

Intelligenter Steller auf Basis eines prozessorgesteuerten bürstenlosen DC-Motors

Dipl.Ing.(BA) Frank Stoll
Mahle Filtersysteme GmbH, Stuttgart

Dr.-Ing. Björn Hagemann
Berger Lahr GmbH & Co.KG, Lahr

Mahle Filtersysteme GmbH
Pragstraße 54

70376 Stuttgart
Tel: 0711 5063 695
Fax: 0711 5063 346
Email: frank.stoll@mahle.com
<http://www.mahle.com>

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung.....	3
2. Stellerkonzept.....	4
3. Beschreibung des Antriebkonzeptes	6
4. Ansteuerungs- und Regelungskonzept.....	8
5. Dynamische Simulation / [1].....	10
6. Verwendung von Smart Components.....	13
7. Einsatz im Fahrzeug.....	14
8. Kommunikation mit der Steuereinheit.....	14
9. Vergleich mit konventionellen Aktuatoren.....	15
10. Messungen	16
11. Ausblick	19
12. Literatur / Quellenhinweis	19

1. Einleitung

Zu Beginn der Automobiltechnik wurde der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeit auf die Zuverlässigkeit und die Verbesserung der Grundfunktionen des Fahrzeuges gelegt. Die Anwendung von Stelleinrichtungen im Fahrzeug beschränkte sich auf das notwendigste, zum Beispiel Lenkstange, Schalthebel, Bremszug und Gaszug. Der Kraftstoff wurde noch nicht als knappes Gut angesehen, es gab keine Vorschriften hinsichtlich Verbrauch und Emission, für mehr Leistung und Drehmoment wurde einfach mehr Hubraum vorgesehen.

Mittlerweile hat sich die Ausgangslage geändert. Wir wissen, daß nur begrenzte Ressourcen an mineralischem Kraftstoff zur Verfügung stehen, Vorschriften zur Erhöhung der Sicherheit und Reduzierung der Emission wurden eingeführt, die Komfort-Anforderungen der Kunden haben sich erhöht. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind Steuer- und Regeleinrichtungen notwendig, die auf verschiedene Betriebszustände des Fahrzeugs reagieren.

So gibt es im Fahrzeug mittlerweile viele Anwendungen, bei denen Systeme bewegt bzw. verstellt werden müssen.

Beispiele aus dem Motorenbereich:

- Steuerung der Ventilöffnungszeiten und des Ventilhubes
- Luftmassensteuerung über elektrisch betriebene Drosselklappen
- Schalten von Klappen oder Schieber bei geschalteten Saugmodulen (zum Ändern der Saugrohrlänge oder des Resonanzvolumens zur Verbesserung von Leistung und Drehmoment)
- Steuerung der Luftladungsbewegung durch Klappensysteme (für Schichtladebetrieb über Tumbleklappen bzw. Drallklappen/SWIRL-Klappen zur Unterstützung der Gemischbildung im Brennraum)
- Abgasrückführventile
- Steuerung der Leitschaufeln an Abgas-Turboladern

Diese verstellbaren mechanischen Systeme können in die zwei Kategorien eingeteilt werden:

1. Zweipunktsysteme (z. B. Resonanzklappen, Schiebemuffen)
2. Stufenlos einstellbare Systeme (z. B. Nockenwellensteller, Drosselklappensteller, Einlaßklappensteller)

Zum Stellen von Zweipunktsystemen wurden und werden häufig pneumatische Stellglieder verwendet. Diese sind eine kostengünstige und platzsparende Wahl, wenn im Motorsystem bei allen Betriebsbedingungen ausreichend Unterdruck im Saugsystem vorherrscht, oder wenn eine zusätzliche Unterdruckpumpe integriert ist. Bei heute eingesetzten Motorensystemen gibt es Betriebszustände im Fahrzeug, bei denen nicht sichergestellt ist, daß genügend Unterdruck vorhanden ist, um pneumatische Steller zu aktivieren.

Und gerade bei der Anforderung der stufenlosen Verstellung hat das pneumatische Stellsystem seine Grenze erreicht.

Da elektrische Energie in Form des Bordnetzes in jedem Fahrzeug zur Verfügung steht, ist ein elektrisches Stellsystem für diese erhöhten Anforderungen prädestiniert.

Intelligente elektrische Steller zeichnen sich durch die Integration verschiedener Funktionen wie Motor, Getriebe, Sensorik, Kommunikations- und Leistungselektronik aus. Durch die Verlagerung dieser erweiterten Funktionen aus dem Motorsteuergerät in den Steller wird die notwendige Zahl der Ein- und Ausgänge des Steuergerätes verringert, was zu Kostenersparnissen führt. Im folgenden wird der elektrische Steller ESR1 der Firma Mahle Filtersysteme vorgestellt. Er wurde zur kontinuierlichen Verstellung von Ladungsbewegungsklappen entwickelt.

2. Stellerkonzept

Der elektrische Steller ESR1 ist als Klappensteller zur Änderung der Ladungsbewegung im Brennraum konzipiert worden. Ladungsbewegungsklappen dienen dazu, je nach Betriebszustand des Verbrennungsmotors gezielt Einfluß auf die Gemischbildung, sowohl global als auch lokal, im Brennraum nehmen zu können. Dies ist Voraussetzung für heutige Otto- und Dieselmotoren, um hohe Wirkungsgrade bei niedrigen Abgasemissionen zu erzielen. Beispielhaft ist in Bild 1 ein Tumblesystem für Benzin-Direkteinspritzer dargestellt, um die Abmagerungsfähigkeit sowohl bei Homogenbetrieb als auch bei Ladungsschichtung zu verbessern.

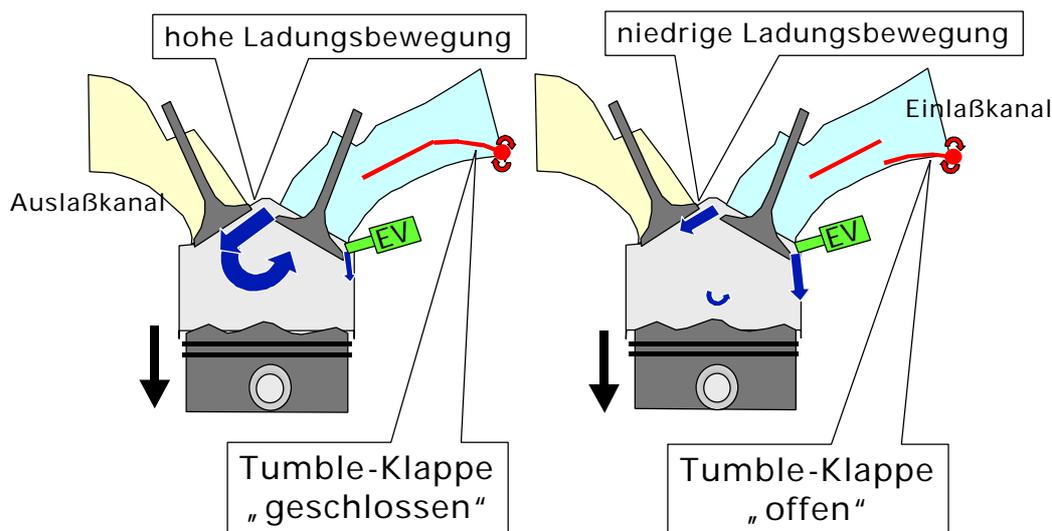


Bild 1: Tumble-Ladungsbewegung im Brennraum [4]

Wichtige Forderungen an einen Steller für den Einsatz sind:

- Ausreichende Geschwindigkeit beim Stellen von einer Position in eine andere
- Bereitstellung des notwendigen Drehmoments zum Stellen der Klappen und zum Halten der Sollposition
- Genauigkeit der Istposition gegenüber der Sollvorgabe
- Diagnosefähigkeit
- Volle Funktionssicherheit bei allen in Betrieb möglichen Umweltbedingungen (Temperatur, Vibration, Feuchtigkeit, elektrostatische und elektromagnetische Störungen)
- Fail Safe-Funktion: Automatisches Fahren in eine definierte Stellung im Fehlerfall

Der elektrische Steller ESR1 weist die oben geforderten Merkmale auf. Der Motor (A) treibt über ein internes Getriebe den Abtriebshebel (B) an. Der 5polige Steckanschluß (C) bildet die Schnittstelle zur im Steller integrierten prozessorgesteuerten Elektronik.

Diese Schnittstelle besteht aus:

- Spannungsversorgung
- Eingangssignal (Sollvorgabe der Stellposition für Abtriebshebel (B))
- Ausgangssignal (Rückmeldung der Istposition)

Der Deckel (D) sorgt für eine dichte Kapselung von Motor und Elektronik zur Umwelt. Auf der Abtriebsachse ist eine Drehfeder angebracht zur Realisierung der Fail-Safe-Funktion.

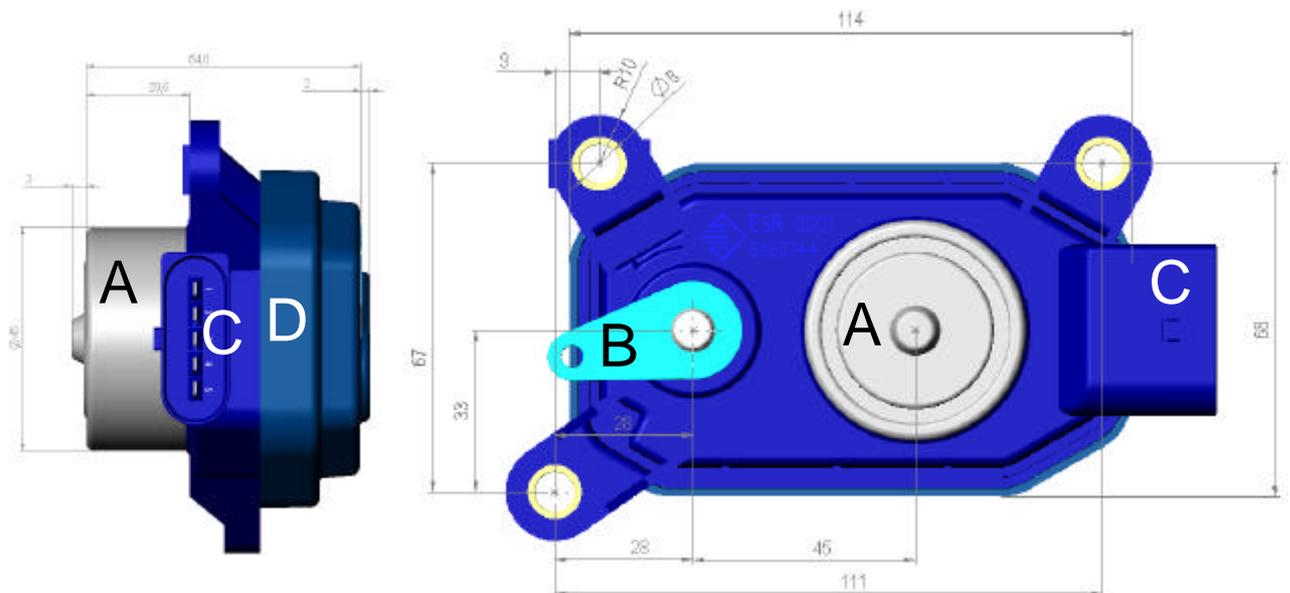


Bild 2: Abmessung elektrischer Steller ESR1



Bild 3: Innenansicht ESR1 (ohne Deckel)

3. Beschreibung des Antriebkonzeptes

Als Antrieb wurde ein bürstenloser elektronisch kommutierter Gleichstrommotor gewählt; BLDC-Motor (brushless direct current motor) bzw. EC-Motor (electronically commutated motor).

Das magnetische Drehfeld des Motors wird durch elektronische Ansteuerung im Stator erzeugt. BLDC-Motoren sind dadurch gekennzeichnet, daß das im Stator umlaufende Drehfeld immer erst dann von einer Position n auf die nächste Position $n+1$ weitergeschaltet werden darf, wenn der permanentmagnetische Rotor die Position n erreicht hat. Um diese Weiterschaltung des Drehfeldes zu gewährleisten, sind zwei Hall-Sensoren um 90° gegeneinander phasenverschoben eingebaut, die die Rotorlage berührungslos erfassen.

Realisiert wurde für obige Anwendung ein zweiphasiger Innenläufer-Klauenpolmotor, d. h. der Stator besteht aus zwei Wicklungen, die, über einen Controller gesteuert, alternierend bestromt werden. Der Polkranz jeder Erregerwicklung besteht aus einem klauenartig ineinandergreifenden Eisenblech mit acht Polpaaren. Die beiden Kammern der Erregerwicklungen sind um 90° elektrisch gegeneinander verdreht.



Bild 4: zweiphasiger Polkranz mit Klauenpolen / [1]

Die Wicklungen im Polkranz umgeben den innen gelagerten Rotor, der als Permanentmagnet (ebenfalls mit acht Polpaaren) ausgebildet ist. Aufgrund des geforderten Betriebstemperaturbereichs von -40°C bis $+120^\circ\text{C}$ wurde ein kunststoffgebundener Ferritmagnet aus einem PPS-Compound eingesetzt. Mit dieser Anwendung werden 32 Motorschritte pro Umdrehung erreicht.

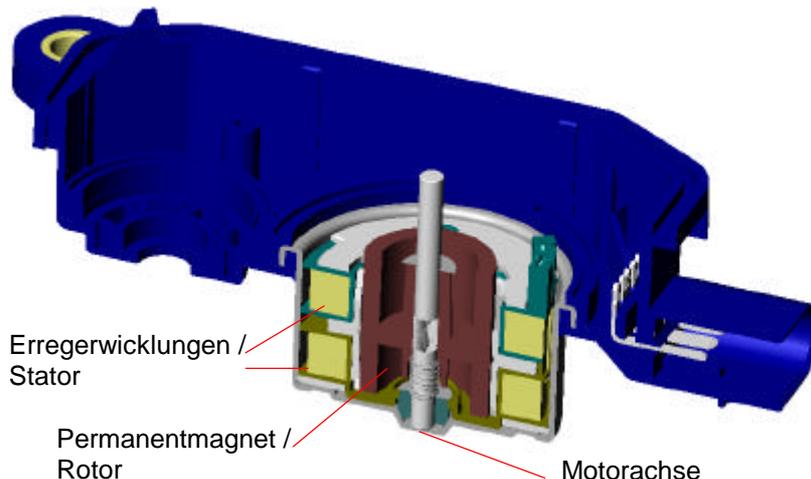


Bild 5: Schnitt durch Klauenpolmotor

Intelligenter Steller auf Basis eines prozessorgesteuerten BLDC-Motors / Mahle Filtersysteme

Die Rotorlage wird über die oben erwähnten Hallsensoren ausgewertet, die eine zusätzliche Sensorspur auf dem Rotormagneten auslesen. Dies ist auch der Hauptunterschied des BLDC-Motors gegenüber einem gewöhnlichen Schrittmotor.

Ein Schrittmotor fährt seine Sollposition aus der Grundstellung an, indem er so viele Schritte zurücklegt wie in der gespeicherten Kennlinie hinterlegt sind. Führt aufgrund äußerer Einflüsse ein Ansteuerschritt zu keiner Bewegung des Rotors wird dies vom Motor nicht erkannt. Es gibt keine Rückmeldung der Istposition. Soll- und Istposition haben nun eine bleibende fehlerhafte Abweichung bis eine neue Referenzfahrt des Schrittmotors durchgeführt wird.

Ein solcher sich fortpflanzender Fehler kann beim BLDC-Motor nicht auftreten, da über Sensoren die Rotorlage erkannt wird. Zum Anfahren einer Sollposition wird nicht die Schrittzahl als Steuergröße verwendet, sondern die Drehung des Rotors als Regelgröße.

Zwischen Motor und Abtrieb ist am ESR1 ein zweistufiges Stirnradgetriebe mit einer Untersetzung von 15 : 1 geschaltet. Um diesen Faktor erhöht sich das Abtriebsmoment gegenüber dem Motormoment und die Stellgenauigkeit (32 Schritte/Umdrehung am Motor, 120 Schritte/90° am Abtrieb), was zu einem ruhigen Fahrbetrieb und zu einer Stellgenauigkeit am Stellerabtrieb von ± 2 Winkelgraden führt.

Am Abtrieb ist eine Drehfeder zum Erfüllen der Fail Safe-Funktion eingebaut. Das heißt diese Feder stellt den Abtrieb bzw. die angeschlossenen Klappen bei Ausfall der Elektronik in die definierte mechanische Ausgangsposition zurück. Die Drehzahl und das Abtriebsmoment gegen die Rückstellfeder ist daher zwangsläufig kleiner als mit der Feder. Über den gesamten Temperaturbereich wird aber mindestens ein Moment von 20 Ncm erreicht, mit der Feder entsprechend 60 Ncm.

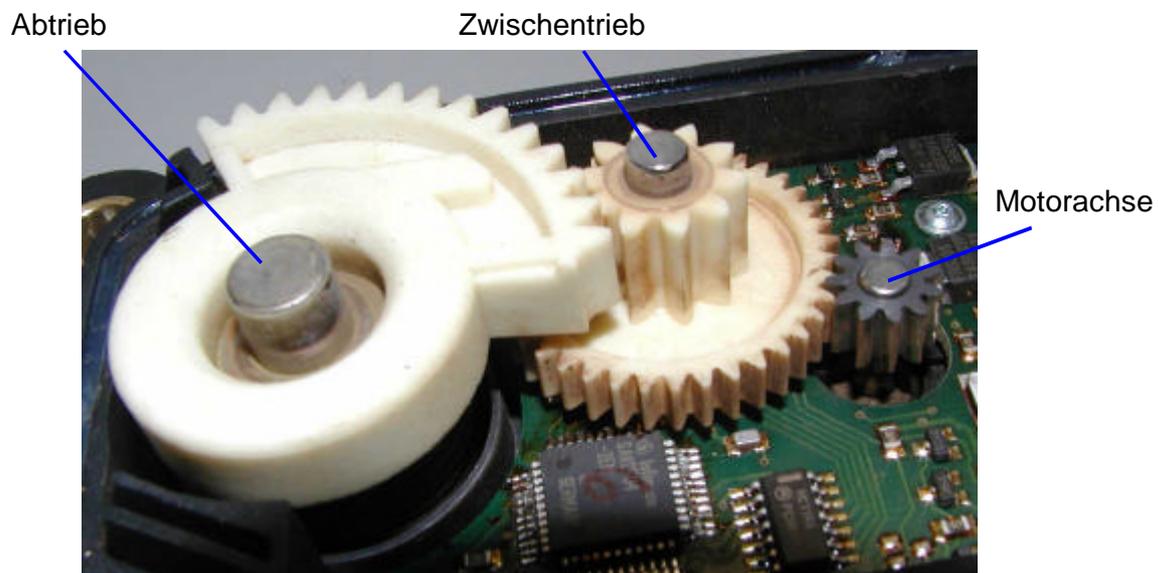


Bild 6: zweistufiges Stirnradgetriebe

Die Stellzeit für eine Bewegung um 90° bei 10 Ncm externem Lastmoment beträgt mit dieser Auslegung kleiner 200 ms über den gesamten spezifizierten Temperaturbereich (-40 ... +120 °C).

4. Ansteuerungs- und Regelungskonzept

Die Sollvorgabe für eine Stellbewegung wird vom Motorsteuergerät an den elektrischen Steller gesendet. Als Ansteuersignal wurde eine pulswidenmodulierte Spannung gewählt. Dieses Signal ist ideal für den "open collector"-Standardausgang des Motorsteuergeräts. Mit dem Tastverhältnis des Signals gibt das Motorsteuergerät die Informationen für die Sollposition des Stellers aus.

Das Tastverhältnis des PWM-Signals ist definiert als Verhältnis der Zeit von "signal LOW" zu Periodendauer.

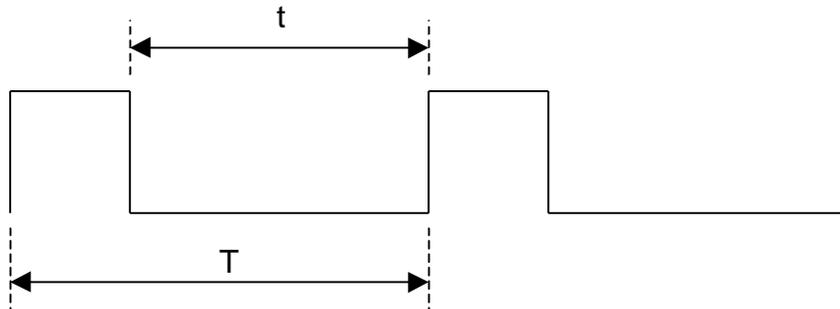


Bild 7: Tastverhältnis = $t / T \times 100\%$

Die Grundfrequenz des Signals kann zwischen 200 und 300 Hz betragen. Mit einer Frequenzstabilität von $\pm 0,1 \%$ gibt es keine Einbußen der Stellgenauigkeit von $\pm 2 \%$.

Ein PWM-Tastverhältnis von 5 ... 95 % setzt der Steller in den Stellwinkelbereich 0 ... 90° um.

Umrechnung gemäß Formel:

$$\text{Winkel [} ^\circ \text{]} = (\text{Tastverhältnis [\%]} - 5\%) \times (90^\circ / 90\%)$$

Die PWM-Bereiche 0...4 % und 96...100 % sind für Diagnosezwecke des Motorsteuergerätes reserviert:

- PWM = 0%: Steller befindet sich im "Sleep-Mode" (d.h. Spannungsversorgung aktiv, aber nicht angesteuert)
- PWM = 100%: Fehler liegt vor (evtl. Kurzschluß nach Masse)

Auswertung:

Der Steller wird über Klemme 15 mit Spannung versorgt, das heißt nach Einschalten der Fahrzeug-Zündung liegt Versorgungsspannung am Steller an. Dann führt der Steller zuerst eine Referenzfahrt durch und speichert den Endanschlag als Referenzpunkt 0° ab.

Das PWM-Signal des Motorsteuergerätes wird auf einen Timer-Eingang des internen Steller-Controllers gegeben und ausgewertet.

Der Drehwinkel des Motors wird erfaßt, indem mit den zwei (bereits in Kapitel 3 erwähnten) Hallsensoren die Anzahl der Polwechsel des sich drehenden permanentmagnetischen Rotors gezählt wird. Da die beiden zur Lageerkennung eingesetzten Hallsensoren um 90° zueinander versetzt sind, kann der Controller über die zeitliche Abfolge der beiden Sensorsignale die Drehrichtung des Motors erkennen.

Nachdem der Controller eine Sollvorgabe erhalten hat, steuert er die Treiberstufen der Statorwicklungen so lange an, bis die erwartete Anzahl der Polwechsel erreicht ist.

Jede der beiden Statorwicklungen wird über eine Treiberstufe angesteuert. Diese sind identisch als H-Brücke aufgebaut.

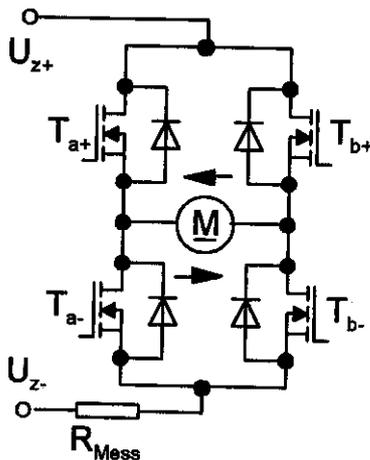


Bild 8: Prinzipaufbau einer H-Brücke / [2]

Der Summenstrom beider H-Brücken wird über den Strommesswiderstand R_{Mess} (auch Shunt genannt) erfaßt und mit der vom Controller ausgegebenen Strom-Sollgröße verglichen. Übersteigt der effektive Strom die Sollgröße, unterbrechen die H-Brücken den Stromfluß zu den Statorwicklungen. Sie schalten den Strom im vorgegebenen Takt von 14,3 kHz dann wieder zu. Diese Strombegrenzung tritt nicht nur im Fehlerfall ein, sondern auch dann, wenn der Motor seine Position statisch halten muß und die Erregerwicklungen ein konstantes Magnetfeld aufbauen sollen. Für diesen statischen Zustand speisen die H-Brücken die beiden Wicklungen mit einer konstanten Spannung, wodurch der Strom stetig ansteigt. Durch ein Pulsen des Erregerstroms der jeweiligen Wicklung übersteigt dieser nicht den zulässigen Maximalwert. Durch das entstehende konstante Feld wird ein stabiles Haltemoment für Zwischenstellungen des Aktuators erzeugt. Ändert sich aufgrund äußerer Einflüsse die Lage des Stellers, wird dies über die Hallsensoren erkannt und der Controller kann die Position des Aktuators nachregeln.

Die Lageerkennung über die Hallsensoren wird durch den Controller nicht nur für interne Regelzwecke verwendet, sie wird auch als Rückmeldesignal an das Steuergerät ausgegeben. Dieses kann wie hier als analoges Signal realisiert werden oder, je nach Anwendung, als PWM-Signal.

Das Rückmeldesignal gibt die Steller-Istposition von $0^\circ \dots 90^\circ$ als Analogspannung von 0,3 ... 2,7 V proportional wider ($0,3 \text{ V} \hat{=} 0^\circ$; $2,7 \text{ V} \hat{=} 90^\circ$)

Die Bereiche 0 ... 0,2V und 2,8 ... 3,0V sind für Diagnosezwecke reserviert. So wird während der Referenzfahrt zur Lagebestimmung die Rückmeldespannung 0 V ausgegeben.

Ebenfalls ein 0V-Signal wird bei erkanntem Fehler am Aktuator ausgegeben (z.B. Defekt an Elektronik, Motor oder Getriebe, Bruch der Rückstellfeder).

Ein 3V-Signal wird ausgegeben bei erkanntem Fehler außerhalb des Stellers (bei Nulllast, wenn das zu stellende Klappensystem abgekoppelt ist und der Steller nur sich selbst bewegt).
Damit das analoge Rückmeldesignal nicht durch hohe Masseströme des Leistungsteils verfälscht werden kann, wird es mit einer separaten Signal-Masse zum Motorsteuergerät zurückgeführt.

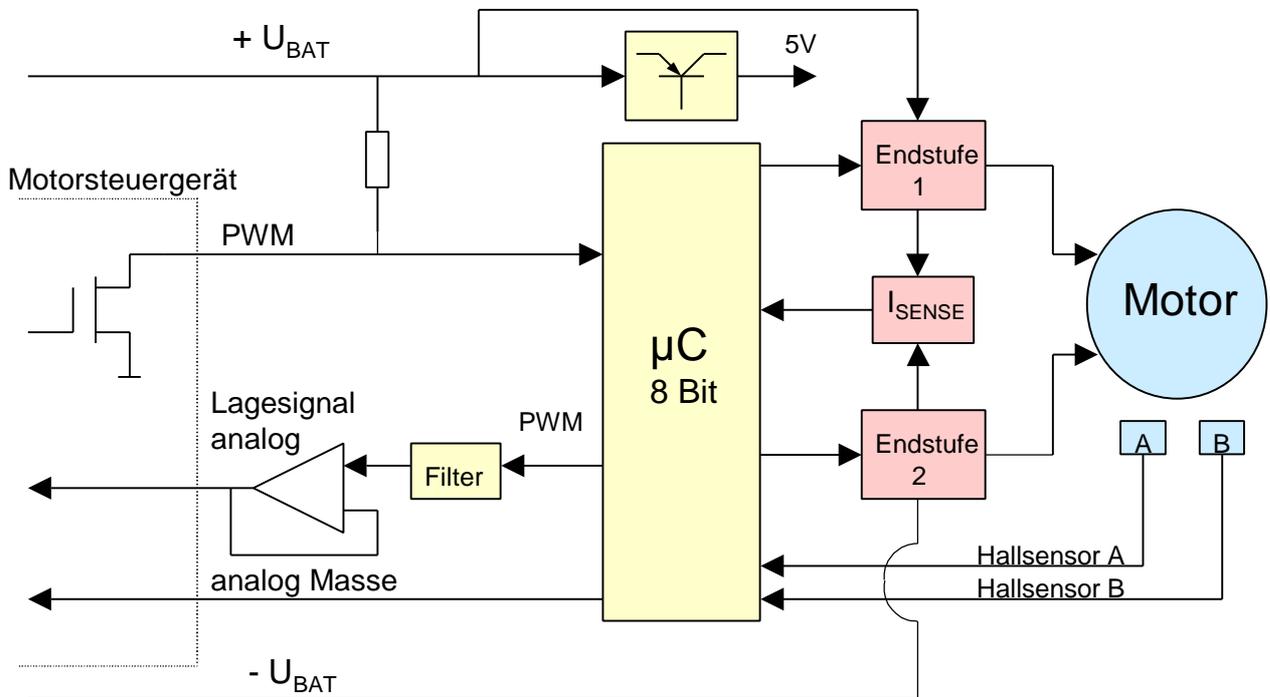


Bild 9: Blockschaltbild elektronischer Steller

5. Dynamische Simulation / [1]

Dynamische Simulationen wurden während der Entwicklung unterstützend eingesetzt für die Antriebsauslegung und den Reglerentwurf.

Die Berechnung von Klauenpolmotoren gestaltet sich aufgrund des dreidimensionalen Feldverlaufes als aufwendig. Zur Optimierung des Motors wurde ein analytisches Berechnungsprogramm und ein parametrisiertes 3D-FEM-Modell eingesetzt. Das analytische Programm diente für eine erste Auslegung. Mit Hilfe der FEM-Modelle wurden sehr gute Simulationsergebnisse erreicht. Sie ermöglichten eine effiziente Vorgehensweise bei der Anpassung des Motors an die jeweilige applikationsspezifische Anforderung. Damit wurde die Optimierung hinsichtlich des angestrebten Spitzendrehmoments, des Rastmoments, der Induktivität und der Magnetstabilität erreicht. Die Parametrierung eines solchen Modells ist eine wesentliche Voraussetzung für eine effiziente Entwicklung und für kurze Optimierungszyklen, da sie eine einfache Generierung unterschiedlichster Abmessungen und Polgeometrien ermöglicht.

Für eine Berechnung der Rastmomente ist eine möglichst genaue Kenntnis der Orientierungsverteilung im Rotor-Permanentmagneten erforderlich. Diese Verteilung kann durch Simulation des Richtfeldes in der Spritzgußkavität ermittelt und in Form von Fourierkoeffizienten im FEM-Modell berücksichtigt werden.

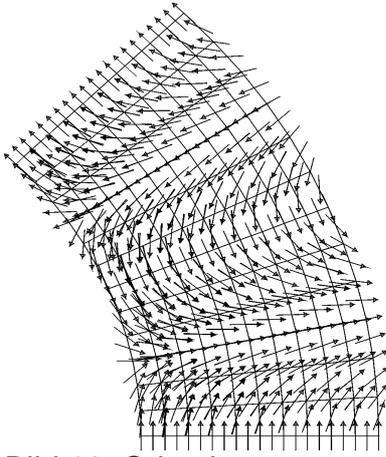


Bild 10: Orientierungsverteilung im Magneten / [1]

Bereits bei einer mittleren Diskretisierung des FEM-Modells wird eine gute Übereinstimmung bei induzierter Spannung, Haltemoment und Spuleninduktivität erreicht. Zur Berechnung der Rastmomente ist dagegen eine sehr feine Diskretisierung erforderlich. Die recht gute Korrespondenz zwischen Berechnung und Messung ist in Bild 11 dargestellt.

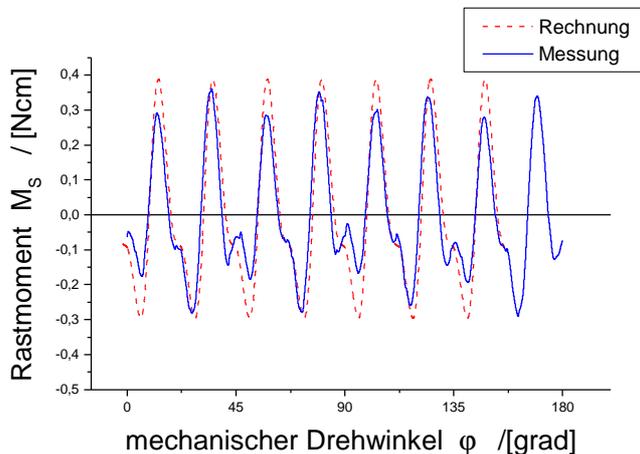


Bild 11: Rastmomentverlauf / [1]

Die Berechnung der Eisenverluste bei Klauenpolmotoren ist mit 3D-FEM-Modellen sehr aufwendig. Hier bieten sich aber Lösungswege an, bei denen einzelne Elemente des Motors zweidimensional berechnet werden. So kann zum Beispiel das Joch zur Berechnung der Wirbelstromverluste vergleichsweise einfach in Zylinderkoordinaten dargestellt und mit 2D-FEM simuliert werden.

Aus der analytischen und der FEM-Berechnung wurden die diskreten Ersatzschaltbild-Elemente für die dynamische Berechnung der Motorkennlinien gewonnen.

Zur Simulation des Gesamtsystems fließen alle berechneten oder messtechnisch ermittelten Kenndaten der Teilsysteme zusammen. Hierzu zählen zum Beispiel die Getriebedaten, die Federsteifigkeit der Rückstellfeder, die Ersatzschaltbildelemente des Motors, die Widerstände und das Schaltverhalten der Leistungselektronik, die Laufzeiten einzelner Interrupt-Routinen des Mikrocontrollers und das Drehmoment der Last.

Die dynamische Simulation des Gesamtsystems eröffnet die Möglichkeit, den Antrieb nicht nur für einzelne Arbeitspunkte zu optimieren, sondern auch charakteristische Bewegungszyklen zu berücksichtigen.

Zum Vergleich von Messung und Simulation, die mit Matlab/Simulink erstellt wurde, sind in Bild 12 der Strangstrom beim Anlauf des Stellantriebes dargestellt.

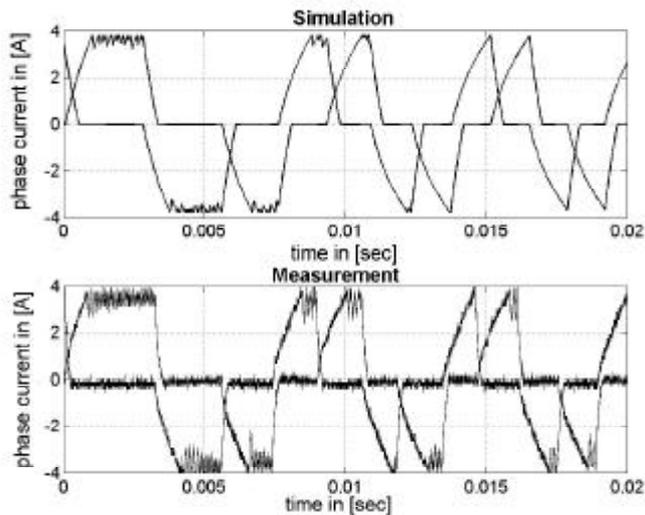


Bild 12: simulierter und gemessener Strangstrom beim Anlauf des Stellantriebes/ [1]

In Bild 13 ist die Position des Abtriebes über die Zeit bei einem Positioniervorgang von 0° auf 80° dargestellt.

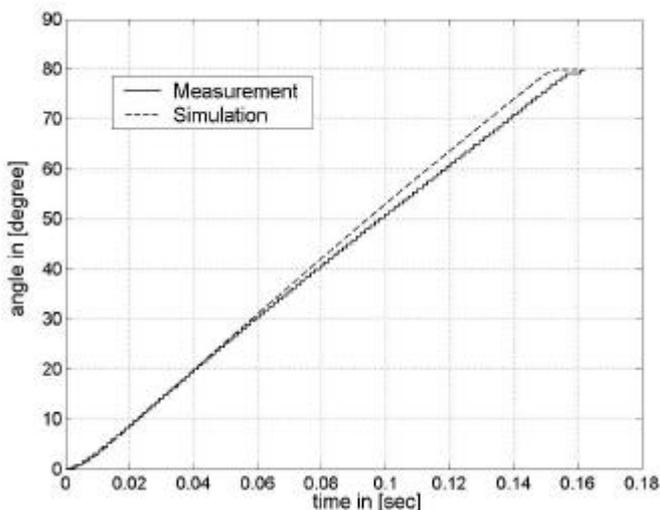


Bild 13: Hochlaufkurve des Stellantriebes / [1]

Beide Verläufe zeigen eine gute Übereinstimmung, so daß sich Regelungskonzepte auf Basis der Simulation frühzeitig erproben lassen.

Die gewonnenen Reglerparameter stellen eine gute Grundlage bei der ersten Inbetriebnahme eines intelligenten Stellantriebes dar. Dies führt zu Kosten- und Zeitersparnis, da unnötige Entwicklungsschleifen vermieden werden.

Die letztendliche Feinabstimmung der Parameter wird aber immer am realen System erfolgen.

6. Verwendung von Smart Components

Unter Smart Components versteht man integrierte elektronische Schaltungen, die sowohl einen Leistungsteil als auch einen Steuer- und Regelteil beinhalten, das heißt: Smart Components sind intelligente Leistungsbaulemente.

Als Festspannungsregler für die interne 5 V-Versorgung wird der Baustein TLE4275 von Infineon eingesetzt. Außer der Grundfunktion, die Batteriespannung auf konstante 5 V zu regeln, hat der Baustein zusätzliche „smarte“ Fähigkeiten, die zur Betriebssicherheit beitragen:

- Übertemperaturschutz
- Unter- und Überspannungsschutz
- Überstromschutz / Kurzschlußfestigkeit
- Schutz vor elektrostatischen Entladungen (ESD)
- Schutz gegen Verpolung

Bei Übertemperatur, Überstrom und Unterspannung wird der Reset-Ausgang des TLE4275 aktiviert. Dieses Signal wird zum internen Controller geführt, der auf den eingetretenen Fehler reagieren kann.

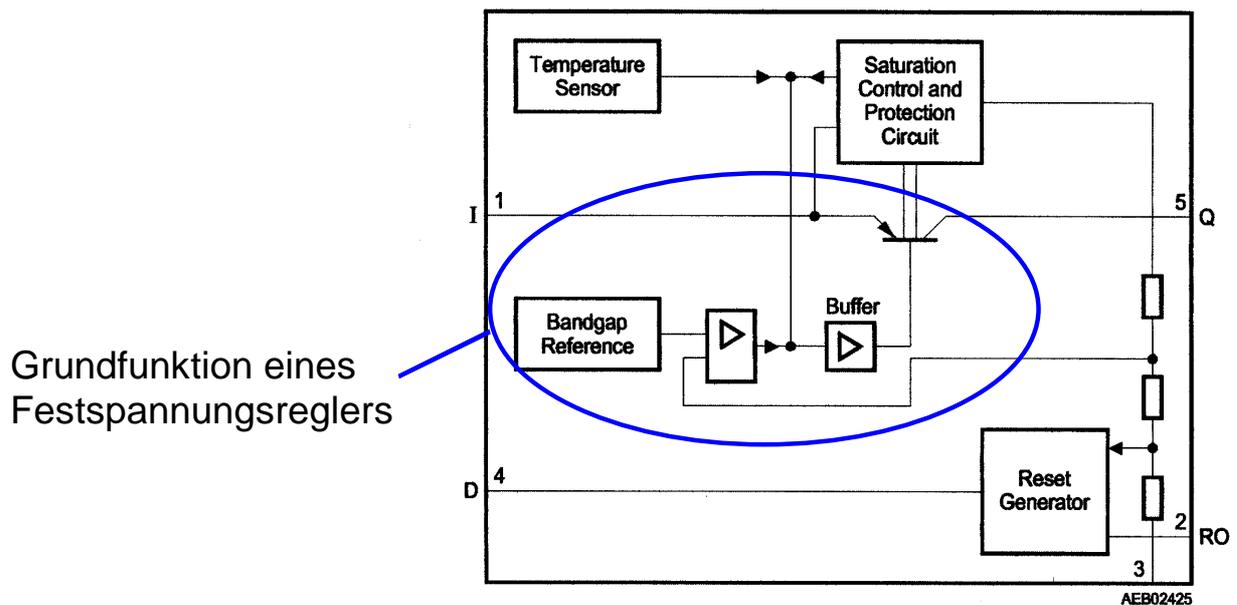


Bild 14: Blockdiagramm Festspannungsregler TLE4275 / [3]

Um diese Schutz- und Diagnoseeinrichtungen diskret, ohne Smart Components zu realisieren, wäre eine große Anzahl von Bauelementen, deutlich mehr Platzbedarf und ein Mehraufwand an Entwicklungsarbeit notwendig.

7. Einsatz im Fahrzeug

Der vorgestellte Aktuator wurde als Klappensteller zur Ladungsbewegung für einen direkt einspritzenden Ottomotor entwickelt. Das Konzept des ESR1-Aktuators (Antriebstechnik, Elektronik) ist außerdem geeignet als Drosselklappensteller, Ansaugluftdrosselung ALD und andere Steller, bei denen nicht nur die beiden Endpositionen sondern auch Zwischenstellungen statisch angefahren und gehalten werden müssen.

Wegen der deutlich höheren Kräfte, die bei einem Nockenwellensteller (für variablen Ventiltrieb) aufgebracht werden müssen, ist mit geänderter Dimensionierung von Motor, Getriebe und Treiberstufe unser Aktuator-Konzept auch für diesen Einsatz verwendbar.

Weitere denkbare Anwendungen außerhalb des Motor- und Motoranbaubereiches:

- Steller für Neigewinkel der Fahrscheinwerfer
- Steller für Feststellbremse direkt am Hinterrad mit Selbsthemmung
- Steller für Luftklappen im Klimabereich
- Steller für variablen Windabweiser bei Schiebedächer

Je nach Anwendungsfall ist die Dimensionierung von Antrieb und Elektronik bezüglich Lastmoment, Genauigkeit, Ein- und Ausgangssignalisierung anzupassen.

8. Kommunikation mit der Steuereinheit

Standardschnittstelle zur Datenkommunikation im Motorraum von Kraftfahrzeugen ist der serielle CAN-Bus. Für manche Anwendungen wird auch der einfachere, ebenfalls serielle LIN-Bus eingesetzt.

Da der elektrische Steller mit einem Controller ausgestattet ist, könnte man mit einem passenden Schnittstellenbaustein eine Busanbindung für die Kommunikation mit dem Motorsteuergerät realisieren. Für die umgesetzte Anwendung war unser Ziel, den Aufwand für die Schnittstelle so gering wie möglich zu halten, und da die Komplexität der zu übermittelnden Informationen relativ gering ist, kann das Ansteuer- und das Rückmeldesignal auch durch ein einfaches pulswidenmoduliertes Signal (PWM-Signal) bzw. durch ein Analogsignal realisiert werden.

Ein PWM-Signal ist vom Motorsteuergerät über seinen „open collector“-Standard-Ausgang einfach zu generieren. Dieses Rechtecksignal mit seiner stabilen Frequenz wird vom Steller ausgewertet, indem an dessen Eingang ein Pull-Up-Widerstand angeschlossen wird.

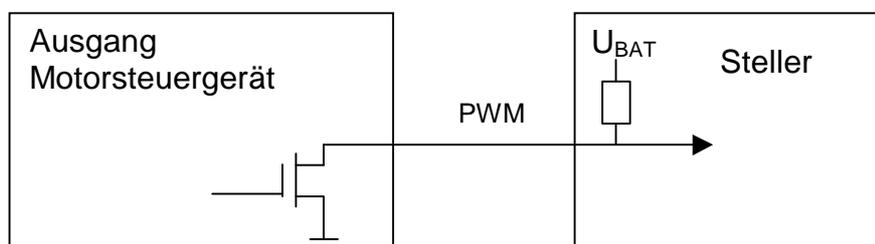


Bild 15: Schnittstelle Eingangssignal

Technische Daten des PWM-Ansteuersignals siehe Abschnitt 4.

Das Lagerückmeldesignal wurde ein Analogsignal gewählt, da der Steller gemäß kundenspezifischer Vorgabe einen analogen Lagesensor substituieren soll. Denkbar ist aber auch die Realisierung eines PWM-"open collector" Signals.

Die Genauigkeit der Lagerückmeldung liegt bei $\pm 1,5^\circ$.

9. Vergleich mit konventionellen Aktuatoren

In konventionellen elektronisch betriebenen Aktuatoren werden überwiegend zwangskommutierte DC-Motoren eingesetzt. Bei diesen wird das erregende Magnetfeld des Motors im Rotor erzeugt. Der Erregerstrom wird über Bürsten zum Rotor geführt.

Die Bürsten schleifen im Betrieb am Rotor. Dieser prinzipielle Verschleiß der Bürsten begrenzt zwangsläufig die Lebensdauer eines solchen DC-Motors. Die Bürsten führen zu zusätzlicher Reibung, was zu schlechterem Wirkungsgrad und höherer Eigenerwärmung führt.

Ein weiteres Problem ist die Kontaktstelle zwischen den Kohlebürsten und dem Rotor. Die Oberflächen der beiden Teile müssen elektrisch gut leitend sein. Deshalb ist unbedingt auf silikonfreie Fertigung des Stellers und seiner Umgebung zu achten. Bereits Silikondämpfe können sich auf den Kontaktstellen niederschlagen. Die hochohmigen Eigenschaften des Silikons führen dann schnell zu Funktionsstörungen. Für Stelleranwendungen bei denen nicht nur gegen einen Anschlag gefahren wird, sondern auch Zwischenstellungen angefahren und gehalten werden müssen, hat der DC-Motor das Problem, daß sein Erregerstrom immer ein Drehmoment am Rotor induziert und kein Haltemoment. Zwischenstellungen sind mit einem DC-Motor nur zu realisieren, wenn der Motor sein Moment gegen eine Feder aufbringen muß und der Motorstrom so reduziert wird, daß Motor- und Federmoment sich gegenseitig aufheben. Wirken dabei auf den DC-Motor dynamische Kräfte, müssen diese laufend ausgeregelt werden um die Zwischenstellung zu halten.

Beim elektronisch kommutierten BLDC-Motor wird das Erregerfeld im Stator erzeugt und es dreht sich der Permanentmagnet. Daher ist keine elektrische Verbindung zum Rotor (Permanentmagnet) notwendig. Der von uns eingesetzte BLDC-Motor hat eine höhere Lebensdauer (ca. Faktor 2 bis 5) gegenüber einem DC-Motor, da der mechanische Verschleiß nur an den Lagerstellen, nicht an Kontaktstellen auftreten kann (es gibt keine Kohlebürsten, die sich abnutzen).

Außerdem wird bei gleichem äußeren Bauraum des Motors, sowohl ein höheres Nennmoment, als auch ein höheres Losbrechmoment erreicht.

Bei der Realisierung von Zwischenstellungen hat der BLDC-Motor den Vorteil, durch einen konstanten Erregerstrom seine Position auch konstant zu halten. Dadurch wird ein hohes Haltemoment und eine hohe Genauigkeit beim Halten von Zwischenstellungen erreicht.

Die vielen Vorteile des BLDC-Motors werden erkaufte über einen höheren Ansteuer-aufwand. Der DC-Motor läßt sich mit einem einfachen statischen Gleichstrom ansteuern. Beim BLDC-Motor muß die Kommutierung von der Ansteuerelektronik übernommen werden. Das heißt je nach gewünschter Drehzahl und anliegendem Lastmoment muß die Ansteuerelektronik die Phasenfrequenz aussteuern. Der Aufwand an Leistungsbau-elementen der Ansteuerelektronik (H-Brücken) vervielfacht sich proportional zur Phasenzahl des Motors. Unser zweiphasiger BLDC-Motor benötigt dementsprechend zwei H-Brücken gegenüber einer H-Brücke beim DC-Motor.

Es ist je nach Anwendung abzuwägen, ob die technischen Vorteile des BLDC-Motors den größeren Aufwand rechtfertigen.

10. Messungen

Der beschriebene elektrische Aktuator ist für die spezielle Anwendung eines Einlassklappenstellers konzipiert und konstruiert worden. Darauf wurden auch seine Prüfungen und Messungen ausgerichtet.

Funktionsprüfungen:

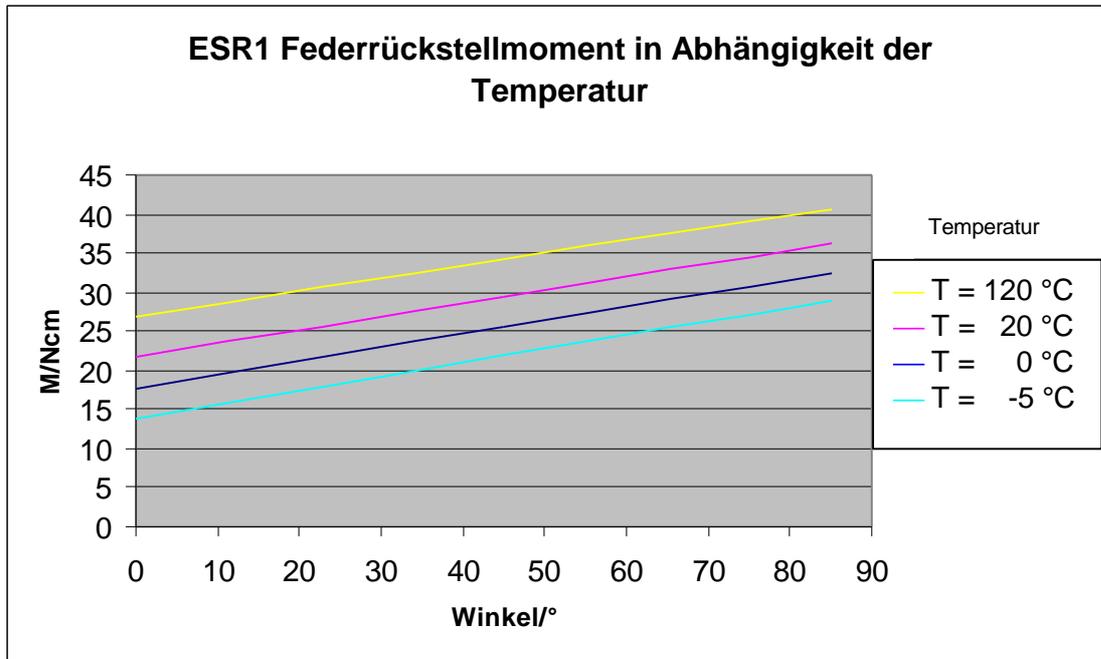


Bild 16: Messung Federrückstellmoment

Zu erkennen: Je größer der Winkel, d.h. je größer die Federspannung, und je höher die Temperatur, umso größer das Rückstellmoment.

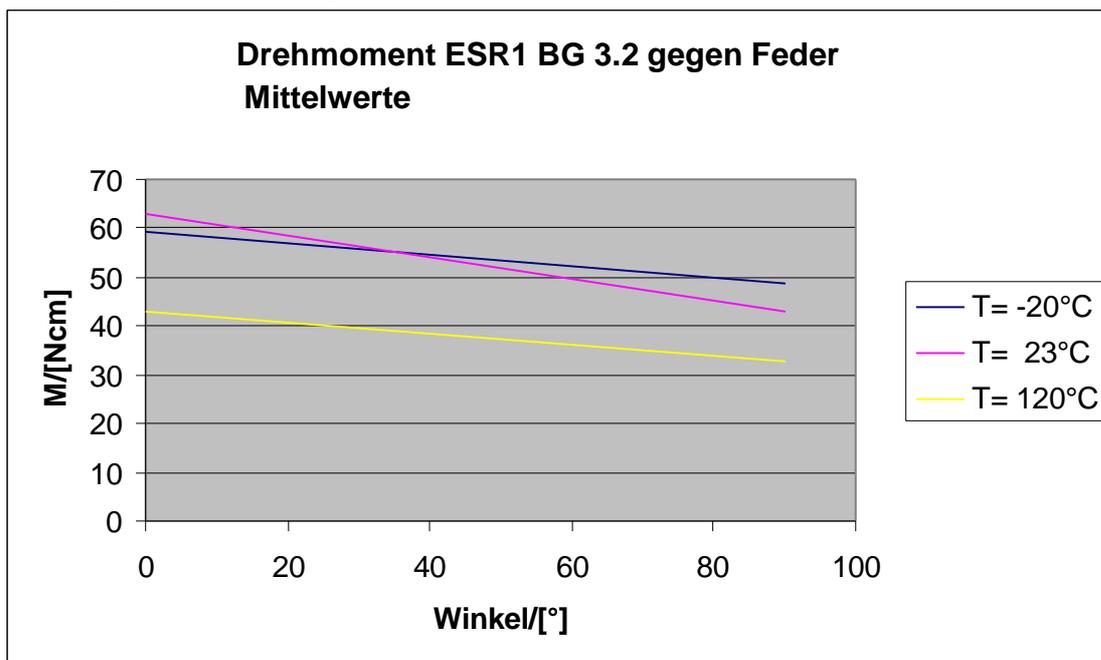


Bild 17: Messung Steller-Drehmoment

Das Abtriebsmoment gegen die Rückstellfeder nimmt mit steigender Temperatur deutlich ab. Dies liegt zum einen an dem höheren Rückstellmoment aus Bild 16, zum anderen an der geringeren Magnetisierung des permanentmagnetischen Rotors.

Die Temperaturabhängigkeit des Abtriebsmoments wirkt sich ebenso auf die Stellzeiten aus:

Stellzeiten gegen die Feder bei 90° Stellwinkel und 20 Ncm Lastmoment:

Umgebungstemperatur	-20°	80°	120°
Stellzeit in ms	229	195	253

In Bild 18 ist die Differenz dargestellt zwischen der Sollposition des Steller-Abtriebs (rechnerisch ermittelt aus dem PWM-Eingangssignal) und der Istposition, die sich bei dem entsprechenden PWM-Signal am ESR1 einstellt.

Der geprüfte Steller hat eine absolute Abweichung von ca. 2°, gleichbleibend über den kompletten Stellbereich.

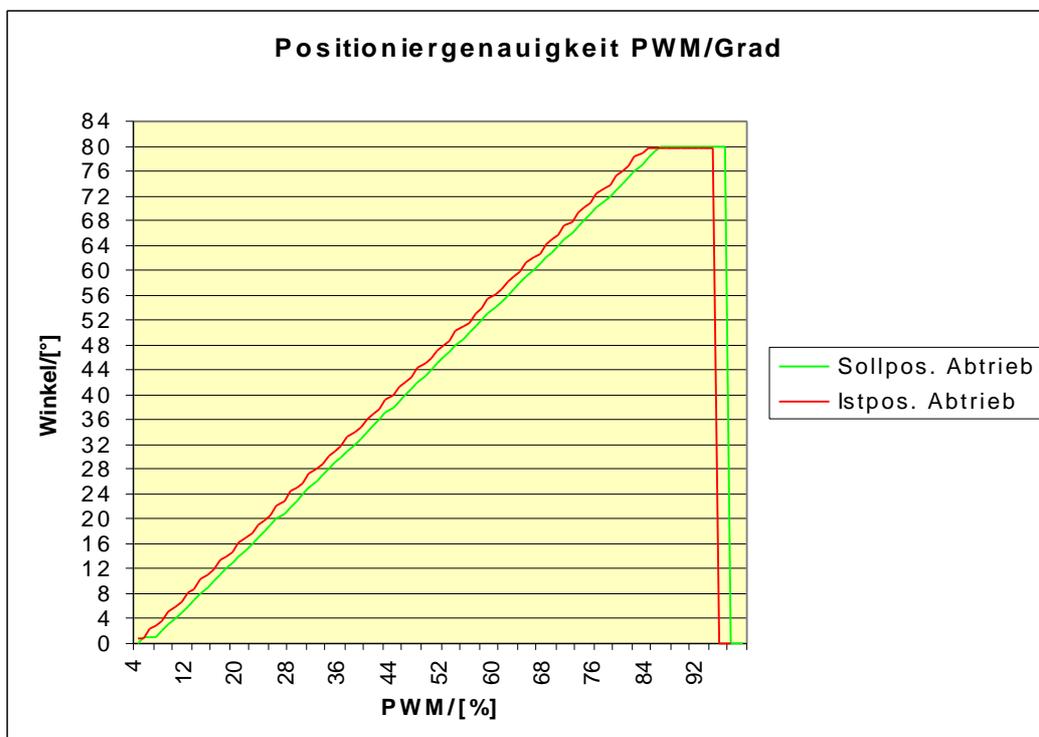


Bild 18: Positioniergenauigkeit des Stellers (PWM-Eingangssignal zu Stellwinkel)

Bild 19 zeigt das analoge Rückmeldesignal, das sich der Steller aus dem Lagesignal der beiden Hallsensoren generiert. Dieses Signal deckt sich zu $\pm 1\%$ mit dem errechneten Sollwert (linearer Verlauf mit 0,3V bei 0° und 2,7V bei 90°)

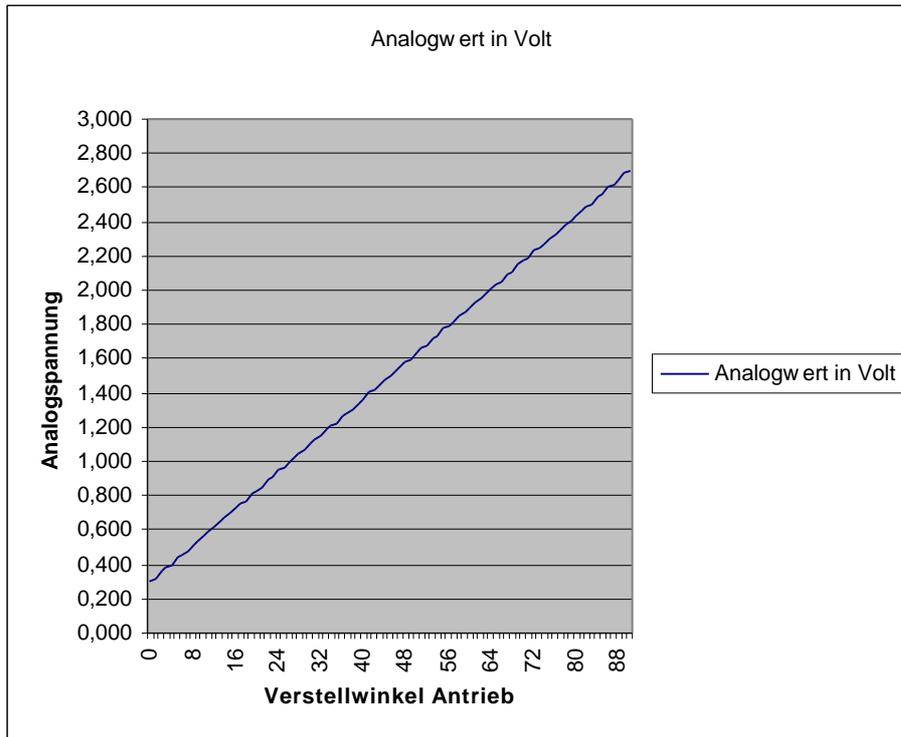


Bild 19: Rückmeldesignal des Stellers über den Verstellwinkel

Dauerlaufprüfung mit überlagertem Temperaturprofil (-20 °C ... +120 °C):

- Der Steller ist auch nach 1,2 Millionen Stellzyklen voll funktionsfähig
- Spitzentemperaturen bei $T_{\text{Umgebung}} = 120^{\circ}\text{C}$:
 - Controller: 132 °C
 - Transistoren der H-Brücke: 143 °C

Schwingungsprüfung (20 Hz ... 800 Hz) mit

- überlagertem Temperaturprofil (-20 °C ... +120 °C) gemäß DIN EN 60068-2-6:
- Der Steller war auch nach der Prüfung funktionsfähig.

11. Ausblick

Für elektrische Steller wird es im Automobil in Zukunft immer mehr Anwendungen geben. Dies liegt vor allem an den immer restriktiver werdenden Gesetzesvorschriften in Bezug auf Verbrauch und Emission und am wachsenden Sicherheits- und Komfortanspruch der Kunden.

Die Entwicklung wird dabei in zwei Richtungen weitergehen:

1. Sehr einfache kostengünstige Lösungen als Ersatz für pneumatische Steller. Diese Steller erfüllen die Grundfunktion und sind ohne Intelligenz ausgestattet.
2. Aufwendigere intelligente Steller, die zum Einen das Motorsteuergerät entlasten, zum Anderen Funktionen erfüllen, die für moderne Motorenkonzepte notwendig sind und nur mit elektronischen Stellerkonzepten umgesetzt werden können.

Die letztgenannten Steller werden in ihrer Funktion immer umfangreicher. Sie werden in Zukunft auch über den fahrzeugspezifischen seriellen Bus angesteuert werden können. Damit können mehrere Steller gemeinsam mit einem Steuergeräteausgang angesteuert werden. Die einzelnen Steller erkennen eigenständig, ob die aktuell gesendete Information für sie bestimmt ist oder für einen anderen Steller aus der Funktionsgruppe. Das Motorsteuergerät muß dann nur einen Steuerausgang für diese aus mehreren Stellern bestehende Funktionsgruppe zur Verfügung stellen (z. B. die Funktionseinheiten an einem Saugmodul bestehend aus zwei Resonanzklappenstellern, einem Ladungsbewegungsklappensteller und einem AGR-Ventil).

Eine Standardisierung von kompletten Stellern mit ihren elektrischen und mechanischen Eigenschaften wird mittelfristig nicht eingeführt werden können, da die Anwendungsvielfalt und der jeweils unterschiedliche Bauraum dies nicht zulassen. Herstellerbezogen standardisierte Komponenten von Stellsystemen werden die Entwicklungszeiten von kundenspezifischen Applikationen in Zukunft weiter reduzieren.

Elektrische Steller im Fahrzeug bleiben auch in Zukunft ein breites und spannendes Betätigungsfeld für die Mechatronik.

12. Literatur / Quellenhinweis

- [1] Hagemann, B.; Hartnuß, H.; Meyer, T.; Springmann, R.; Welle, G.: Intelligente Stellantriebe für Positionierlösungen im Automobil
- [2] Stölting, H.-D.; Kallenbach, E.: Handbuch Elektrische Kleinantriebe
- [3] Datenblatt "TL 4275" / Fa. Infineon
- [4] Kölmel, A.: Präsentation "Luft- / Wandgeführte Direkteinspritzung: Tumble-System"