

# Der Wandler als System

Dr.-Ing. **Volker Middelman**

Dipl.-Ing. **Uwe Wagner**

## Einleitung

Der Wandler wird seit seiner Einführung in den 40er Jahren als bewährtes Koppellement zwischen Motor und Automatikgetriebe eingesetzt. Die aus dem Prinzip der hydrodynamischen Leistungsübertragung resultierenden Vorteile sind bemerkenswert: Durch die Momentenüberhöhung wird die Zugkraft gesteigert und die Anfahrverluste werden verringert. Durch den prinzipbedingten Schlupf werden Schwingungsanregungen vom Motor gefiltert, Lastwechselstöße vermieden und ein guter Schaltkomfort ermöglicht. Zur Minimierung der Wandlerverluste werden Überbrückungskupplungen mit Dämpfern eingesetzt.

Im Gegensatz zu den Automatikgetrieben, die in einem kontinuierlichen Entwicklungsprozeß in ihrer Funktionalität verbessert wurden, hat sich der Wandler in den letzten 20 Jahren in seiner konstruktiven Gestaltung nur geringfügig verändert. Auch die Einführung der Wandlerüberbrückungskupplung in den 70er Jahren hat kaum zu einem Umdenken in der Auslegungsphilosophie geführt. Dabei ist bekannt, daß gerade bei Stufenautomaten die Optimierung des Systems Wandler, Wandlerüberbrückungskupplung und Getriebe bezüglich Kraftstoffverbrauch und Fahrleistung ein großes Verbesserungspotential aufweist.

Bereits während des letzten Kolloquiums (1994) stellte LuK ein ganzheitliches Wandlerüberbrückungskonzept, das LuK-TorCon-System, vor. Dieses System nutzt die Vorteile des Wandlers nach wie vor voll aus, seine Nachteile werden aber mit einer Hochleistungsüberbrückungskupplung minimiert. Bereits mit diesem System konnten im experimentellen Vergleich erhebliche Verbesserungen im Verbrauch, den Emissionen und der Fahrleistungen erreicht werden. Ferner konnten mit einem 4-Stufenautomat die gleichen Leistungsdaten erreicht werden wie mit einem existierenden 5-Stufenautomaten. Die Forderung nach weiter reduziertem Kraftstoffverbrauch und verbesserten Fahrleistungen verlangt jedoch aufbauende Optimierungsschritte. Bei dieser Optimierung ist der Auswahl und Abstimmung der Steuerungsstrategie für die Überbrückungskupplung gleiches Gewicht beizumessen, wie der konzeptionellen Auslegung der drei Systemelemente, Überbrückungskupplung, Dämpfer und hydrodynamischer Kreislauf des Wandlers. In der Tat wird es nur mit einer derartigen,

ganzheitlichen Systembetrachtung möglich, das gesamte Potential des Wandlers und der Überbrückungskupplung auszuschöpfen.

Diesem Konzept konsequent folgend, hat LuK in den vergangenen Jahren Wandler Systeme entwickelt, die bei reduziertem Bauraum, geringerem Gewicht und vergleichbaren Systemkosten erhöhte Funktionalität und Flexibilität bieten und sowohl die Fahrleistung steigern als auch die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch erheblich reduzieren.

In unserem Tochterwerk LuK Inc. in Wooster, USA, wo in den vergangenen Jahren neben Bühl ein zweites Entwicklungszentrum für Wandler aufgebaut wurde, werden seit Ende 1997 auch Wandler verschiedener Baugrößen in Serie für den Getriebehersteller **Allison Transmission** produziert. Die Wandler **MD** und **HD** (**M**edium und **H**eavy **D**uty) werden in Allison's **WT** Getrieben (**W**orld **T**ransmission) eingesetzt. Bild 1 zeigt den konstruktiven Aufbau der MD-Wandlerbaureihe, die auch den Vorteil einer Überbrückungskupplung nutzt.

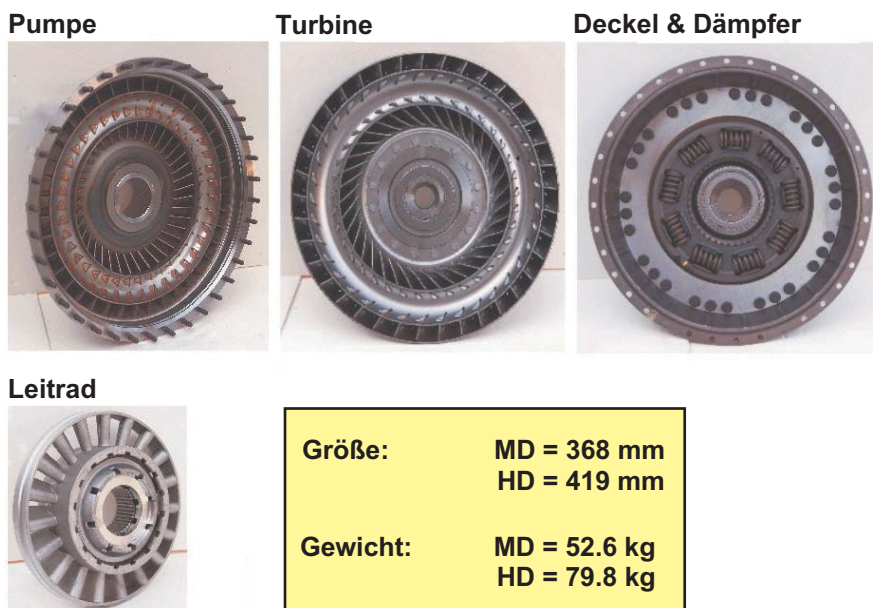


Bild 1: Komponenten der MD-Wandlerbaureihe

## Geschichte und globale Entwicklungstendenzen von Automatikgetrieben und deren Bedeutung für moderne Wandlerkonzepte

Bereits 1940 stellte der amerikanische Automobilhersteller **Oldsmobile** das erste vollautomatisierte Stufengetriebe für Personenkraftwagen vor.



### 1940

Oldsmobile stellt das erste vollautomatisierte Stufengetriebe vor.

### Fokus

- Komfort
- Bequemlichkeit

Bild 2: Die Anfänge des Automatikgetriebes

Damals standen der Fahrkomfort und die gewonnene Bequemlichkeit des Fahrers im Vordergrund des Interesses. Nachteile im Benzinverbrauch sowie in den Fahrleistungen waren noch nicht von Bedeutung. Das Standardgetriebe war der 2-Gang-Automat mit einer mittleren Getriebespreizung von 1.8 (Bild 3). Zur Kompensation dieser kleinen Getriebespreizung wurden Wandler mit einer Drehmomentwandlung von 3 bis maximal 4,5 eingesetzt. Dies ergab ein sehr komfortables Fahren allerdings mit hohen Verlusten. Insgesamt war die Komplexität respektive Funktionalität der damals verwendeten Wandler ausgesprochen hoch. Es gab Ausführungen mit verstellbaren Leitradschaukeln, mehrflutigen Turbinen- und Leiträdern sowie integrierten Getriebefunktionen. Wandlerüberbrückungskupplungen wurden noch nicht eingesetzt.

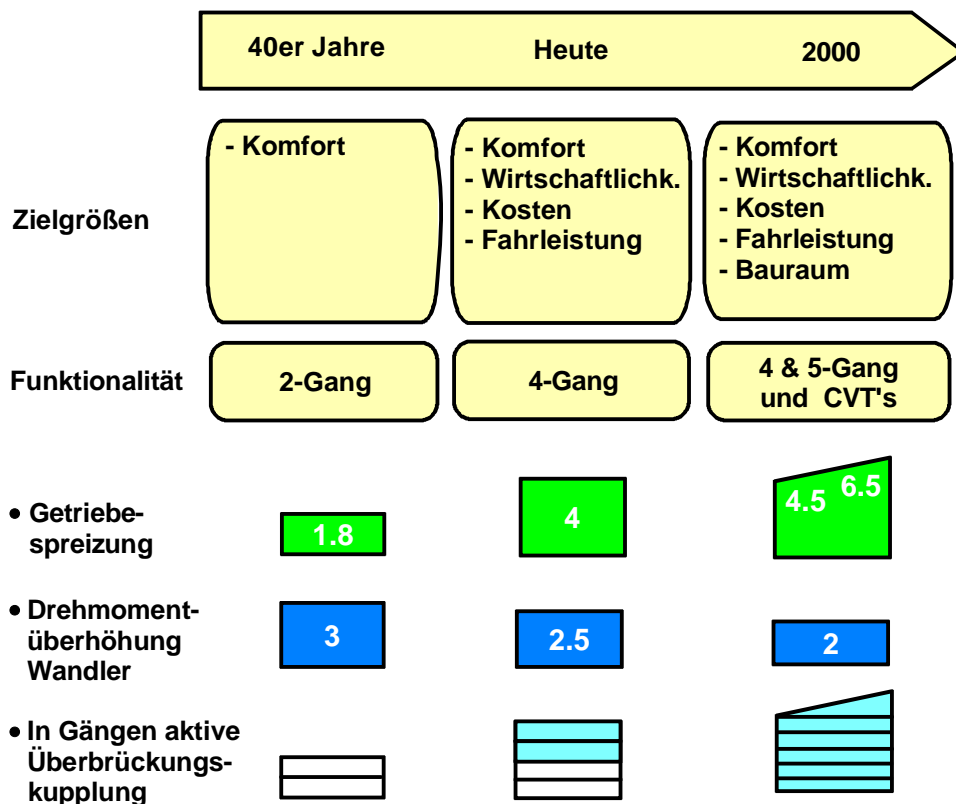


Bild 3: Globale Entwicklung der Automatikgetriebe

Im Laufe der Jahre mußte der Wandler zur Verringerung der Verluste steifer ausgeführt werden, was aber ebenso die Momentenwandlung reduziert. Zur Kompensation wurden Getriebe mit größerer Getriebespreizung und mehr Gängen eingeführt. In den 70er Jahren war der 3-Gang-Automat (Spreizung von ca. 2.5) am weitesten verbreitet. Nicht zuletzt forciert durch die Ölkrise wurde zur Verringerung der Wandlerverluste eine Überbrückungskupplung eingeführt, die den Wandler jedoch nur im obersten Gang und bei größeren Geschwindigkeiten überbrückte. Die Anforderungen an die Überbrückungskupplung bezüglich Kühlungsvermögen und an den Dämpfer bezüglich Schwingungsisolation waren entsprechend gering (Bild 3).

Das Standardgetriebe der 90er Jahre (Marktanteil ca. 80%) ist der 4-Gang-Automat mit einer Spreizung von 4 bis 4,5. 75% der Getriebe haben vollelektronische Steuerungen und bereits im Jahr 2000 werden es annähernd 100% sein. Die heutige Überbrückungskupplung weist einen im Vergleich zu den 70er Jahren erweiterten Betriebsbereich auf. Zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauches wird der Wandler in der Regel im dritten und vierten Gang ab Drehzahlen zwischen 1100 1/min und 1700 1/min zum Teil schlupfend überbrückt. Bei Gangwechseln oder Lastwechselreaktionen (z.B. Tip-in) wird die Überbrückungskupplung ebenfalls schlupfend (moduliert) betrieben (Bild 3).

Betrachtet man die Geschichte und die globalen Entwicklungstendenzen der Automatikgetriebe, so lassen sich einige grundlegende Tendenzen ableiten:

1. Die Funktionalität (Gangzahl und Getriebespreizung) des Automatikgetriebes nimmt zu.
2. Die Betriebsbereiche, die mit geöffnetem Wandler gefahren werden, nehmen ab.
3. Die Betriebsbereiche, die mit geschlossener (schlupfend oder voll geschlossen) Überbrückungskupplung gefahren werden, nehmen zu.

Neben diesen globalen Tendenzen kann sicher prognostiziert werden, daß steigende Kraftstoffkosten und wachsendes Umweltbewußtsein eine weitere Reduzierung des Kraftstoffverbrauches erfordern werden. Ebenso zwingend ist, daß die Kosten weiter reduziert werden müssen. Der für den Wandler und die Überbrückungskupplung zur Verfügung stehende Bauraum wird insbesondere bei frontgetriebenen Fahrzeugen, 5-Gang-Automaten und CVT's abnehmen.

In Bild 4 sind die globalen Entwicklungstendenzen sowie die Entwicklungsziele für das System Wandler und Überbrückungskupplung zusammengefaßt.



Bild 4: Globale Entwicklungstendenzen und Entwicklungsziele des Systems Wandler und Überbrückungskupplung

## Die Steuerungsstrategie der Überbrückungskupplung: Das verknüpfende Element zur Realisierung der Zielvorgaben

Konzept, Kennungen und konstruktiver Aufbau der drei Systemkomponenten des Wandlers, Überbrückungskupplung, Dämpfer und hydrodynamischer Kreislauf, resultieren aus der gewünschten Steuerungsstrategie für die Überbrückungskupplung. Sie bildet die zentrale Verknüpfung der Hardwareelemente, legt die Anforderungen in den unterschiedlichen Wirkungsbereichen fest und bestimmt damit die Auslegung der jeweiligen Komponenten (Bild 5).

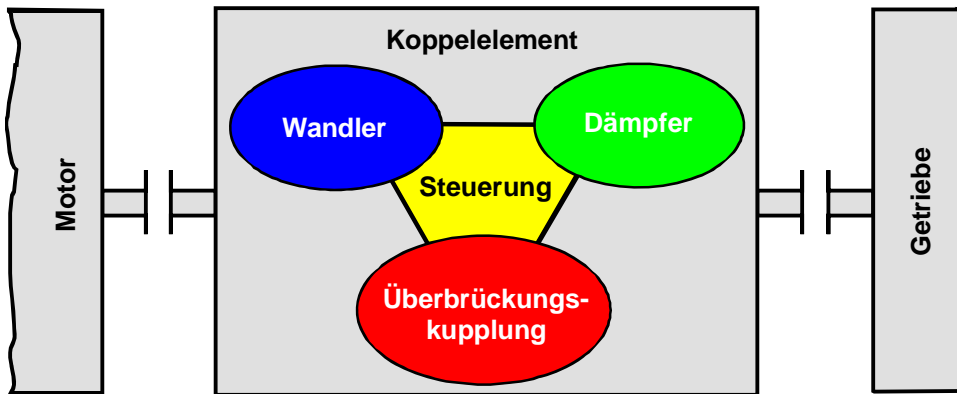


Bild 5: Gesamtsystem Wandler-Überbrückungskupplung-Dämpfer mit Überbrückungsstrategie

Die geeignete Überbrückungsstrategie basiert auf dem jeweiligen Fahrzeug und orientiert sich sowohl an der gewünschten Funktionalität im Fahrzeug als auch an den Zielvorgaben für den Verbrauch, den Fahrleistungen, der Fahrbarkeit und des Fahrkomforts. Die Eigenschaften des Gesamtsystems bestimmen also die Überbrückungsstrategie und diese wiederum die Anforderungen für die konstruktive Auslegung der Hardwarekomponenten.

Als geeignete Kenngrößen für die beste Überbrückungsstrategie bietet sich die Getriebespreizung an. Gemäß dem heutigen Stand der Technik und unter Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklung von Automatikgetrieben und CVT's empfiehlt sich eine Einteilung gemäß Bild 6.

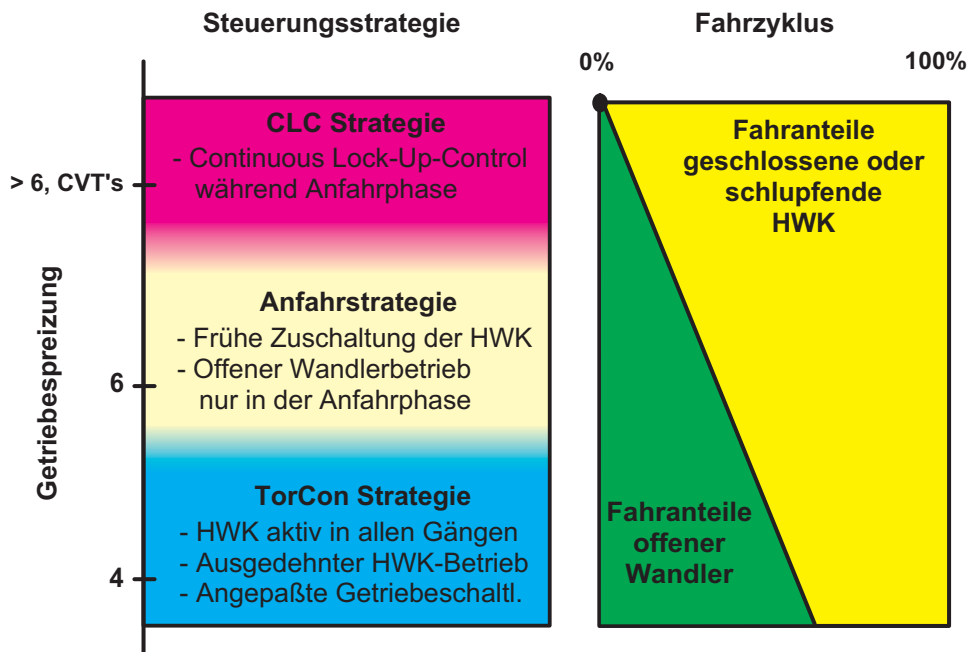


Bild 6: Überbrückungsstrategien (HWK = Hochleistungswandler-überbrückungskupplung)

Für Getriebe mit einer Spreizung von 4 bis 4,5 bietet sich die TorCon-Strategie an. Zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und Steigerung der Fahrleistung wird bei dieser Überbrückungsstrategie

- in allen Gängen und
- in weiten Drehzahlbereichen (bis hinunter zu ca. 900 1/min)

überbrückt. Um eine ausreichende Geräuschabkopplung in diesem niedrigen Drehzahlbereich auch bei hoher Last zu gewährleisten oder um zu verhindern, daß der Motor zu stark gedrückt wird, ist ein relativ hoher Schlupf an der Überbrückungskupplung erforderlich. Mit einem entsprechend leistungsfähigen Dämpfer kann die Geräuschabkopplung zusätzlich unterstützt bzw. der erforderliche Schlupf reduziert werden. Die Verlustleistungen, die durch diese hohen Schlupfwerte an der Überbrückungskupplung entstehen, können zu unzulässig hohen Temperaturspitzen an der Reibfläche führen. Diese Temperaturspitzen schädigen das Getriebeöl (ATF) und den Reibbelag. Die Folge ist ein abfallender Reibwertverlauf über dem Schlupf, was zum Rupfen und letztlich zum Getriebeausfall führt. Zur Absenkung der Temperaturspitzen muß die Überbrückungskupplung also eine hohe Kühlfähigkeit aufweisen. Mit den Hochleistungswandlerüberbrückungskupplungen der LuK ist dies gewährleistet (siehe Seite 137).



Da bei dem TorCon-Steuerungskonzept der offene Wandlerbetrieb zwar reduziert aber eben nicht völlig eliminiert ist, stellt sich die Frage nach der geeigneten Wandlercharakteristik. Weiche Wandler mit einer hohen Anfahrwandlung und hoher Festbremsdrehzahl (Stalldrehzahl) haben gegenüber harten Wandlern den Vorteil geringerer Stillstandsverluste und größeren Beschleunigungsvermögens. Zudem wird die Warmlaufphase des Motors reduziert, was die Emissionen senkt. Allerdings kann es in einigen Betriebsbereichen zu unzulässig hohen Verlusten im Wandler kommen. Deshalb müssen weiche Wandler unbedingt früh überbrückt werden, was von der TorCon-Strategie vorgesehen und mit der von der LuK entwickelten Hardware auch zulässig ist.

Bild 7 zeigt eine Gegenüberstellung eines harten und eines weichen Wandlers jeweils mit einer konventionellen Überbrückungsstrategie und der LuK-TorCon-Strategie.

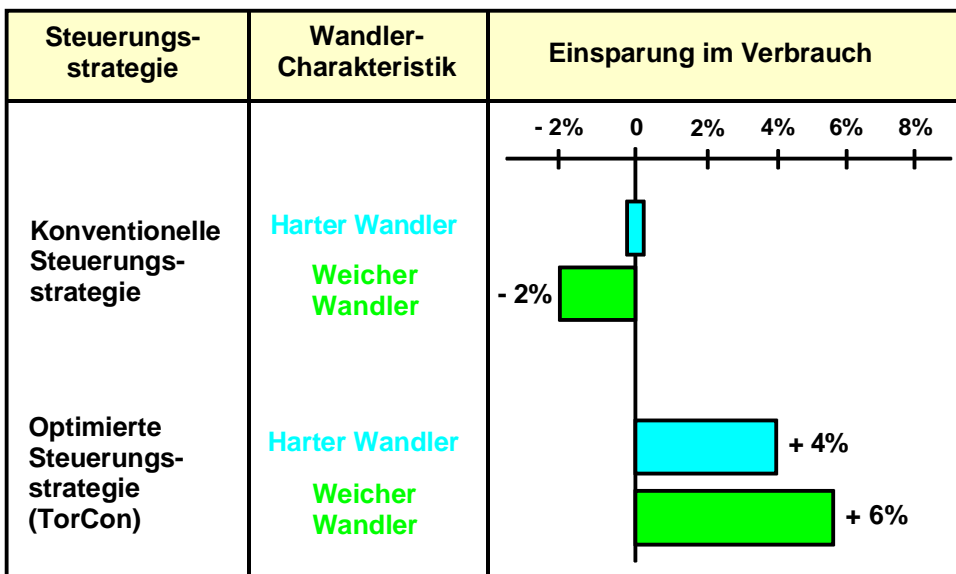


Bild 7: Einfluß der Wandlercharakteristik (hart/ weich) und der Überbrückungsstrategie auf den Verbrauch am Beispiel eines 4-Stufen Automatik Getriebes (Simulation)

Bezüglich des Einflusses auf den Verbrauch ist folgendes festzuhalten:

- Bei Verwendung einer konventionellen Überbrückungsstrategie hat der harte Wandler im Vergleich zum weichen Wandler Vorteile.
- Bei Verwendung der TorCon Strategie ist der weiche Wandler im Vorteil.
- Der Einfluß der Überbrückungsstrategie ist maßgebend, erst in zweiter Linie der Einfluß der Wandlercharakteristik.
- Mit einem weichen Wandler und der TorCon-Strategie kann, je nach Anwendungsfall, ein Verbrauchsvorteil von 5% bis 10% gegenüber dem harten Wandler mit konventioneller Überbrückungssteuerung erzielt werden.

Ähnliche Verhältnisse ergeben sich, wenn man die Fahrleistungen betrachtet.

Bei steigender Getriebespreizung (>5) nimmt die Bedeutung der Wandlercharakteristik (hart/ weich, Anfahrwandlung, maximaler Wirkungsgrad, etc.) bezüglich der beiden Kriterien

- Fahrleistung und
- Kraftstoffverbrauch

ab. Der Grund hierfür ist, daß durch die große Getriebespreizung und die hohe Gangzahl dieser Getriebetypen in der Regel für jeden Lastzustand ein Betriebspunkt mit geschlossenem Wandler bereitgestellt werden kann, der entweder bezüglich Verbrauch oder Zugkraft jedem denkbaren Betriebspunkt mit geöffnetem Wandler überlegen ist. Ein Öffnen der Überbrückungskupplung ist also weder technisch sinnvoll noch aus Komfortgründen erwünscht. Der Wandler verkümmert zum komfortablen Anfahr-element und wird nach Beendigung der Anfahrphase nicht mehr offen betrieben.

Bei der konzeptionellen Gestaltung des Wandlers steht deshalb bei diesen Getriebetypen nicht mehr die Frage nach der geeigneten Wandlercharakteristik, dem maximalen Wandlerwirkungsgrad oder der Höhe der Anfahrwandlung im Vordergrund. Von wesentlicher Bedeutung sind nunmehr folgende Kriterien:

- Erforderlicher Bauraum
- Kosten

Von der klassischen Wandlerauslegung verbleiben die Kriterien

- Verlauf des Lastwertes über der Drehzahlwandlung und
- Lage des Kupplungspunktes (siehe hierzu auch Seite 148).

LuK hat daher einen extrem schmalen Wandler entwickelt, der im Vergleich zu konventionellen, kreisrunden Ausführungen axial um 45% schmaler baut und in funktioneller Hinsicht im Zusammenwirken mit der Überbrückungskupplung und der Steuerungsstrategie keinerlei Nachteile aufweist (siehe hierzu auch Seite 148). Zur Verdeutlichung sind in Bild 8 der Kraftstoffverbrauch und die Fahrleistungen eines kreisrunden, konventionell ausgelegten Wandlers dem extrem schmalen LuK-Wandler exemplarisch für eine CVT-Anwendung gegenübergestellt.

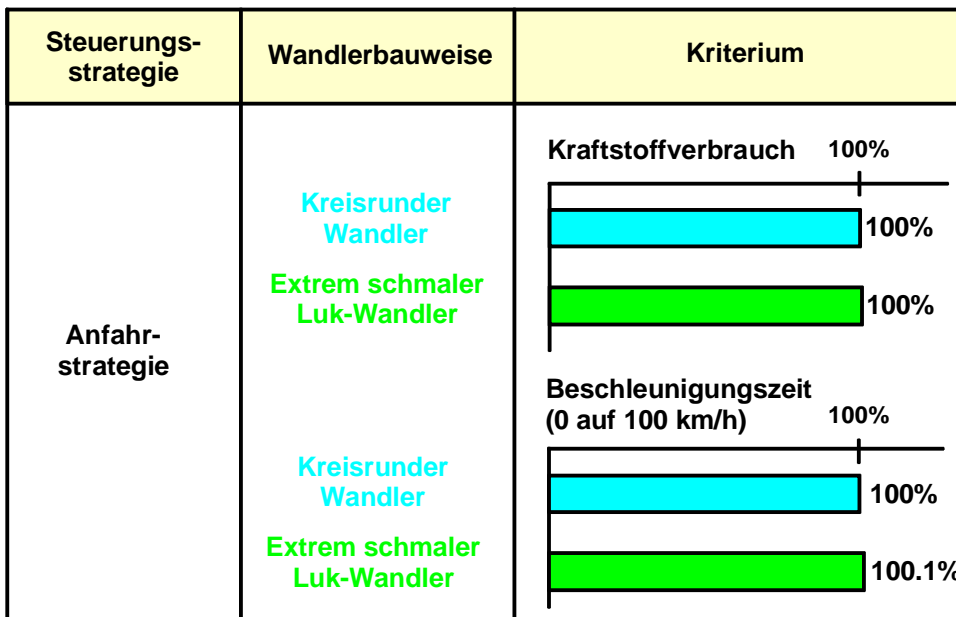


Bild 8: Einfluß der Wandlerkonstruktion auf Verbrauch und Fahrleistung am Beispiel einer CVT-Anwendung (Simulation)

Für CVT Anwendungen ist sogar eine Steuerungsstrategie für die Überbrückungskupplung denkbar, die keine diskrete Zuschaltstrategie verwendet, sondern vielmehr eine stufenlose. Bei dieser CLC Steuerung (**C**ontinuous **L**ock-up **C**ontrol) wird die Überbrückungskupplung bereits im Stillstand des Fahrzeugs beim Lösen der Bremse mit einem Mindestmoment (Schleppmoment) von ca. 10 Nm angelegt und dann beim Anfahren bis zum Verstellen der Übersetzung stufenlos geschlossen (Bild 6). Ein Öffnen der Überbrückungskupplung im Fahrbetrieb ist nicht

vorgesehen. Der Vorteil einer derartigen Strategie liegt eindeutig im gewonnenen Komfort (keine Zuschaltung der Überbrückungskupplung während der Anfahrphase). Allerdings erfordert eine derartige Strategie auf Grund der an der Überbrückungskupplung auftretenden Verluste eine nochmals größere Kühlkapazität mit gegebenenfalls geändertem Kühlungsmechanismus. Ein derartiges Projekt befindet sich bei LuK momentan in der Vorentwicklung.

Mit Hilfe der vorgestellten Steuerungsstrategien und der durchgeführten Simulationen zum Verbrauch und der Fahrleistungen sowie den erwähnten Entwicklungstrends lassen sich die in Bild 9 quantitativ zusammengefaßten Entwicklungsziele für das Gesamtsystem Wandler, Wandlerüberbrückungskupplung (HWK), Dämpfer und Überbrückungssteuerung formulieren.

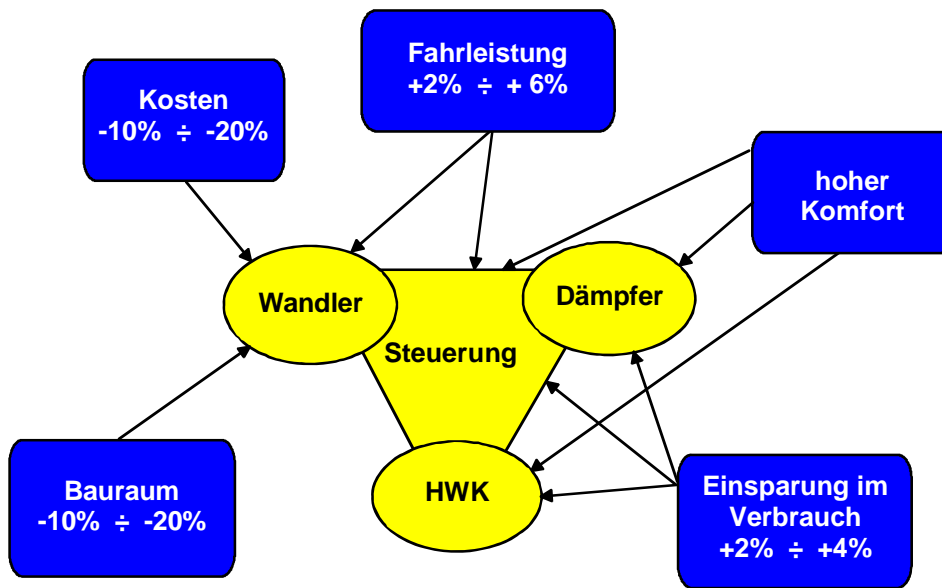


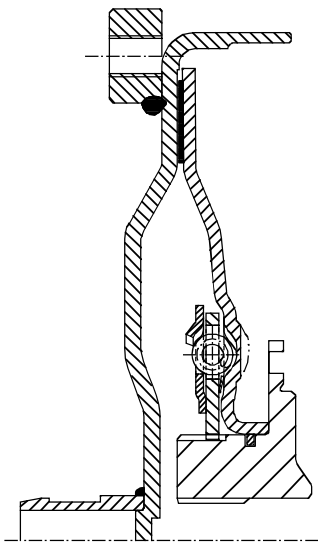
Bild 9: Entwicklungsziele für das Gesamtsystem Wandler-Überbrückungskupplung-Dämpfer und Überbrückungssteuerung.

## Die Bauteilkomponenten

### Die Hochleistungswandlerüberbrückungskupplung

Gemeinsame Basis der vorstehend beschriebenen Steuerungsstrategien ist die höhere Anforderung an die Funktionalität der Überbrückungs-

kupplung. Neben der Momentenübertragungsfähigkeit sind hier die beiden Kriterien Kühlungsvermögen und Steuerbarkeit besonders zu beachten (Bild 10).



**Zielgrößen:**

- **Ausreichende Übertragungsfähigkeit**
- **Ausreichendes Kühlungsvermögen**
- **Gute Steuerbarkeit**
  - **Weiche Zuschaltungen**
  - **Neutrales Verhalten im Zug und Schub**
  - **Konstante und kurze Reaktionszeit**
  - **Positiver Reibwertgradient über dem Schlupf**

Bild 10: Anforderungen an die Hochleistungswandlerüberbrückungskupplung (HWK)

### **Momentenübertragungsfähigkeit**

Die Momentenübertragungsfähigkeit ist in erster Linie eine Funktion der zulässigen Flächenpressung am Reibbelag. Diese wiederum ist bestimmt durch den angelegten Druck am Kupplungskolben und die effektiv wirkende Reibbelagfläche. Die Größe der effektiv wirkenden Reibbelagfläche wird bestimmt durch die mechanische und thermische Verformung des Kolbens und des Deckels sowie von den Fertigungstoleranzen beider Bauteile. Die nominelle Größe der Belagfläche ist daher meist nur von untergeordneter Bedeutung. Eine detaillierte Beschreibung dieser Mechanismen wurde von LuK bereits im 4. LuK-Kolloquium 1994 [1] und in einem VDI Bericht [2] gegeben. Hier ist inzwischen umfangreiche praktische Erfahrung vorhanden. Je nach Anwendungsfall werden von LuK ebene HWK-Konzepte (Bild 10), konische HWK-Konzepte (Bild 26), ebene 2-Reibflächen-HWK-Konzepte (Bild 25) sowie Mehrreibflächen-HWK-Konzepte realisiert.

## Steuerbarkeit

Die Zuschaltung der HWK kann in folgende drei Phasen unterteilt werden:

- Umschaltphase
- Anlegephase
- Phase des Momentenaufbaus

Die Überbrückungskupplung sollte mit einem möglichst geringen Volumenstrom geschlossen werden können. Dies ist dann der Fall, wenn erstens der Widerstand, den die Überbrückungskupplung der Schließbewegung entgegensetzt, klein ist und zweitens der Lüftspalt zwischen Kolben und Deckel eng ist, so daß sich schon bei kleinen Volumenströmen eine ausreichende Druckdifferenz ausbildet. Ein zu großer Volumenstrom führt zu einem Momentenstoß nach dem Anlegen des Kolbens, da die kinetische Energie des Schließvolumenstroms in Druckenergie umgewandelt wird. Ein kleiner Lüftspalt zwischen Deckel und Kolben ist also vorteilhaft. Neben dem Lüftspalt ist der hydraulische Widerstand zwischen Deckel und Kolben bzw. Deckel und Turbinennabe maßgebend. Ziel ist es, diesen klein zu gestalten. Mit Hilfe numerischer Strömungsberechnungen konnte die Gestalt von Kolben, Deckel und Turbinennabe diesbezüglich optimiert werden.

Für die Anlegephase ist es wichtig, daß die verwendeten Kühlnuten im Belag keinen Ansaugeffekt aufweisen. Durch empirische Untersuchungen konnte die Gestalt der Kühlnuten im Belag so optimiert werden, daß ein neutrales Verhalten sowohl im Zug- als auch im Schubbetrieb gegeben ist. Zur besten Momentensteuerung ist eine fein abgestimmte Momentenübertragungsfähigkeit sowie ein positiver Reibwertgradient erforderlich.

## Kühlungsvermögen

Von zentraler Bedeutung ist das Kühlungsvermögen der HWK. Der zur Schwingungsabkopplung erforderliche Dauerschlupf, der zur Verbesserung des Komforts kurzzeitig benötigte Schlupf und ein komfortables Schließen und Öffnen der Überbrückungskupplung bewirken eine hohe thermische Beanspruchung des Reibbelages und des ATF-Öles. Die an der Reibfläche absorbierte Verlustleistung kann zu Spitzentemperaturen führen, welche die Öladditive zerstören und zusammen mit der mechanischen Scherbelastung die Molekülketten aufspalten. Die Folge ist ein über dem Schlupf fallender Reibwertverlauf, der Rupfen verursacht und letztlich zum Getriebeausfall führt.

Die thermische Belastung der HWK hängt wesentlich von der eingesetzten Überbrückungsstrategie ab. Sie bestimmt das Maximum der anfallenden Verlustleistung sowie die zu absorbierende Gesamtenergie an der Reibfläche. Allgemein gilt:

- Je niedriger das Drehzahlniveau bei dem überbrückt wird, desto größer ist der zur Geräuschabkopplung benötigte Schlupf und damit die anfallende Verlustleistung.
- Je niedriger der Gang, desto kritischer ist das Lastwechselerhalten. In Bild 11 ist der Ablauf eines Lastwechsels (Tip-in) dargestellt. Unmittelbar nach dem Gasstoß schlupft die HWK, wodurch die sonst übliche Ruckelschwingung vermieden wird. Das Verhalten erscheint komfortabel. Allerdings tritt für eine kurze Zeit eine hohe Verlustleistung an der HWK auf.

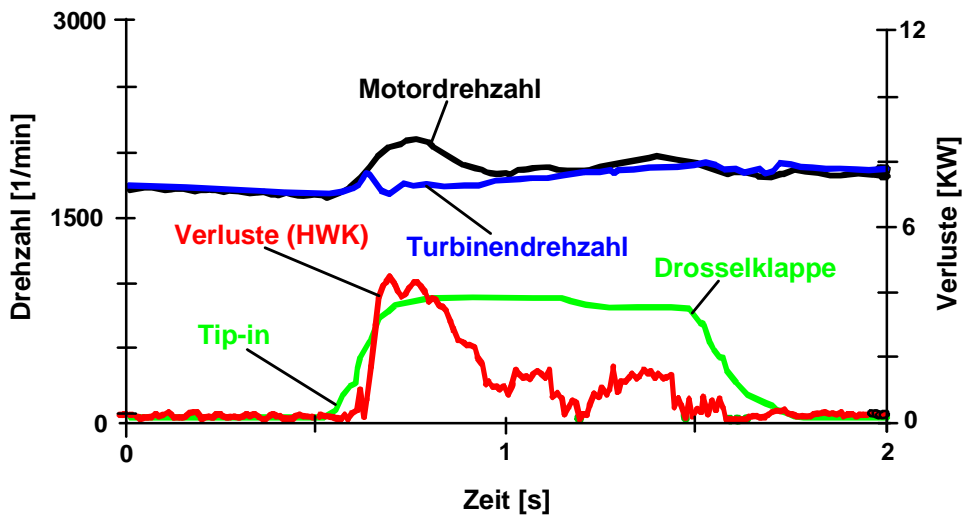


Bild 11: Thermische Beanspruchung der HWK während eines Lastwechsels (Tip-in)

Je niedriger der Gang und je niedriger das Drehzahlniveau bei dem überbrückt wird, desto komfortabler, d.h. desto länger, muß die Dauer der Zuschaltung sein. Je länger die Zuschaltung, desto größer ist die zu absorbierende Gesamtenergie. Bild 12 zeigt den Ablauf einer komfortablen Zuschaltung. Bei diesem praktisch nicht spürbaren Schließvorgang beträgt die maximale Verlustleistung an der HWK immerhin 7kW.

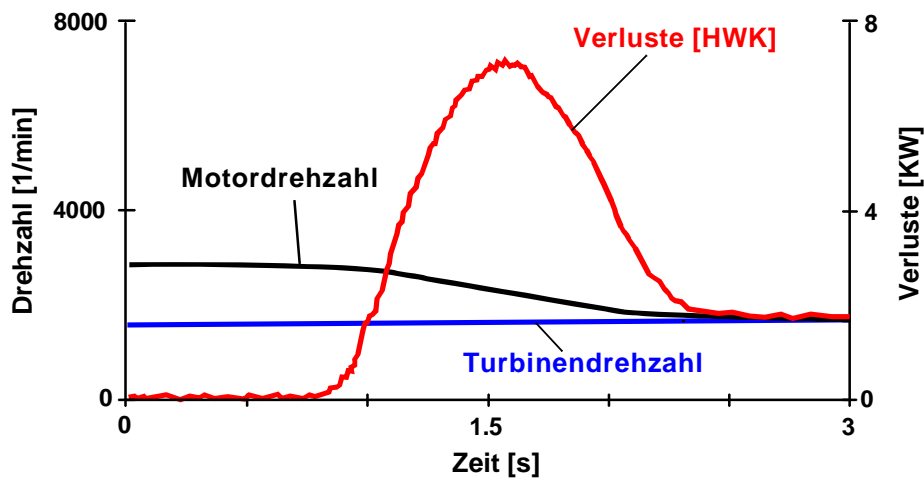


Bild 12: Thermische Beanspruchung der HWK während einer Zuschaltung



Worin unterscheidet sich nun die LuK-HWK von einer konventionellen Überbrückungskupplung und warum ist die zulässige Verlustleistung größer? Die Antwort ist:

- Fein aufeinander abgestimmte Bauteile
- Einsatz von konisch gestalteten, im Bereich der Reibfläche sehr steifen HWKs (Bild 25) oder 2-Reibflächen-HWKs (Bild 24) für noch höhere Verlustleistungen
- Optimierte Geometrie der Kühlnut im Reibbelag

Für die Abstimmung der Bauteile sind folgende Zusammenhänge wichtig:

1. Für die Temperaturentwicklung an der Reibfläche ist sowohl die eingebrachte spezifische Reibleistung, also das Produkt aus der lokalen Flächenpressung am Belag und dem Schlupf, als auch ihr zeitlicher Verlauf entscheidend (s. Bild 13). Insbesondere für Zuschaltungen ist also das strengere Optimierungskriterium die lokale spezifische Verlustleistung am Reibbelag und nicht die lokale Flächenpressung.
2. Bei der Berechnung der Flächenpressungsverteilung am Belag ist neben der elastischen Verformung von Deckel und Kolben durch die wirkenden Drücke auch die mechanische Verformung durch Wärmeeinbringung zu berücksichtigen. Diese allein kann die lokale Flächenpressung am Belag um bis zu 20% erhöhen.
3. Bei Wandlern mit Zweiwegeanschluß empfiehlt es sich, den Reibbelag auf den Kolben zu kleben. Bei einem Wandler mit Dreiwegeanschluß sollte der Reibbelag auf den Deckel geklebt sein.
4. Die Temperaturentwicklung bei Zuschaltungen ist sehr verschieden von der bei Dauerschlupfbetrieb.

Zur Analyse der Temperaturentwicklung benutzt LuK ein spezielles Softwarepaket, das sowohl die mechanische und thermische Verformung des Kolbens, die Materialeigenschaften des Reibbelages als auch den Wärmeübergang zwischen Stahl/Öl und Stahl/Luft, der lokal sehr unterschiedlich ist, berücksichtigt.

Die Simulationsergebnisse werden mit konkreten Temperaturmessungen am rotierenden Bauteil verglichen. Bild 13 zeigt die Temperaturentwicklung an der Belagfläche während einer Zuschaltung. Die maximale Reibflächentemperatur wird gegen Ende der Zuschaltung im mittleren Bereich der Belagfläche erzielt, obwohl dort und zu diesem Zeitpunkt weder die Flächenpressung noch die spezifische Verlustleistung maximal ist.

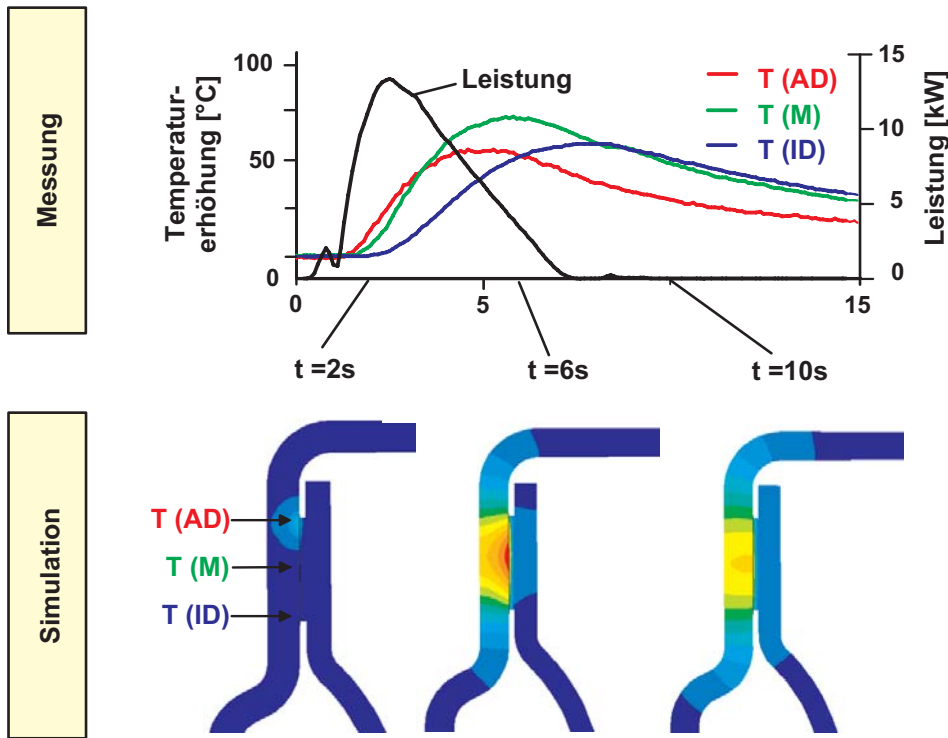


Bild 13: Temperaturerhöhung an der Reibfläche während einer Zuschaltung

Als Ergebnis dieser Betrachtungen konnten Konstruktionsrichtlinien abgeleitet werden, die sich wesentlich von denen unterscheiden, die sich allein aus der Betrachtung der Flächenpressungsverteilung ergeben.

Das zweite wichtige Konstruktionselement der LuK-HWK ist die Kühlnut, deren Form in idealer Weise eine Abstimmung zwischen Volumenstrom und hydraulischem Widerstand ermöglicht und einen im Vergleich zu einer üblichen Kühlnut um den Faktor 4 verbesserten Wärmeübergangskoeffizienten besitzt. Zudem weist die LuK-Kühlnut ein neutrales Verhalten bezüglich des Reibungskoeffizienten und damit des Momentenaufbaus sowohl im Zug- als auch im Schubetrieb auf. In Bild 14 ist die zulässige spezifische Verlustleistung von Belägen mit der LuK-Kühlnut dargestellt. Man erkennt, daß im Dauerschlupfbetrieb eine Steigerung der zulässigen Verlustleistung um 120% möglich ist. Bei kurzzeitigen Schlupfphasen ist die zulässige Steigerung geringer.

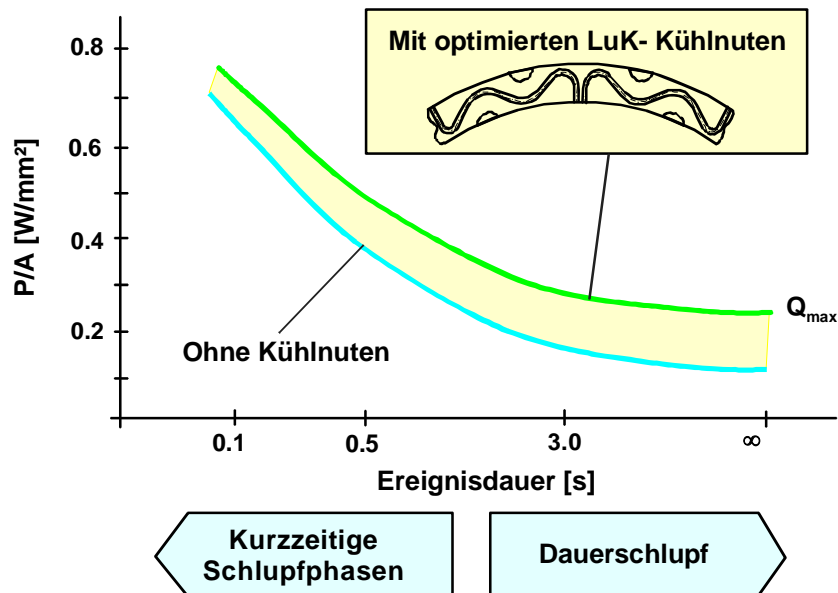


Bild 14: Zulässige spezifische Verlustleistung am Reibbelag

Überträgt man die in Bild 14 zusammengefaßten spezifischen Verlustleistungen auf ein reales Bauteil, so ergeben sich die in Bild 15 dargestellten absoluten Werte für die zulässige Verlustleistung. Hierbei ist bemerkenswert, daß die dargestellten HWK-Konzepte bezüglich ihres Kühlungsvermögens einen starken bauteilspezifischen Einfluß erkennen lassen. Dieser ist auf das unterschiedliche Verformungsverhalten und die realisierbaren Fertigungstoleranzen zurückzuführen. Das HWK-Konzept mit konischer Gestaltung des Kolbens weist das größte, spezifische Kühlungsvermögen auf.

Mit den beschriebenen HWK-Konzepten können die eingangs erläuterten Steuerungsstrategien problemlos realisiert werden. Die Gefahr der Ölschädigung besteht nicht.

Entsprechende Sorgfalt ist bei der Auswahl des Reibmaterials für HWK-Konzepte angebracht. Von besonderer Bedeutung sind die Kriterien:

- Steigender Reibwertkoeffizient über der Schlupfdrehzahl
- Gutes Präge- und Klebeverhalten
- Hohe mechanische Belastbarkeit
- Gutes Verschleißverhalten
- Hohe thermische Belastbarkeit
- Hohes Reibwertniveau

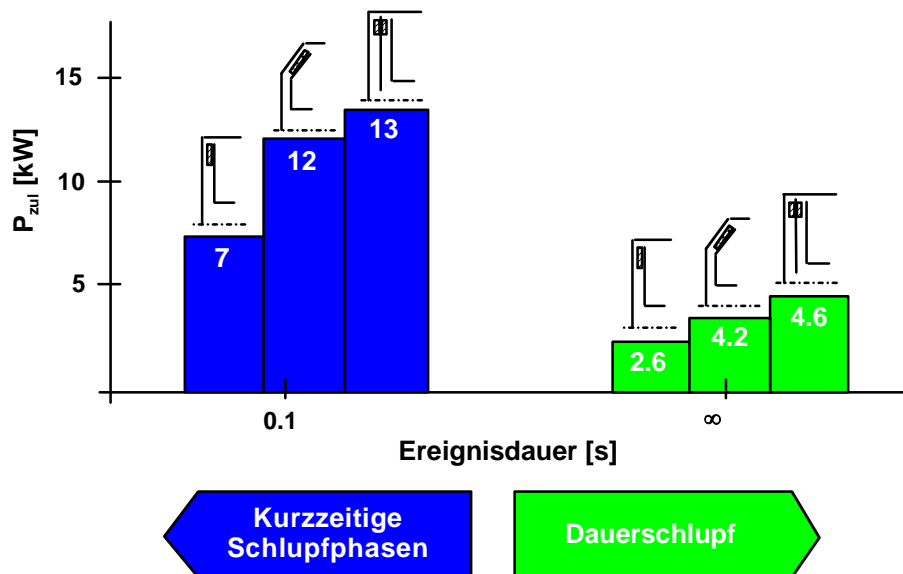


Bild 15: Zulässige Verlustleistung an der HWK (260mm Wandler) bei optimierter Kühlnut und maximalem Volumenstrom

## Der Dämpfer

LuK produziert im Jahr weltweit ca. 3.000.000 Wandlerüberbrückungskupplungen und Dämpfer in den verschiedensten Konfigurationen. Seit 1996 wird auch ein Zwei-Wege-Dämpfer in Serie produziert. Dieses innovative Dämpferkonzept bietet bei einigen Antriebssträngen und Motorisierungen erhebliche Vorteile.

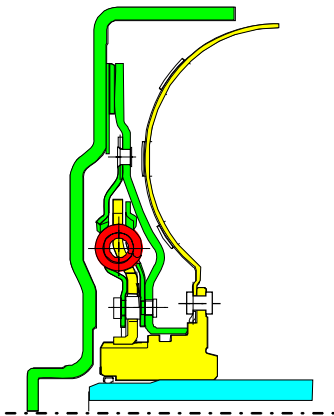
Beschreibt man die Schwingungseigenformen eines Antriebsstranges mit Hilfe eines 4-Massen-Modells (Motor-Turbine-Getriebe-Fahrzeug), so

schwingt in der dritten Eigenform die Getriebemasse relativ zum Fahrzeug und zur Turbinenmasse. Den größten Verdrehwinkel weist damit die Getriebeeingangswelle auf. Der Verdrehwinkel im Dämpfer ist vergleichsweise klein. Fällt diese Eigenfrequenz in den kritischen Drehzahlbereich des Fahrzeugs, der zwischen 900 1/min und 2000 1/min liegt, so kann es zu einer unangenehmen Geräuschentwicklung, dem Brummen, kommen. Eine Verringerung der Verdrehsteifigkeit des Dämpfers bleibt hier auf Grund seines kleinen Verdrehwinkels wirkungslos. Ein Weitwinkeldämpfer stellt also für dieses Problem keine Lösung dar.

Stattdessen würde eine Reduzierung der Steifigkeit der Getriebeeingangswelle einen positiven Einfluß ausüben, was aber aus Festigkeitsgründen in der Regel nicht möglich ist.

Zur Lösung dieses Problems hat LuK einen Dämpfer entwickelt, bei dem die Turbinenmasse verdrehfest mit dem Überbrückungskolben verbunden ist und der Dämpfer in Reihe mit der Getriebeeingangswelle geschaltet wird (Bild 16).

## Konventionelles Dämpferkonzept



## LuK- Zwei-Wege-Dämpfer

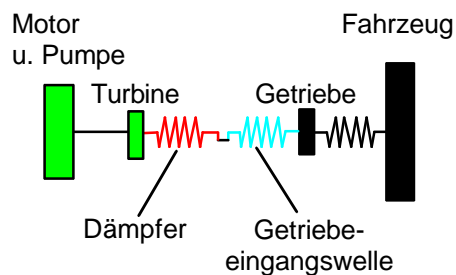
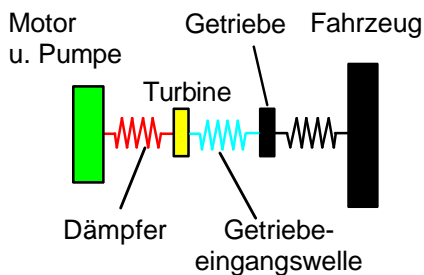
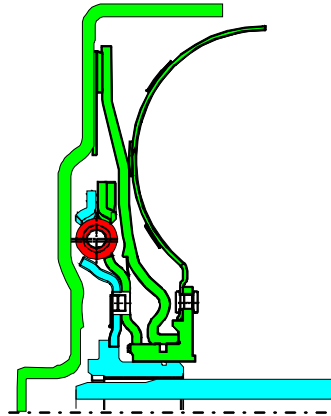


Bild 16: Wirkungsweise des LuK-Zwei-Wege-Dämpfers im Vergleich zum konventionellen Dämpferkonzept

Der konstruktive Aufbau des LuK-Zwei-Wege-Dämpfers bewirkt folgendes:

- Die Federsteifigkeiten des Dämpfers und der Getriebeeingangswelle sind in Reihe geschaltet, was in der Summe eine sehr weiche Federrate ergibt (dies war das ursprüngliche Ziel).
- Die Turbine ist verdrehfest mit dem Wandlergehäuse (Pumpe) verbunden und wirkt somit als zusätzliche Schwungmasse, wodurch die in den Triebstrang eingeleiteten Drehzahlungleichförmigkeiten reduziert werden.
- Durch starre Kopplung der Trägheitsmassen von Motor, Pumpe und Turbine weist der Antriebsstrang einen Freiheitsgrad weniger auf.

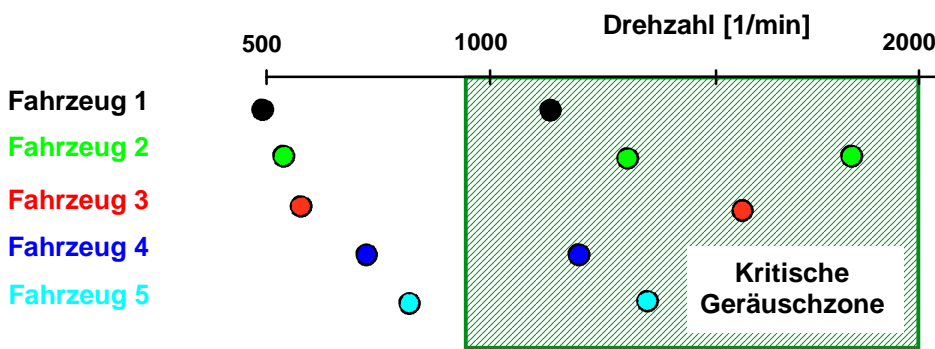
Die dritte Eigenfrequenz des Antriebsstranges kann immer dann zum Geräuschproblem werden, wenn sie in den kritischen Drehzahlbereich zwischen 900 1/min und 2000 1/min fällt. Simulationen mit typischen Triebstrangdaten zeigen, daß dies bei frontgetriebenen Fahrzeugen mit 8-

und 10-Zylindermotoren und heckgetriebenen Fahrzeugen mit 6- und 8-Zylindermotoren der Fall ist. Frontgetriebene Fahrzeuge mit 8- und 10-Zylindermotoren sind aber eher selten. Heckgetriebene Fahrzeuge mit 6- und 8-Zylindern eher die Regel. Für diese Fahrzeugtypen bietet der Zwei-Wege-Dämpfer daher meist deutliche Vorteile.

Durch Eliminierung der hier üblicherweise kritischen dritten Schwingungseigenfrequenz kann die Überbrückungskupplung früher und ohne Komforteinbußen überbrückt und damit der Verbrauch bei den hier betrachteten Fahrzeugtypen (Bild 17) um bis zu 6% reduziert werden.

In Bild 17 sind für verschiedene heckgetriebene Fahrzeugtypen, die aber alle mit dem gleichen Automatikgetriebe und dem gleichen Wandler bestückt werden, die Schwingungseigenfrequenzen des Antriebsstrangs dargestellt. Jeder Punkt in dem Diagramm markiert also eine Resonanzstelle des Antriebsstrangs und damit ein potentielles Schwingungs- oder Geräuschproblem. Gegenübergestellt sind die Schwingungseigenfrequenzen, die sich mit einem konventionellen Dämpfer ergeben mit denen, die bei Verwendung eines Zwei-Wege-Dämpfers auftreten. Man erkennt, daß bei Einsatz des Zwei-Wege-Dämpfers im gesamten kritischen Drehzahlbereich nur eine Resonanzstelle auftritt, die aber bei kleiner Hysterese des Dämpfers unkritisch wird. Ebenfalls bemerkenswert ist, daß der konventionelle Dämpfer bereits mit 15 Nm/Grad eine viel kleinere Federrate aufweist als der Zwei-Wege-Dämpfer mit 45 Nm/Grad. Dies bedeutet, daß beim Zwei-Wege-Dämpfer ein kleineres Federvolumen verbaut werden muß.

**Triebstrangresonanzen mit konventionellem Dämpfer**  
 Federrate des Dämpfers:  $c = 15 \text{ Nm/Grad}$



**Triebstrangresonanzen mit Zwei-Wege-Dämpfer**  
 Federrate des Dämpfers:  $c = 45 \text{ Nm/Grad}$

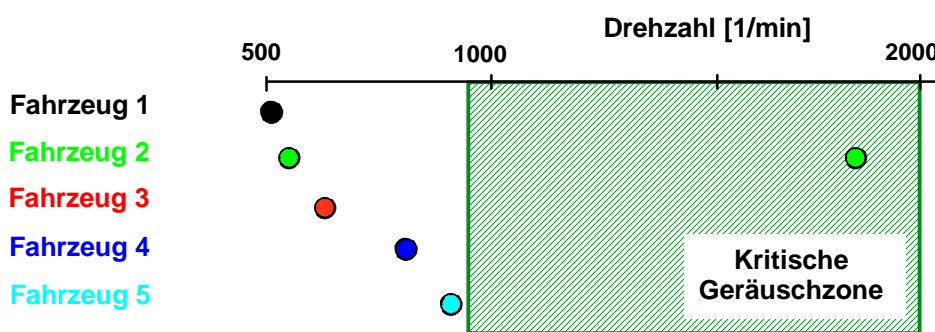


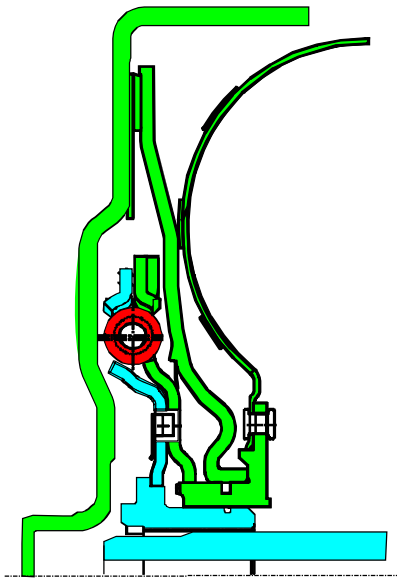
Bild 17: Eliminierung von kritischen Triebstrangresonanzen durch den LuK-Zwei-Wege-Dämpfer

Ein weiterer Gesichtspunkt ist, daß beim Zwei-Wege-Dämpfer-Konzept das Drehmoment ebenfalls im offenen Wandlerbetrieb durch den Dämpfer geleitet wird. Somit erhält man auch in diesem Betriebsmodus eine zusätzliche Schwingungsisolierung. Dies ist ein weiterer Vorteil, da bei einigen Fahrzeugtypen, z. B. bei Direkteinspritzern oder Fahrzeugen mit Zylinderabschaltung, im offenen Wandlerbetrieb ebenfalls Brummen auftreten kann.

Ferner sei bemerkt, daß der LuK-Zwei-Wege-Dämpfer auch für CVT-Anwendungen, auf Grund der hier vorliegenden Trägheitsmassenverteilung, geeignet ist.

Die Vorteile des LuK-Zwei-Wege-Dämpfers sind in Bild 18 zusammengefaßt.





#### Vorteile

- Reduzierter Verbrauch durch frühes Überbrücken
- Verbesserte Geräuschabkopplung durch Eliminierung einer Schwingungseigenform
- Auch wirkungsvoll im offenen Wandlerbetrieb

Bild 18: Vorteile des Zwei-Wege-Dämpfers

## Der Wandlerkreislauf in extrem schmaler Ausführung

Wie eingangs bereits erwähnt, sollte der zukünftige Wandler kleiner, leichter und kostengünstiger werden (Bild 9).

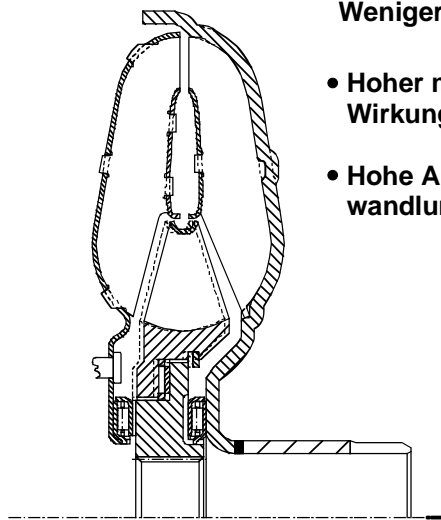
Eine geometrische Verkleinerung des hydrodynamischen Kreislaufs ohne eine gleichzeitige Änderung der Beschau felung ist aber bekanntermaßen nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich. Derartig ausgelegte Wandler kavitieren oder haben einen nicht akzeptablen Lastwertverlauf (Momentenaufnahmekapazität) über der Drehzahlwandlung.

Ziel ist es also, die Beschau felung von Pumpe, Turbine und Leitrad an die neuen geometrischen Verhältnisse eines extrem schmalen Wandlers anzupassen. Neben der Vermeidung von Kavitation ist besonderes Augenmerk auf den Lastwertverlauf zu legen:

- Um den Profildurchmesser des Wandlers im Vergleich nicht vergrößern zu müssen, ist ein ausreichendes Lastwertniveau erforderlich.
- Zur Minimierung der Stillstandsverluste sollte der Lastwert im Festbremspunkt (Stallbetrieb) möglichst klein sein. Der Schließvorgang der Überbrückungskupplung ist hingegen komfortabler und kann früher erfolgen, wenn der Lastwert im Bereich des Kupplungspunktes möglichst hoch ist. Zudem wird hierdurch die thermische Belastung der Überbrückungskupplung reduziert. Beide Kriterien zusammen erfordern demnach ein möglichst kleines Verhältnis zwischen Lastwert im Festbremspunkt und Lastwert im Kupplungspunkt.

Diesem Entwicklungsziel kommt der Umstand entgegen, daß die Auslegung des zukünftigen Wandlers in Verbindung mit der Überbrückungsstrategie nicht mehr durch den Kraftstoffverbrauch oder die Fahrleistung diktiert ist (vergleiche Seite 128). Die bei der klassischen Wandlerauslegung noch wichtigen Kriterien, wie ein hoher Maximalwirkungsgrad oder eine hohe Anfahrwandlung, sind demnach von untergeordneter Bedeutung. Die Entwicklung kann also wesentlich gezielter erfolgen. In Bild 19 sind die Anforderungen an den zukünftigen Wandler zusammengefaßt.

## Zielgrößen



### Weniger Wichtig

- Hoher maximaler Wirkungsgrad
- Hohe Anfahrwandlung

### Sehr Wichtig

- Extrem schmaler Torus
- Keine Kavitation
- Ausreichendes Lastwertniveau
- Hoher Kupplungspunkt
- Kleines Verhältnis zwischen Lastwert im Festbrems- und Kupplungspunkt
- Ausreichende Wärmespeicherkapazität

Bild 19: Anforderungen an den zukünftigen Wandler

LuK hat einen Wandler entwickelt, dessen Kreislauf im Vergleich zum konventionellen, kreisrunden Kreislauf axial um bis zu 45% schmaler ist. Der Lastwertverlauf über der Drehzahlwandlung ist mit dem eines kreisrund gestalteten Wandlers vergleichbar (siehe Bild 24). Ohne Verwendung entsprechender Werkzeuge, wie z. B. leistungsfähige Software zur numerischen Berechnung der Strömungsverhältnisse im Kreislauf und zur Auslegung der Schaufelgeometrie, sowie Rapid Prototyping zur schnellen und kostengünstigen Erstellung der geometrisch komplexen Prototyp-Schauflerräder, wäre eine solche Entwicklung nicht möglich.

Die Strömungszustände im Wandler sind besonders im Stallbetrieb und bei kleiner Drehzahlwandlung kritisch. Der Energieaufbau in der Pumpe sowie der Energieabbau in der Turbine aber auch die Umlenkung der Strömung im Leitrad (Impulsänderung) sind in diesem Betriebsbereich am größten. Vereinfacht ausgedrückt sind hier die Kräfte auf die Fluidteilchen am größten. Dies gilt prinzipiell für jeden Wandlertyp. Die Verhältnisse verschlechtern sich entschieden, wenn die Strömung "unnötig" in Betrag oder Richtung beschleunigt wird oder wenn der Strömung lokal Richtungsänderungen aufgezwungen werden, denen die Fluidteilchen auf Grund ihrer Trägheit nicht folgen können. Sofern man nicht konstruktiv gegensteuert, tritt dies bei extrem schmalen Wandlern ein.

In Bild 20 sind die Strömungsverhältnisse im Wandlerkreislauf einer frühen Konstruktion (erste Entwicklungsstufe) und der optimierten Konstruktion gegenübergestellt. Der Kreislauf der ersten Entwicklungsstufe besitzt bereits eine tränenförmige Form im Meridianschnitt. Durch diese Form wird gewährleistet, daß der reale Querschnitt des Strömungskanals annähernd konstant bleibt und unnötige Beschleunigungen oder Verzögerungen der Strömung vermieden werden. Trotzdem zeigt das Geschwindigkeitsfeld ein großes Ablösegebiet, das sich ausgehend von der Eintrittskante des Turbinenrades entlang der gesamten inneren Kanalbegrenzung (Innenschale) erstreckt.

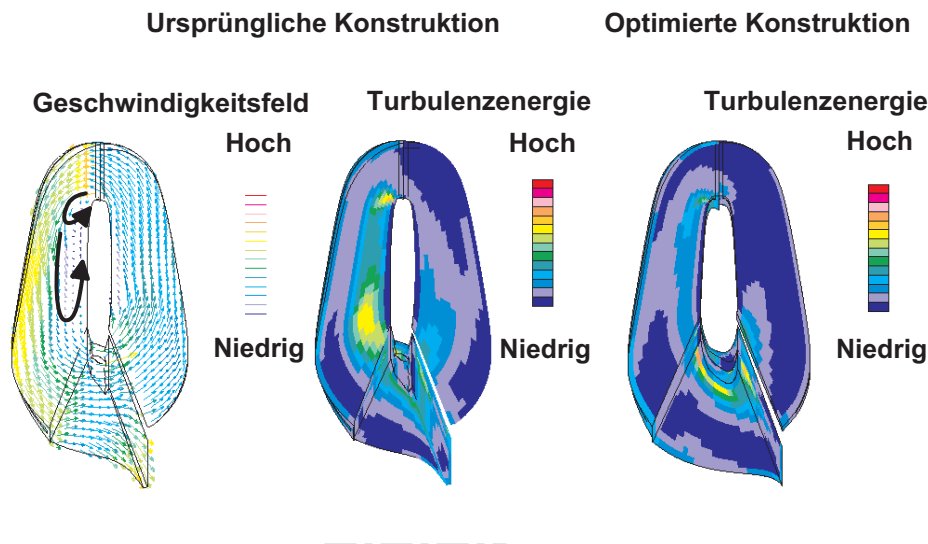


Bild 20: Optimierte Turbinenradgestaltung, Strömungsverhältnisse im „Stall“-Punkt

Dieses Ablösegebiet verengt den Strömungskanal erheblich und führt zu einer Drosselung des umlaufenden Volumenstroms und damit zu einer Reduzierung des Lastwertes. Zudem bildet sich eine Austauschzone, in der Energie von der „gesunden“ Umlaufströmung auf die Zirkulationsströmung im Ablösegebiet übertragen wird und dort zu annähernd 100% dissipiert wird. Diese ausgeprägte Verlustzone läßt sich anschaulich mit Hilfe der Turbulenzenergie darstellen.

Bei der optimierten Kreislaufform konnte durch eine angepasste Gestaltung der Innenschale und der Beschaukelung das Ablösegebiet und damit die Verluste erheblich reduziert werden. Dies trägt wesentlich zur günstigen Lastwertcharakteristik bei.

Das zentrale und weitaus schwierigste Problem bei der Gestaltung extrem schmaler Wandler ist die Vermeidung von Kavitation. Unter Kavitation versteht man das Entstehen mit nachfolgendem Zusammenbrechen gaserfüllter Hohlräume in der Flüssigkeitsströmung.

Wird nun der statische Absolutdruck in der Strömung kleiner als der Dampfdruck, so bilden sich Dampfblasen, die von der Strömung mitgerissen werden. Diese Hohlräume schnüren den Kanalquerschnitt ein und drosseln den umlaufenden Volumenstrom. Der Lastwert und der Wirkungsgrad sinken drastisch ab. An Orten mit höherem statischen Druck implodieren die Dampfblasen wieder. Das Zusammenbrechen erfolgt sehr rasch und die Flüssigkeitsteilchen schlagen mit sehr großer Geschwindigkeit auf die Kanalwand auf (jet-impact), was zur mechanischen Zerstörung des Laufrades führen kann.

Bei Wandlern stellt der Ansaugbereich der Pumpe, also der Raum zwischen Pumpe und Leitrad, das Gebiet kleinsten Druckes dar. Um den statischen Druck am Leitradaustritt so hoch wie möglich zu halten, müssen die Profilverluste im Leitrad reduziert werden. Bild 21 zeigt die Strömungsverhältnisse im Leitradkanal einer frühen Konstruktion (erste Entwicklungsstufe). Man erkennt in dem dargestellten Zylinderschnitt ein ausgeprägtes Ablösegebiet auf der Saugseite der Leitrad-schaukel. Die Nachlaufströmung des Leitrades ist gekennzeichnet durch starke Verwirbelungen. Beide Erscheinungen führen zur einer drastischen Druckabsenkung im Leitradkanal und in der Nachlaufströmung des Leitrades (s. Bild 21 und Bild 23). Die ursprüngliche Konstruktion konnte daher bei hoher Antriebsdrehzahl auf Grund von Kavitation im Ansaugbereich der Wandlerpumpe nicht unterhalb einer Drehzahl-wandlung von  $sr=0,5$  betrieben werden.

## Ursprüngliche Konstruktion

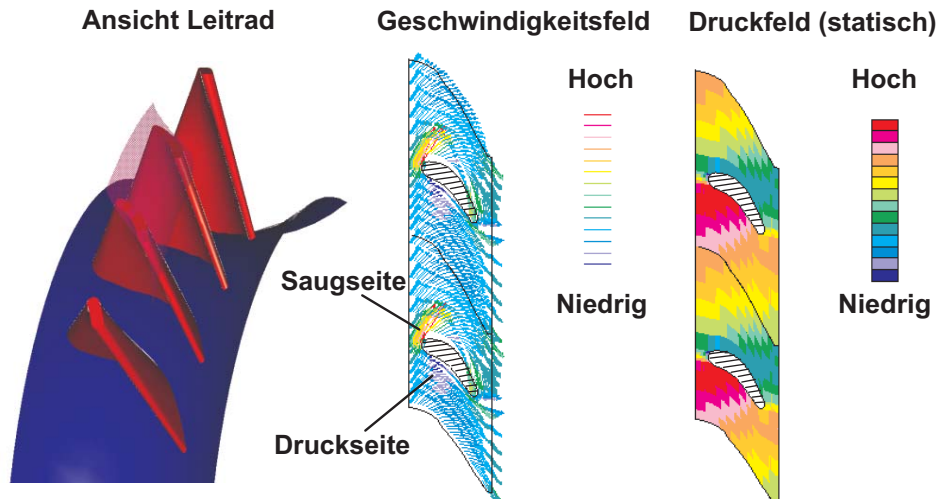


Bild 21: Strömungsfeld und statisches Druckfeld bei einer nicht optimierten Leitradbeschaufelung, Strömungsverhältnisse im „Stall“-Punkt

Bild 22 zeigt das Geschwindigkeitsfeld und das statische Druckfeld der optimierten Leitradkonstruktion. Das Ablösegebiet auf der Saugseite der Leitrad-schaufel ist erheblich kleiner als bei der ursprünglichen Konstruktion. Ebenso ist die Nachlaufströmung annähernd wirbelfrei. Beide Erscheinungen führen zu einer Verringerung der Druckabsenkung im Leitrad und damit zu einer relativen Anhebung des Druckes im Bereich des Pumpeneintritts.

Als Maß für die Güte der Energieübertragung ist in Bild 23 das Gesamtdruckfeld der ersten Entwicklungsstufe dem der optimierten Konstruktion gegenübergestellt. Ein Vergleich der Verlustbeiwerte beider Profile zeigt, daß beim optimierten Leitrad die Profilverluste um mehr als 60% reduziert werden konnten.

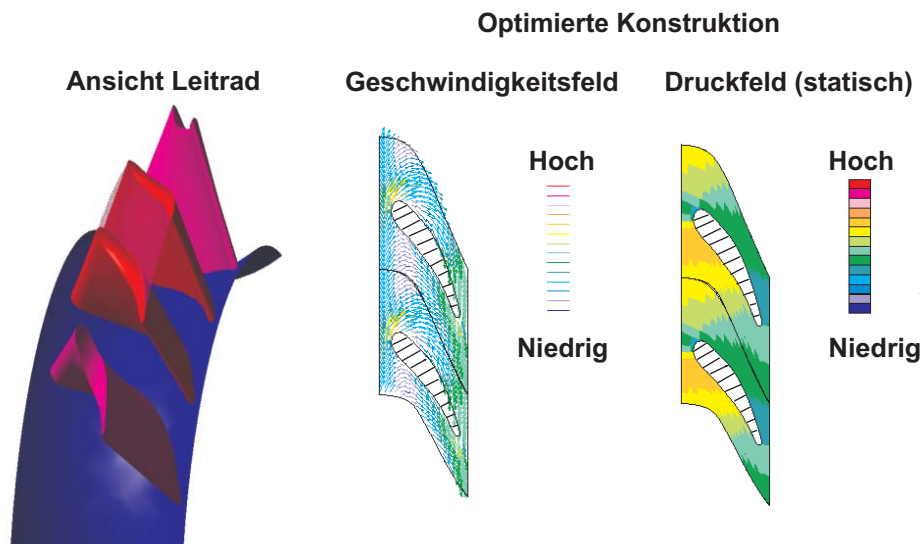


Bild 22: Strömungsfeld und statisches Druckfeld bei der optimierten Leitradbeschaufelung, Strömungsverhältnisse im „Stall“-Punkt

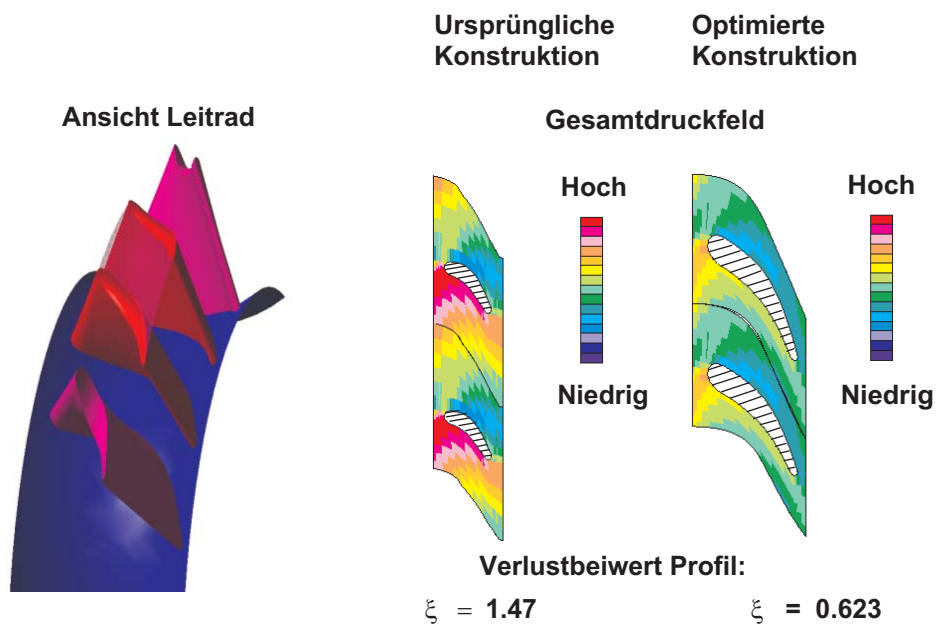


Bild 23: Vergleich der Profilverluste: Ursprüngliche und optimierte Leitradkonstruktion, Strömungsverhältnisse im „Stall“-Punkt

Die optimierte Konstruktion des extrem schmalen Wandlers ist kavitationsfrei. Die erzielte Güte der Energieübertragung kommt der eines konventionellen, kreisrunden Wandlers nahe (Bild 24). Funktionelle Nachteile treten bei Einsatz dieses extrem schmalen Wandlers in Verbindung mit der entsprechenden Überbrückungsstrategie in keiner Hinsicht auf.

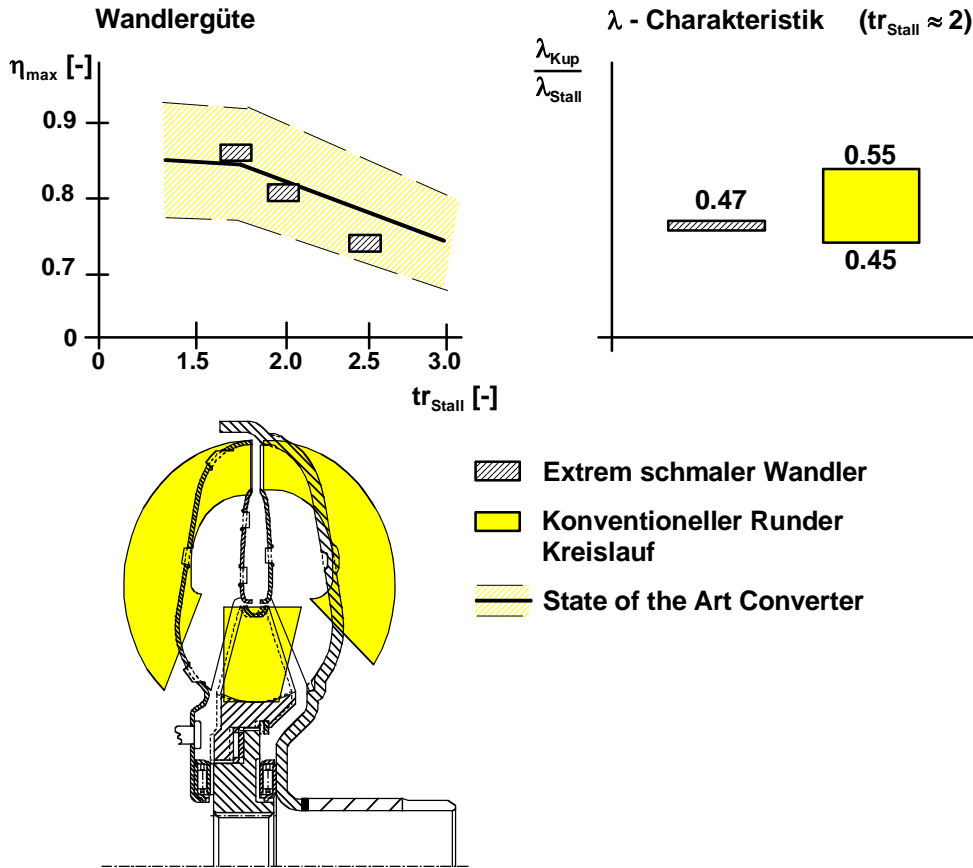


Bild 24: Vergleich der erzielten Güte der Energieübertragung: Konventioneller, kreisrunder Wandler und extrem schmaler LuK-Wandler



Vergleicht man Einbauraum und Gewicht, so ergibt sich für den extrem schmalen Wandler mit Überbrückungskupplung im Vergleich zum konventionellen, kreisrunden Wandler, je nach Anordnung und Auswahl des Konzeptes für die Überbrückungskupplung, ein Vorteil zwischen 20% und 26% (Bild 25 und 26). Der gewonnene Einbauraum kann entweder der Getriebekonstruktion bereitgestellt werden oder aber verkürzt den Antriebsstrang im Fahrzeug.

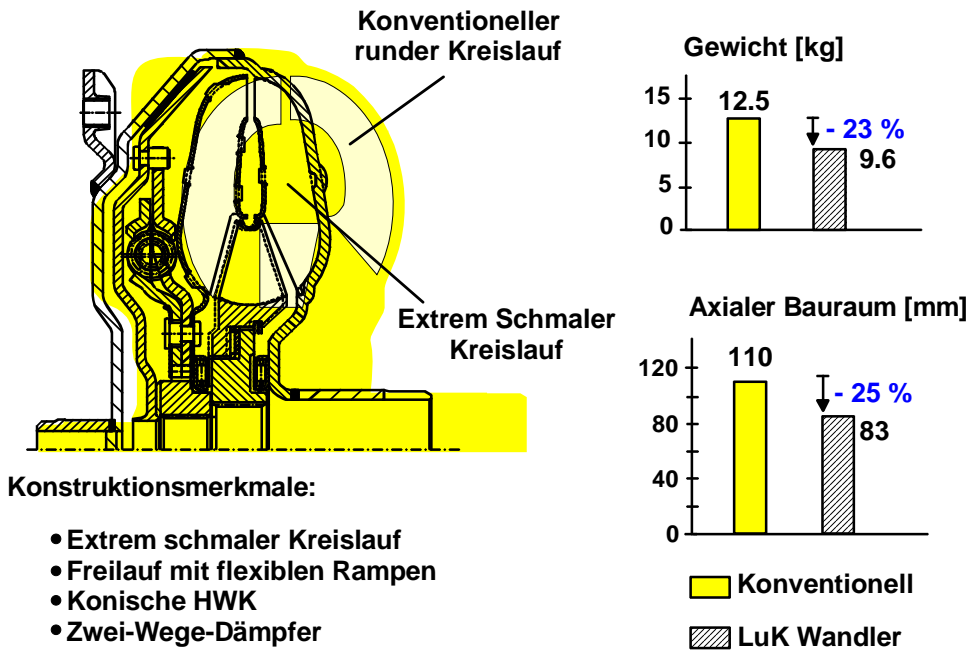
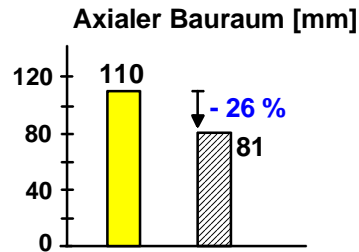
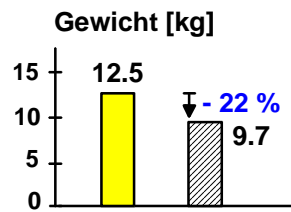
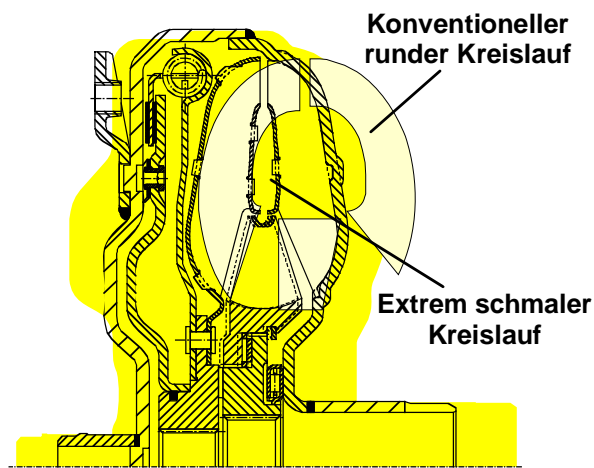


Bild 25: Bauraumvergleich für 260 mm Wandler: Konventioneller, kreisrunder Wandler und extrem schmaler LuK-Wandler mit Zwei-Wege-Dämpfer und konischer Überbrückungskupplung



■ Konventionell

▨ LuK Wandler

**Konstruktionsmerkmale:**

- Extrem schmaler Kreislauf
- Freilauf mit flexiblen Rampen
- Zweireibflächenkupplung HWK
- Weitwinkeldämpfer

Bild 26: Bauraumvergleich für 260 mm Wandler: Konventioneller, kreisrunder Wandler und extrem schmaler LuK-Wandler mit Weitwinkeldämpfer und Zweireibflächenkupplung für 260 mm Wandler

Zur Reduzierung der Herstellungskosten hat LuK die Konstruktion des Wandlers in einigen wichtigen Details weiterentwickelt:

- Geringerer Materialeinsatz durch extrem schmalen Torus
- Einsatz eines axialen Rampenfreilaufs
- Spritzgussleiträder mit integrierten Funktionselementen
- Tiefgezogene bzw. gestanzte Schlitze zur Schaufelbefestigung
- Reduzierte Schaufelzahl
- Einsatz innovativer Fertigungsprozesse
- Einsatz von gesinterten Naben
- Reduzierung spanabhebender Bearbeitungsgänge

## Zusammenfassung

Die Entwicklung der modernen Antriebstechnik, der Wunsch nach höheren Fahrleistungen, reduziertem Kraftstoffverbrauch und geringeren Emissionen sowie der stetig kleiner werdende Bauraum erfordern ein Umdenken in der Auslegung und Konzeption des modernen Wandler.

Der Wandler mit seinen drei Bauelementen Überbrückungskupplung, Dämpfer und hydrodynamischer Kreislauf ist als System zu betrachten. Als verknüpfendes Bindeglied dieser drei Elemente kommt der Strategie der Überbrückungssteuerung eine zentrale Bedeutung zu. Mit einer sorgfältig auf die Belange des jeweiligen Fahrzeugs abgestimmten Steuerungsstrategie und nur mit Hardwareelementen, die den spezifischen Anforderungen gerecht werden, läßt sich das vorhandene Potential des Systems Wandler voll nutzen.

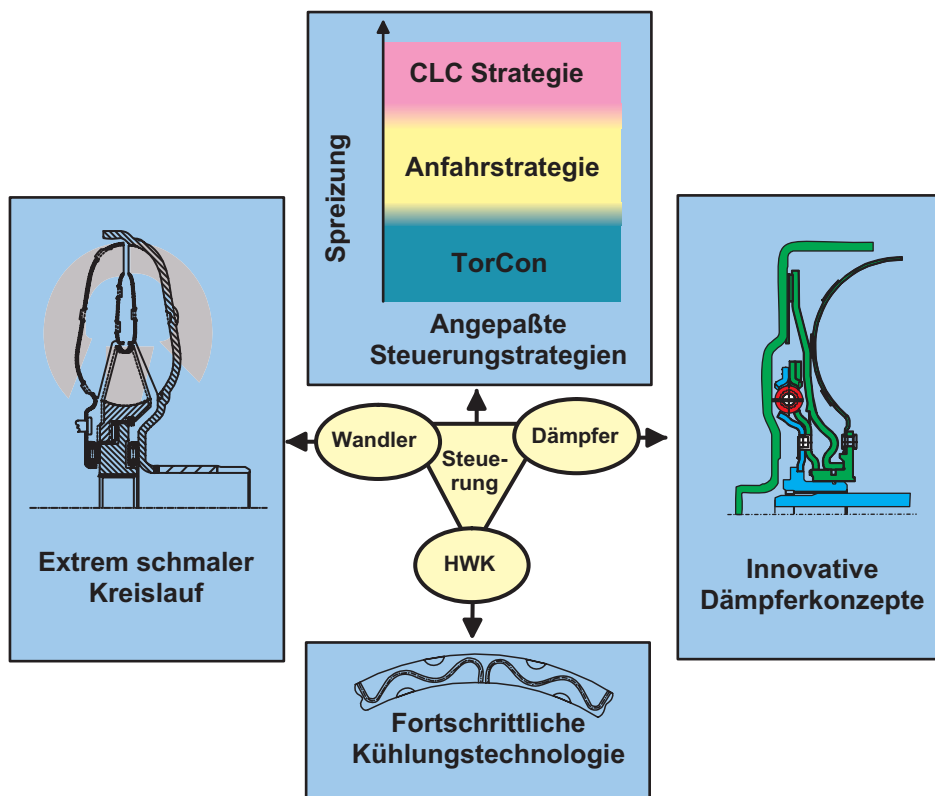


Bild 27: Der Wandler als System - Zusammenfassung

Dieses Potential lässt je nach Anwendungsfall eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und eine Steigerung der Fahrleistungen von jeweils bis zu 10% zu. Mit den von LuK entwickelten Wandlerkonzepten (s. Bild 27) kann dieses Potential voll genutzt werden. Bei sinkenden Bauteilkosten wird zudem eine erhebliche Einsparung in Gewicht und Bauraum ermöglicht.

## Literatur

- [1] Dr. techn. R. Fischer, Dipl.-Ing. D. Otto:  
Wandlerüberbrückungssysteme; 4. internationales LuK-Kolloquium 1994, "Leichter Schalten umweltfreundlicher und komfortabler Fahren", Seiten 133 ff.
- [2] Dr. techn. R. Fischer:  
Das TorCon-System – Ein neues Wandlerüberbrückungs-Konzept als Beitrag zur Ökonomie und Fahrfreude; VDI Berichte Nr. 1175, "Getriebe in Fahrzeugen 1995", Seiten 301 ff.
- [3] Dave Piper:  
Automatic Transmissions – An American Perspective; VDI Berichte Nr. 1175, "Getriebe in Fahrzeugen 1995", Seiten 25 ff.