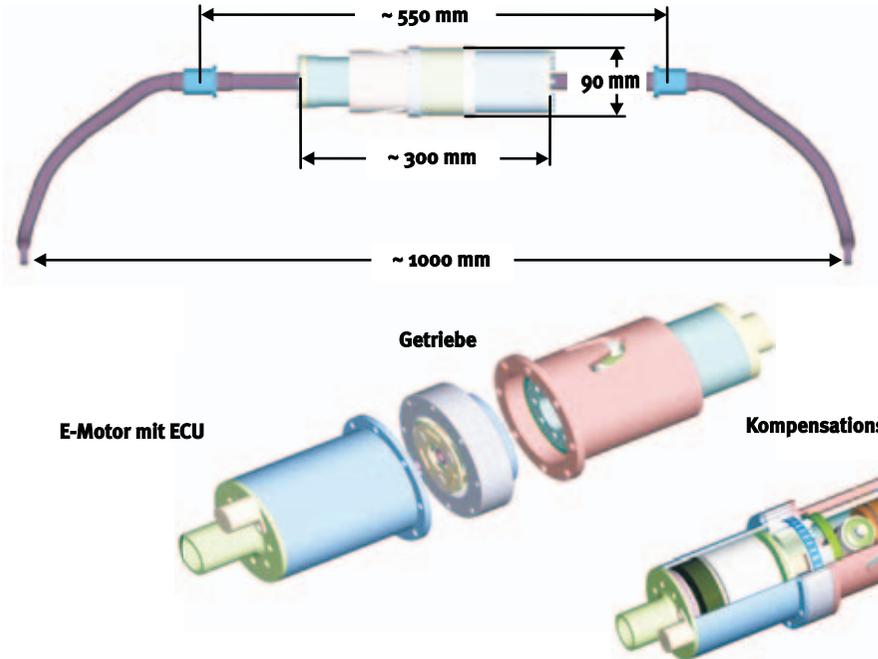


Bild 8 Aufbau und wichtige Hauptabmessungen des Wankstabilisators

ist. Die Außenhülse, die formschlüssig mit der unteren Stabilisatorhälfte verbunden ist, eine Einheit mit der V-förmigen Kulissee. Die Innenhülse ist drehbar in der Außenhülse gelagert. Wird nun die Kompensationsfeder entspannt, dann wälzt die Rolle an der V-Kulisse ab und erzeugt eine Rotativbewegung und eine Umfangkraft, die – mit dem Hebelarm, der sich aus dem Abstand der V-Kulisse zur Mittellinie ergibt, multipliziert – ein (Verspann)-Moment im Aktor induziert.

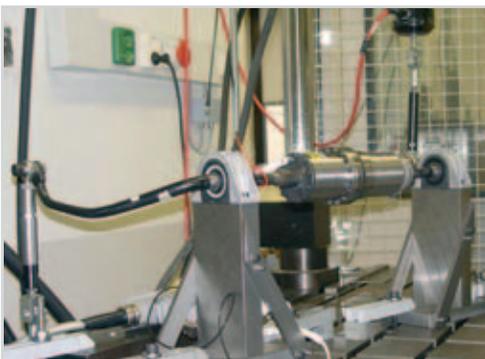


Bild 9 Wankstabilisator auf dem Funktions- und Dauerlaufprüfstand

In Bild 7 ist unten das Verspannmoment des Stabilisators über dem Drehwinkel aufgetragen (grüne Linie). Die sich darunter ergebende Fläche ist die Energie, die der Aktor aufbringen muss. Die aus der Kompensationsfeder zur Verfügung gestellte Energie ist der rote Teil. Somit muss ein parallel geschalteter Elektromotor nur noch die grün dargestellte Energie aufbringen, was zu einer deutlichen Verbesserung der Energiebilanz des Aktors führt.

Den Aufbau des elektromechanischen Wankstabilisators der Schaeffler Gruppe zeigt Bild 8. Der Aktor besteht im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten:

- E-Motor (BLDC = Bürstenloser Gleichstrommotor) mit ECU
- Umlaufgetriebe, welches vom E-Motor angetrieben wird
- Kompensationsmodul, das parallel zum E-Motor mit Umlaufgetriebe geschaltet ist
- Stabilisatorhälften

Bild 9 zeigt den Aktor auf dem Funktions- und Dauerlaufprüfstand, der u.a. zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens, der Dauerhaltbarkeit und des Stromverbrauches eingesetzt wird.

Wankstabilisierung – Ergebnisse und Stand der Entwicklung

In der Entwicklung wurden die Grundlagen geschaffen, das Verhalten des Aktors im Fahrzeug durch Integration der Simulationsmodelle des Aktors in ein MKS-Programm (Mehrkörper-Simulationsprogramm) zu simulieren. Weiterhin wurde basierend auf einem Einspurmodell ein Regler entwickelt, der den Aktor ansteuert. Nach erfolgreicher Optimierung verschiedener Parameter in der Simulation konnten der Regler und die Ansteuerung des Aktors auf einen Rapid-Prototype-Controller übertragen werden und im Prüfstandsbetrieb die sichere Funktion, die Dauerhaltbarkeit, der Energieverbrauch und die Robustheit nachgewiesen werden.

Im Folgenden werden exemplarisch einige Entwicklungsergebnisse aus der Simulation und dem Fahrversuch vorgestellt. Bild 10 zeigt das aufzubringende Moment, die Stromaufnahme und die aufgenommene Leistung über der Zeit bei einer Rechteckanregung. Das Führungsverhalten – also die Zeit, in der das geforderte Verspannmoment aufgebaut wird – beträgt 0,25 s und ist damit 0,1 s schneller als bei einem Aktor ohne Kompensation. Zudem ist die Strom- und Leistungsaufnahme dabei um etwa 50 % geringer.

Die in der Simulation ermittelte Stromaufnahme wurde im Fahrversuch bestätigt. Bei Dreieckanregung (Bild 11) konnten Stromspitzen des für die Belastung des Bordnetzes relevanten Batteriestromes von maximal 15 A gemessen werden und somit die Wirksamkeit der Kompensation nachgewiesen werden. Weiterhin zeigt Bild 11

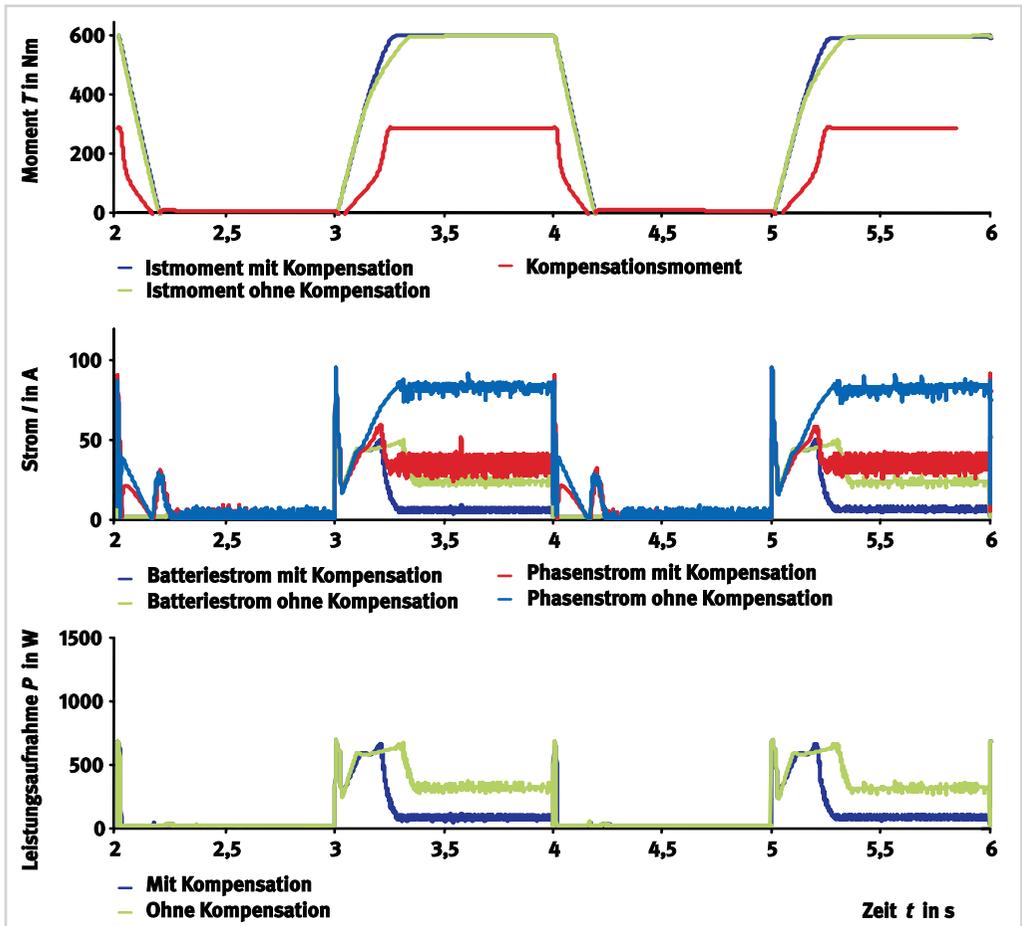


Bild 10 Simulation des Führungsverhaltens, der Strom- und Leistungsaufnahme über der Zeit bei Rechteckanregung

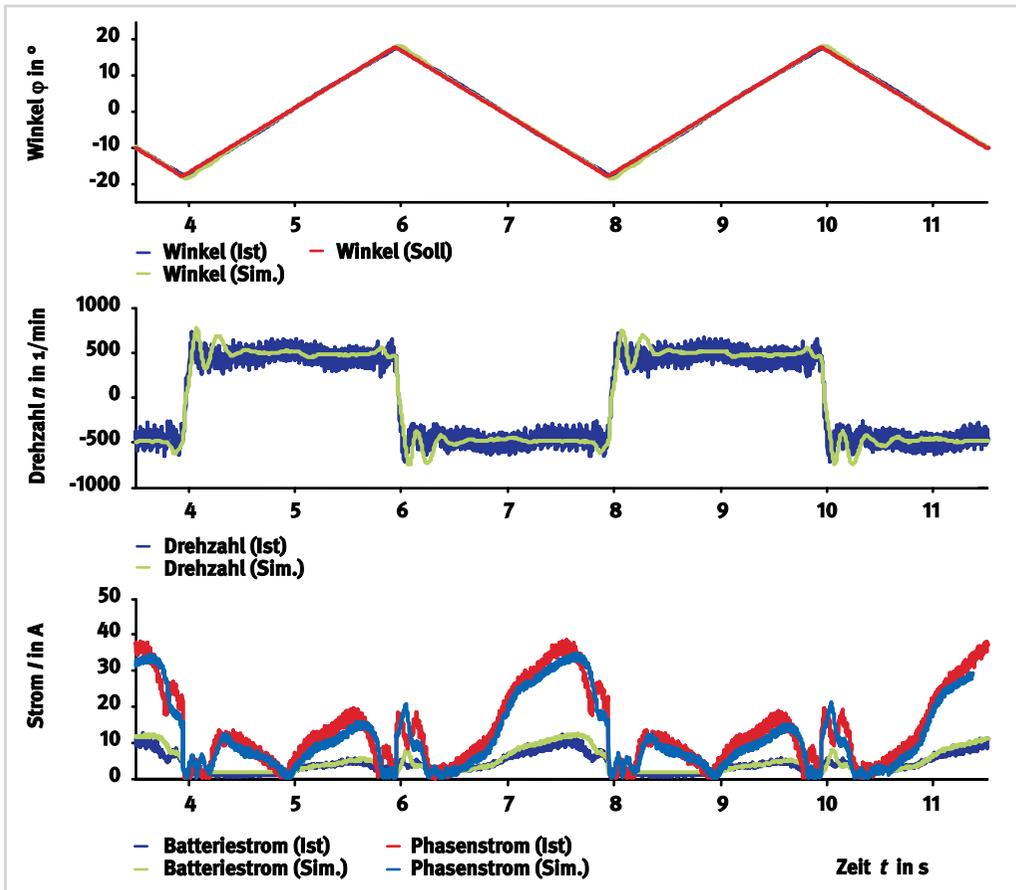


Bild 11 Vergleich des gemessenen Strombedarfs zur Simulation bei dreieckförmigem Verlauf des vorgegebenen Wankwinkels

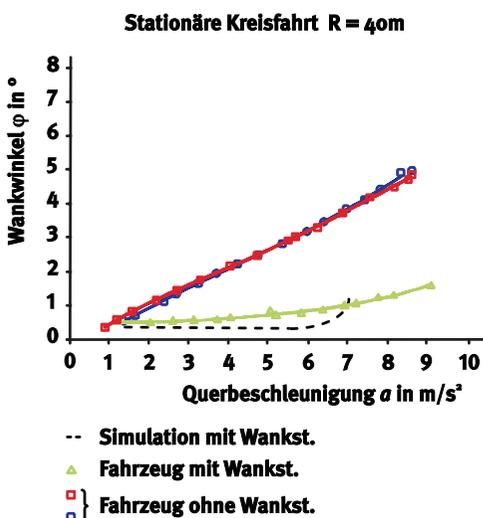


Bild 12 Ergebnisse aus Fahrversuch und Simulation

eine gute Korrelation zwischen Simulation und gemessenem Stromverlauf auf dem Prüfstand.

Einen Auszug der Ergebnisse aus dem Fahrversuch zeigt Bild 12. Hier ist ein Vergleich des Wankwinkels über der Querbeschleunigung für eine Fahrt auf der Kreisbahn mit einem Radius von $R = 40\text{m}$ dargestellt. Die Vergleichsfahrzeuge ohne Wankstabilisierung zeigen eine stetige Zunahme des Wankwinkels über der Querbeschleunigung. Der Wankwinkel des Schaeffler-Fahrzeuges mit Wankstabilisierung hingegen bleibt nahezu konstant und lässt erst bei höheren Querbeschleunigungen ein Wanken zu, um dem Fahrer die Grenze der Reifenhaftung zu signalisieren. Die Simulationsergebnisse zeigen eine leichte Abweichung zum Fahrversuch. Grund hierfür ist, dass bei der Simulation kein komplexes Reifenmodell implementiert wurde, sondern die Kompression der Reifen nun sehr stark vereinfacht im Modell berücksichtigt wurde.

Nachdem die Fahrzeugstests positiv verlaufen sind, wird der Wankstabilisator konstruktiv überarbeitet. Ziel ist es hierbei, die Massenträgheiten zu verringern, den erforderlichen Bauraum zu reduzieren und Kostenoptimierungen in die Konstruktion einfließen zu lassen.

Elektromechanischer Linearaktor

Immer wenn es darum geht, lineare oder rotative Stellbewegungen ohne Hydraulik zu erzeugen, werden aus den genannten Gründen in

zunehmendem Maße elektromechanische Aktoren eingesetzt. Die Grundkonfiguration besteht dabei aus den in Bild 5 gezeigten Komponenten, E-Motor mit Leistungselektronik, Sensor und Getriebe bzw. mechanisches Betätigungselement. Wenn das Getriebe über eine Selbsthemmung verfügt, sind bei stationären Bedingungen keine Haltekräfte/-ströme notwendig. Jedoch ist dann aufgrund des geringen Wirkungsgrades die Leistungsaufnahme beim Betätigen zumeist nicht unerheblich. Im Gegensatz dazu verfügt ein wirkungsgradoptimierter Aktor über eine geringere Leistungsaufnahme und eine gute Dynamik. Jedoch sind bei statischen Belastungen große Haltekräfte/-ströme

notwendig, um eine angefahrne Position zu halten. Dies soll mit dem Kran in Bild 13 (linke Seite) veranschaulicht werden.

Eine energetische Verbesserung ergibt sich durch die Kombination des wirkungsgradoptimierten Aktors mit einem Sperrmechanismus, der in der angefahrenen Position den Aktor unter Last „verriegelt“, wie auf der rechten Seite von Bild 13 dargestellt. Damit lässt sich der Zielkonflikt zwischen hohem Wirkungsgrad und Selbsthemmung auflösen.

Bild 14 zeigt den Aufbau eines solchen Aktors als Linearaktor. Neben dem E-Motor und einem Kugelgewindetrieb als Getriebe ist ein in beide Richtungen schaltbarer Freilauf in den Leistungsfluss des Aktors integriert.

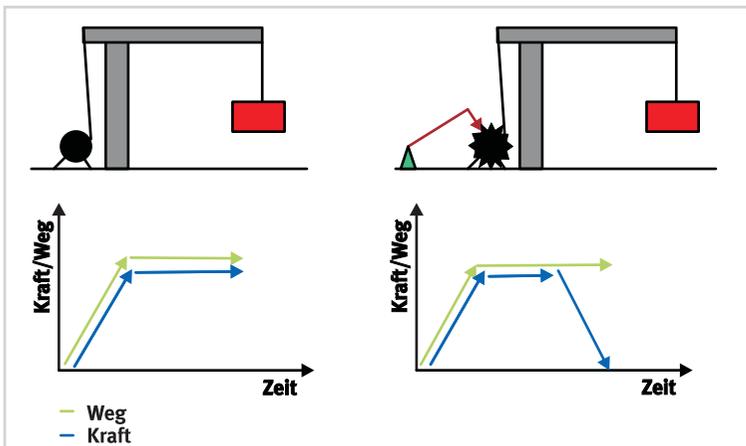


Bild 13 Aktor ohne bzw. mit Sperrmechanismus

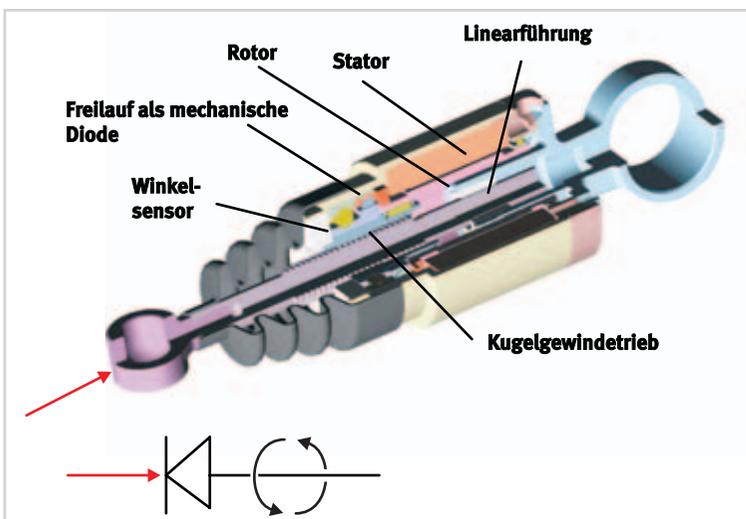


Bild 14 Aufbau eines Linearaktors mit schaltbarem Freilauf

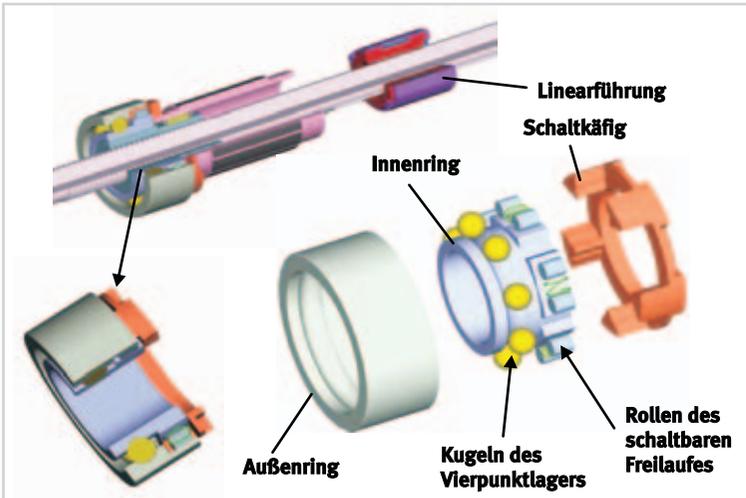


Bild 15 Darstellung des bidirektionalen Freilaufes

dargestellt), so wird der Aktor mechanisch durch den schaltbaren Freilauf verriegelt. Der Motor ist entlastet und somit vor hoher Stromaufnahme geschützt.

Trennt man gedanklich den E-Motor und das Gehäuse aus Bild 14, dann verbleiben die mechanischen Komponenten, die Bild 15 zeigt.

Folgt man dem Leistungsfluss im Aktor, ergibt sich folgender Verlauf:

Zur Verdeutlichung der Funktion des Aktors ist die Analogie mit einer elektrischen Diode hilfreich, wobei der Vergleich nur als Gedankenstütze dienen darf, weil er streng genommen nicht ganz korrekt ist. Vereinfacht kann man sagen, alle Energie, die von innen heraus – also vom E-Motor induziert – in den Aktor eingeleitet wird, gelangt nach „draußen“ und steht zur Betätigung zur Verfügung. Wirken jedoch äußere Kräfte auf den Aktor ein (symbolisch durch den roten Pfeil

E-Motor bestromt → Rotor dreht Schaltkäfig → Rollen werden freigeschaltet → Mutter dreht → Spindel wird linear bewegt

Die Funktion des schaltbaren Freilaufes ist in Bild 16 im Detail dargestellt. Der Elektromotor ist mit dem Schaltkäfig verbunden, die Lastseite mit dem Innenring und der Außenring ist gehäuseseitig. Auf der linken Seite ist der Freilauf im gesperrten Zustand dargestellt. Ein angreifendes

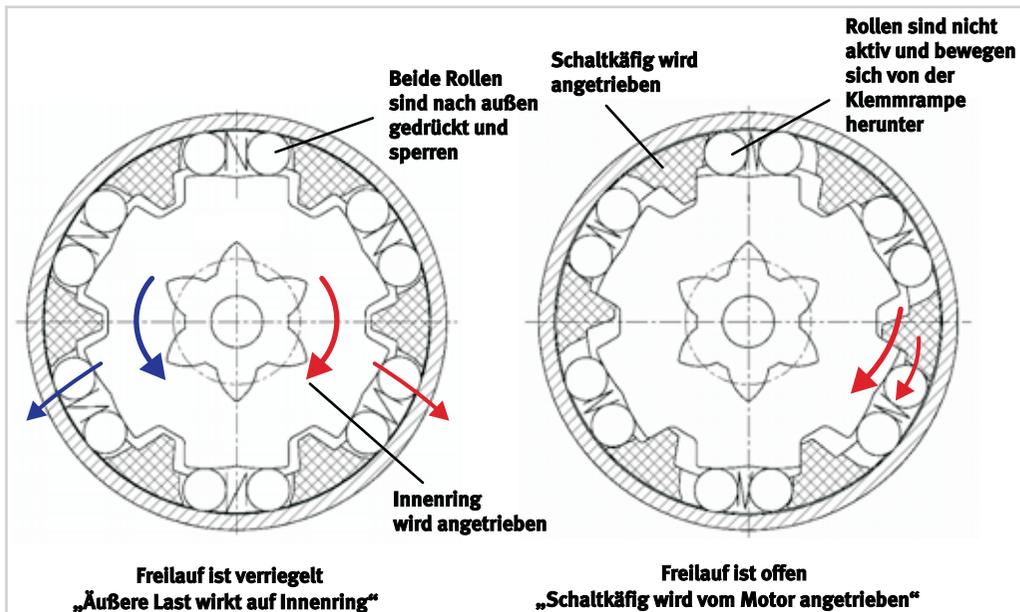


Bild 16 Funktionsweise des schaltbaren Freilaufes

Lastmoment am Innenring bzw. an den Innenrampen führt zur Klemmung der Rollen gegenüber dem gehäusefesten Außenring. Die Sperrung erfolgt dabei in beide Richtungen. Auf der rechten Seite von Bild 16 wird der Schaltkäfig vom Motor angetrieben, der Freilauf ist offen. Die Rollen werden durch den Käfig freigeschaltet. Der Schaltkäfig greift nach dem Freischalten der Rollen mit seinen Zähnen in die Nuten des Innenringes ein und verdreht die nachgeschaltete Mutter des Kugelgewindetriebes, was zu einer Stellbewegung der Spindel führt.

Anforderungen und Anwendungsmöglichkeiten

Der Aktor kann z.B. zur Sturzverstellung, Vorspurverstellung und Niveauregulierung eingesetzt werden. Bei diesen Systemen muss die Position unter Last gehalten bzw. verriegelt werden. Eine elektrische Verriegelung ist energetisch und aus Kostengründen nicht vorteilhaft. Wichtige technische Anforderungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Anforderungen Vorspur-/Sturzbetätigung

- Winkel: $\pm 3^\circ$
- Verstellweg ca. 25 mm (abhängig vom Drehpunkt)
- Betätigungsgeschwindigkeit 0,1 m/s
- Betätigungskraft bis ca. 7 kN, Überlast 15 kN

Die genannten Anforderungen beziehen sich auf Fahrzeuge der oberen Mittelklasse.

Bild 17 zeigt eine Hinterachse mit einem Aktor für die synchrone Betätigung von Sturz- und Vorspurwinkel.

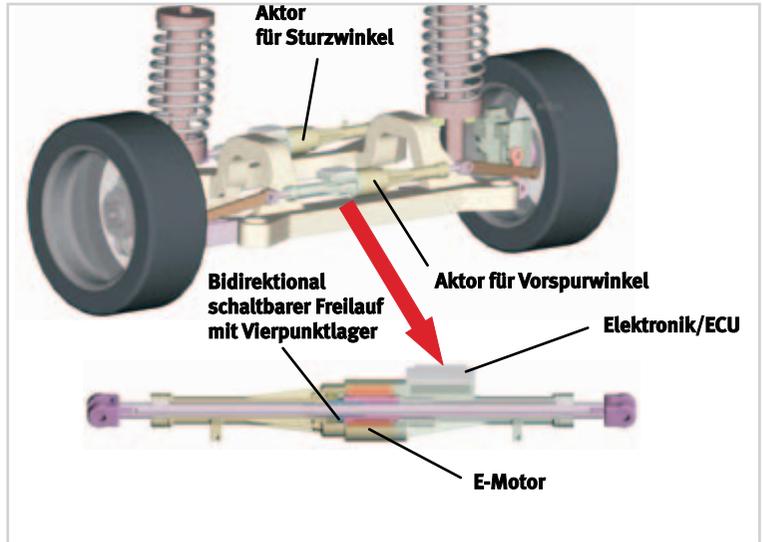


Bild 17 Aktor für die synchrone Betätigung von Sturz- und Vorspurwinkel an der Hinterachse

Sollen die Winkel für Sturz und Vorspur radselektiv eingestellt werden, dann ergibt dies insgesamt 4 Aktoren für die Betätigung (Bild 18). Damit ist es möglich, die Vorspur und den Sturz bedarfsgerecht und voneinander unabhängig einzustellen. Dies erlaubt bei Geradeausfahrt unabhängig vom Beladungszustand eine minimale Vorspur zu fahren und die Reifenaufstandsfläche waagrecht auf der Straßenoberfläche zu positionieren und bei Kurvenfahrt oder Ausweichmanövern die erforderliche Vorspur von bis zu 3° einzustellen.

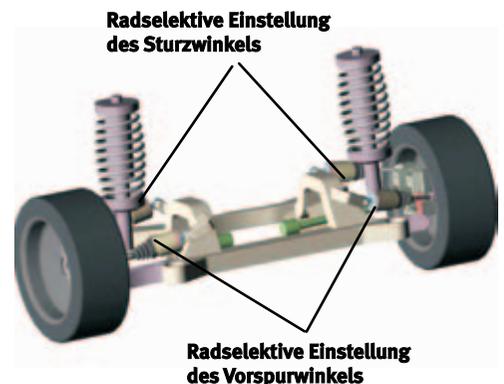


Bild 18 Aktor für die selektive Betätigung von Vorspur- und Sturzwinkel an der Hinterachse

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten für den Endkunden relevanten Vorteile zusammengefasst.

Vorteile Vorspurbetätigung

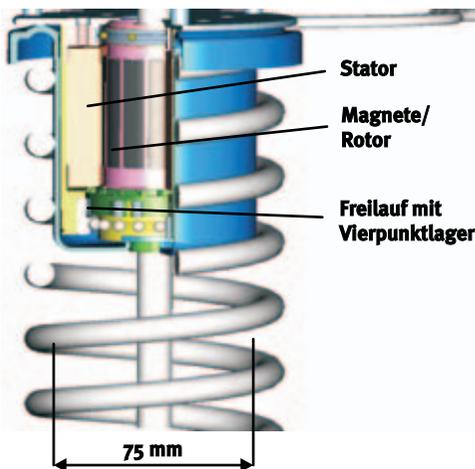
- geringerer Reifenverschleiß
- Sicherheits-/Stabilitätsgewinn, insbesondere beim Bremsen in Kurven und bei μ -Split-Bedingungen
- optimierte Stabilität bei Anhängerbetrieb
- optimiertes Ansprechverhalten auf Lenkbefehle
- Reduzierung des Wendekreises

Vorteile Sturzbetätigung

- höhere Querbeschleunigung
- verringerter Reifenverschleiß
- verringerter Bremsweg
- höhere Reifentragfähigkeit

Elektromechanische Niveauregulierung über Fußpunktverstellung der Feder

Zusätzlich kann der elektromechanische Linearaktor mit beidseitig schaltbarem Freilauf zur Fußpunktverstellung im Federbein vorteilhaft eingesetzt werden und somit die Niveauregulierung des Fahrzeuges bewirken (Bild 19). Damit kann ein Beladungsausgleich an der Hinterachse erreicht werden. Wenn zusätzlich an den beiden Vorderrädern ein derartiger Aktor im Federbein



Kraft	7500 N
Hub	60 mm
Zeit	10 s
Steigung	3 mm
Wirkungsgrad	85 %

Bild 19 Fußpunktverstellung des Federbeins mit Linearaktor

installiert ist, dann ist auch die generelle Anhebung / Absenkung des Fahrzeuges möglich, so wie dies heute bei Sport-Utility-Vehicles mittels Luftfeder vorgenommen wird.

Die Verstellung erfolgt statisch innerhalb von 10 bis 15 Sekunden. Dadurch wird die Belastung für das Bordnetz möglichst gering gehalten. Die gewählte Bauweise ermöglicht eine Integration in ein Federbein mit einem Federinnendurchmesser von 75 mm. Die Belastungsdaten aus Bild 19 sind stellvertretend für ein Mittelklasse-Fahrzeug.

Alternativ zum Linearaktor kann auch ein sogenannter Federbandaktor im Federbein integriert werden. Hierbei rotiert ein Innenläufer in einem

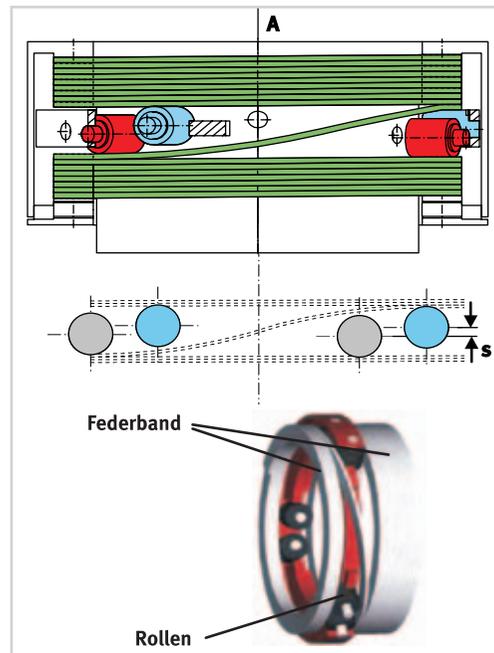


Bild 20 Prinzipdarstellung des Federbandkatuators

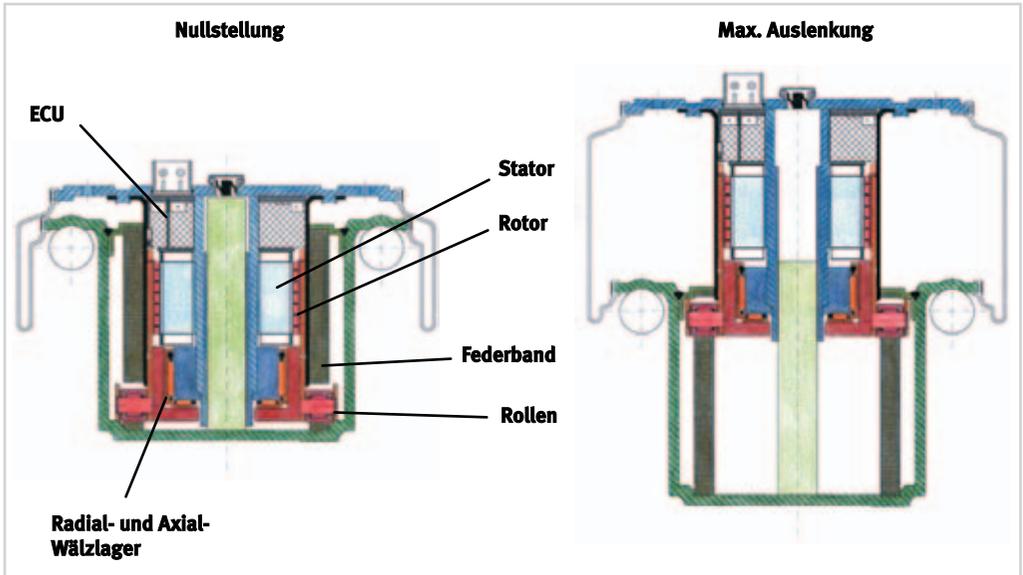


Bild 21 Federbandaktor, ins Federbein integriert

Federband (Bild 20). Die Laufrollen sind wälzgelagert und ermöglichen die geräusch- und reibungsarme Abrollbewegung des Innenläufers im Federband. Durch die Rotation im Federband erzeugt der Innenläufer eine Vorschubbewegung, die zum Verstellen des Federbeins genutzt wird.

Im Bild 21 ist der Federbandaktor in ein Federbein mit einem Federinnendurchmesser von 75 mm integriert. Die Anordnung ermöglicht ebenfalls die Integration der ECU.

Der Federbandaktor hat prinzipbedingt eine Steigung von 0,5 bis 1,3 mm, welche der Blechdicke des Federbandes entspricht. Darüber hinaus verfügt der Aktor über einen Wirkungsgrad von 40 %, ist selbsthemmend und benötigt keinen Sperrmechanismus. Steht eine genügend große Verstellzeit zur Verfügung (10 bis 15 Sekunden), dann ist – trotz des geringen Wirkungsgrades – die Bordnetzbelastung ver-

hältnismäßig gering, da die Last quasi statisch aufgebracht wird. Der Federbandaktor konkurriert mit einem Schraubtrieb, hat eine vergleichbar geringe Steigung, verfügt jedoch über einen deutlich besseren Wirkungsgrad.

Zusammenfassung

Die elektromechanische Aktorik ist in Bewegung und ein Ansatz, bestehend aus E-Motor, Sensor und Getriebe, reicht oftmals nicht aus, um die passende bzw. wettbewerbsfähige Lösung anzubieten. Die Schaeffler Gruppe entwickelt daher weitergehende Lösungen mit einer verbesserten Energiebilanz. Es zeigt sich, dass hierzu die notwendigen Kenntnisse und Erfahrungen innerhalb der Gruppe zielgerichtet genutzt und gegenüber dem heutigen Stand der Technik verbesserte Lösungen entwickelt werden. Die Umsetzung in Serie wird innerhalb der nächsten 5 Jahre erfolgen.

