

Von der Automatisierten Kupplung zum Automatisierten Schaltgetriebe

Dr.-Ing. R. Berger, Dr. techn. R. Fischer und Dr.-Ing. M. Salecker, Bühl

Summary / Zusammenfassung

An Electronic Clutch Management (EKM), developed by LuK, is in mass production. The essentials of this system are the Selfadjusting Clutch (SAC), the electromotoric clutch actuator with integrated control and power electronics, smart control strategies like torque tracking and a minimal number of sensors used. For the complete automation of the manual transmission (ASG) the EKM-system is completed by an electromotoric gearshift actuator. By using a shift elasticity integrated in the shifting electric motor, very quick gearshifts are possible, comparable to a system with hydraulic actuation.

Ein von LuK entwickeltes Elektronisches Kupplungsmanagement (EKM) wird in Großserie gebaut. Die wesentlichen Säulen dieses Systems sind die Selbstnachstellende Kupplung (SAC), ein elektromotorischer Kupplungsaktor mit integrierter Steuerungs- und Leistungselektronik, intelligente Steuerstrategien wie die Momentennachführung sowie die Beschränkung auf eine minimale Zahl von Sensoren. Bei der vollständigen Automatisierung des Handschaltgetriebes wird das EKM-System um einen elektromotorischen Getriebeaktor erweitert. Dank einer im Elektromotor integrierten Schaltelastizität lassen ebenso schnelle Schaltungen wie bei Einsatz hydraulischer Aktoren realisieren.

1 Einleitung

Bedingt durch die steigende Verkehrsdichte, die zunehmende Reglementierung im Straßenverkehr sowie steigende Treibstoffpreise ist eine sehr große Nachfrage nach einer teilweisen oder vollständigen Automatisierung des Handschaltgetriebes entstanden. Die Chancen für die langfristige Etablierung dieser Systeme neben dem Handschaltgetriebe und den bisher verfügbaren Automatgetrieben sind dank der gewachsenen Möglichkeiten beim Einsatz elektronischer Steuerungen sehr groß [1,2]. LuK befaßt sich als Kupplungs-hersteller seit vielen Jahren mit dieser Thematik. Nach ersten Erfahrungen mit einem elektronischen Kupplungsmanagement (EKM) auf hydraulischer Basis, konzentriert sich LuK nunmehr auf den Einsatz von Elektromotoren als Aktoren für Kupplung und Getriebe.

Dadurch werden Kosten- und Gewichtseinsparungen sowie eine höhere Integration angestrebt. Das dies gelungen ist, beweist das EKM-System, in der Mercedes A-Klasse.

Bild 1 zeigt schematisch das EKM als Teilautomatisierung sowie das ASG als komplette Automatisierung des Handschaltgetriebes, beides als add-on Systeme.

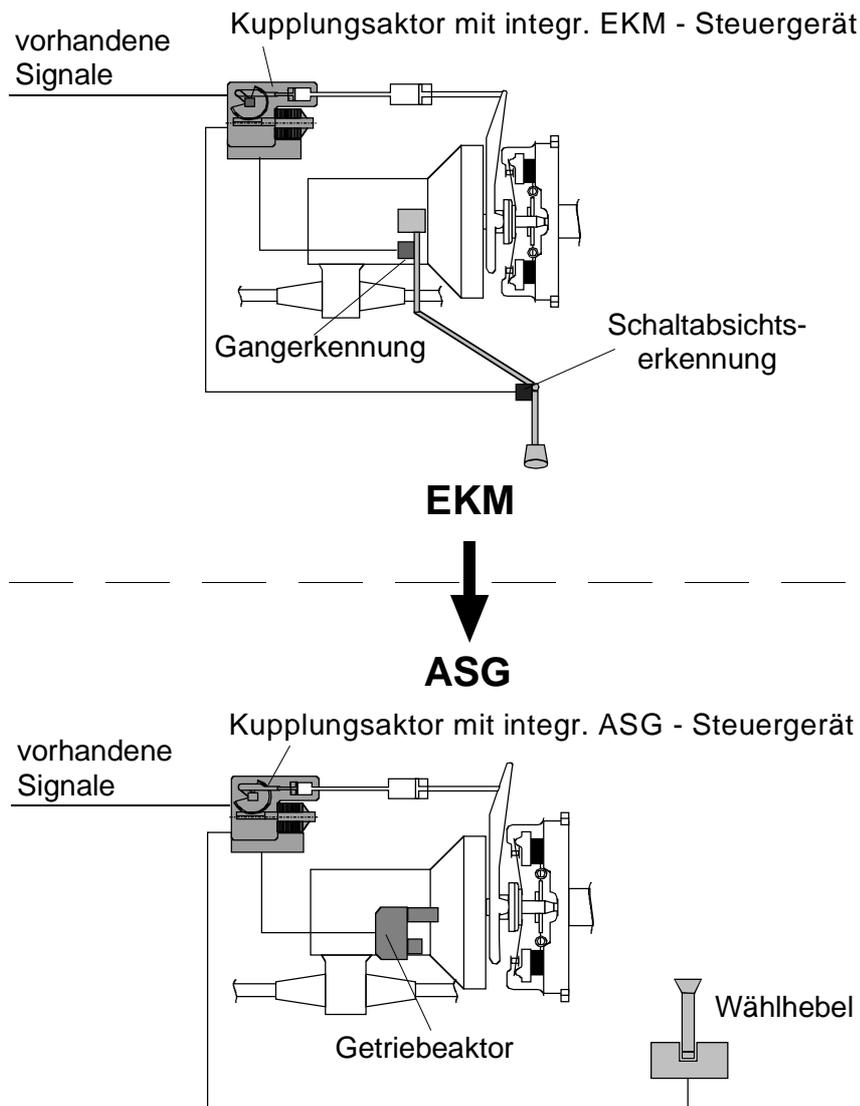


Bild 1: Prinzip add-on EKM und ASG

Beim EKM entfällt das Kupplungspedal und wird durch einen intelligenten elektromotorischen Kupplungsaktor ersetzt. Dieser betätigt über den vom Handschaltgetriebe unverändert übernommenen Ausrücker die Kupplung. Zur Gang- und Schaltabsichtserkennung sind zusätzliche Sensoren notwendig. Alle darüber hinaus benötigten Signale sind bereits im Fahrzeug vorhanden, z.B. aus der Motorsteuerung oder von den Raddrehzahlsensoren.

Beim ASG wird die automatisierte Kupplungsbetätigung des EKM-Systems übernommen. Die Außenschaltung mit den zusätzlichen Sensoren entfällt und wird durch einen elektromotorischen Getriebeaktor ersetzt. Für den Fahrer bedeutet dies „shift by wire“. Auch beim ASG hat sich LuK als Ziel gesetzt, sämtliche Modifikationen am Getriebe zu vermeiden. Dies bedeutet insbesondere den Verzicht auf zusätzliche Sensoren, so daß die für die Steuerung benötigten Signale aus den gezeigten Elementen kommen und darüber hinaus bereits im Fahrzeug vorhanden sind.

Der vorliegende Beitrag gliedert sich in drei Abschnitte. Zunächst wird auf den erreichten Serienstand bei EKM eingegangen, danach folgt ein Abriß zu den wichtigsten Weiterentwicklungszielen beim EKM. Der dritte Teil behandelt den Aufbau des ASG sowie dessen wichtigstes Merkmal, den von der Zugkraftunterbrechung geprägten Schaltvorgang.

2 Serienstand Elektronisches Kupplungsmanagement (EKM)

Über das elektromotorische LuK EKM sind in den letzten Jahren zahlreiche Veröffentlichungen erschienen, dies betrifft sowohl die Hardware [3,4] als auch die Steuerung des Systems [1-4]. Deshalb erübrigt sich an dieser Stelle eine ausführliche Darstellung. Mit dem Start der Mercedes A-Klasse liefert LuK das weltweit kompakteste System in Serie.

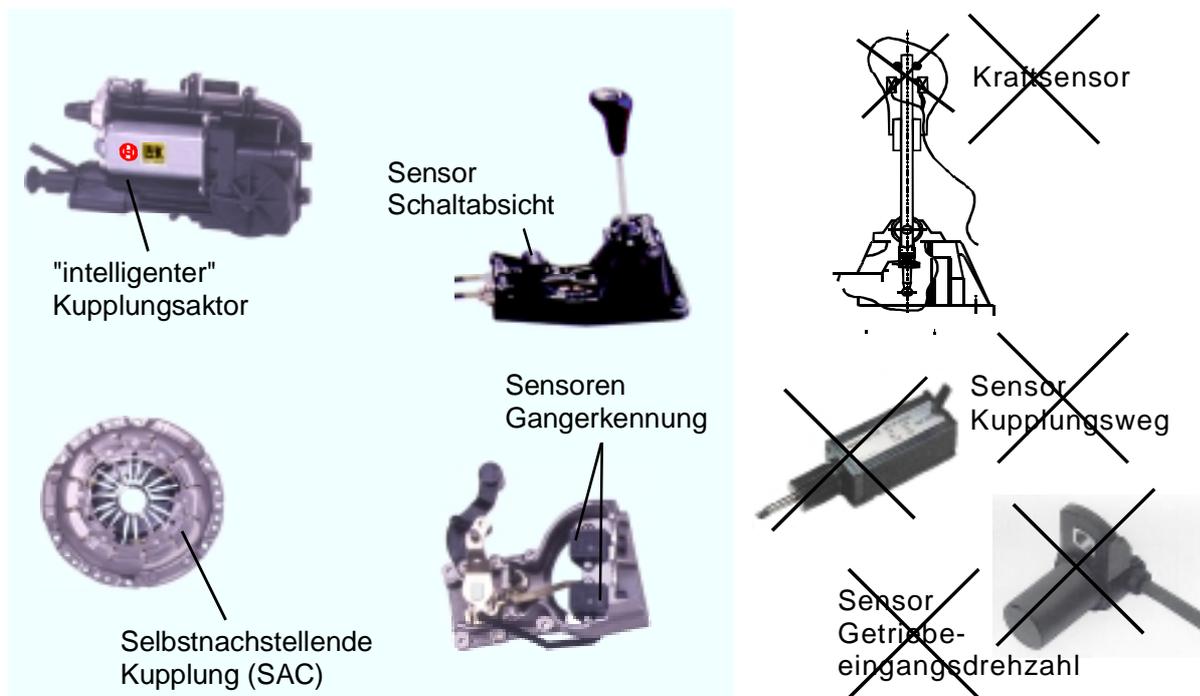


Bild 2: Komponenten des LuK-EKM

Die vier wesentlichen Pfeiler dieses Erfolges sind die Selbstnachstellende Kupplung (SAC) [5], der intelligente elektromotorische Aktor, intelligente Steuerstrategien wie die Momentennachführung sowie die Aufwandsminimierung, siehe auch Bild 2. Damit ließen sich die Kundenforderungen nach hoher Dynamik der automatisierten Kupplung bei geringen Kosten und hoher Funktionssicherheit realisieren.

Der wichtigste Schritt zur Minimierung der Kosten war der Übergang vom hydraulischen zum elektromotorischen Aktor. Dadurch entfallen Pumpe, Speicher und Ventile. Gleichzeitig entfällt die Notwendigkeit, einen Wegsensor im Ausrücksystem einzusetzen. Anstelle dessen wird der Kupplungswegsensor im elektromotorischen Aktor integriert. Die weiteren Schritte zur Aufwandsminimierung sind der Verzicht auf einen Getriebeeingangsdrehzahlensensor sowie einen Kraftsensor zur Schaltabsichtserkennung, welcher eine Modifikation des Schalthebels sowie ein bewegtes Kabel bedingt hätte.

Im Vergleich zu einer Hydraulikpumpe mit Speicher bietet der kleine Elektromotor, welcher aus einem Fensterheber stammt, eine geringe Leistungsdichte. Deshalb stellt sich die Frage, ob mit dem elektromotorischen Aktor hinreichend kurze Auskuppelzeiten für schnelle Schaltungen realisiert werden können. Die Antwort lautet ja, dank SAC und Momentennachführung. In Bild 3 werden diese Zusammenhänge veranschaulicht.

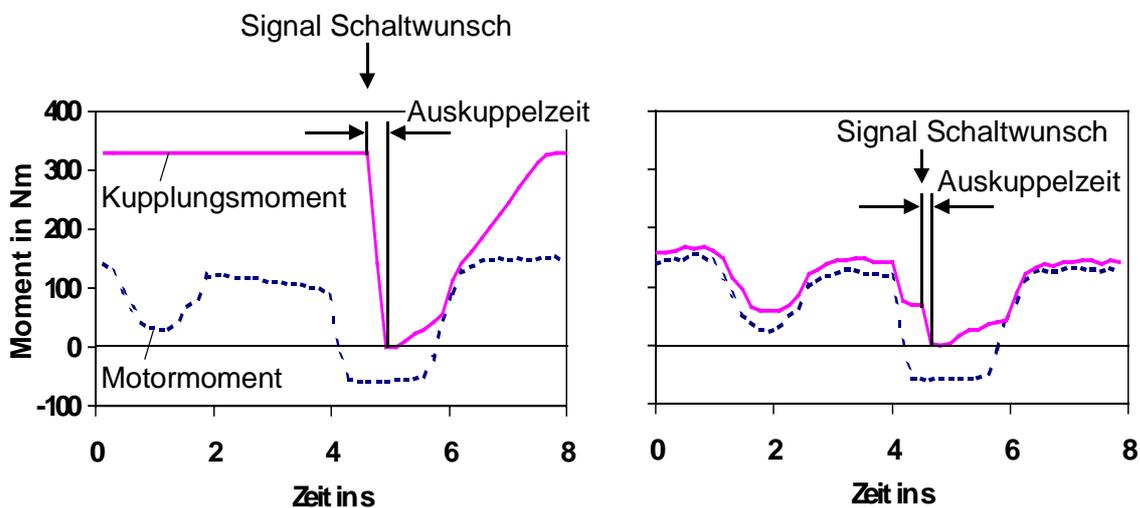


Bild 3a: Schaltvorgang ohne Momentennachführung

Bild 3b) Schaltvorgang mit Momentennachführung

Bei konventionellem System ohne Momentennachführung liegt das Kupplungsmoment weit über dem Motormoment, weil die Trockenkupplung, die ja unter allen extremen Bedingungen mindestens das Motormoment übertragen können muß, im Normalfall 50 bis 150% Reserve bietet. Will der Fahrer schalten und geht vom Gas, fällt das Motormoment. Bei Betätigung des Schalthebels wird die Schaltabsicht ausgelöst und die Kupplung muß nun von ganz geschlossen bis ganz geöffnet verfahren werden. Das definiert die Auskuppelzeit. Wird diese zu lang, überträgt die Kupplung während der Synchronisierung des nächsten Gangs noch Moment, was zum Ratschen oder Getriebebeschäden führen kann.

Bild 3b zeigt den gleichen Vorgang mit Momentennachführung, das Kupplungsmoment liegt nur knapp über dem Motormoment. Geht der Fahrer nun zum Schalten vom Gas, sinkt mit dem Motormoment auch das Kupplungsmoment. Bei Auslösung der Schaltabsicht ist die Kupplung somit schon fast geöffnet und das restliche Auskuppeln erfolgt sehr schnell.

Die erreichte hohe Funktionssicherheit des EKM-Systems resultiert aus der Beschränkung auf wenige und einfache Komponenten aber dafür aufwendiger Softwareentwicklung. Das dies nicht zu Lasten der Qualität ging, zeigen folgende Pressestimmen.

**...oder Halbautomatik mit Hand-
schaltung, ohne zu kuppeln (diese
Version würde David Coulthard
kaufen)...**
Die Welt 28.06.97

**...Schalten macht Freude - erst recht,
wenn man ... die automatische
Kupplung geordert hat. Sie funktioniert
so perfekt, daß wir für sie alle Tip- und
Steptronics dieser Welt stehen lassen
würden...**

FAZ 10/1997

**...Ein weiterer Fortschritt in Sachen
Komfort ist die vom Spezialisten LuK
entwickelte automatische Kupplung...**
mot 17/1997

Bild 4: Pressestimmen zum EKM in der A-Klasse

3 Weiterentwicklung der automatisierten Kupplung

Mit dem jetzigen Serienstand wurde eine preisgünstige und leistungsfähige Lösung erreicht. Vor dem Hintergrund knapper werdender Einbauräume in modernen Fahrzeugen sowie dem Trend zu höherer Systemintegration, bildet das automatisierte Ausrücksystem vom Kupplungsaktor bis zur Kupplung einen wichtigen Schwerpunkt bei der Weiterentwicklung. Hierbei sind wichtige Ziele, die Minimierung von Bauraum und Gewicht, die verbesserte Applizierbarkeit, die Bedienung höherer Drehmomente sowie Kostensenkungen.

Neben den nachfolgend dargestellten Maßnahmen zur Weiterentwicklung von Kupplungsaktor und Kupplung arbeitet LuK auch an der Vereinfachung der Gang- und Schaltabsichtserkennung sowie an zusätzlichen Softwarefunktionen [4].

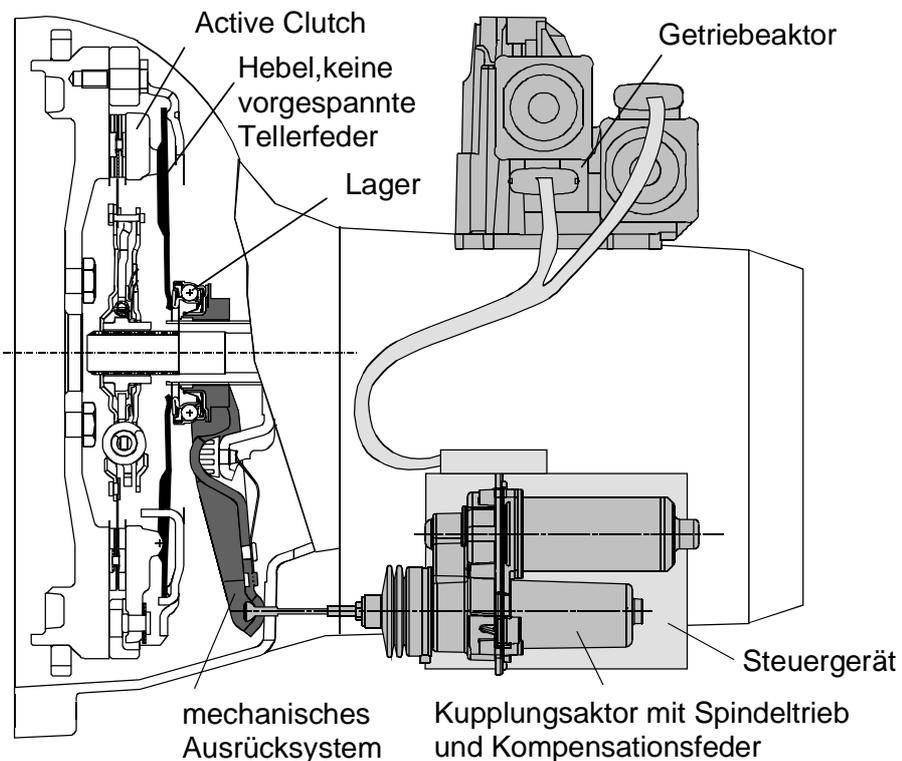


Bild 5: Automatisiertes Schaltgetriebe mit weiterentwickelten EKM-Komponenten

3.1 Weiterentwicklung beim Kupplungsaktor

In Bild 5 erkennt man die Vorteile, die sich aus dem Getriebeanbau des Kupplungsaktors ergeben. Damit gelingt es z.B., das komplett automatisierte Schaltgetriebe als separat funktionsfähiges Subsystem darzustellen. Am unveränderten serienmäßigen Handschaltgetriebe werden der Kupplungsaktor mit Steuergerät, das Ausrücksystem, der Getriebeaktor sowie eine Verkabelung zwischen Kupplungs- und Getriebeaktor angebaut.

Der heutige Serienstand des Kupplungsaktors wurde mit dem Ziel entwickelt, möglichst viele bewährte Komponenten einzusetzen. Dies sind Elektromotor und Schneckengetriebe eines Fensterhebers und ein Kurbeltrieb. Ein Spindeltrieb ermöglicht im Vergleich zum Kurbeltrieb bei kleinerem Bauraum, einen wesentlich größeren Stellweg und damit auch die Möglichkeit des Ausgleichs von Toleranzen ohne Ersteinstellung. Dies soll bei der neuen, in Bild 5 dargestellten, Generation des Kupplungsaktors verwirklicht werden.

Weiterhin kommen neue Motoren zum Einsatz, die speziell für die ungünstigen Temperatur- und Schwingungsbedingungen bei Getriebeanbau entwickelt worden sind. Dafür werden die inzwischen beim ASG gewonnenen Erfahrungen benutzt.

3.2 Weiterentwicklung bei der Kupplung

Die in Bild 5 dargestellte Kupplung ist ebenfalls eine neue Entwicklung. Sie besitzt keine vorgespannte Haupttellerfeder mehr, sondern nur einfache Hebel, welche bei Betätigung durch das Lager die Anpreßplatte gegen Kupplungsscheibe und Schwungrad drücken.

Eine solche zugeführte Kupplung, LuK nennt sie „Active Clutch“, eignet sich nur in Verbindung mit einer automatisierten Betätigung. Während dem Fahren wird sie vom Kupplungsaktor entsprechend der errechneten Momentenvorgabe aktiv zugeführt. Dies gilt auch für die Parksicherung des Fahrzeuges. Damit der Kupplungsaktor in dieser Situation nicht permanent bestromt werden muß, ist ein selbsthemmendes Getriebe oder eine Feder, die das Ausrücksystem verspannt, im Kupplungsaktor erforderlich. Es muß außerdem ein mechanisches Ausrücksystem benutzt werden, um über längere Zeiträume die Parksicherung zu gewährleisten.

Die „Active Clutch“ ist gegenüber der SAC deutlich vereinfacht. Untersuchungen ergaben, daß bei gleichem Motormoment ein Elektromotor gleicher Baugröße verwendet werden kann. Eine detaillierte Darstellung dieser Zusammenhänge findet sich in [4]

4 Automatisiertes Schaltgetriebe

4.1 Aufbau

Die wesentlichen Komponenten eines automatisierten Schaltgetriebes sind bereits in der Einleitung aufgezählt worden. In Bild 6 wird nun gezeigt wie die Aktoren aufgebaut sind.

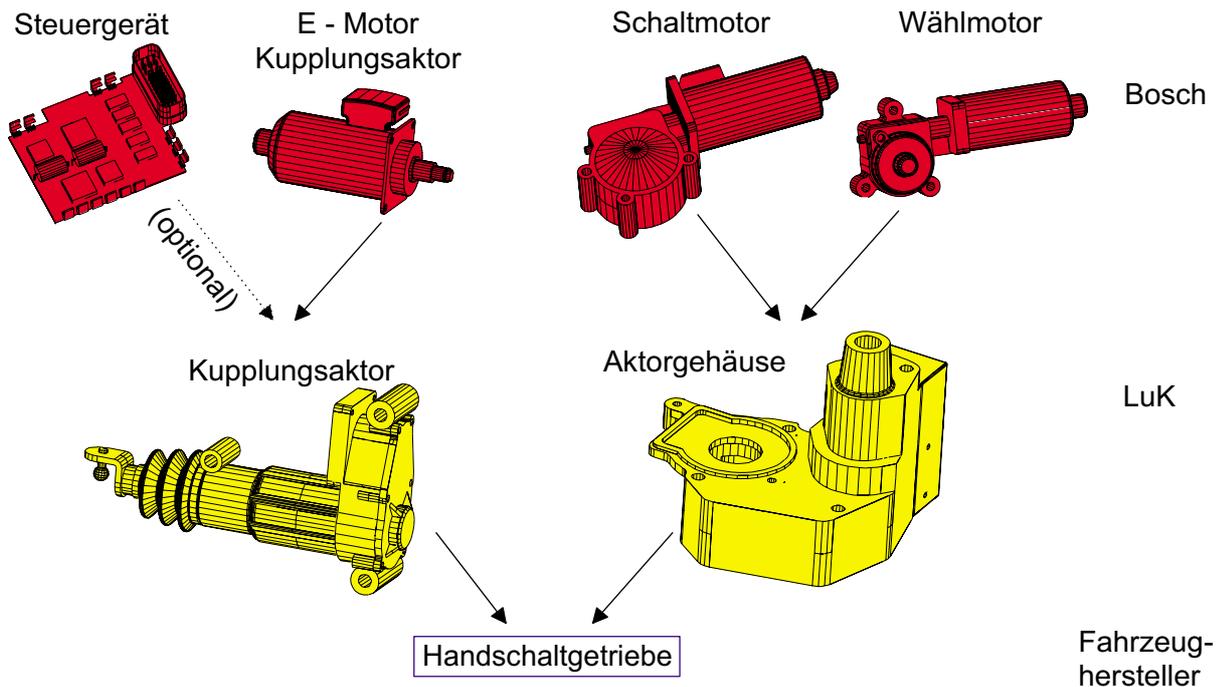


Bild 6: Hardware ASG - Aufgabenverteilung

Wie auch beim EKM ist LuK beim ASG eine Kooperation mit Bosch eingegangen. Von diesem bewährten Partner kommen die E-Motoren für Kuppeln, Schalten, Wählen sowie das Steuergerät. Diese Standardkomponenten sollen in allen ASG-Anwendungen eingesetzt werden, was eine automatisierte und kostengünstige Großserienfertigung ermöglicht.

Auf der anderen Seite unterscheiden sich die verschiedenen Typen der Handschaftgetriebe hinsichtlich Geometrie sowie Betätigungselementen sehr stark voneinander. Hinzu kommen unterschiedlichste Bauraumrandbedingungen in den Fahrzeugen. Die add-on Applikation der obengenannten Standardkomponenten an das jeweils unveränderte Getriebe erfolgt über getriebespezifischen Bauteile, welche von LuK kommen.

Diese Aufgabenverteilung, bei der LuK die Systemverantwortung übernimmt, führt zu größtmöglicher Flexibilität und Kostenminimierung.

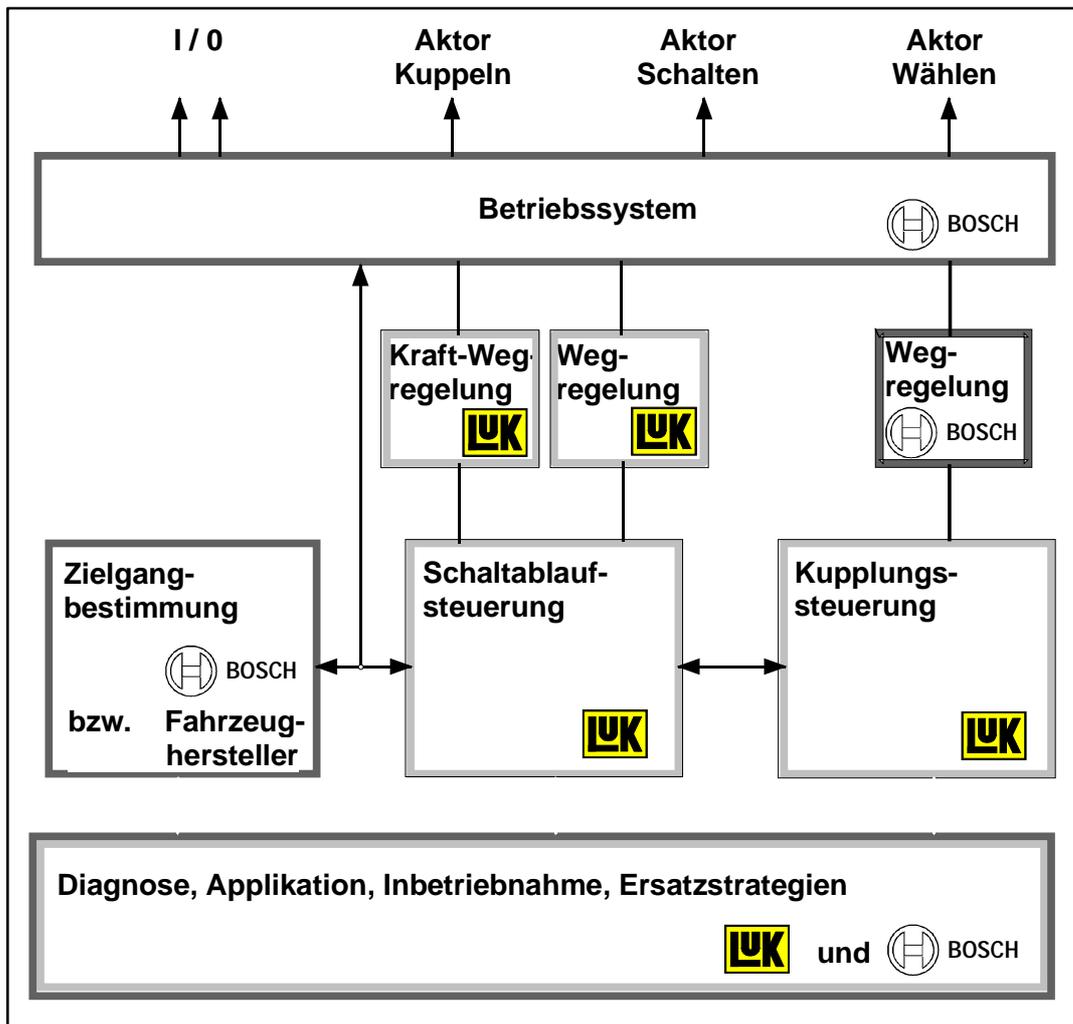


Bild 7: Software ASG- Aufgabenverteilung

Auch bei der Software des ASG teilen sich LuK und Bosch die Aufgaben, siehe Bild 7. Das Betriebssystem, die Signalaufbereitung sowie hardware-spezifischen Routinen zur Ansteuerung der Aktoren kommen von Bosch. Außerdem gehen die Bosch-Erfahrungen aus dem Automatgetriebebereich in die Zielgangbestimmung des ASG ein. Dazu gehören u.a. Fahrererkennung, Bergerkennung, Kurvenerkennung.

Die Ansteuerung des Getriebes und die Koordination des Schaltablaufes (Kupplung, Verbrennungsmotor, Getriebe) liegen in Verantwortung von LuK. Gleiches gilt für die Kupplungssteuerung, die in wesentlichen Teilen vom EKM-System übernommen werden kann.

Beim Fahrzeughersteller als unserem Kunden liegen ebenfalls wichtige Aufgaben. Er bringt die markenspezifische Philosophie, wann und wie die Getriebe geschaltet werden sollen, ein. Dazu gibt es im LuK-Konzept umfangreiche Applikationsmöglichkeiten.

4.2 Schaltvorgang und Zugkraftunterbrechung

Das Grundproblem beim ASG ist die Zugkraftunterbrechung. Dies ist in Bild 8 die Talsenke der Fahrzeugbeschleunigung zwischen den beiden geschalteten Gängen.

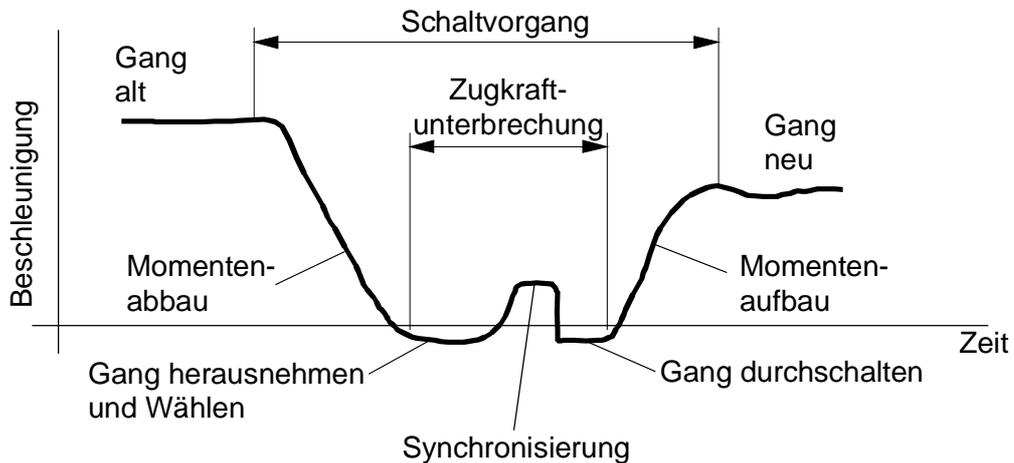


Bild 8: ASG Schaltvorgang: Phasen

Die Phasen des Schaltvorgangs kann man im Hinblick auf die Anforderungen an die Aktoren in zwei Blöcke unterteilen, siehe Bild 9:

- Phasen, die sich auf die Fahrzeugbeschleunigung auswirken
- Phasen, die reine Totzeiten darstellen

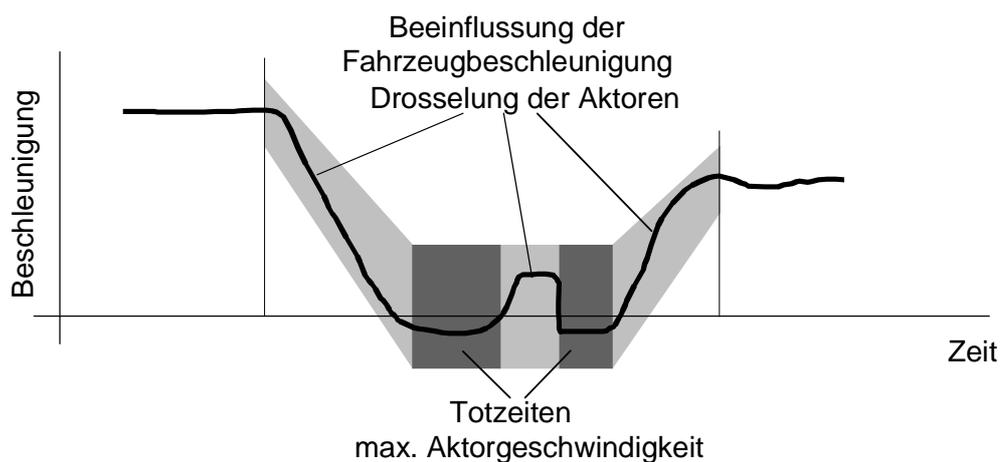


Bild 9: Anforderungen an Aktoren beim Schaltvorgang

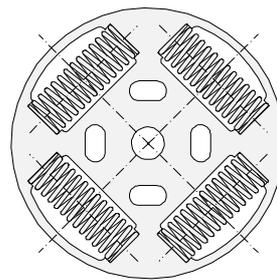
Bei den Phasen, die sich auf die Fahrzeugbeschleunigung auswirken, zeigt sich, daß die Aktoren gedrosselt werden müssen, weil zu schnelle Änderungen der Fahrzeugbeschleunigung zu einer Überforderung der Aktoren führen können.

gung als unangenehm empfunden werden. Die optimale Interaktion von Motor-, Kupplungs- und Getriebeeingriff führt zum bestmöglichen Verhalten. Die Synchronisierung kann z. B. durch Zwischenkupplern und Zwischengas unterstützt werden.

In den Totzeiten ist jedoch die maximale Geschwindigkeit der Aktoren gefordert. Dabei muß darauf geachtet werden, daß nach dem Herausnehmen des Ganges und der folgenden schnellen Phase nicht zu hart auf die Synchronisierung aufgeschlagen wird. In diesem Zusammenhang stellt sich außerdem die Frage, wie beim elektromotorischen System der Nachteil geringerer Leistungsdichte im Vergleich zu hydraulischen Aktoren egalisiert werden kann.

Zur Lösung dieser Widersprüche hat LuK eine vorgespannte Schaltelastizität entwickelt, die bei Überschreiten einer Schaltkraftschwelle anspricht und dann zunächst nur einen geringen Kraftanstieg aufweist.

- ➔ Schaltzeitminimierung durch:
 - Weiterlaufen des E-Motors beim Synchronisieren
 - kurze Freiflugphase durch Entspannen der Elastizität



- ➔ konstant guter Schaltkomfort (definierte Schaltkraft)
- ➔ Schutz von Aktorik- und Getriebekomponenten

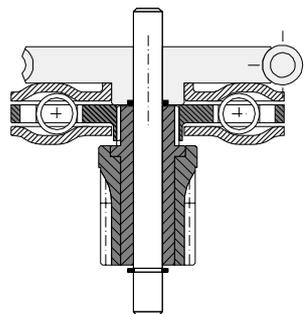
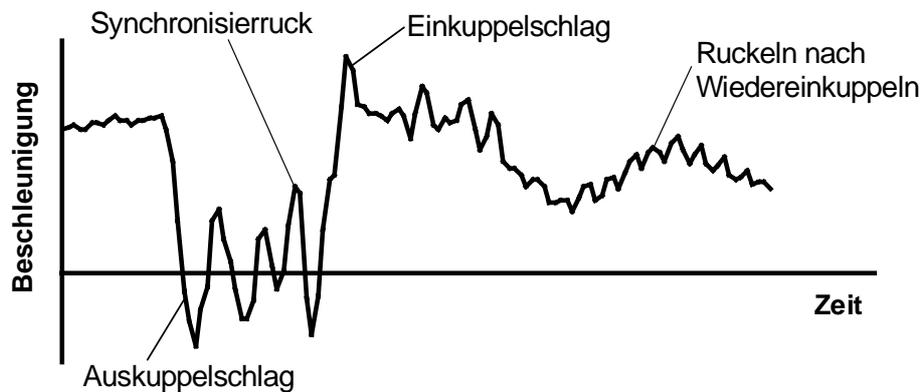


Bild 10: Schaltelastizität

Anhand zweier Messungen werden die Auswirkungen verschiedener Auslegungen des Schaltablaufes demonstriert. Bild 11a zeigt den Verlauf der Fahrzeugbeschleunigung bei einer Schnellschaltung mit nicht gedrosselten Aktoren. In den drei genannten Phasen mit Auswirkung auf die Fahrzeugbeschleunigung werden starke Schwingungen angeregt. Der abrupte Momentenabbau führt zunächst zu einem Auskuppelschlag, und dessen abklingende Schwingungen werden vom Synchronisierdruck überlagert. Durch das sehr schnelle

Einkuppeln kommt es zu einer Beschleunigungsspitze und einer anschließenden Schlupfphase mit maximalen Kupplungsmoment respektive hoher Fahrzeugbeschleunigung. Nach dem Schlupfabbau in der Kupplung sind Ruckelschwingungen des Fahrzeuges zu sehen. Die Schaltung in Bild 11b erfolgte unter gleichen Bedingungen jedoch mit einer komfortorientierten Abstimmung. Momentabbau und -aufbau sowie die Synchronisierphase dauern deshalb länger als bei der Messung in Bild 11a.

a) Unkomfortable Schaltung



b) Komfortable Schaltung

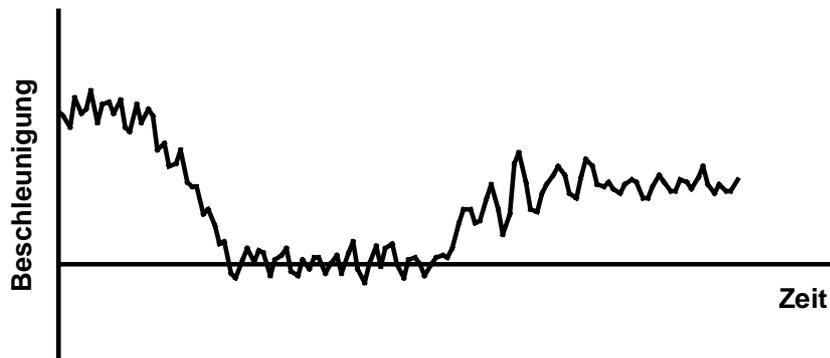


Bild 11: Messung Schaltablauf

Bild 12 zeigt einen Vergleich der erreichbaren Schaltzeiten mit hydraulischem und elektromotorischem System sowie die notwendige Schaltzeit für einen komfortablen Schaltvorgang. Die Balkenlängen entsprechen den benötigten Zeiten für die einzelnen Phasen gemäß Bild 9, und es wird die gleiche Graustufung benutzt.

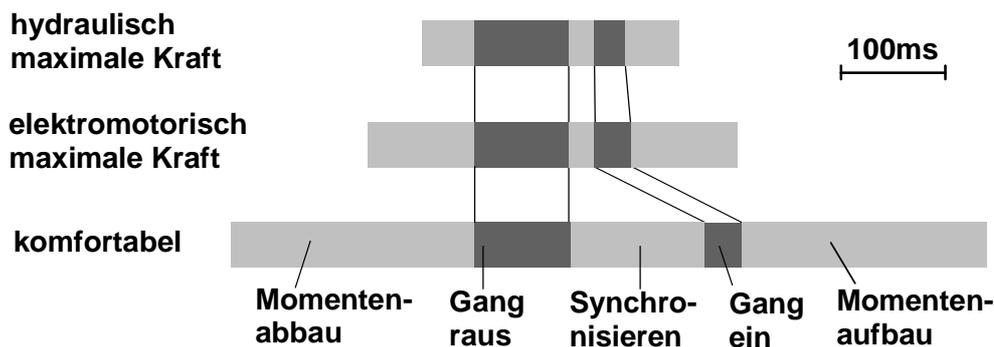


Bild 12: Schaltzeitvergleich

Bei maximaler Ausnutzung der Leistungsfähigkeit der Aktoren weist das elektromotorische System gegenüber dem hydraulischen lediglich bei der Kupplungsbetätigung einen Zeitnachteil auf. Dieser ließe sich insbesondere beim Momentenabbau durch intelligente Steuerung wie die Momentennachführung bzw. die Interaktion von Verbrennungsmotor und Kupplung verringern. Hervorzuheben ist, daß sich die Totzeitphasen „Gang herausnehmen“ und „Gang einlegen“ für beide Systeme kaum unterscheiden.

Auch bei der komfortablen Schaltung verlängern sich die Totzeiten praktisch nicht. Hingegen müssen die beschleunigungsrelevanten Phasen jeweils zwei- bis viermal solange wie im extrem Fall dauern, sowohl bei hydraulischer als auch bei elektromotorischer Aktorik.

4.3 Schaltkollektiv und Verbrauchseinsparungen

Die ASG-Entwicklung wird ja, wie erwähnt, auch mit Kraftstoffeinsparungen im Vergleich zum Handschaltgetriebe begründet. Die Abstimmung der Schaltkennlinien im Automatenmodus spielt diesbezüglich eine dominierende Rolle, wobei es auf Grund der größeren Spürbarkeit der ASG-Schaltungen im Vergleich zum Automatengetriebe Unterschiede gibt.

In Bild 13 sind die Verbrauchsvorteile des ASG gegenüber dem EKM (stellvertretend für das Handschaltgetriebe) beispielhaft für eine einzige Fahrsituation angegeben. Zugrunde liegen Vergleichsmessungen für einen Kleinwagen und mehrere Fahrer.

Betrachtet wird die Konstantfahrt mit 50 km/h. Während das verbrauchsoptimal schaltende ASG den 5.Gang wählte, fuhren die Fahrer mit Handschaltung am häufigsten im 4.Gang. Der 3. und der 5.Gang kamen dort seltener vor. Daraus errechnet sich in der betreffenden Situation ein Verbrauchsvorteil des ASG von 13%.

3.Gang	4.Gang	5.Gang
<u>2.81 l</u> 100 km	<u>2.16 l</u> 100 km	<u>2.03 l</u> 100 km

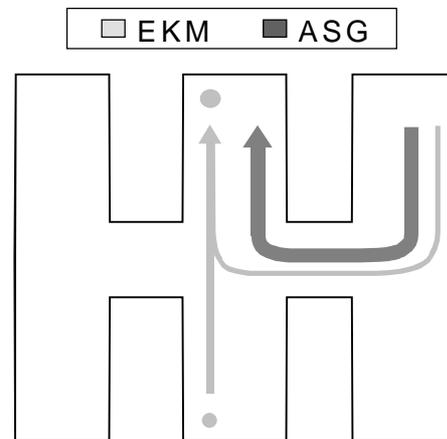
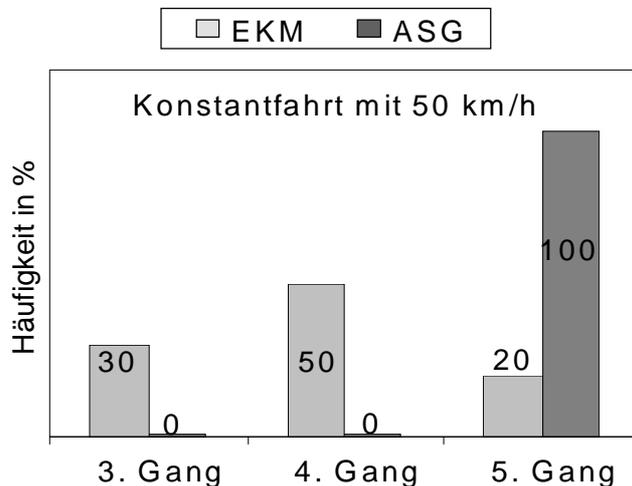


Bild 13a: Gangverteilung EKM und ASG bei Konstantfahrt mit 50 km/h (Vergleichsmessung)

Bild 13b: Gangwechsel EKM und ASG bei Beschleunigung aus 50km/h

Diese Betrachtung führt aber auch noch zu einem ganz anderen Aspekt. Will der Fahrer aus Konstantfahrt mit 50 km/h beschleunigen, z.B. zum Überholen, so tritt er das Gaspedal voll durch. Sinnvoll sind Schaltkennlinien, die beim ASG eine 5->3 Rückschaltung auslösen, damit eine hohe Beschleunigung erzielt werden kann. Die Mehrzahl der Fahrer eines Handschaltgetriebes wird, gemäß der Verteilung in Bild 13a, in dieser Situation eine 4->3 Rückschaltung durchführen. Einige werden den alten Gang auch beibehalten.

Dieses Beispiel zeigt, daß während des Fahrens beim ASG viel häufiger Doppelschaltungen oder sogar auch Dreifachschaltungen im Vergleich zum Handschalter auftreten werden. Dort findet man diese meist nur zum Anhalten.

Ein ASG, welches nur sequentiell schalten kann, wie z.B. ein Schaltwalzengetriebe, würde in dieser Beschleunigungssituation einen Schaltzeitnachteil haben, weil bei der Rückschaltung 5->3 zwischenzeitlich der 4.Gang eingelegt werden müßte. Mit dem hier dargestellten dreimotorigen ASG-Konzept ist die 5->3 Schaltung hingegen genau so schnell möglich wie eine 5->4 oder 4->3 Schaltung.

5 Ausblick

LuK entwickelt das ASG auf elektromotorischer Basis im Rahmen mehrerer Kundenprojekte. Ziel ist die Markteinführung um die Jahrtausendwende. Wir sind überzeugt, daß sich sowohl EKM als auch ASG neben Handschalter und Vollautomat am Markt durchsetzen werden. Das ASG wird dabei unserer Meinung nach primär in den unteren Drehmomentklassen zum Einsatz kommen, wo es im Vergleich zum Vollautomaten den Nachteil der Zugkraftunterbrechung durch den Kostenvorteil kompensieren kann.

Der Erfolg des ASG wird auch davon abhängen, in welchem Erscheinungsbild es den Kunden präsentiert wird. Die Bedienoberfläche spielt hierbei eine wichtige Rolle, denn dadurch kann eine Abgrenzung vom Automatgetriebe erreicht werden. Gelingt dies, würde der Nachteil der Zugkraftunterbrechung anders bewertet. Deshalb soll das letzte Bild unsere Kunden zum Nachdenken über geeignete Alternativen zum Wählhebel anregen.

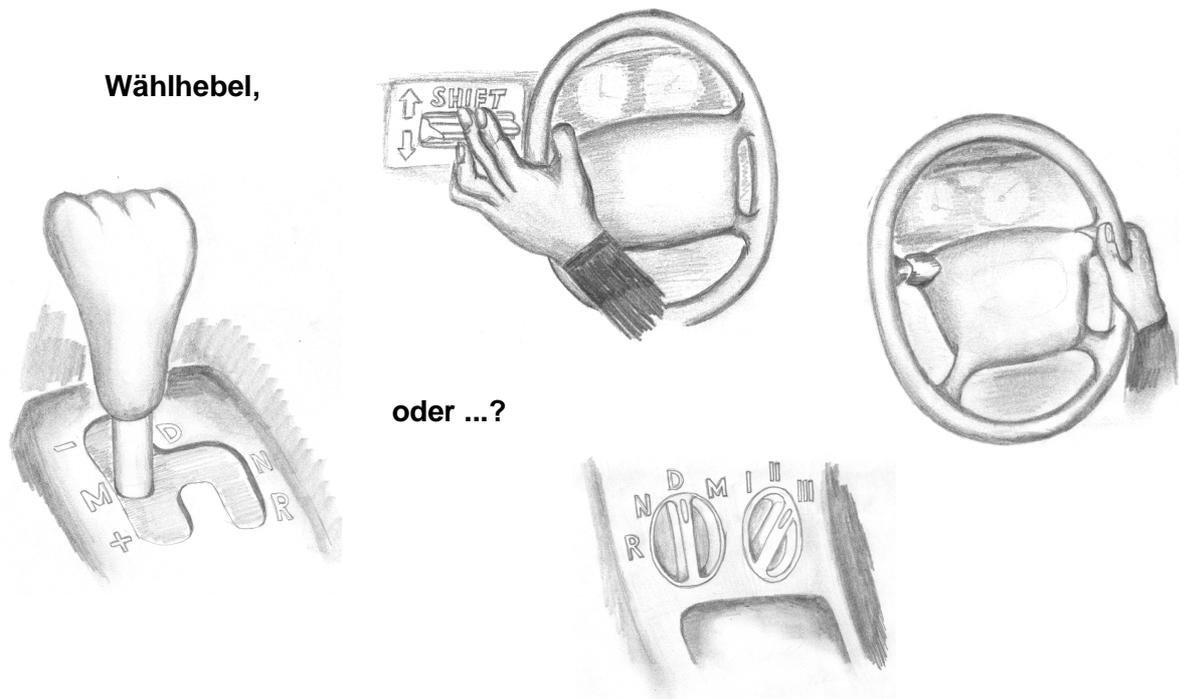


Bild 14: Bedienelemente für ASG

Literatur

- [1] Fischer, R.; Salecker, M.: Strategien zur Kupplungsansteuerung.
VDI-Berichte 1323, Kupplungen in Antriebssystemen '97, S. 269-290
- [2] Fischer, R.; Berger, R.; Salecker, M.; Esly, N.: Anforderungen an die Verbrennungsmotor-
Steuerung bei Automatisierung des Schaltgetriebes.
19. Internationales Wiener Motorensymposium, 7.-8.5.1998
- [3] Kremmling, B.; Fischer, R.:Automatisierte Kupplung – Das neue LuK-EKM.
5. Internationales LuK-Kolloquium 1994, S. 89-111
- [4] Fischer, R.; Berger, R.: Automatisierung von Schaltgetrieben.
6. Internationales LuK-Kolloquium 1998, S. 95-121
- [5] Reik, W.: Selbsteinstellende Kupplungen für Kraftfahrzeuge.
VDI-Berichte 1323, Kupplungen in Antriebssystemen '97, S. 105-116