
Denken in Systemen – Software von LuK

Klaus Küpper
Roland Seebacher
Olaf Werner

Einführung

Seit über zehn Jahren arbeitet LuK nicht nur im konventionellen Stammgeschäft der mechanischen Komponenten, sondern auch im Bereich der Automatisierung des Triebstrangs. Schon seit Beginn dieser Arbeiten wurden neben den mechanischen Komponenten auch die notwendigen Automatisierungsstrategien entwickelt und umgesetzt.

Natürlich stellte und stellt sich immer wieder die Frage, ob LuK als klassischer metallverarbeitender Automobilzulieferer sich mit der Strategie- und Softwareentwicklung beschäftigen soll. Inzwischen hat sich gezeigt, dass die Kombination von Komponenten und Software den Kunden viele Vorteile bietet.

Der folgende Beitrag soll diese Vorteile und die Gründe erläutern, warum LuK Software- und Strategieentwicklung betreibt.

Weiterhin haben sich bei LuK in den vergangenen Jahren verschiedene Grundsätze der Softwareentwicklung herausgebildet. Sie sind letztlich eine Anpassung der Leitlinien, nach denen LuK schon immer Produkte entwickelt hat. So bekommt der Kunde Software der Qualität, wie er sie von LuK gewohnt ist.

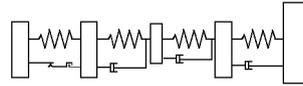
Einige ausgewählte Beispiele zeigen, wie sich die abstrakten Vorteile und die Grundsätze der Softwareentwicklung bei LuK konkret darstellen.

Warum entwickelt LuK Software?

Umsetzen des Triebstrangwissens

Seit vielen Jahren legt LuK im konventionellen Geschäft mit Kupplungen und Zweimassenschwungrädern Wert darauf, dem Kunden nicht nur einzelne Teile anzubieten, sondern diese auch im gesamten Umfeld des Triebstrangs zu optimieren.

Umsetzen des Triebstrangwissens



Optimieren des Gesamtsystems

Vorteile der Mechatronik nutzen

- wenige, einfache Sensoren
- Komponenten vereinfachen
- Komponenten entfallen lassen

Anbieten von Komplettsystemen



Bild 1: Kundennutzen durch LuK Software

Die über lange Jahre aufgebaute Erfahrung spiegelt sich zum einem in den Komponenten wider, zum anderen aber auch in der Optimierung des Gesamttriebstrangs.

Genau diese Erfahrung nutzt die Softwareentwicklung für XSG-Systeme. Zunächst ist die Software eine weitere Komponente des Triebstrangs, die im Zusammenspiel mit allen anderen Teilen abgestimmt werden muss. Darüber hinaus bietet sie die Möglichkeit, die gesamte Erfahrung aktiv (oder „intelligent“) umzusetzen. Die dabei theoretisch mögliche Komplexität und die logischen Verbindungen sind mechanisch häufig nicht zu realisieren.

So hat der Kunde die Möglichkeit, das Know-how (also Strategien und Ideen) der LuK unmittelbar zu erwerben und in seinem Fahrzeug direkt einzusetzen. Entscheidend ist, dass insbesondere das Wissen um die Kupplung, die während der Schlupfphasen den Triebstrangkomfort bestimmt, vollständig in die Software eingeht. Und gerade bei Kupplungen kann LuK lange und umfangreiche Erfahrungen vorweisen.

Optimieren des Gesamtsystems

Erst durch den Einsatz von Elektronik und Software wird die Mechanik zum „mechatro-

nischen System“. Dieses in den letzten Jahren viel genutzte Schlagwort bedeutet eigentlich nur, dass an die Stelle einer separaten Betrachtung von Mechanik, Elektronik und Software ein integriertes Konzept tritt, das über alle Komponentengrenzen hinweg optimiert wird. So ermöglichen es erst intelligente Strategien, bestimmte Sensoren einzusparen, wie z. B. den Getriebeeingangsdrehzahlsensor und den Ausrückwegsensoren in der Kupplungsglocke. Die Software macht die Fertigungstoleranzen der Handschaltgetriebe beherrschbar. Intelligente Algorithmen lernen am Bandende diese Toleranzen, um sie dann im darauffolgenden Regelbetrieb zu berücksichtigen. Schließlich können auch nur bei Betrachtung des Gesamtsystems bestimmte Anforderungen der Software an die Mechanik umgesetzt werden. Ein Beispiel ist das Anpassen der Kupplung an die Anforderung der Steuerung.

Neben der Verbesserung des Gesamtsystems selbst kann der Kunde natürlich auch dessen optimale Integration erwarten, eben unter Nutzung des oben erwähnten Triebstrangwissens der LuK.

Anbieten von Komplettsystemen

Im Bereich der Automatisierung des Triebstrangs auf Basis von Stirnradgetrieben (XSG) arbeitet LuK an verschiedenen Konzepten, die in anderen Beiträgen vorgestellt werden. Sie sind alle dadurch gekennzeichnet, dass sie ein Basisgetriebe, eine Kupplung, einen Kupplungsaktor, einen Getriebeaktor und eine Elektronik umfassen. Jede einzelne dieser Komponenten erfüllt eine spezifische Aufgabe und ist für diese optimiert.

Erst in ihrem Zusammenspiel, das die Software ermöglicht und koordiniert, werden die Einzelkomponenten zu einem System, siehe Bild 2.

Durch die Entwicklung von Strategien und ihre Umsetzung in Software kann LuK den Kunden statt einzelner Komponenten eine komplette Triebstrangautomatisierung anbieten. So muss sich der Kunde nicht um die Koordination und Integration von Teilkomponenten kümmern, sondern kann sich auf das Anpassen des Systems an das Fahrzeug konzentrieren.

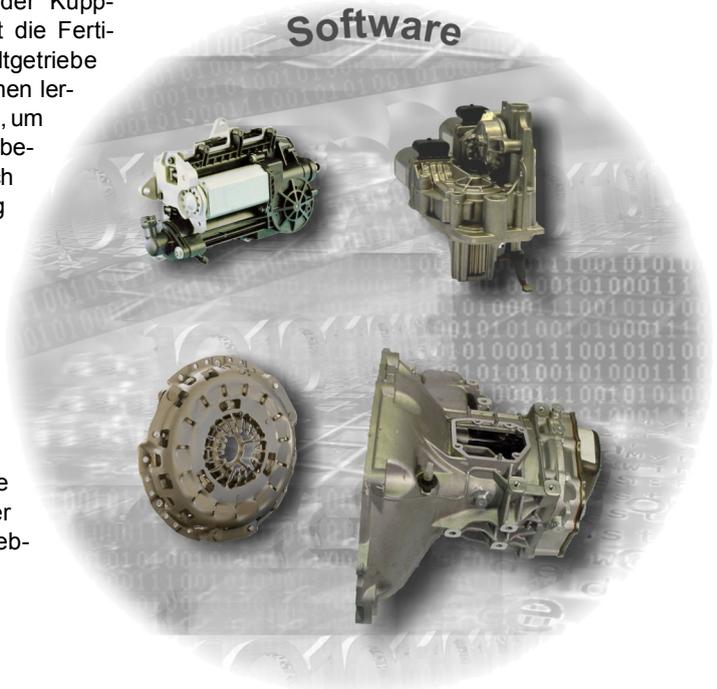


Bild 2: Gesamtsystem durch Software

Auch diesem Schritt des Übergangs vom Komponenten- zum Systemlieferanten, der in der Automobilindustrie unverändert stark anhält, trägt LuK durch die hausinterne Softwareentwicklung Rechnung.

Grundsätze der Softwareentwicklung

Im Laufe der Jahre haben sich bei LuK verschiedene Grundsätze zur Softwareentwicklung etabliert. Selbstverständlich muss jede Software - wie auch jede mechanische Komponente - eine

Vielzahl von Anforderungen erfüllen. Die im Folgenden beschriebenen Grundsätze erscheinen uns aber besonders wichtig. Sie sind Prüfsteine für jede neue Strategie.

Interessant ist, dass sich diese Grundsätze im Wesentlichen auch für die Entwicklung von mechanischen Komponenten anwenden lassen und dort eine ähnlich große Rolle spielen.



Bild 3: Grundsätze der Softwareentwicklung

Systemverständnis

Wie oben beschrieben soll die Software alle Teilkomponenten zu einem XSG-Gesamtsystem zusammenführen. Dieses befindet sich wiederum im Gesamtzusammenhang des Fahrzeugs bzw. dessen Triebstrangs. Daraus folgt selbstverständlich, dass derjenige, der Software schreibt, alle Teilkomponenten, deren Zusammenspiel, aber auch das übergeordnete System „Triebstrang“ im Detail verstanden haben muss. Letztendlich bestimmt das Maß an Systemverständnis die Qualität der Strategien und der Software.

Außer in der Arbeitsweise bei LuK wird dieser Grundsatz der Softwareentwicklung auch in der Qualifikation der Mitarbeiter deutlich. Die Softwareentwicklung bei LuK setzt sich etwa zu gleichen Teilen aus Maschinenbauingenieuren, Elektrotechnikingenieuren und Physikern zusammen. Der Schwerpunkt liegt somit auf dem naturwissenschaftlichem Verständnis der Probleme und führt zu optimalen, fachlich fundierten Lösungen.

Robustheit

Mit Software wird seit langem, insbesondere aber seit der Verbreitung von Windows-Rechnern, eine gewisse Unzuverlässigkeit assozi-

iert. Genau dies ist es aber, was bei Software im Automobil-Bereich nicht akzeptabel ist. So ist der zweite wichtige Grundsatz der Softwareentwicklung bei LuK die Robustheit. Letztendlich muss die Software in allen Fahrzeugen und mit allen Komponenten über die gesamte Lebensdauer und in jeder Situation funktionieren.

Das bedeutet zunächst, dass die Software selbst keinen Fehler enthalten darf, der zu einer Fehlfunktion des Systems führt.

Des Weiteren müssen die Strategien so gestaltet sein, dass sie sowohl über alle Toleranzen hinweg als auch über alle anderen Schwankungen - etwa Reibungs- oder Leistungsänderungen der Motoren - einwandfrei funktionieren. Auch Veränderungen während der Lebensdauer sind zu berücksichtigen.

Schließlich muss die Software in jeder unerwarteten Situation richtig funktionieren, was ebenfalls sorgfältige Überlegung verlangt.

Wie in jeder technischen Anwendung erfordert aber die hohe Robustheit in einzelnen Fällen Kompromisse hinsichtlich der optimalen Funktion. Entscheidend ist dabei, dass der Fahrer sie nicht als störend empfindet.

Als Beispiel sei hier das Anfahren genannt, das idealerweise immer mit der gleichen Motordrehzahl erfolgen soll: Eine Strategie, die normalerweise die Anfahrtdrehzahl präzise einstellt, aber beim Zusammentreffen ungünstiger Bedingungen eine Abweichung von 500 Umdrehungen oder sogar ein Schwingen der Motordrehzahl erlaubt, wäre nicht akzeptabel. Deswegen wird eine robuste Strategie gewählt, die diese Fehler nicht zulässt. Sie darf dafür dann auch, etwa zwischen verschiedenen Fahrzeugen bzw. in verschiedenen Situationen, eine Abweichung von z. B. 100 Umdrehungen von dem Idealwert haben, die der Fahrer in der Regel aber nicht bemerkt. Hier muss, wie überall in den Ingenieurwissenschaften, ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Robustheit gefunden werden, der im Zweifelsfall zugunsten der Robustheit ausfällt.

Sicherheit

Gerade bei der Automatisierung des Triebstrangs spielt Sicherheit eine übergeordnete Rolle. Sicherheit bezieht sich dabei zum einen auf die eigentliche Softwarequalität, zum anderen aber auch auf die Funktion. Hier dürfen keine Kompromisse gemacht werden. Deshalb wird jede Funktion sorgfältig auf ihre sicherheitsrelevanten Aspekte geprüft. Unseren Kunden ist bekannt, wie viel Wert LuK auf diese Regel legt.

Auch in Zukunft wird sie konsequent beibehalten werden.

Schlupfregelung

Die Schlupfregelung ist ein typischer Fall, in dem erst der Einsatz von Software es ermöglicht, eine Idee zu realisieren.

Die Grundidee der Schlupfregelung, den Triebstrang gegen die Schwingungsanregungen des Motors durch eine leicht schlupfende Kupplung zu isolieren, ist bereits alt und wurde in den vergangenen Jahren immer wieder diskutiert. Neben verschiedenen mechanischen Problemen haben in der Vergangenheit vor allen Dingen unzureichende Möglichkeiten, die Kupplung anzusteuern, einen Einsatz der Schlupfregelung

verhindert. Auf die schwingungstechnischen Grundlagen und die Auslegung des Triebstrangs für die Schlupfregelung soll hier nicht weiter eingegangen werden. Diese Themen wurden bereits auf dem LuK Kolloquium 1998 ausführlich behandelt [1].

Steuerungskonzept

Die Steuerung hat zunächst die Aufgabe, einen optimalen Sollschlupf zu bestimmen. Dieser stellt einen Kompromiss aus notwendiger Schwingungsisolierung und zulässiger Verschleiß- bzw. Verbrauchserhöhung dar. Gerade hier müssen umfangreiche, insbesondere fahrzeugspezifische Untersuchungen und Simulationen durchgeführt werden.

Der zweite entscheidende Punkt ist, den berechneten Sollschlupf möglichst exakt einzustellen. Hierbei ist eine hohe Steuer- und Regelgüte notwendig, da Abweichungen nach unten zum Haften und damit zu akustischen Problemen (Anbrummen) führen können, Abweichungen nach oben aber aus Gründen des Verschleißes und des Verbrauchs vermieden werden sollten.

Um die im vorherigen Kapitel geforderte Robustheit der Softwarestrategie zu erreichen, verfolgt LuK einen Ansatz, der Steuerung,

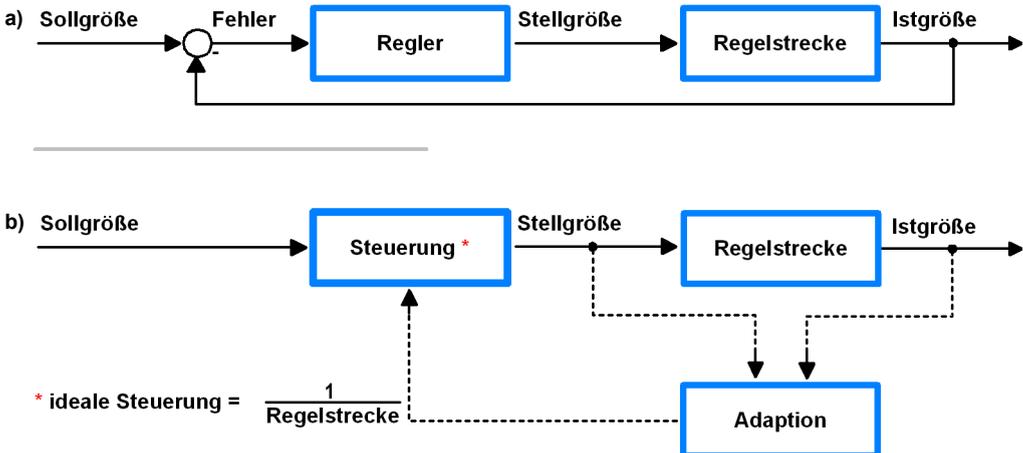


Bild 4: a) Regelung
b) Steuerung

Adaption und Regelung miteinander verbindet. Diese Kombination kennzeichnet sehr viele LuK Strategien und soll am Beispiel der Schlupfregelung näher erläutert werden.

Ein Regler nimmt definitionsgemäß immer die Abweichung zwischen Soll- und Istgröße, um aus diesem „Fehler“ eine Stellgröße zu generieren (Bild 4a). Diese Stellgröße wiederum wirkt auf das zu regelnde System und soll den Fehler minimieren bzw. auf Null reduzieren.

Eine Steuerung dagegen nutzt lediglich den Sollwert als Eingang und generiert so - unter Kenntnis des zu regelnden Systems - eine Stellgröße, die im Idealfall den Sollwert fehlerfrei einstellt (Bild 4b). Zunächst wird hier ein möglicher Fehler zwischen Soll- und Istgröße nicht korrigiert. Um dennoch eine gute Qualität zu erreichen, wird das Verhalten des zu regelnden Systems beobachtet, in dem vorliegenden Fall das Gesamtfahrzeug mit Motor, Kupplung und Triebstrang. Mit dieser Information wird dann das Modell der Strecke, das die Steuerung intern benutzt, angepasst, um so mittel- und langfristige Änderungen der Strecke ausgleichen zu können.

Beide Verfahren haben einige Vor- und Nachteile, weswegen sie in der Praxis in der Regel auch parallel eingesetzt werden. LuK verfolgt den Ansatz, so viel wie möglich zu steuern und so wenig wie nötig zu regeln. Durch einen kleinen Regelanteil soll insbesondere erreicht werden, dass

- der Regler unter keinen Toleranzlagen oder Umweltsituationen instabil wird,
- sich Schwingungen oder Überschwingen des Reglers nicht fühlbar äußern und
- der Geschwindigkeitsvorteil der Steuerung ausgenutzt wird.

Gleichzeitig muss natürlich darauf geachtet werden, dass möglichst viel Systemwissen eingesetzt wird, so dass bereits die Steuerung nur einen kleinen Fehler zulässt.

Im konkreten Fall der Schlupfregelung besteht das zu regelnde System im Wesentlichen aus Kupplung, Motor und Triebstrang. Der Fahrerwunsch wirkt als Stellgröße auf

den Motor. Die Schlupfsteuerung beaufschlagt die Kupplung.

Um eine ausreichend gute Vorsteuerung darzustellen, erhält die Schlupfsteuerung neben dem Fahrerwunsch verschiedene weitere Informationen, insbesondere über den Motorzustand. Sie werden in einem Modell des zu regelnden Systems genutzt, um die notwendigen Steuergrößen korrekt berechnen zu können.

Teilschlupf

Umfangreiche Untersuchungen bei LuK haben gezeigt, dass bereits im Teilschlupf, wie er in Bild 5 dargestellt ist, eine ausreichende Schwingungsisolierung erreicht wird. Der Teilschlupf ist dadurch gekennzeichnet, dass sich auf Grund der Drehungleichförmigkeit des Verbrennungsmotors Haft- und Gleitphasen in der Zündfrequenz abwechseln.

Aus Verschleiß- und Verbrauchsgründen wird bei der Schlupfregelung ein möglichst niedriger Sollschlupf angestrebt. Seine untere Grenze ist durch die notwendige Schwingungsisolierung und die Regelgüte vorgegeben. Dabei soll ein Übergang ins Dauerhaften in jedem Fall vermieden werden. Gerade das wurde in der Vergangenheit als äußerst schwierig angesehen und niedrige Schlupfdrehzahlen deshalb weitgehend vermieden. Die Untersuchungen bei LuK zeichnen jedoch ein völlig anderes Bild:

Zunächst wird der Momentenverlauf im Teilschlupf näher analysiert (vgl. Bild 5). Die Simulation zeigt, dass in den Momentenspitzen, also bei großer Vorwärtsbeschleunigung des Verbrennungsmotors, die Kupplung ins Rutschen gerät. Während des Rutschens ist somit das übertragene Moment auf das maximal übertragbare Moment der Kupplung beschränkt. Sobald die Drehunförmigkeit des Motors wieder zu einem Haften der Kupplung führt, sinkt das in den Triebstrang übertragene Moment vom übertragbaren Moment der Kupplung auf das innere Moment. Dieser physikalisch leicht nachvollziehbare Vorgang hat den Effekt, dass das mittlere übertragene

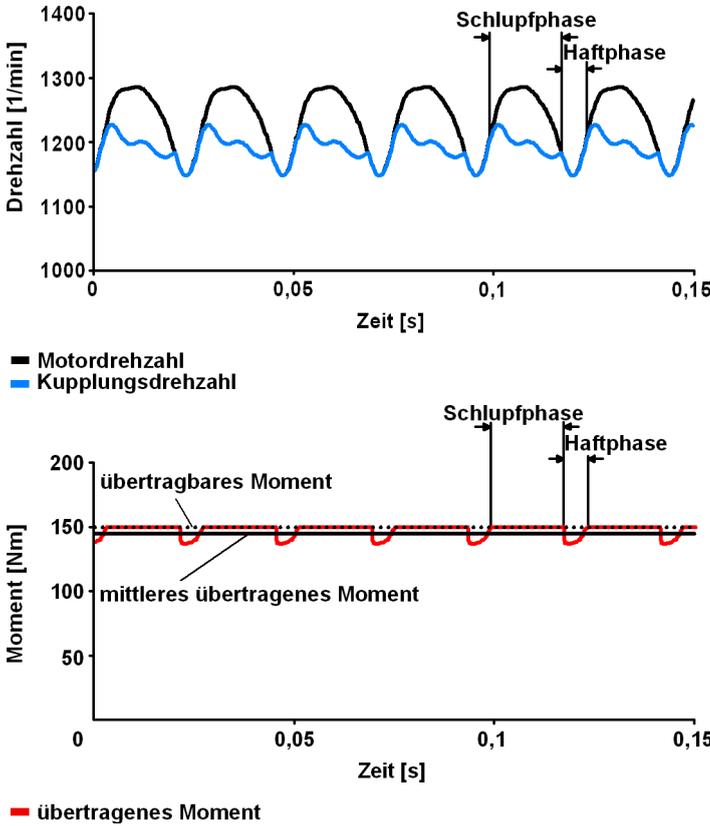


Bild 5: Betrachtung des Teilschlupfs

Moment unter dem übertragbaren Moment der Kupplung liegt.

Das im Teilschlupf übertragene mittlere Kupplungsmoment ist durch das Verhältnis von Schlupf- zu Haftdauer und die Momentenungleichförmigkeit des Motors bestimmt. Damit ergibt sich das in Bild 6 dargestellte physikalische Verhalten: Von Schlupfdrehzahl Null bis zum Übergang in den Vollschlupf (die Motorungleichförmigkeiten führen nicht mehr zu einem temporären Haften der Kupplung) steigt das mittlere übertragene Moment der Kupplung stetig an, um beim Übergang zum Vollschlupf das tatsächliche übertragbare Moment im herkömmlichen Sinne zu erreichen.

Wird dieses Moment als Reibwert interpretiert, kann von einem positiven „Reibwertgradienten“ im Teilschlupf ausgegangen werden,

wobei der Gradient hin zu kleinen Schlupfdrehzahlen zunimmt. Ein im eigentlichen Sinne eventuell negativer Reibwertgradient wird durch den beschriebenen Effekt sogar kompensiert.

Diese wichtige Erkenntnis des positiven „Reibwertgradienten“ im Teilschlupf hat für die Schlupfregelung einen erheblichen Vorteil. Im Gegensatz zu dem bei Kupplungsbelägen gefürchteten negativen Reibwertgradient führt ein positiver Reibwertgradient nicht zum Rupfen, sondern stabilisiert vielmehr die einmal eingestellte Schlupfdrehzahl selbstständig: Sobald der Schlupf steigt, etwa durch ein geringfügig höheres Motormoment, erhöht sich auch das von der Kupplung

übertragene Moment, wodurch sich der Schlupf wiederum verringert.

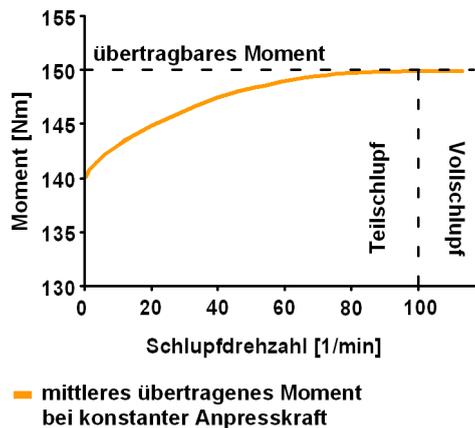


Bild 6: Schlupfabhängigkeit des übertragenen Moments

Dieser selbst stabilisierende Effekt kann außerdem dazu genutzt werden, im Teilschlupf einen schärfer eingestellten Regler einzusetzen, ohne dass dieser instabil wird. So ist es möglich, eine besonders hohe Reglergenauigkeit und eine schnelle Reaktion auf Störungen, etwa Momentenänderungen, sicherzustellen.

Auf Grund des zunehmend positiven „Reibwertgradienten“ lässt sich die Regelgüte soweit optimieren, dass Dauerhaftung weiterhin sicher vermieden werden kann.

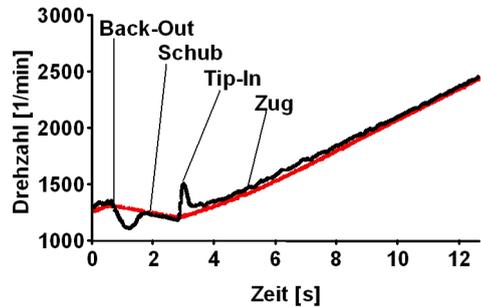
Erst die sorgfältige Analyse des Verhaltens im Teilschlupf und das konsequente Nutzen dieser Erkenntnisse aus dem Gesamtsystemverhalten Motor-Kupplung-Triebstrang erlaubten es LuK, eine Schlupfregelung mit hoher Güte und niedrigen Schlupfdrehzahlen darzustellen.

Ergebnisse

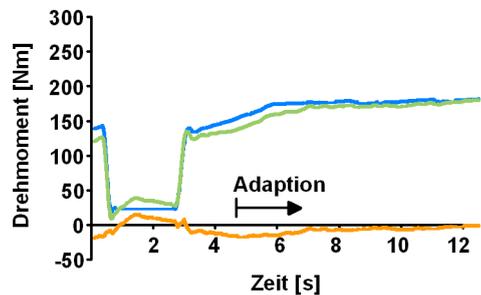
Die Kombination aus Steuerung und Regelung im Teilschlupf führt zu einer stabilen Strategie, die gleichzeitig sehr gute Ergebnisse liefert.

In Bild 7 ist eine Beispielmessung dargestellt. Die obere Abbildung zeigt den Verlauf von Motor- und Getriebeeingangsdrehzahl. Hier ist sehr gut zu erkennen, wie bei einem Back-Out, im Schubbetrieb, bei einem Tip-In und beim anschließenden Zugbetrieb die Schlupfdrehzahl eingestellt wird. Die Drehzahlabweichungen bei großen Lastwechseln verhindern Triebstrangschwingungen, ohne aber vom Fahrer akustisch wahrgenommen zu werden. So kann der Komfort bei Lastwechseln erhöht werden, ohne dabei die Agilität des Fahrzeugs zu beeinträchtigen.

Neben der guten Regelgüte wird deutlich, wie der Sollschlupf entsprechend dem Schlupfkennfeld bei höheren Drehzahlen reduziert wird. Sobald die festgelegte Motordrehzahl erreicht ist, wird bei völliger Schlupffreiheit das Kupplungsmoment auf eine Überanpressung erhöht.



■ Motordrehzahl
■ Getriebeeingangsdrehzahl



■ Gesamtmoment ■ Steuerungsanteil
■ Regelungsanteil

Bild 7: Fahrzeugmessung Schlupfregelung

Der untere Teil der Abbildung zeigt, wie sich das Kupplungssollmoment aus einem steuerungsabhängigen Teil und einem Regelungsanteil zusammensetzt. Entsprechend der gewählten Struktur überwiegt der Steuerungsanteil sehr deutlich. Darüber hinaus ist ab dem Zeitpunkt fünf Sekunden zu erkennen, wie der Regelungsanteil kontinuierlich zugunsten des Steuerungsanteils kleiner wird. Hier sorgt die Adaption dafür, dass die Genauigkeit der Steuerung steigt und so der Regelungsanteil weiter sinkt.

Die hier beschriebene Schlupfsteuerung wurde bereits in einem Fahrzeug, einer auf ein Einmassenschwungrad umgebauten Mercedes A-Klasse A170, im Dauerbetrieb eingesetzt. Es zeigte sich, dass eine dem ZMS vergleichbare Schwingungsisolation erreicht wird. Gleichzeitig arbeitete die Steuerung stabil und zuverlässig über den Dauerlauf. Der

Mehrverschleiß des Kupplungsbelages beläuft sich auf lediglich 0,2 bis 0,4 mm pro 100 000 km. Der Verbrauch bleibt im Wesentlichen unverändert, was auch Simulationen von Fahrzyklen zeigen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass durch den Wegfall des ZMS die Massenträgheit des Motors reduziert werden konnte. Die so erreichte Verringerung der Beschleunigungsverluste gleicht den durch Schlupf bedingten, minimalen Mehrverbrauch aus. Für konkrete Fahrzeugprojekte müssen die Ergebnisse natürlich, je nach gewünschtem und notwendigem Fahr- und Sollschlupfprofil, verifiziert werden.

Kupplungsschutz

Naturgemäß kann die Kupplung als Anfahr-element durch Missbrauch vom Fahrer überlastet werden. Die von der Software geforderte Robustheit bedeutet, dass sie in dieser Situation das System besser als bei einem Handschalter schützt.

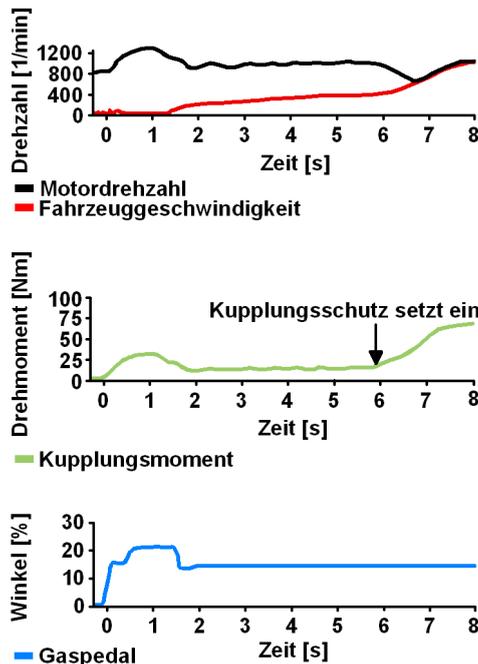


Bild 8: Kupplungsschutz:
Sehr langsames Fahren

Ein wichtiges Beispiel ist das Fahren bzw. Anfahren am Berg. Bei einem typischen Anfahren am Berg mit einer automatisierten Kupplungsbetätigung erhöht sich zunächst die Motordrehzahl leicht, die Kupplung schleift. Erst wenn eine der Anfahr-drehzahl angepasste Fahr-geschwindigkeit erreicht wird, schließt die Kupplung vollständig. Es kann aber vorkommen, dass das Fahrzeug mit schlupfender Kupplung einen Berg hinauffährt, wenn der Fahrer den Wagen mit leicht erhöhter Motordrehzahl, aber nur geringer Geschwindigkeit bewegt.

Um diesen Dauerschlupf zu vermeiden, imitiert die Kupplungssteuerung die „Strategie“ eines normalen Fahrers.

Sobald das Fahrzeug fährt, schließt die Kupplung langsam vollständig. Das bedeutet, dass das Fahrzeug mit niedriger Drehzahl den Berg hochfährt, ohne die Kupplung zu belasten. Diese Strategie ist in Bild 8 dargestellt.

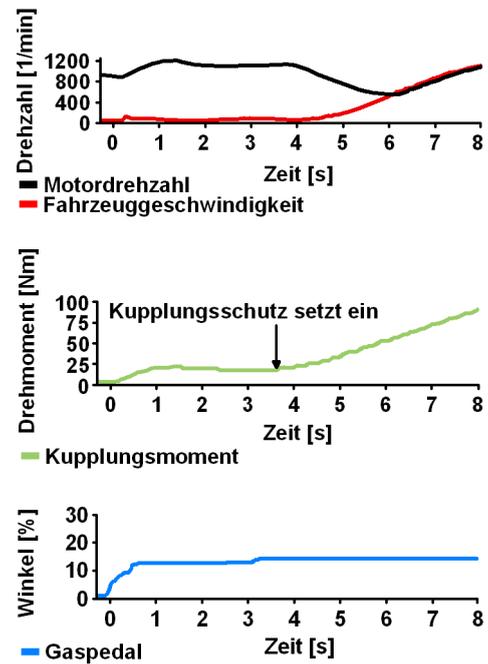


Bild 9: Kupplungsschutz:
Halten am Berg

Ein anderer, besonders kritischer Fall liegt vor, wenn das Fahrzeug durch Modulation des Gaspedals am Berg gehalten wird, wie es z. B. bei einer Staufahrt am Berg auftritt. So wird sich ein Fahrer mit einer fußbetätigten Kupplung in der Regel nicht verhalten, weil die Modulation über Gas- und Kupplungspedal relativ schwierig ist. Dagegen erleichtert eine automatisierte Kupplung das Halten am Berg.

Eine Strategie, diesen Missbrauch der Kupplung zu verhindern, ist in Bild 9 dargestellt. Nach einer bestimmten Zeit, etwa vier Sekunden, wird die Kupplung langsam rampenförmig geschlossen. Da der Fahrer das Gaspedal betätigt, also explizit einen Anfahrwunsch hat, und das Kupplungsmoment sehr langsam aufgebaut wird, kommt die Fahrzeugreaktion für den Fahrer nicht überraschend. Er kann angemessen reagieren. Entweder kann er die Anfahrt fortsetzen oder durch Bremsen das Fahrzeug am Berg halten. Gleichzeitig erfährt und „lernt“ er die natürlichen Grenzen des Systems.

Diese beiden Beispiele zeigen, wie durch geeignete, relativ einfache Softwaremaßnahmen die Robustheit des Gesamtsystems gegen Missbrauch wesentlich erhöht werden kann.

Überwachungskonzept

Als Beispiel für die Sicherheitsüberlegungen, die ein Shift-by-wire-System, wie ein ASG- oder ein anderes XSG-System, erforderlich machen, kann die imfolgenden beschriebene Prozessorüberwachung dienen.

Der Mikroprozessor ist als zentrales Bauteil an allen Vorgängen in einem XSG beteiligt, sei es Gangauswahl, Motoreingriff oder Kupplungssteuerung. Aus diesem Grund kommt seiner Überwachung eine besondere Bedeutung zu, da bereits ein Einzelfehler zu gefährlichen Situationen führen kann. Um diese Situationen zu erkennen und zu entschärfen, wurde ein mehrstufiges Überwachungskonzept, das

sogenannte „Intelligent Safety Monitoring“ (ISM), entwickelt.

Das ISM betrachtet vornehmlich eine Reihe von besonders kritischen Situationen, die sogenannten „Top-Events“. Deren Auftreten auf Grund eines Prozessorfehlers muss es sicher verhindern.

Sicherer Zustand

Die erste Frage, die sich bei der Entwicklung eines Überwachungskonzeptes stellt, ist die nach einem sicheren Zustand, in den das System überführt werden soll. Wird, wie es hier notwendig ist, von einem Prozessorfehler ausgegangen, gibt es bei einem Ausfall nur sehr beschränkte Reaktionsmöglichkeiten. Da unter Umständen die „Intelligenz“ des Systems ausgefallen ist, ist es sehr schwer oder gar unmöglich, auf verschiedene Fehlersituationen mit unterschiedlichen, vielleicht sogar komplexen Strategien zu reagieren. Die Überlegungen zu einem sicheren Zustand der Kupplung, die als wichtigstes Leistungsübertragungsglied im Triebstrang betrachtet werden muss, sind in Bild 10 dargestellt.

Als mögliche Reaktion auf einen Fehler kann ein Kupplungsaktor grundsätzlich **schließen**,

		Situation		
		Geschlossen	Zwischenstellung	Geöffnet
Reaktion	Schließen	✓	?	⚡
	Öffnen	⚡	?	✓
	Stehenbleiben	✓	✓	✓

Bild 10: Sicherer Zustand bei Totalausfall

öffnen oder in der augenblicklichen Position **stehen bleiben**. Andere Strategien, etwa verschiedene zeitliche Abläufe von Öffnen und Schließen, vielleicht sogar als Reaktion auf

externe Signale, sind bei einem Prozessorausfall kaum darstellbar.

Für die möglichen Ausgangssituationen, also **Kupplung geschlossen**, **Kupplung in einer Zwischenstellung** oder **Kupplung geöffnet**, muss betrachtet werden, welche der drei oben genannten Reaktionen sicher ist.

Ist die Kupplung geschlossen, etwa als Wegrollsicherung (Top-Event: Fahrzeug steht am Berg bei stehendem Motor und eingelegtem Gang), ist das Schließen bzw. das geschlossene Bleiben die sichere Maßnahme. Dagegen kann das Öffnen der Kupplung zu einer für den Fahrer unerwarteten Reaktion, also dem plötzlichen Losrollen des Fahrzeugs, führen.

Ist die Kupplung dagegen geöffnet, ist Öffnen bzw. offen stehen bleiben die sichere Option. Ein für den Fahrer unerwartetes Schließen, etwa beim Warten an einem Zebrastreifen oder an einer Ampel (Top-Event), kann dagegen fatale Folgen haben.

Befindet sich die Kupplung in einer Zwischenstellung, kann, je nach konkreter Situation, das weitere Öffnen oder Schließen entweder sicher sein oder aber zu sehr kritischen Situationen führen. Hier erscheint das Halten der aktuellen Kupplungsaktorposition als sicherste Reaktion, da so der Fahrer nicht mit einer unerwarteten Fahrzeugaktion konfrontiert wird.

Es wird deutlich, dass das Stehenbleiben des Kupplungsaktors in allen Situationen die sicherste Option darstellt. Hier zeigt sich auch der Vorteil der von LuK favorisierten elektromotorischen Kupplungsaktorik, nämlich, dass beim Abschalten bzw. Stromlosschalten der Aktorik die Position unverändert bleibt und die Kupplung nicht, wie bei einem hydraulischen System, schließt oder öffnet.

ISM

Um die Anforderungen an ein Shift-by-wire-System zu erfüllen, wurde zusammen mit Bosch eine Überwachungsstruktur mit mehreren Ebenen entwickelt. Sie beruht im Wesentlichen darauf, dass sich verschiedene Softwareebenen

sowie der eingesetzte Hauptprozessor und ein Überwachungsprozessor gegenseitig kontrollieren. Anhand der Darstellung in Bild 11 lässt sich das System sehr gut erläutern.

Der größte Teil der Überwachung läuft in den verschiedenen Softwareebenen im Hauptprozessor. Dementsprechend sind hier neben der eigentlichen Funktionalität für die ASG-Steuerung (Funktionsebene) verschiedene Überwachungsebenen implementiert. Als Hardware wird der Hauptprozessor (im heutigen ASG ein Infineon 80C167) und ein Überwachungsrechner (im heutigen ASG-System ein Motorola 68HC05) eingesetzt. Jeder dieser beiden Rechner kann bei Bedarf unabhängig vom anderen die Endstufen des XSG-Systems abschalten. Außerdem haben sie die Möglichkeit, am Steuergerät einen Reset auszulösen, um nach einem möglicherweise auftretenden Prozessorfehler das System neu zu initialisieren und eine Weiterfahrt zu ermöglichen.

Die Ebene 1 (Funktionsebene) beinhaltet die komplette Funktionalität im Normal- und Notbetrieb, also etwa die Kupplungssteuerung, die Gangauswahl oder den Motoreingriff.

Die Ebene 2 (Funktionsüberwachung) überwacht die Ebene 1. Dazu werden die Eingangssignale der Ebene 1 sowie die in ihr generierten Ausgangssignale eingelesen und auf Plausibilität geprüft. Es ist jedoch nicht die komplette Funktionalität der Ebene 1 nachprogrammiert, sondern es werden ausschließlich die sicherheitskritischen Funktionen (Top-Events) überwacht.

Ein vereinfachtes Beispiel ist das Verhindern des Kupplungsschließens bei eingelegtem Gang ohne Betätigung des Gaspedals. Unabhängig von allen anderen Berechnungen, Fehlerüberwachungen oder Adaptionen, die die Funktionsebene durchführen muss, braucht die Funktionsüberwachung lediglich sicherzustellen, dass die Kupplung in dieser Situation nicht über das Kriechmoment hinaus schließt. Sobald diese relativ einfache Forderung verletzt wird, führt die Funktionsüberwachung dies auf einen Rechenfehler zurück und schaltet die Endstufen ab.

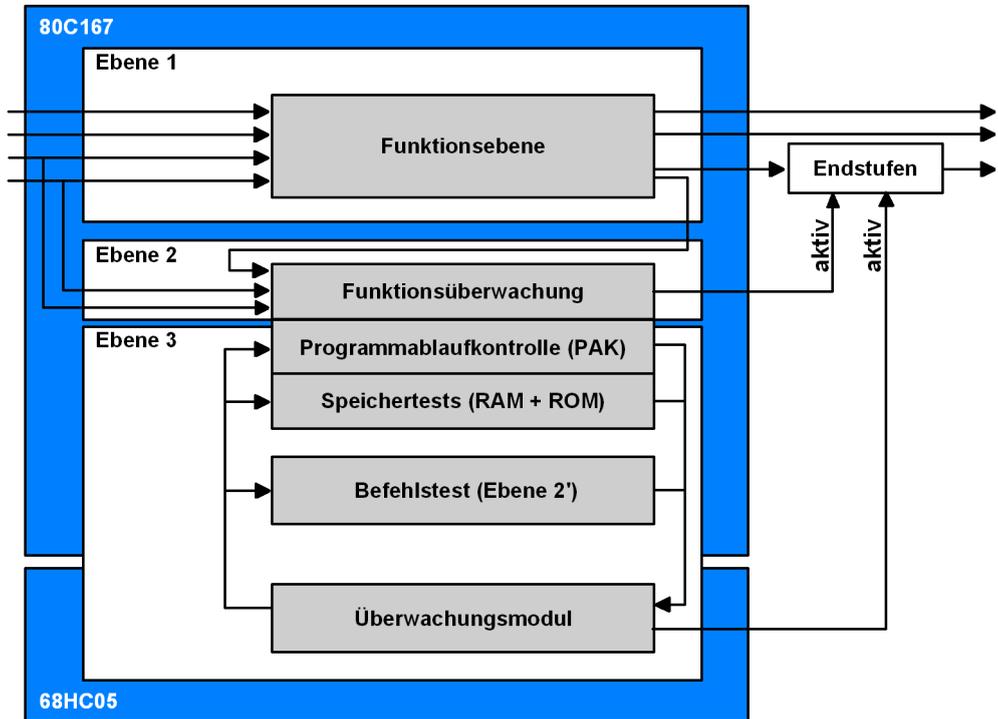


Bild 11: Aufbau des „Intelligent Safety Monitoring“

Die Ebene 3 umfasst schließlich verschiedene Prüfungen, die wiederum eine sichere Funktion der Überwachungsebene 2 gewährleisten. Dazu gehört die Programmablaufkontrolle, die sicherstellt, dass jeder Teil der Funktionsüberwachung ausgeführt wird, sowie der ständige Speichertest von RAM und ROM. Außerdem erfolgt eine Befehlsüberwachung der Ebene 2. Dies bedeutet, dass alle relevanten Prozessorbefehle, die die Ebene 2 nutzt, auf richtige Funktion überprüft werden. Die Ebene 3 kann ihre umfangreichen Überwachungsaufgaben der Ebene 2 nur gewährleisten, weil die Ebene 2 gegenüber der Ebene 1 bereits wesentlich weniger Code umfasst.

Der letzte Baustein des Überwachungskonzeptes ist der Überwachungsrechner. Mit Hilfe von zufallsgesteuerten „Fragen“ an die Ebene 3 des Hauptprozessors und den aus den Softwaremodulen der Ebene 3 generierten Antwortbeiträgen prüft der Überwachungsrechner deren Funktion. Dieser Aus-

tausch von Fragen und Antworten nutzt umgekehrt auch der Hauptprozessor, um den Nebenprozessor zu überwachen. So muss der Nebenprozessor absichtlich eingestreute „falsche“ Antworten erkennen und diese beim Hauptprozessor verifizieren.

Wird in einer der drei Ebenen des Überwachungskonzeptes ein sicherheitskritischer Fehler entdeckt, so werden die Endstufen abgeschaltet und ein Reset des Rechners ausgelöst. Durch das Abschalten der Endstufen geht das XSG-System in den oben definierten sicheren Zustand und kann sich bei einem nur temporären Fehler des Controllers wieder selbst heilen. Andernfalls bleibt das System im sicheren Zustand, bis der Fehler behoben wird.

Die beschriebene Sicherheitsarchitektur orientiert sich sehr stark an den Systemen, die auch bei anderen sicherheitsrelevanten Systemen im Triebstrang, etwa bei E-Gas-Systemen, eingesetzt werden.

Zusammenfassung

In den mehr als zehn Jahren der Softwareentwicklung bei LuK hat sich gezeigt, dass die Erweiterung der Kompetenzen von LuK über die mechanischen Komponenten hinaus für den Kunden wesentliche Vorteile bietet. So ist es möglich, dass LuK

1. das über lange Jahre erarbeitete Triebstrangwissen über die Möglichkeiten von mechanischer Hardware hinaus auch in Softwarestrategien umsetzen,
2. den automatisierten Triebstrang in seiner Gesamtheit im Fahrzeug optimieren und
3. dem Kunden Komplettsysteme zur Automatisierung des Triebstrangs anbieten kann.

Dabei verfolgt LuK als wichtigste Maßstäbe für die Softwareentwicklung die Entwicklung des Gesamtsystemverständnisses, maximale Robustheit und uneingeschränkte Sicherheit.

Als typische Beispiele der genannten Vorteile für den Kunden und der Leitlinien bei der Entwicklung sind in diesem Beitrag die Schlupfregelung mit bereits sehr guten praktischen Ergebnissen, einige Strategien zum Kuppelungsschutz und ein Überwachungskonzept dargestellt, das Shift-by-wire in Fahrzeugen erst erlaubt.

Literatur

- [1] Fischer, R., Berger, R.: Automatisierung von Schaltgetrieben, 6. LuK Kolloquium 1998.

