





---

# Das Kurbel-CVT

**Wirtschaftlicher als ein Handschaltgetriebe und  
komfortabler als ein heutiges CVT ?**

Oswald Friedmann  
Wolfgang Haas  
Ulrich Mair

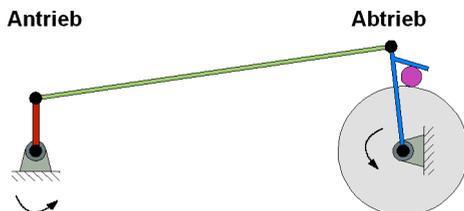
## Einleitung

Kaum vorstellbar, dass es ein solches Getriebe geben könnte. Und doch sieht LuK einen Hoffnungsschimmer, ein so ehrgeiziges Ziel zu erreichen. Dazu wurden unkonventionelle Überlegungen angestellt, die zu einem neuen Getriebekonzept mit neuen und vermutlich auch ungewohnten Eigenschaften führten.

Heutzutage besteht nur die Wahl zwischen den komfortablen, aber auch teuren Automatikgetrieben oder den kostengünstigeren Handschaltern.

Eine Kostenbetrachtung ergab, dass bei allen in Serie existierenden Getriebetypen ein recht hoher Aufwand erforderlich ist, um eigentlich selten auftretende, aber dennoch wichtige Fahrzustände abzudecken. Anfahr- und Rückwärtsgang machen einen erheblichen Anteil der Getriebekosten aus, insbesondere wenn die dazu nötige hydraulische oder elektromotorische Aktorik mit dazugechnet wird.

Bei Geared-Neutral-Getrieben, zum Beispiel Reibradgetrieben, wurde schon versucht, das Anfahren und Rückwärtsfahren ohne zusätzliche Elemente zu realisieren. Dazu muss der Variator bis zur Drehzahl 0 heruntergeregt werden können. Allerdings scheinen Regelprobleme den Wegfall des Anfahr- und Rückwärtsganges zu verhindern. LuK hat deshalb nach einem völlig andersartigen Variator gesucht, mit dem das verlustbehaftete Anfahr- und Rückwärtsgang-Element, der Festübersetzung ersetzt werden können.



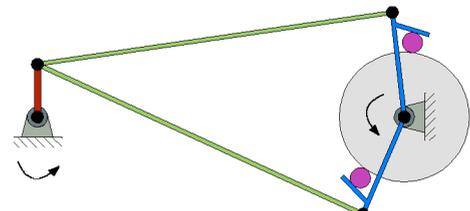
**Bild 1:** Funktionsprinzip Kurbel-CVT

Im Folgenden soll ein CVT vorgestellt werden, dessen Variator genau diese Möglichkeit bietet. Ein entsprechendes Prinzipgetriebe wurde bei LuK bereits aufgebaut und seine grundsätzliche Funktion nachgewiesen. Auch erste Erfahrungen im Fahrzeug wurden bereits gewonnen.

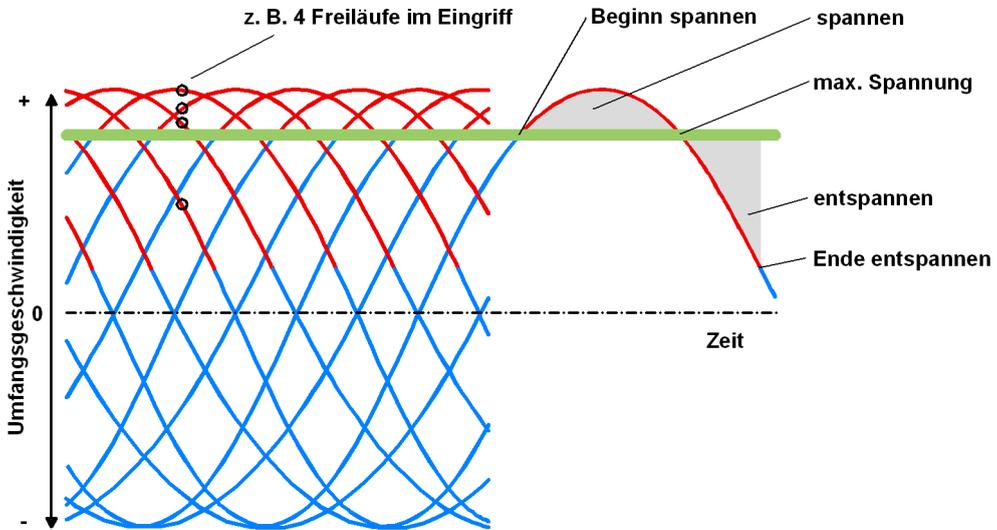
## Das Grundprinzip

Das Grundprinzip beruht auf der an sich bekannten Idee, die Kraft über veränderbare Hebel zu übertragen [1]. Bild 1 zeigt den schematischen Aufbau. Der Antrieb besteht aus einer Kurbel, die über ein Pleuel mit einem Freilauf am Abtrieb verbunden ist. Da der Kurbelradius am Antrieb deutlich kleiner ist als der Drehpunkt-Abstand am Abtrieb bzw. Freilauf, macht der Freilauf hin- und herschwenkende Bewegungen, wenn sich die Kurbelwelle dreht. Der Freilauf nimmt den Abtrieb immer dann mit, wenn seine Umfangsgeschwindigkeit größer als die des Abtriebes ist.

Damit lässt sich noch kein ausreichend gleichförmiges Moment auf den Abtrieb übertragen. Deshalb müssen mehrere dieser Anordnungen zeitlich versetzt parallel geschaltet werden. Bild 2 zeigt, wie eine Kurbel mit zwei Pleuel auf zwei Freiläufe wirken, die um fast  $180^\circ$  versetzt nacheinander eingreifen. Zusätzlich können zum Beispiel sechs dieser Kurbel-CVT axial hintereinander so angeordnet werden, dass dann die zwölf Freiläufe nacheinander zum Eingriff kommen.



**Bild 2:** Funktionsprinzip mit zwei Pleuel



**Bild 3:** Verlauf der Umfangsgeschwindigkeiten

Bild 3 zeigt den Verlauf der Umfangsgeschwindigkeiten über der Zeit für eine solche Anordnung. Unterhalb der Nulllinie bewegen sich die Freiläufe relativ zum Gehäuse rückwärts, oben vorwärts. Die grüne Linie entspricht der Abtriebsdrehzahl. Die jeweils eingreifenden Freiläufe sind rot, die nicht eingreifenden blau gekennzeichnet.

Es wird zunächst erwartet, dass die Abtriebsgeschwindigkeit bzw. -drehzahl im wesentlichen der Einhüllenden der maximalen Kurbelgeschwindigkeiten folgt. Wegen der Elastizität der Freiläufe und der Pleuel, die praktisch einige Grad Verdrehung zulässt, verläuft die Abtriebsdrehzahl unter den maximalen Drehzahlen der Freiläufe.

Solange der Freilauf eine höhere Umfangsgeschwindigkeit als der Antrieb hat wird er gespannt und Moment aufgebaut. Danach baut sich das Moment ab. Der Freilauf bleibt aber noch einige Zeit im Eingriff. Die Zeitdauer, in der ein Pleuel Moment übertragen kann, wird dadurch beträchtlich erhöht.

Erst nach vollständiger Entspannung läuft er wieder frei. Die eingeschlossenen Flächen während dem Spannen und Entspannen sind dabei gleich.

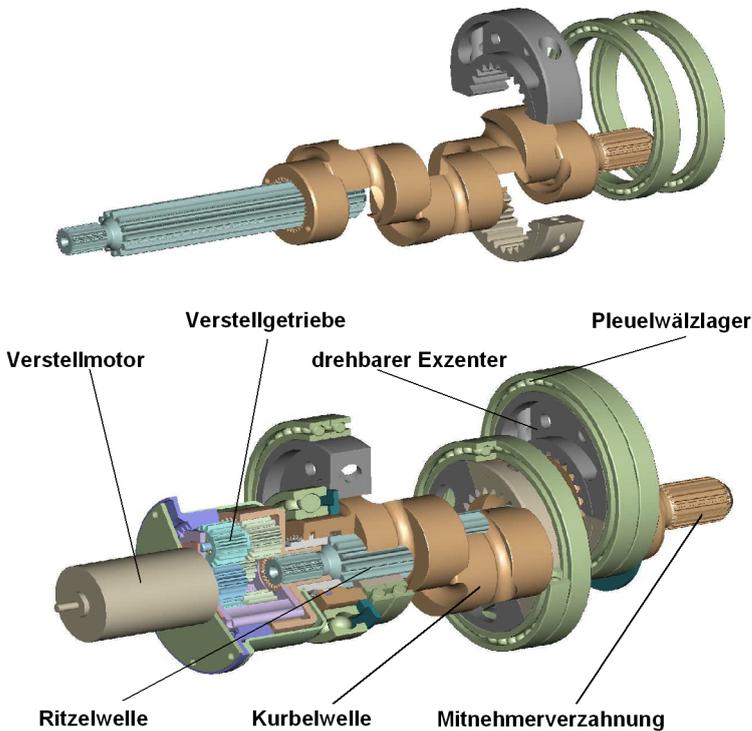
Weil mehrere Freiläufe gleichzeitig eingreifen und weitere Weichheiten und Massen die Drehmomentschwankung glätten, ergibt sich eine nahezu gleichbleibende Abtriebsgeschwindigkeit. Die Anzahl der gleichzeitig eingreifenden Freiläufe wächst mit dem Moment, gleichzeitig wird das Gesamtmoment auch auf mehrere Freiläufe verteilt.

## Die Verstellung der Übersetzung

Soll nach dem vorgestellten Prinzip der Momentenübertragung die Gesamtübersetzung entsprechend den Anforderungen im Fahrzeug von Unendlich (Fahrzeugstillstand) bis 2,1 (Overdrive) variiert werden, so muss der Antriebsradius der Kurbelwelle bis Null verstellt werden. Wie das konstruktiv realisiert werden kann, ist aus Bild 4 ersichtlich.

Der Antrieb besteht wie bei einer Kurbelwelle aus einer festen Kurbelkröpfung und einen um diesen drehbare Exzenter. Dabei haben die beiden Drehzentrumsabstände jeweils den gleichen Betrag. Die drehbaren Exzenter haben eine Innenverzahnung, die in eine zentrale Ritzelwelle eingreift und deren Kopfkreis als Lagerung dient. Wird die zentrale Ritzel-





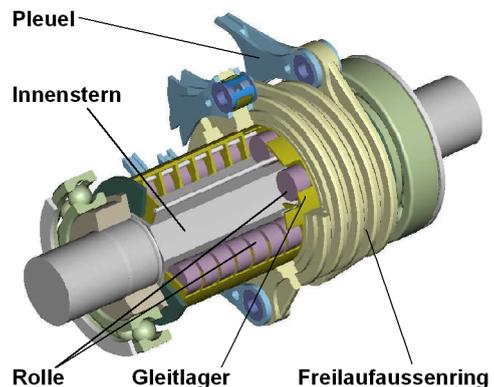
**Bild 6:** Ansicht Antriebswelle

Am linken Wellenende ist die Verstelleinrichtung zu sehen, welche die Aufgabe hat, die Ritzelwelle gegenüber der Kurbelwelle zu verdrehen, um damit die Übersetzung des Getriebes zu verändern. Für den gesamten Übersetzungsbereich ist etwa eine Umdrehung der Ritzelwelle notwendig. Zwischen dem Elektromotor für die Verstellung (etwa 150 W) ganz links und dem Kurbelwellenende befindet sich ein Planetengetriebe mit einer Übersetzung von etwa 200, das mit der Kurbelwelle und der Ritzelwelle verbunden ist. Das Gehäuse des Elektromotors dreht sich mit der Kurbelwelle, die elektrische Energie wird über Schleifringe zugeführt. Somit dreht sich der Elektromotor und das Verstellgetriebe in sich immer nur dann, wenn verstellt wird. Wird nicht verstellt, laufen Kurbel- und Ritzelwelle mit dem Verstellgetriebe als Block um.

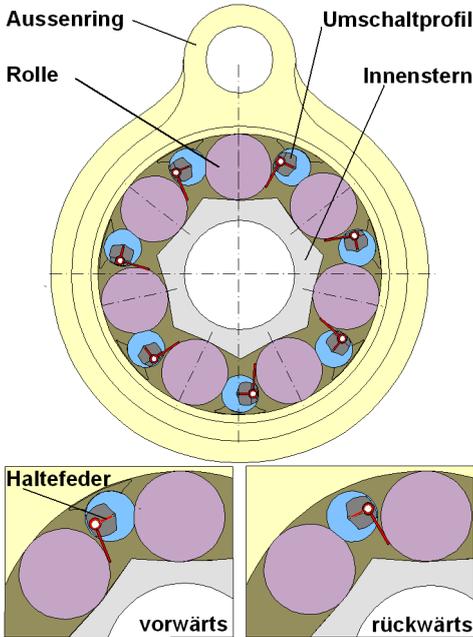
## Die Abtriebswelle

Die Abtriebswelle enthält die Freiläufe, auf die die Pleuel das Moment übertragen. Bild 7 zeigt eine Ansicht, in der am rechten Ende einige Pleuel mit ihren Freiläufen zu sehen sind. Die aufgeschnittenen Partien geben die Sicht frei auf die Rollen der Freiläufe. Sie sind als Rollenfreiläufe mit Innenstern ausgeführt. Das kleine Pleuelauge greift direkt über ein Gleitlager in den Außenring ein, dieser wird über das als Käfig ausgebildete Gleitlager auf dem Innenstern gelagert. Die Lagerung im Gehäuse erfolgt an den beiden Wellenenden, das Drehmoment wird vom Innenstern direkt an den Differenzialkorb weitergeleitet.

Durch die Aufteilung der Pleuel in oben und unten, und damit in ziehende und drückende Kräfte, heben sich die Querkräfte beim gleichzeitigen Eingriff mehrerer Freiläufe teilweise auf, was den Lagerkräften zugute kommt.



**Bild 7:** Ansicht Abtriebswelle

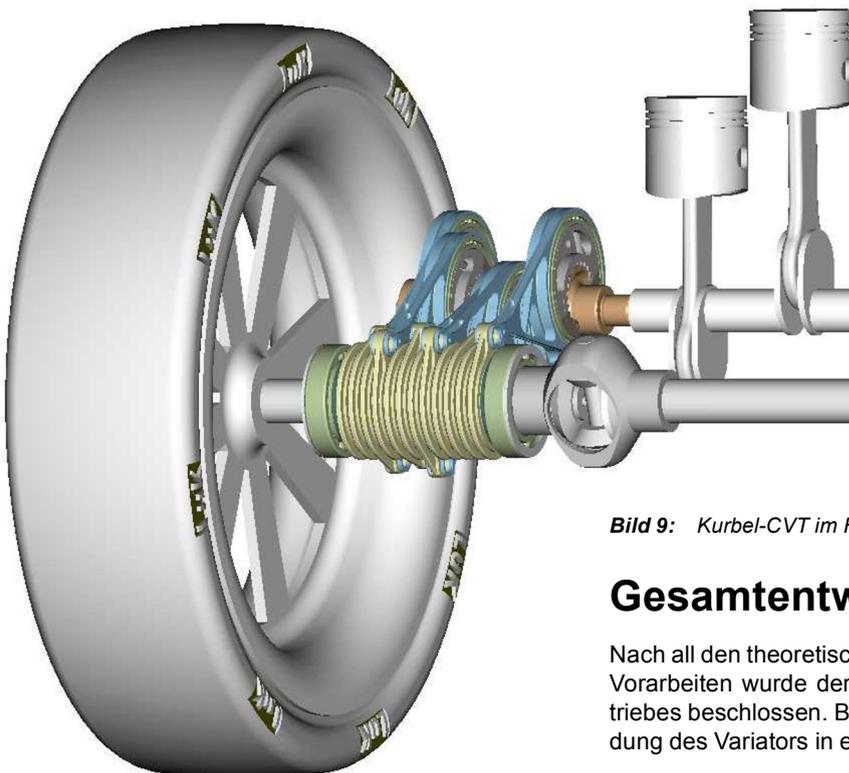


**Bild 8:** Vorwärts-Rückwärtsumschaltung

Zum Rückwärtsfahren müssen die Freiläufe in ihrer Wirkrichtung umschaltbar sein. Wie das funktioniert, zeigt ein Querschnitt in Bild 8.

Der Innenstern ist symmetrisch für beide Drehrichtungen ausgeführt, die Drehrichtungsumschaltung erfolgt durch Ändern der Krafrichtung der Haltefedern für die einzelnen Rollen um ca. 180°. Dazu werden die Umschaltprofile, die durch alle Freiläufe hindurchgehen und die Haltefedern tragen, durch eine im Bild nicht gezeigte Einrichtung gleichzeitig verdreht. Alle anderen Funktionen sind bei Rückwärtsfahrt gleich wie bei Vorwärtsfahrt, nur der Regelbereich wird eingeschränkt.

Bei einem Radmoment von z. B. 1700 Nm muss der einzelne Freilauf wegen der Lastverteilung auf mehrere Freiläufe nur max. 600 Nm übertragen. Allerdings wird er mit Frequenzen bis zu 100 Hz bei Hüben bis fast 40 mm beaufschlagt.



Zur Veranschaulichung der Größenverhältnisse ist der Variator in Bild 9 schematisch, aber maßstäblich, mit Verbrennungsmotor und Rad dargestellt. Hier soll verdeutlicht werden, dass das Moment ohne weitere Zahnradstufen und Kuppelungen direkt vom Motor zur Achse übertragen wird.

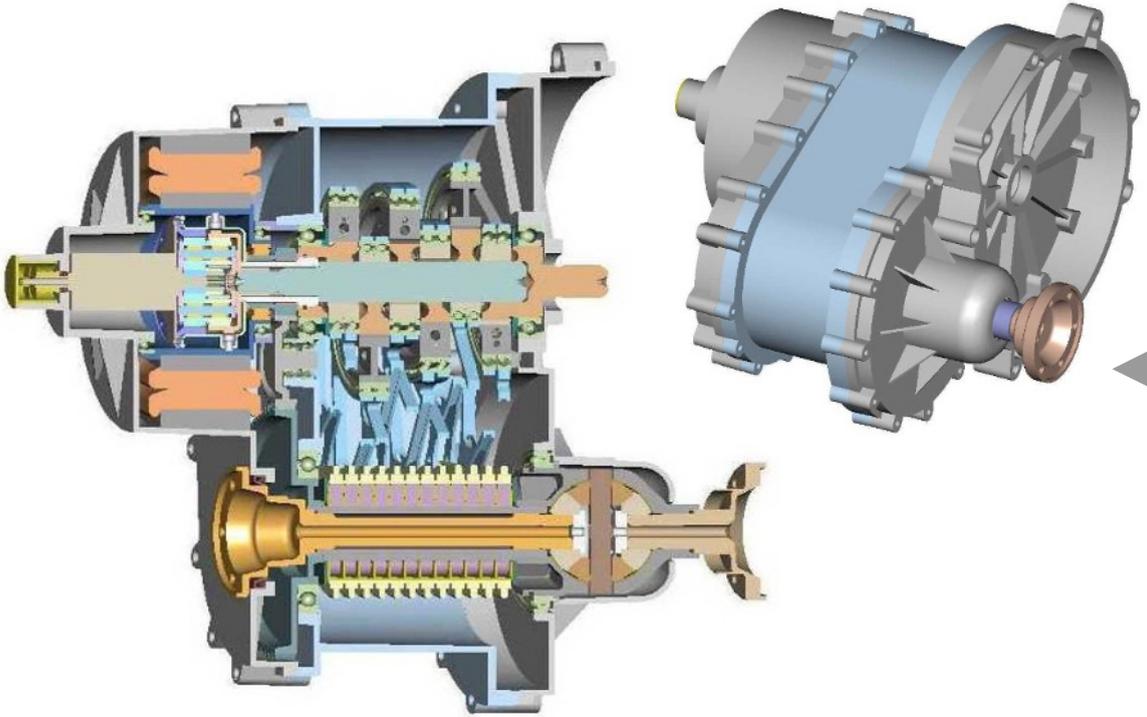
**Bild 9:** Kurbel-CVT im Fahrzeug

## Gesamtentwurf

Nach all den theoretischen und konstruktiven Vorarbeiten wurde der Bau eines Proto-Getriebes beschlossen. Bild 10 zeigt die Einbindung des Variators in einen Gesamtgetriebe-

entwurf. Zur Erzeugung des vom Fahrer gewohnten Schubmoments ist hier eine Lösung mit einer E-Maschine gezeigt. Diese E-Maschine ist über eine Zahnradstufe mit dem Abtrieb oder/und direkt mit dem Verbrennungsmotor verbindbar. Dadurch sind viele Kombinationen von Starter, Generator, Verbrennungsmotor

Das Kurbel-CVT kommt ohne E-Maschine auf ein Gesamtgewicht von kleiner 40 kg, was etwa dem entsprechenden Handschaltgetriebe plus Kupplung entspricht. Die Anzahl der verschiedenen Teile ist kleiner als bei einem Handschaltgetriebe, dafür ist der Wälzlageranteil höher.



**Bild 10:** Ansicht Gesamtgetriebe

mit Zusatzfunktionen, Rekuperation und Booster möglich.

Der übliche axiale Bauraum für ein Querge triebe reicht grob für eine 8 kW-Maschine in Achslage des Verbrennungsmotors.

Das kritische Konstruktionsmaß des Kurbel-CVT ist der axiale Abstand zwischen der Flanschfläche zum Verbrennungsmotor und der Flanschfläche zur kurzen Gelenkwelle. Es wird im Wesentlichen durch die Länge des Variators bestimmt und ist z. Zt. etwa 20 mm länger als bei dem entsprechenden Handschaltgetriebe.

## Der Wirkungsgrad

Nachdem ein solches Getriebe ohne E-Maschine und noch ohne Umschaltmöglichkeit für Rückwärtsfahrt aufgebaut wurde, stellte sich sehr schnell die Frage nach dem Wirkungsgrad. Die bisher gemessenen Werte sind in Bild 11 im Vergleich mit einem Schaltgetriebe und verschiedenen CVTs gezeigt. Die obere Einhüllende der CVT-Wirkungsgrade stellt den theoretisch möglichen Wirkungsgrad eines zum Kurbel-CVT leistungsgleichen CVT dar, unter Verwendung der wirkungsgradoptimierten LuK CVT-Technik [2], [3].

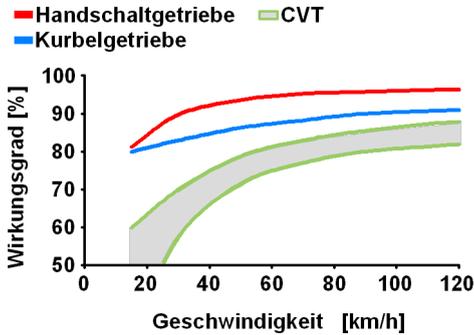


Bild 11: Wirkungsgradvergleich

Das Kurbel-CVT hat offensichtlich vor allem bei kleinen Geschwindigkeiten und Lasten sein höchstes Potenzial und steht dem Handschaltgetriebe kaum nach. Geht man davon aus, dass ein heutiges CVT seinen schlechteren Wirkungsgrad gegenüber dem Handschaltgetriebe durch die höhere Spreizung und die Stufenlosigkeit an sich mehr als kompensieren kann, so hat das Kurbel-CVT ein hohes Potenzial zur Reduktion des Verbrauchs. Hinzu kommt, dass gegenüber dem Handschaltgetriebe oder CVT die Anfahr- bzw. Schaltverluste entfallen.

Die größte Verlustquelle im Kurbel-CVT sind theoretisch die Freiläufe, während sie überholt werden. Deshalb kommt der Vorspannkraft und der Führung der Rolle außerhalb des Eingriffs eine besondere Bedeutung zu. In Verbindung mit den hohen Anforderungen an die Dynamik des Freilaufs ist hier ein Schwerpunkt der weiteren Entwicklung zu sehen.

## Anfahren

Beim Anfahren und im Fahrzeugstillstand kommt dem Kurbel-CVT die in Abschnitt *Das Grundprinzip* beschriebene Elastizität der Pleuel und Freiläufe zugute. Damit lässt sich bei stillstehendem Fahrzeug und kleinen Exzentrizitäten des Kurbeltriebes das Kriechmoment einstellen, und zwar weitgehend verlustfrei, was bei Wählern und Kupplungen nicht der Fall ist.

In Bild 12 ist dazu jeweils das maximale Radmoment und Motormoment über dem Kurbel-

radius dargestellt. Kurbelradius Null entspricht der Übersetzung Unendlich, der max. Radius dem OD. Rechts ist der Bereich ("C"), in dem das maximale Radmoment durch das maximale Motormoment mal der wirksamen Übersetzung gegeben ist. Im mittleren Bereich ("B") bestimmt das rutschende Rad selbst das max. Radmoment. Ganz links ist schließlich der Bereich ("A"), in dem das Radmoment durch die Kurbelstellung bestimmt wird. In diesem Bereich ist die Übersetzung Unendlich, da die Rutschgrenze nicht erreicht ist, und das Fahrzeug steht. Ohne Berücksichtigung der Verluste wird der Motor auch kein Moment abgeben, beim Gasgeben würde er einfach frei hochdrehen. Der Geschwindigkeitsverlauf für diesen Fall ist in Bild 13 in Anlehnung an Bild 3 dargestellt. Es zeigt, dass der Freilauf praktisch die ganze Zeit Moment überträgt, da nach dem Entspannen sofort wieder der Spannbereich beginnt. So kann mit dem eingestellten Kurbelradius das Radmoment relativ genau vorgegeben werden.

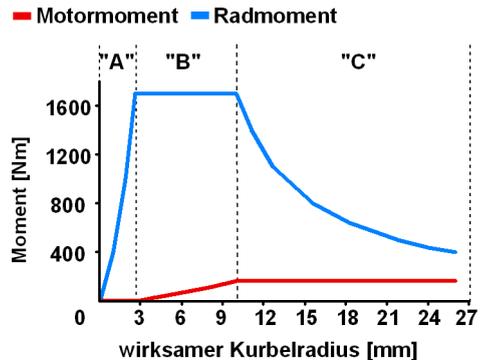


Bild 12: Max. Rad- und Motormoment

Durch die Untersetzung bis Unendlich und die Vermeidung von Kupplungs- bzw. Wandlerverlusten ist eine hervorragende Anfahr-dynamik gegeben.

Der wirksame Kurbelradius Null wurde mechanisch als Anschlag ausgebildet, so dass die Stellung Unendlich ohne zu regeln einfach angefahren werden kann. Dies ist bei anderen Gared-Neutral Konzepten nicht möglich [4].

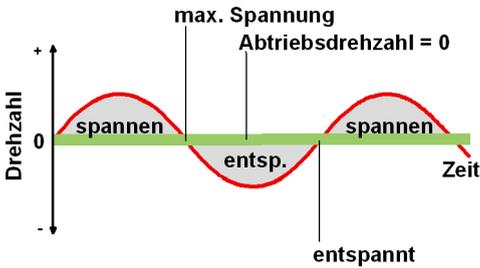


Bild 13: Drehzahlverlauf eines Freilaufs bei Fahrzeugstillstand

Auch ein gewünschtes Kriechmoment kann mit dieser Methode eingestellt werden, da die hohe Übersetzung für den Verstellmotor eine hohe Auflösung des eingestellten Exzenters gestattet. Das gutmütige Verhalten beim Anfahren konnte mit dem Prinzipgetriebe bestätigt werden. Eine Messung einer Kriechfahrt mit Leerlaufdrehzahl des Motors zeigt Bild 14.

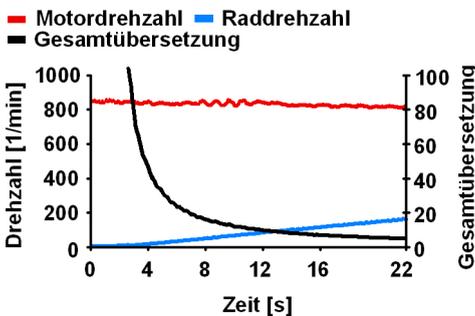


Bild 14: Messung Kriechfahrt

## Die Ungleichförmigkeit am Abtrieb

Eine typische Messung der Drehzahlsschwankung von Motor und Getriebeausgang über der Zeit zeigt Bild 15. Da das Versuchsfahrzeug einen 4-Zylinder Ottomotor hat, entsprechen zwei Perioden in der Motordrehzahl einer Umdrehung am Antrieb. Man erkennt in diesem Beispiel die 12. Ordnung in dem Verlauf der Abtriebsdrehzahl als dominierend, aber auch andere Ordnungen sind überlagert. Dies führt zur Zeit noch zu Geräuschanregungen. Die Weiterentwicklung der Akustik ist

deshalb neben der bereits erwähnten Freilaufoptimierung ein weiterer Schwerpunkt der zukünftigen Arbeiten.

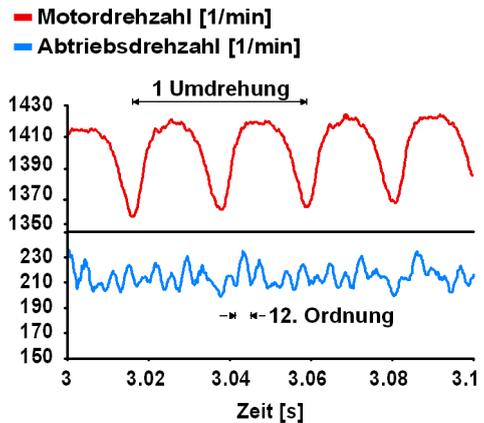


Bild 15: Messung der Ungleichförmigkeit

## Schub und Bergabfahrt

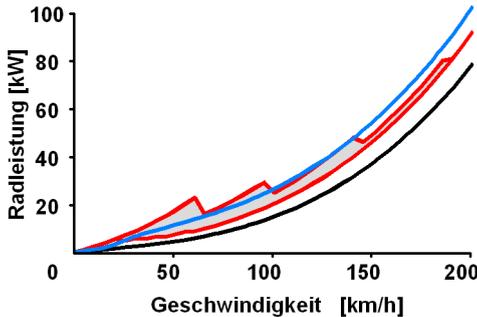
Da die Freiläufe kein Schubmoment übertragen können, mussten für kritische Schubsituationen wie z. B. Bergabfahrt Lösungen gefunden werden.

Im Normalfahrbetrieb hat das fehlende Schubmoment auch seine Vorteile. So zeigt sich das Versuchsfahrzeug bezüglich Längsschwingungen bisher als unkritisch, ebenso das Anhalten, bei dem die Gesamtübersetzung stets etwas kürzer als die wirksame Übersetzung eingestellt wird. Das Problem der zunehmenden Motorbremswirkung bei kürzer werdender Übersetzung ist damit umgangen.

In Bild 10 wurde bereits gezeigt, wie ein Generator wahlweise mit dem Abtrieb oder dem Verbrennungsmotor verbunden werden kann. Sind beide Verbindungen aktiv, so hängen der Verbrenner und die E-Maschine am Abtrieb. Die feste Übersetzung zum Abtrieb ist dabei so gewählt, dass der Verbrennungsmotor und die E-Maschine bei Höchstgeschwindigkeit mit ihrer Maximaldrehzahl drehen.

In Bild 16 sind die möglichen Bremsleistungen für Schubetrieb bezogen auf das Rad über der Fahrgeschwindigkeit aufgetragen.

Die Bremsleistung setzt sich dabei zusammen aus dem Luft- und Rollwiderstand (schwarze Linie) sowie dem Bremsmoment des Motors. Für die Gesamtbremsleistung eines herkömmlichen Schaltgetriebes in den verschiedenen Gängen mit maximaler und niedriger Schaltdrehzahl ergeben sich die roten Linien, die den vom Fahrer beeinflussbaren Bereich umschließen. Die Stufen entsprechen den einzelnen Gängen.



- mit Motorbremse
- mit Kurbelgetriebe
- Luft- und Rollwiderstand

**Bild 16:** Bremsleistungen bei Bergabfahrt

Für das Kurbel-CVT entfällt die Möglichkeit, mit den verschiedenen Gängen die Bremsleistung zu beeinflussen. Verbindet man nun den Generator (Nennstrom 180 A) und den Verbrennungsmotor über die feste Übersetzung mit dem Abtrieb, so ergibt sich als Summenbremsleistung die blaue Kurve. Wie man sieht, wird die vorgeschlagene Lösung nur bei extremem Ausdrehen des Verbrennungsmotors übertroffen und sollte deshalb für die Praxis genügen. Ist die Batterie bei längerer Bergabfahrt bereits geladen, so kann mittels einer elektrischen Heizung die Energie problemlos

in das Kühlwasser abgeführt werden, da der Verbrennungsmotor zeitgleich kaum Wärme abgibt. Es handelt sich dabei nur um erste Vorschläge. Das Schubmanagement müsste zusammen mit dem Fahrzeughersteller entwickelt werden.

## Zusammenfassung

Das Kurbel-CVT von LuK zeichnet sich in der bis jetzt untersuchten Ausführung vor allem durch den Entfall von Baugruppen aus. Dadurch ergibt sich ein leichtes und kostengünstiges, für Front-quer-Einbau geeignetes CVT mit der Chance auf günstigen Verbrauch und hohen Komfort.

Das Entwicklungsrisiko besteht im geänderten Schubverhalten, dem Erreichen der Lebensdauer und im Geräuschverhalten.

## Literatur

- [1] Stölzle, K.; Hart, S.: Freilaufkupplungen, Berechnung und Konstruktion 1961.
- [2] Faust, H.; Linnenbrügger, A.: CVT-Entwicklung bei LuK, 6. LuK Kolloquium 1998.
- [3] Faust, H.; Homm, M.; Bitzer, F.: Wirkungsgradoptimiertes CVT-Anpresssystem – Verbrauchsreduktion durch Schlupferhöhung? 7. LuK Kolloquium 2002.
- [4] Jürgens, G.: Dissertation: Potenziale und Risiken von Geared-Neutral-Strukturen stufenloser Getriebe 1995.