



# **7. LuK Kolloquium**

**11./12. April 2002**



Herausgeber: LuK GmbH & Co.  
Industriestrasse 3 • D -77815 Bühl/Baden  
Telefon +49 (0) 7223 / 941 - 0 • Telefax +49 (0) 7223 / 2 69 50  
Internet: [www.LuK.de](http://www.LuK.de)

Redaktion: Ralf Stopp, Christa Siefert

Layout: Vera Westermann

Druck: Konkordia GmbH, Bühl  
Das Medienunternehmen

Printed in Germany

**Nachdruck, auch auszugsweise, ohne  
Genehmigung des Herausgebers untersagt.**

# Vorwort

---

Innovationen bestimmen unsere Zukunft. Experten sagen voraus, dass sich in den Bereichen Antrieb, Elektronik und Sicherheit von Fahrzeugen in den nächsten 15 Jahren mehr verändern wird als in den 50 Jahren zuvor. Diese Innovationsdynamik stellt Hersteller und Zulieferer vor immer neue Herausforderungen und wird unsere mobile Welt entscheidend verändern.

LuK stellt sich diesen Herausforderungen. Mit einer Vielzahl von Visionen und Entwicklungsleistungen stellen unsere Ingenieure einmal mehr ihre Innovationskraft unter Beweis.

Der vorliegende Band fasst die Vorträge des 7. LuK Kolloquiums zusammen und stellt unsere Sicht der technischen Entwicklungen dar.

Wir freuen uns auf einen interessanten Dialog mit Ihnen.



Bühl, im April 2002

A handwritten signature in black ink that reads "Helmut Beier". The signature is written in a cursive, slightly slanted style.

Helmut Beier

Vorsitzender  
der Geschäftsführung LuK Gruppe

---

# Inhalt

---

1	ZMS – nichts Neues? .....	5
2	Der Drehmomentwandler .....	15
3	Kupplungsausrückssysteme .....	27
4	Der Interne Kurbelwellendämpfer (ICD) .....	41
5	Neueste Ergebnisse der CVT-Entwicklung .....	51
6	<b>Wirkungsgradoptimiertes CVT-Anpresssystem .....</b>	<b>61</b>
7	Das 500 Nm CVT .....	75
8	Das Kurbel-CVT .....	89
9	Bedarfsorientiert ansteuerbare Pumpen .....	99
10	Die temperaturgeregelte Schmierölpumpe spart Sprit .....	113
11	Der CO2 Kompressor .....	123
12	Komponenten und Module für Getriebebeschaltungen .....	135
13	Die XSG Familie .....	145
14	Neue Chancen für die Kupplung? .....	161
15	Elektromechanische Aktorik .....	173
16	Denken in Systemen – Software von LuK .....	185
17	Das Parallel-Schalt-Getriebe PSG .....	199
18	Kleiner Startergenerator – große Wirkung .....	213
19	Codegenerierung contra Manufaktur .....	227

---

# Wirkungsgradoptimiertes CVT-Anpresssystem

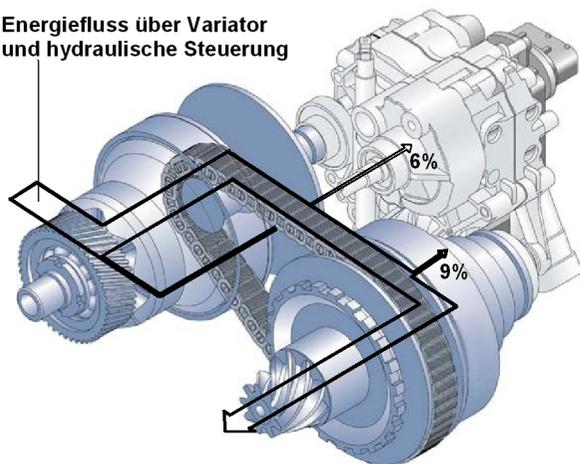
Verbrauchsreduktion durch Schlupferhöhung?

Hartmut Faust  
Manfred Homm  
Franz Bitzer

## Einleitung

Die steigenden Treibstoffpreise und die vom Gesetzgeber verordneten Emissionsrichtlinien stellen hohe Anforderungen an die Automobilhersteller und Zulieferer, den Wirkungsgrad des Antriebsstranges weiter zu verbessern.

### Energiefluss über Variator und hydraulische Steuerung

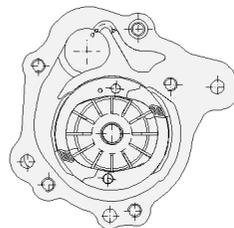


**Bild 1:** Verluste im MVEG-Zyklus

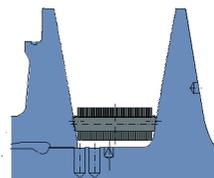
LuK stellt als Systemlieferant CVT-Komponenten wie Scheibensätze, Kette, hydraulische Steuerung und Dämpfer her. All diese Komponenten haben einen großen Einfluss auf den Getriebewirkungsgrad und somit auf den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs. Die mit Audi gemeinsam entwickelte multitronic® zeigt, dass das Getriebe einen deutlichen Beitrag zur Verbrauchsreduzierung leisten kann. Im Vergleich zu konventionellen 5-Gang-Stufenautomaten wird ein Verbrauchsvorteil im NEFZ-Zyklus von ca. 9% erreicht [1].

Trotz dieses Vorsprungs, den das CVT hat, wird versucht, den Wirkungsgrad weiter zu verbessern. In diesem Bericht werden zwei verlustrelevante Bauteile näher betrachtet. Der erste Abschnitt befasst sich mit den Verlusten, die durch die hydraulische Steuerung hervorgerufen werden, und den Möglichkeiten, diese weiter zu reduzieren. Der zweite Abschnitt behandelt die mechanischen Verluste im Variator in Abhängigkeit von den Anpresskräften. Hierzu wird ein neuartiges Verfahren zur Schlupferkennung und damit zur

Reduzierung der Anpresskräfte und Verbesserung des Wirkungsgrades vorgestellt. In Bild 1 sind die Verlustanteile am Beispiel der in Serie produzierten multitronic® für den NEFZ-Zyklus dargestellt.



**Hydraulische Verluste**



**Mechanische Verluste**

Die Summe der Energieverluste am Variator und der Hydraulik liegt bei ca. 15% bezüglich der Gesamtenergie an der Getriebeeingangswelle. Durch weitere Optimierungsschritte, wie einer kleineren Pumpe und einer geänderten Anpressstrategie des Variators, soll der Wirkungsgrad des Systems weiter verbessert werden.

## Reduzierung der hydraulischen Antriebsleistung

### Auswahlkriterien für die Pumpengröße

Die notwendige Pumpengröße stellt ein wesentliches Beurteilungskriterium für die Auswahl des Hydraulikkonzeptes dar.

Die hydraulischen Verluste können, wie in Bild 2 dargestellt, über das theoretische Fördervolumen und den Druck berechnet werden.

**Geringe hydraulische Verluste =****Geringes Fördervolumen**

X

**Geringer Pumpendruck**

- Scheibensätze mit LuK Doppelkolben
- Kupplungskühlung mit Saugstrahlpumpe
- Geringe Leckage
  - Pumpe mit axialer und radialer Spaltkompensation
  - geringe Schieberzahl
  - enge Spiele und kleine Fertigungstoleranzen
  - geringe Anzahl von E-Ventilen

- kleine Anpress-Sicherheitsfaktoren (Schlupfregelung)
- Systemdruck abhängig vom aktuellen Motormoment
- geringe Rückstaudrücke

**Bild 2:** Reduzierung hydraulischer Verluste

## Getriebekonzept

Die Pumpengröße wird durch das Getriebekonzept und die Getriebeleckage bestimmt. Das Getriebekonzept beinhaltet beispielsweise die Entscheidung für Einfach- oder Doppelkolben oder die Ausführung der Kupplungskühlung mit einer Saugstrahlpumpe, die es erlaubt, den Kühlvolumenstrom der Hochdruckpumpe zu verdoppeln.

Je nach Fahrsituation benötigt das Getriebe sehr unterschiedlich große Volumenströme. Das LuK System mit Doppelkolben und Drehmomentfühler zeichnet sich dadurch aus, dass die Spitzenbedarfswerte für Verstellung, Kupplungskühlung und Anpressung im gleichen Maße die Pumpengröße bestimmen. Der große Volumenstrombedarf der Scheibensätze für dynamische Getriebeverstellungen bei Vollbremsung von konventionellen CVT mit Einfachkolben kann durch das Doppelkolbensystem auf ein Drittel reduziert werden [2], [3].

Ein weiteres wichtiges Auslegungskriterium für die Dimensionierung der Pumpengröße stellt die Kupplungskühlung dar. Im Anfahrmodus benötigt die nasse Kupplung einen hohen Kühlölvolumenstrom auf niedrigem

Druckniveau, um die entstehende Verlustleistung abführen zu können. Die Zeitanteile, in denen zusätzlich zur Hochdruckpumpe ein Volumenstrom zur Kupplungskühlung benötigt wird, betragen im NEFZ weniger als 2%. Auf Grund der geringen Zeitanteile ist es nicht sinnvoll, diesen Spitzenbedarf allein mit der Hochdruckpumpe abzudecken. Stattdessen wird eine kostengünstige zuschaltbare Saugstrahlpumpe, die keine

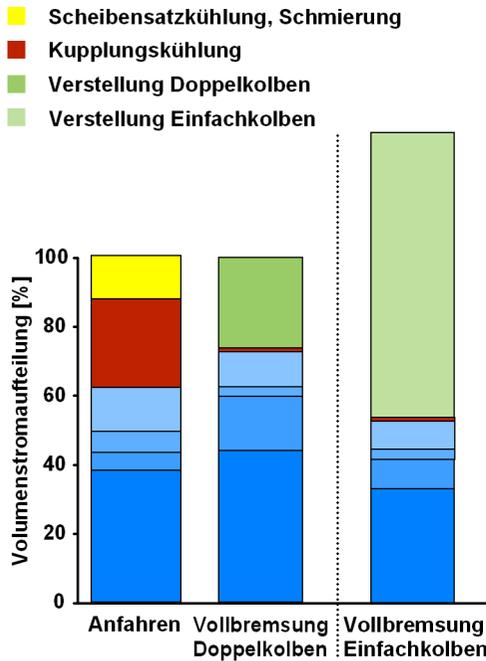
Antriebsleistung erfordert, verwendet. Die Saugstrahlpumpe nutzt die vorhandene kinetische Energie des Öls mittels Injektorwirkung zur Erhöhung des Volumenstromes.

## Getriebeleckage

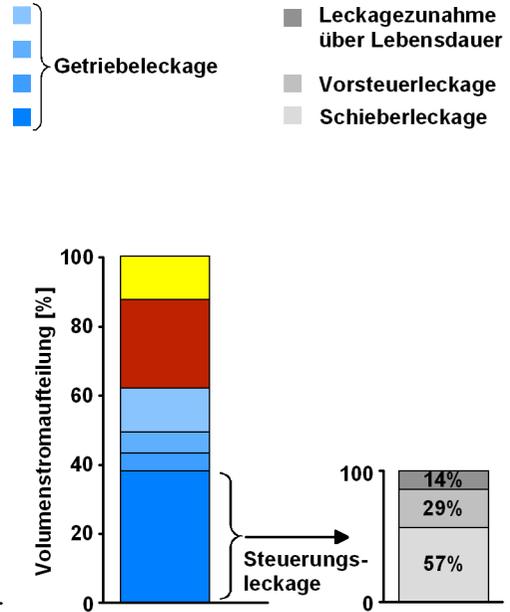
Einen weiteren wichtigen Aspekt für die Auslegung der Pumpengröße stellt die interne Getriebeleckage dar. Diese setzt sich wie folgt zusammen:

- Interne Pumpenleckage
- Steuerungsleckage
- Leckage der Gleitdichtringe
- Schieberleckage der Scheibensätze

All diese Leckagen sind stark temperatur-, druck- und toleranzabhängig. In einem Getriebe gehen viele Bauteileinzeltoleranzen in die Leckagebilanz ein. Die Wahrscheinlichkeit, dass all diese Spiele gleichzeitig ein Maximum aufweisen, ist sehr gering. Aus diesem Grund werden die Maximaltoleranzen im Sinne einer statistischen Betrachtung berücksichtigt. Somit wird die Pumpe nicht unnötig groß dimensioniert. Für die Berechnung der Getriebeleckage werden alle einzelnen Leckagestellen erfasst und in einer Bilanz zusammengeführt.



**Bild 3:** Aufteilung des Volumenstromes für die Betriebszustände Anfahren und Vollbremsung



**Bild 4:** Steuerungsleckage Betriebszustand Anfahren

In Bild 3 sind zwei kritische Betriebszustände dargestellt. Für beide Zustände wird die kleinste vorkommende Motordrehzahl, das jeweils höchst mögliche Motormoment und eine Temperatur von 100 °C zugrundegelegt, d. h. geringe Fördermenge der Pumpe bei hohem Systemdruck und geringer Ölviskosität. Im Betriebszustand Anfahren wird der erforderliche Volumenstrom vom Kühlölbedarf der Anfahrkupplung bestimmt, während die Vollbremsung durch den hohen Volumenstrombedarf für die Underdriveverstellung charakterisiert wird. Rechts wird der Vorteil des Doppelkolbensystems bezüglich Pumpengröße verdeutlicht. Trotz des bei einer Vollbremsung niedrigen Druckniveaus mit Einfachkolbensystem und der dadurch geringeren Getriebeleckage muss die Pumpe wegen des höheren Verstellvolumenstromes deutlich größer dimensioniert werden [2].

Die Getriebeleckage stellt je nach Betriebszustand einen Anteil von bis zu 70% des geförderten Volumenstroms dar. Der größte Leckagean-

teil entsteht in der hydraulischen Steuerung selbst. Betrachtet man den Zustand Anfahren, so teilt sich die Steuerungsleckage, wie in Bild 4 dargestellt, in drei wesentliche Blöcke auf.

Die folgenden Optimierungsmaßnahmen wurden zur Reduzierung der Steuerungsleckagen untersucht:

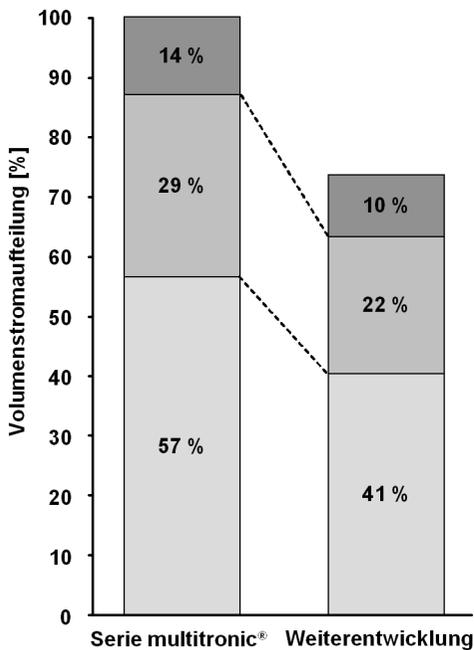
- Schieberleckage
  - Verkleinerung der Schieberdurchmesser
  - Vergrößerung der Überdeckungsängen
  - Reduzierung der Schieberspiele
  - Reduzierung der Schieberanzahl auf ein Minimum
- Vorsteuerleckage
  - Einsatz von 3/2-Wegeventile anstelle von 2/2-Wegeventile
  - Reduzierung der Zulaufblendendurchmesser

- Leckagezunahme über der Lebensdauer auf Grund von Bohrungsverschleiß
  - Neue Beschichtungstechnologie für optimale Schieberkantentopographie
  - Reduzierung der Schieberquerkräfte durch Optimierung der Strömungsführung und Druckverteilung

Werden all diese Maßnahmen umgesetzt, so kann die Steuerungsleckage um bis zu 25% gesenkt werden (Bild 5).

Auch die übrigen Leckagestellen, wie Pumpe, Gleitdichtringe und Schiebesitze der Wegscheiben, werden analysiert und durch leckagereduzierende Maßnahmen optimiert.

Die Pumpe wird konstruktiv mit einer radialen und axialen Spaltkompensation versehen [4]. Die Pumpenleckage kann dadurch auf ein Minimum reduziert werden.



- Leckagezunahme über Lebensdauer
- Vorsteuerleckage
- Schieberleckage

**Bild 5:** Optimierung der Steuerungsleckage im Betriebszustand Anfahren

Die Gleitdichtingelleckage wird durch den Einsatz von speziellen Schlossgeometrien und neuen Materialien mit günstigem Quellverhalten verringert.

Die Schiebesitzleckage der Scheibensätze kann durch Spieleinengung, Vergrößerung der Dichtlänge und Reduzierung der Ovalverformung unter Last verkleinert werden.

## Auswahlkriterien für das Druckniveau der Pumpe

Mit steigenden Systemdrücken nehmen die Leckagen zu, und die Pumpe muss entsprechend größer dimensioniert werden.

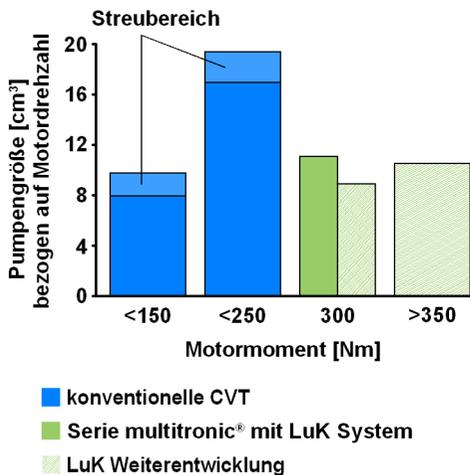
Werden die Systemdrücke kleiner gewählt, so werden die Anpress- und Verstellflächen entsprechend größer, die wiederum bei gleicher Verstellodynamik eine größere Pumpe erforderlich machen. Anhand von Verbrauchssimulationen wird ein Optimum zwischen Druckniveau und Anpress- bzw. Verstellflächen gefunden. Für die Wahl des Druckniveaus wurden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- Systemdruck abhängig von Motormoment und Übersetzung
- Optimum bezüglich Druckniveau und Anpressflächen
- Geringe Sicherheitsfaktoren für die Anpressung, z. B. Schlupfregelung
- Geringe Rückstaudrücke im Kühlerkreis, um nicht systemdruckbestimmend zu werden
- Geringe Rückstaudrücke in der Steuerung durch große Querschnitte mit wenigen Kanalumlenkungen

## Zusammenfassung zum Leistungsbedarf der Hydraulik

Bild 6 zeigt einen Vergleich zwischen der Pumpengröße im LuK Hydraulikkonzept und anderen auf dem Markt verfügbaren CVT-Pumpen. Die zu übertragenden Motormo-

mente beeinflussen die Systemdrücke in einer Steuerung stark und haben somit einen deutlichen Einfluss auf die Getriebeleckage. Der Pumpenvergleich wurde deshalb in Abhängigkeit vom Motormoment durchgeführt.



**Bild 6:** Vergleich CVT-Pumpengröße

Die Vorteile des LuK Konzeptes zeigen sich deutlich in der kleinen Pumpe, die für Motormomente größer 300 Nm kaum größer ausgeführt werden muss wie eine Pumpe eines konventionellen CVT für weniger als das halbe Motormoment. Auch für die Entwicklung von noch leistungsfähigeren CVT mit höheren übertragbaren Momenten wird die Pumpengröße und somit der Leistungsbedarf nicht stark ansteigen. Die höheren Leckagen, die im Getriebe durch die höheren übertragbaren Momente entstehen, werden durch die dargestellten leckagereduzierenden Maßnahmen überkompensiert.

Wenn alle leckagereduzierenden Maßnahmen bei gleichem Nennmoment umgesetzt werden, kann die Pumpengröße um etwa 20% im Vergleich zum Serienstand verkleinert werden.

## Reduzierung der mechanischen Verluste

### Schlupfbestimmung

Die Leistungsübertragung mechanisch stufenloser Getriebe erfolgt über Reibkontakte. Zur Sicherstellung der Leistungsübertragung an den Reibstellen ist eine ausreichende Anpresskraft notwendig. Die für einen sicheren Betrieb realisierbare, minimale Anpresskraft wird im Wesentlichen beeinflusst durch:

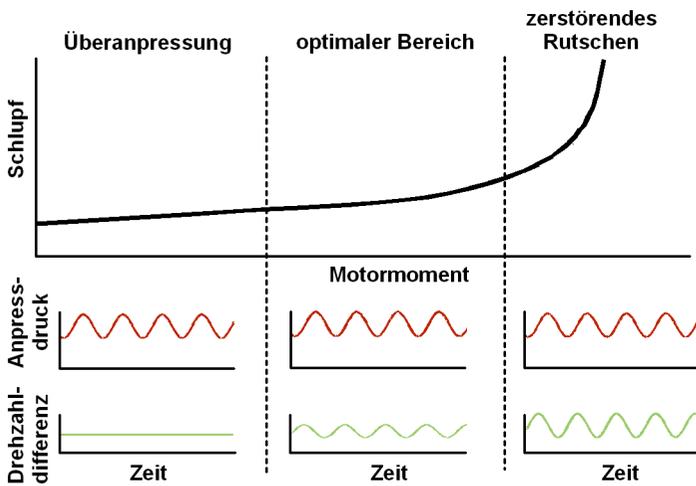
- Güte des Lastsignals
- Schwankungen des Reibwertes
- Verhalten des Stellgliedes

Auf Grund dieser Einflüsse und der Tatsache, dass starkes Rutschen des Variators zur sofortigen Zerstörung führt, müssen zum Teil hohe Überanpressungen in Kauf genommen werden, die zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades sowie zu einer erhöhten Bauteilbelastung führen.

Mit der vor zweieinhalb Jahren erstmals am Markt vorgestellten multitronic® wurde bereits eine deutliche Verbesserung des Wirkungsgrades gegenüber konventionellen CVT erreicht [1]. Die Anpresskraft wird hierbei in Abhängigkeit des Variatoreingangsmomentes durch einen am Scheibensatz 1 angeordneten hydro-mechanischen Drehmomentfühler eingestellt [2]. Dadurch konnte die Überanpressung reduziert werden.

Zur weiteren Steigerung des CVT Wirkungsgrades ist eine weitere Reduzierung der Überanpressung von entscheidender Bedeutung.

Zwischen ungewollter Überanpressung und zerstörendem Rutschen bleibt jedoch lediglich ein schmaler optimaler Bereich.



**Bild 7:** Prinzip der Schlupferkennung (schematisch)

Um den Variator im optimalen Bereich betreiben zu können, ist eine Messgröße notwendig, die im Folgenden Regelgröße genannt wird. Anhand der Regelgröße wird ermittelt, ob die Anpresskraft innerhalb oder außerhalb des optimalen Bereiches liegt. Optimal bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Funktionsfähigkeit des Variators über der Lebensdauer nicht eingeschränkt und gleichzeitig ein hoher Wirkungsgrad erreicht wird.

Eine mögliche Regelgröße zur Ermittlung des Abstandes zwischen der aktuellen Anpressung und der Rutschgrenze, bei der der Variator irreversibel geschädigt wird, stellt der Variatorschlupf dar.

Während der Entwicklung einer Methode zur Schlupfbestimmung wurden verschiedene physikalische Prinzipien, die Rückschlüsse auf den Schlupf erlauben, wie z. B. die Messung der Temperatur des abspritzenden Kühlöles, untersucht. Am erfolgversprechendsten erwies sich eine Modulation des Scheibensatzanpressdruckes.

Im oberen Teil von Bild 7 ist die Zunahme des Variatorschlupfes in Abhängigkeit des Motormomentes bei konstantem Anpressdruck schematisch dargestellt. Im Bereich der Über-

anpressung ist der Schlupf klein. Im optimalen Bereich liegt der Schlupf bereits etwas höher. Bei einer weiteren Steigerung des Momentes steigt der Schlupf überproportional an, und es tritt eine irreversible Schädigung von Scheibensätzen und Kette auf.

Mit Schlupf werden die zur Leistungsübertragung notwendigen Gleitbewegungen zwischen Kette und Scheibensätzen bezeichnet.

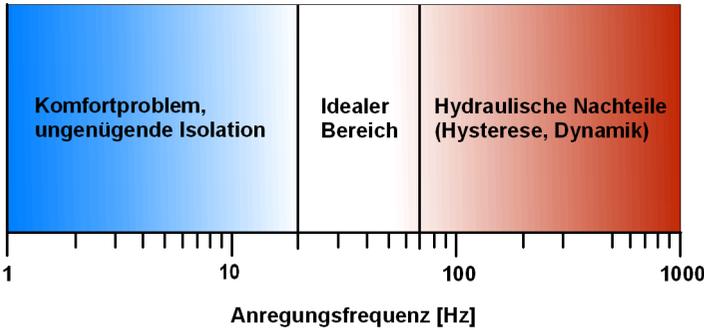
Das Verfahren der Druckmodulation soll anhand der unteren Diagramme in Bild 7 veranschaulicht werden. Bei dem Verfahren wird der Anpressdruck periodisch moduliert und die Scheibensatzdrehzahldifferenz ermittelt. Im Bereich der Überanpressung ergibt sich keine Reaktion der Drehzahldifferenz durch die Druckmodulation. Mit zunehmendem Schlupf stellt sich aber eine Drehzahlschwingung ein, deren Frequenz der Modulationsfrequenz des Anpressdruckes entspricht und deren Amplitude umso größer wird, je mehr Schlupf vorliegt. Damit ist eine Größe gewonnen, die sich in Abhängigkeit des Variatorschlupfes ändert.

## Wahl der Modulationsfrequenz

Wesentliche Kriterien zur Wahl der Modulationsfrequenz sind:

- Hydraulische und mechanische Eigenfrequenzen
- Komfort und Akustikeigenschaften
- Verstellverhalten des Variators

Bild 8 zeigt den idealen Frequenzbereich für die Modulation, in dem keine Komfortprobleme zu erwarten sind und wenig andere Störfrequenzen vorhanden sind.



**Bild 8:** Wahl der Anregungsfrequenz

### Auswerteverfahren

Die in Bild 7 beschriebene Idee zur Schlupfmessung soll nun anhand einer Messung überprüft werden.

Bild 9 zeigt zwei Messungen mit Druckmodulation an einem Umschlingungs-CVT. Die Verläufe von Anpresskraft und Drehzahldifferenz sind über der Zeit dargestellt.

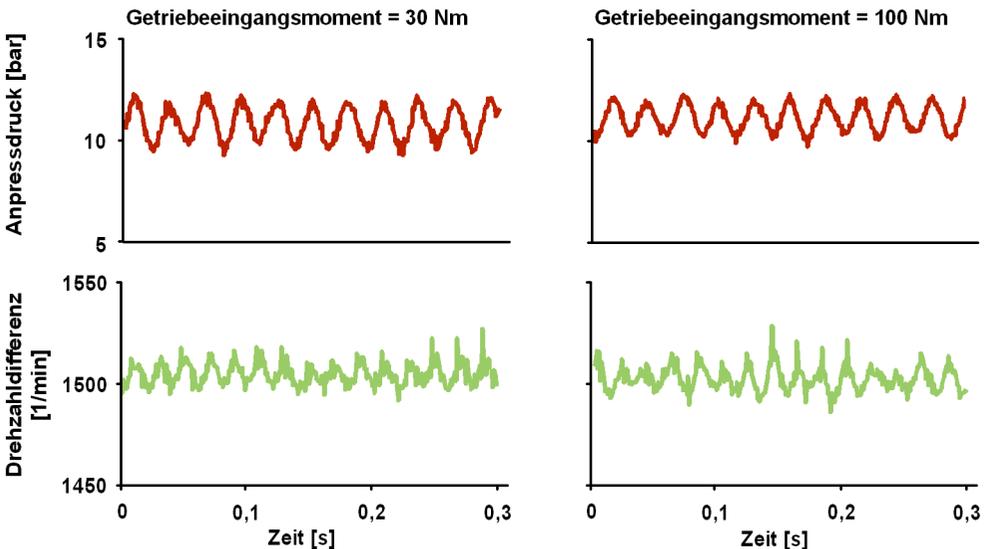
Für beide Messungen wurde derselbe mittlere Anpressdruck gewählt, der nach Momentenfühlerauslegung einem Getriebeeingangsmoment von ca. 60 Nm entspricht. Die Getriebeeingangsmomente in den Messungen sind mit 30 Nm und 100 Nm stark unterschiedlich.

Somit liegen die Grenzverhältnisse aus Bild 7 vor.

Die Drehzahl von Scheibensatz 1 ist bei beiden Messungen  $3000 \text{ min}^{-1}$ , die Variatorübersetzung ist 2. Daraus ergibt sich eine mittlere Drehzahldifferenz von  $1500 \text{ min}^{-1}$ . Die Drehzahldifferenzen

zeigen bei beiden Getriebeeingangsmomenten Schwingungen. Es sind jedoch überwiegend Frequenzen vorhanden, die nicht der Modulationsfrequenz entsprechen. Weiterhin sind trotz verschiedener Eingangsmomente die in Bild 7 gezeigten, markanten Unterschiede der Drehzahldifferenzen nicht zu erkennen.

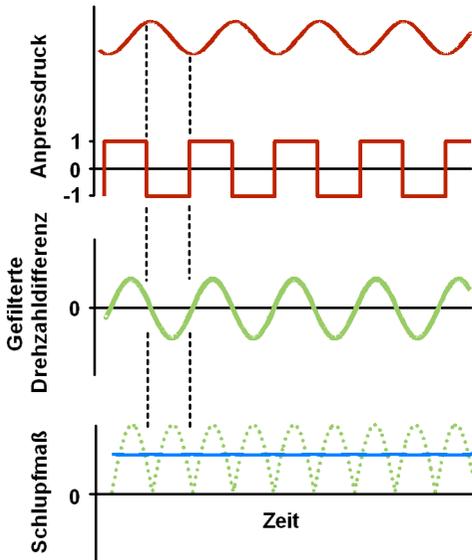
Dass sich die Signale im Zeitbereich nur unwesentlich unterscheiden, liegt am starken Rauschanteil, der dem Nutzsignal überlagert ist. Dies bedeutet, dass das im Vergleich zum Rauschen vorhandene kleine Nutzsignal erst mit einem geeigneten Auswerteverfahren sichtbar gemacht werden muss.



**Bild 9:** Messergebnisse bei zwei verschiedenen Momenten

Für die Erzeugung eines nutzbaren Signals aus einem stark verrauschten Untergrund ist das Lock-In Verfahren bekannt. Nachfolgend wird das Verfahren erläutert und die Funktionsfähigkeit anhand der oben gezeigten Messungen nachgewiesen.

Gemäß Bild 10 wird das Anpressdrucksignal zunächst in eine Rechteckschwingung mit einem Wertebereich zwischen  $-1$  und  $+1$  umgewandelt.



**Bild 10:** Lock-In-Verfahren mit idealen Signalen

Dies lässt sich realisieren, indem ein Bandpassfilter auf das Rohsignal angewandt und unter Berücksichtigung der Phasenlage ein Rechtecksignal generiert wird.

Das Drehzahldifferenzsignal wird ebenfalls mit einem Bandpassfilter gefiltert. Wird nun das Rechtecksignal mit dem gefilterten Drehzahldifferenzsignal multipliziert, werden die negativen Bereiche der Drehzahldifferenz in den positiven Bereich abgebildet. Das beschriebene Vorgehen kann auch mit phasenrichtiger Gleichrichtung bezeichnet werden, da nur die Bereiche gleichgerichtet werden, die die richtige Phasenlage zur Anpresskraft besitzen. Sämtliche Störanteile, deren Pha-

senlage zum Anpresssignal nicht konstant ist, werden zufällig multipliziert.

Durch die anschließende Tiefpassfilterung des gleichgerichteten Signals werden die höherfrequenten Anteile unterdrückt, so dass das Nutzsichtbar wird. Ein Vergleich zwischen Nutzsichtbar und Schlupf an einem geometrisch blockierten Variator zeigt, dass das Nutzsichtbar vom Variatorschlupf abhängt. Deshalb wird es im Folgenden als Schlupfmaß bezeichnet.

Die in Bild 9 dargestellten Messsignale wurden mit dem beschriebenen Verfahren ausgewertet. Das dabei erzeugte Schlupfmaß ist in Bild 11 dargestellt. Zwischen den Signalen für das Eingangsmoment von 30 Nm und 100 Nm sind nun im Schlupfmaß im Gegensatz zu den Drehzahldifferenzen deutliche Unterschiede zu erkennen.

In Bild 12 ist das Schlupfmaß von mehreren ausgewerteten Messungen in Abhängigkeit des Motormomentes aufgetragen. Die Messungen wurden an einem Verbrennungsmotoren-Prüfstand mit Umschlingungs-CVT bei drei unterschiedlichen Variatorübersetzungen durchgeführt. Der mittlere Anpressdruck war nahezu konstant. Die Symbole geben die Messwerte und deren Streuung wieder.

Für alle drei Übersetzungen ist eine deutliche Abhängigkeit des Schlupfmaßes vom Motormoment zu erkennen. Die Steigung der Kurven verläuft bei hoher Überanpressung zunächst flach und nimmt im Bereich geringerer Überanpressung progressiv zu.

Das von der multitronic® bei der hier vorgegebenen Anpressung übertragene Drehmoment ist ebenfalls eingetragen.

Nach den Messungen wurde das System aus Scheibensätzen und Kette befundet. Dabei konnten trotz eines Schlupfmaßes von bis zu 16 keine Beschädigungen festgestellt werden. Das bedeutet, dass zumindest kurzzeitig ein gegenüber der multitronic® erhöhter Schlupf zulässig ist. Nach derzeitigem Erprobungsstand kann noch nicht beurteilt werden, welches Schlupfmaß dauerhaft ertragen werden kann.

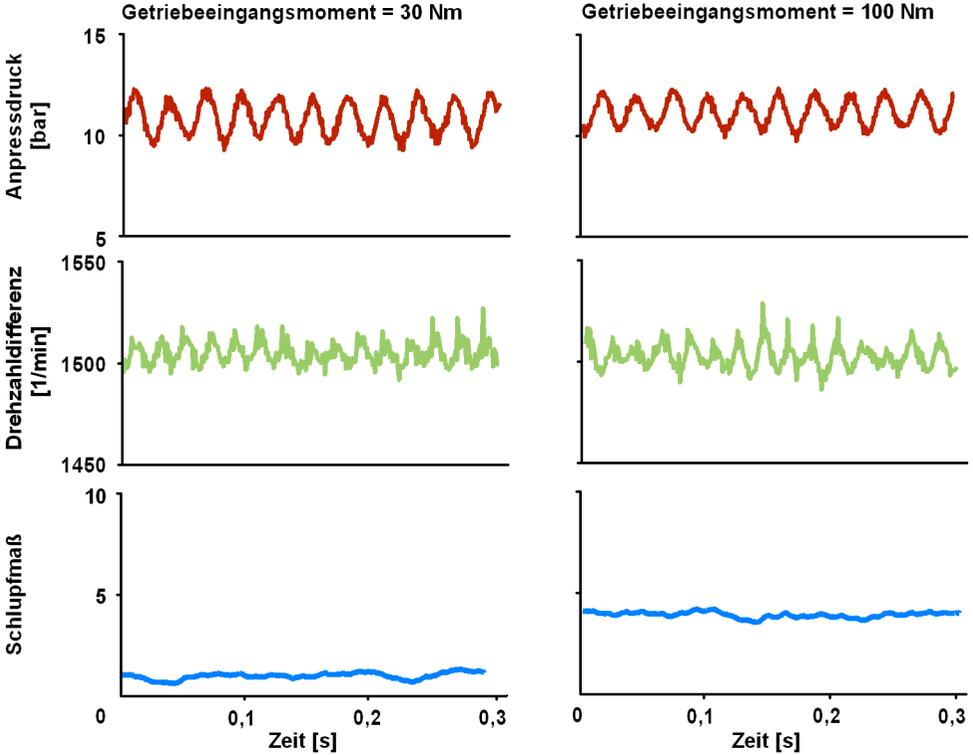


Bild 11: Lock-In Auswertung von Messungen

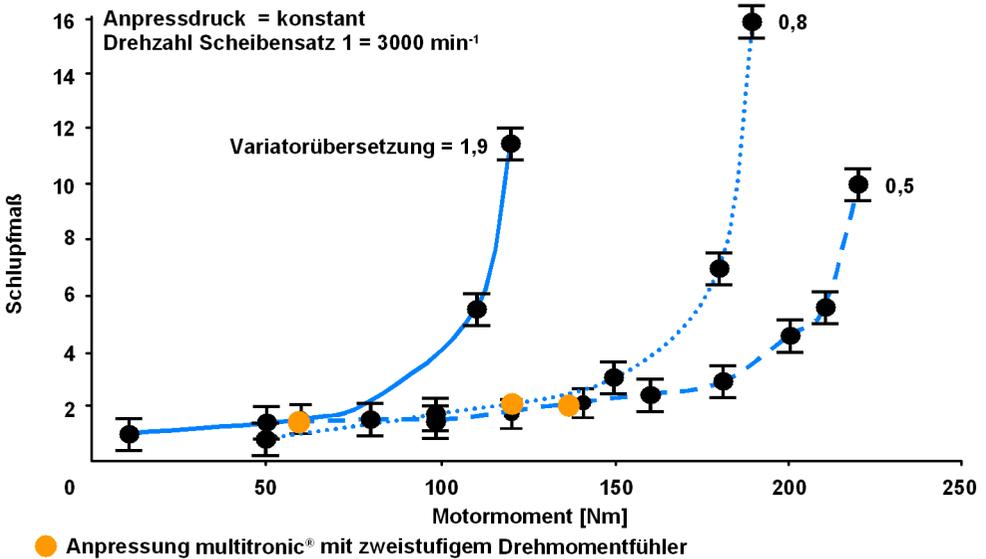
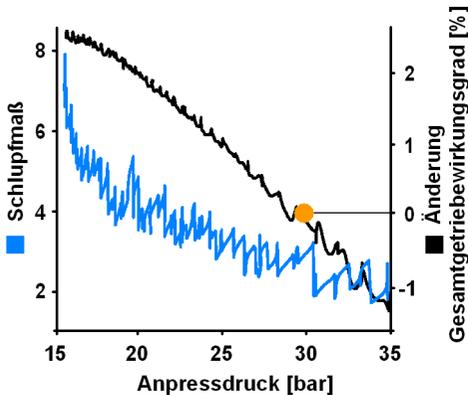


Bild 12: Messungen am Getriebeprüfstand mit Verbrennungsmotor

## Wirkungsgradeinfluss

Variatorübersetzung = 0,47  
 Getriebeeingangsmoment = 310 Nm  
 Drehzahl Scheibensatz 1 = 2000 min<sup>-1</sup>



● **Anpressung multitronic®**  
 mit zweistufigem Drehmomentfühler

**Bild 13:** Gemessener Gesamtgetriebe-  
 wirkungsgrad

Die Auswirkung der Überanpressung auf den Gesamtgetriebewirkungsgrad zeigt Bild 13.

Während der Messung wurden die Getriebeeingangsdrehzahl, die Variatorübersetzung und das Getriebeeingangsmoment konstant gehalten.

Mit fallendem Anpressdruck steigt der Wirkungsgrad ausgehend von der Anpressung der multitronic® zunächst deutlich an. Trotz einer Zunahme des Variatorzuschlupfes steigt der Gesamtgetriebewirkungsgrad. Dies liegt daran, dass zum einen die hydraulischen Verluste durch eine geringere Anpressung reduziert werden und zum anderen sich auf Grund der verminderten Überanpressung geringere Variatorverluste einstellen.

Bei weiterer Reduktion der Anpressung steigt der Gesamtgetriebewirkungsgrad nur noch

wenig bzw. mündet in einen horizontalen Verlauf. Die Schlupfverluste werden nicht mehr durch den Leistungsgewinn aus Überanpressung und Pumpendruck überkompensiert.

Das mit eingetragene Schlupfmaß – ausgewertet nach dem Lock-In-Verfahren – steigt mit sinkendem Anpressdruck kontinuierlich an.

## Schlupfregelung

Wird das Schlupfsignal als Regelgröße für einen Schlupfregler verwendet, besteht prinzipiell die Möglichkeit, das Getriebe im Bereich des optimalen Wirkungsgrades zu betreiben. Durch die reduzierte Anpressung werden zusätzlich die Variatorwellen entlastet, was z. B. für eine Spreizungserweiterung genutzt werden kann.

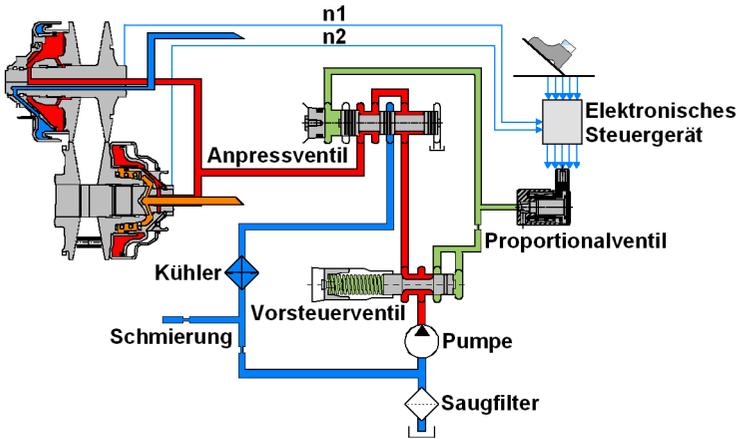
Da sich der Anpressbedarf zeitlich nur langsam ändert, ist anstatt einer Schlupfregelung auch eine Anpresssteuerung mit Adaption denkbar.

## Hydraulikkonzept

Eine Schlupferkennung/ -regelung mit dem Verfahren der Druckmodulation stellt sehr hohe Anforderungen an die hydraulische Steuerung:

- Geringe Hysterese in der Steuerkette
- Hohe Dynamik im Druckaufbau
- Hohe Stabilität bezüglich hydraulischer Schwingungen
- Sehr gute Streckenkenntnisse über Druck und Temperatur, um den überlagerten Regelkreis für die Schlupfregelung in allen Betriebszuständen stabil auslegen zu können.
- Hohe Reproduzierbarkeit des Druckauf- und -abbaus

In Bild 14 ist der Teil der Hydraulik dargestellt, der für das Anpresssystem verantwortlich ist.



**Bild 14:** Schlupferegelte Anpressung

Für die Auslegung der Hydraulik wurden umfangreiche Simulationen und Berechnungen durchgeführt. Mit Hilfe dieser Simulationen kann z. B. der Einfluss der Hysterese auf das Schlupfmaß dargestellt werden (Bild 15).

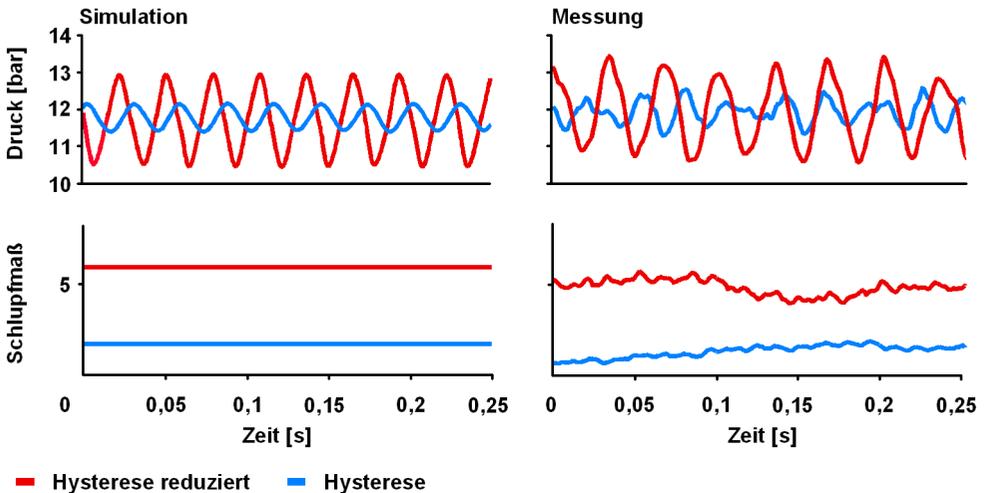
Sowohl in der Simulation als auch in den Messungen zeigt sich, dass bei gleicher Ventilsteuerung die Druckamplituden mit steigender Ventilhysterese geringer werden. Gleichzeitig reduziert sich auch das Schlupfmaß.

Um die Ventilhysterese minimal zu halten, hat LuK eine spezielle Ventilsteuerung

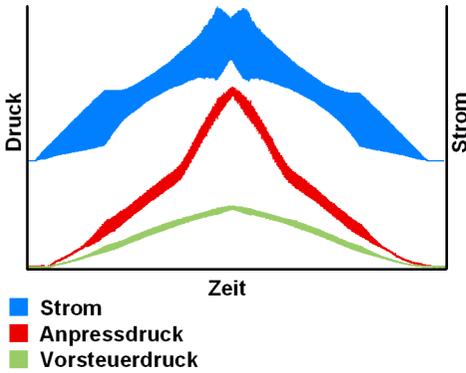
entwickelt. Die Hysterese des Proportionalventils und die des Anpressschiebers wird auf ein Minimum reduziert, indem gezielte Druckschwingungen über die Stromvorgabe des Proportionalventils ins Gesamtsystem eingebracht werden. Diese Druckschwingungen liegen in einem Frequenzbereich zwischen 70 und 100 Hz

und damit über der Modulationsfrequenz für die Schlupferkennung. Sie haben keinen Einfluss auf die Druckamplituden der Schlupferkennung. In Bild 16 ist der Zusammenhang zwischen Strom, Vorsteuerdruck und Anpressdruck dargestellt.

Die erforderliche Form der Überlagerungsamplitude im Strom wird durch das Folgesystem bestimmt. Da die Strecke ein nichtlineares Verhalten aufweist, werden unterschiedlich hohe Anregungsamplituden im Strom benötigt, um eine konstante Druckamplitude über den Kennlinienverlauf zu erzielen.



**Bild 15:** Einfluss der Hysterese auf den relativen Schlupf



**Bild 16:** LuK Ventilansteuerung mit Überlagerung

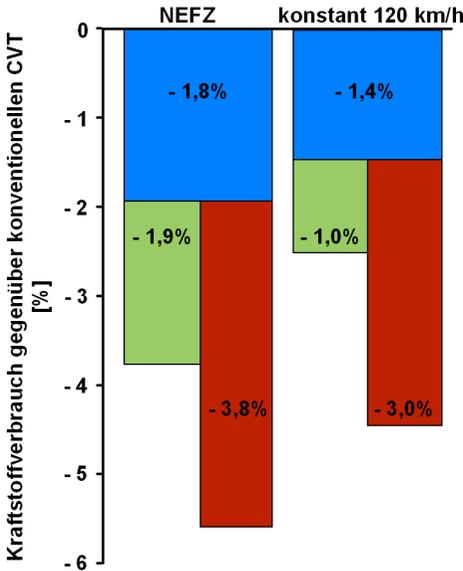
## Zusammenfassung

Ein wesentliches Entwicklungsziel der modernen Antriebstechnik ist die Reduktion des Kraftstoffverbrauches. Dies erfordert Maßnahmen zur weiteren Steigerung des Getriebewirkungsgrades. Die in Serie befindliche multitronic® stellt bezüglich Wirkungsgrad und Verbrauch bereits einen sehr guten Stand dar (Bild 17).

Durch eine konsequente Weiterentwicklung der hydraulischen Steuerung in Verbindung mit neuen Ideen zur Realisierung einer Schlupfregelung lässt sich weiteres Potenzial zur Senkung des Kraftstoffverbrauches erschließen.

Anhand von ersten Messungen konnte nachgewiesen werden, dass das Potenzial zur weiteren Steigerung des Wirkungsgrades vorhanden und umsetzbar ist.

Motormoment = 300 Nm  
Motorleistung = 160 kW



- LuK Doppelkolben } multitronic®
- LuK kleinere Pumpe }
- LuK Drehmomentfühler }
- LuK geringerer Anpressdruck }
- LuK Weiterentwicklung }
- LuK Schlupfregelung und optimierte Hydraulik }

**Bild 17:** Verbrauchsvorteile

## Literatur

- [1] Nowatschin, K.; Fleischmann, H.-P.; Gleich, Th.; Franzen, P.; Hommes, G.; Faust, H.; Friedmann, O.; Wild, H.: multitronic® – Das neue Automatikgetriebe von Audi, ATZ 102 (2000), H. 7/8, S. 548 - 553, H. 9, S. 746 - 753.
- [2] Faust, H.; Linnenbrügger, A.: CVT-Entwicklung bei LuK; 6. LuK Kolloquium 1998.
- [3] Englisch, A.; Faust, H.; Friedmann, O.: Innovative System for Clamping and Adjusting of a Chain Variator; Proceedings of the Global Powertrain Congress (GPC), Detroit (U.S.A.) 2001.
- [4] Lauth, H. J.; Scholz, T.; Agner, I.; Webert, D.: Bedarfsorientiert ansteuerbare Pumpen – Reduzierte Leistungsaufnahme von Lenk-, Fahrwerks- und Getriebesystemen, 7. LuK Kolloquium 2002.