

# 30

???

**Weniger ist Mehr!**

Unkonventionelle Wege zum neuen Produkt

Wolfgang Reik

In den Beiträgen bisher wurden Technologien vorgestellt, die bereits einen hohen Reifegrad erreicht haben. Sie sind entweder bei ersten Kunden in Serie oder werden diesen Status in den nächsten Jahren erhalten. Die Grundlagenentwicklung dazu ist weitgehend abgeschlossen. Es ist sehr klar ersichtlich, wie das Produkt aussieht und welche genauen Eigenschaften es haben wird. Mit größeren Überraschungen ist deshalb nicht mehr zu rechnen.

Ein Unternehmen ist gut darin beraten, sich auch mit der etwas fernerer Zukunft zu beschäftigen. Wird der Blick auf weiter entfernte Ziele gerichtet, mag manches unscharf oder verzerrt erscheinen. Dies auch im Hinblick darauf, dass die Automobilindustrie heftig darüber diskutiert, wie die Mobilität in Zukunft gewährleistet werden soll.

In diesem Beitrag wird der Versuch unternommen, solche weit entfernten Ziele rund um den Motor und das Getriebe zu umreißen. Selbstverständlich werden die Grundlagen dafür gerade erst gelegt, das genaue Ziel ist noch in der Definitionsphase und es sind jetzt schon Hürden zu erkennen, deren Bewältigung nicht unbedingt einfach sein wird.

Unter dieser Voraussetzung laden wir Sie zum Weiterlesen ein. Betrachten Sie diesen Bericht auch als mögliche Vorschau auf Themen für das nächste Schaeffler Kolloquium. Hoffentlich wird das eine oder andere Thema überleben und in die Kategorie der seriennäheren Projekte übergehen können. Dazu ist uns auch Ihre Meinung wichtig. Denn die verrät uns, ob es sich um wirklich lohnenswerte Ziele handelt.

## Zweimassenschwungrad ohne Federn

In den vorausgegangenen Beiträgen wurde über die Wirkung des Fliehkraftpendels bei Zweimassenschwungrad, Wandler und anderen Torsionsschwingungsdämpfern berichtet. Damit lassen sich ganze Erregerordnungen tilgen. Das ist eine absolute Notwendigkeit für moderne Antriebsstränge, die ihren Verbrauchsvorteil auch durch die Absenkung der Motordrehzahl erzielen. Diese Downspeedingkonzepte lassen sich aus Sicht der Motoren deswegen verwirklichen, weil neue Ladergenerationen für fast volles Motorenmoment auch bei Drehzahlen knapp

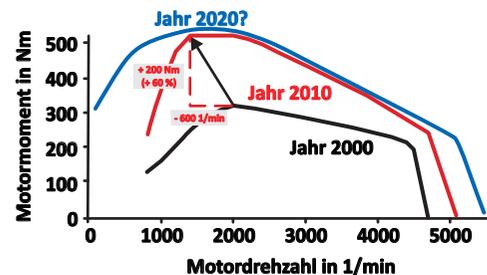


Bild 1 Entwicklung der Motormomente vom Jahr 2000 zu 2010 und eine Prognose für 2020 am Beispiel eines 2,0 l 4-Zylinder Dieselmotors

über 1000 1/min sorgen (Bild 1). Hierfür sind Dämpfersysteme mit Fliehkraftpendel bestens geeignet. Sie liefern hervorragende Isolation bei Drehzahlen um 1500 1/min und erweitern tatsächlich auch den Spielraum zu kleineren Drehzahlen.

Aber was geschieht, wenn die Motorenentwicklung in dem Tempo weiter schreitet, wie das in den letzten Jahren der Fall war? Wird dann bald der Wunsch bestehen, auch unter 1000 1/min mit Vollast fahren zu können? Könnten die Torsionsdämpfer dann die weitere Motorenentwicklung ausbremsen? Aus diesem Grund wird nach neuen Ansätzen gesucht.

Das wesentliche Prinzip des Zweimassenschwungrades ist eine Aufteilung eines Schwungrades in zwei separate Massen (nämlich die primäre und sekundäre Schwungmasse), die über eine Drehelementlastizität miteinander verbunden sind. In dieser Verbindung, die üblicherweise mit Druckfedern ausgeführt wird, weil deren Energiedichte sehr hoch ist, liegt ein großer Teil des Knowhows von Zweimassenschwungraden. Durch geschickte Wahl von Kennliniensteigung mit entsprechender Überlagerung von dämpfender Reibung, mehrstufigen Kennlinien usw., lassen sich in der Regel für alle Betriebsbereiche die Torsionsschwingungsisolierungen erreichen, die für ein komfortables, rassel- und brummfrees Fahren erforderlich sind. Die Torsionsfedern wurden deshalb stets als das Herz des Zweimassenschwungrades angesehen. Durch fortlaufende Optimierung wurden diese Federn verbessert, um optimale Kennlinien darzustellen.

Deshalb wird es zunächst überraschen, wenn versucht wird, bei einem Zweimassenschwungrad ohne Federn auszukommen. Die Federn haben zwei Hauptaufgaben. Zunächst muss das mittlere Moment von Motor und Getriebe übertragen werden. Zusätzlich soll auch die Ungleichförmigkeit möglichst gut herausgefiltert werden. Das ist die typische Aufgabe ei-

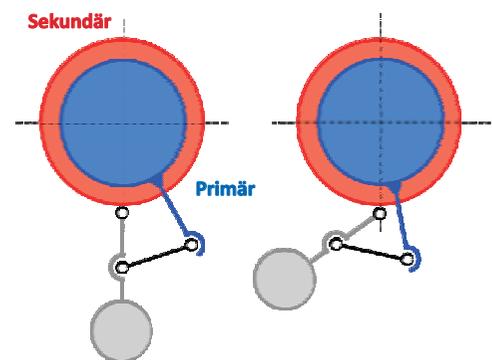


Bild 2 Zweimassenschwungrad ohne Federn. Die Verdrehkennlinie wird über Massen im Fliehkraftfeld erzeugt

nes mechanischen Tiefpassfilters. Für die Isolationswirkung müssen die Federn mit der Anregungsfrequenz jeweils zusätzlich belastet und entlastet werden. Die Feder nimmt dabei potentielle Energie auf, die direkt anschließend wieder freigegeben wird. Die Feder wirkt also als Puffer. Steht zuviel Energie zur Verfügung, weil der Verbrennungsmotor nach einer Zündung schneller dreht, wird dieser Überschuss in der Feder zwischengespeichert. Bei der nächsten Kompression, wenn der Motor sich langsamer dreht, gibt die Feder diese Energie wieder ab.

Wird die Wirkung eines Torsionsschwingungsdämpfers so allgemein betrachtet, wird deutlich, es ist ein

Energiezwischenspeicher notwendig, der nicht unbedingt in Form einer Feder ausgeführt werden muss. Potentielle Energie lässt sich auch auf andere Arten zwischenspeichern. Im einfachsten Fall wird eine Masse gegen eine Kraft angehoben. Diese Kraft kann z. B. durch ein Gravitationsfeld hervorgerufen werden. Auch alle anderen Arten von Feldern, z. B. magnetische oder elektrische, wären denkbar. Bei rotierenden Systemen bietet sich das Fliehkraftfeld, oder einfacher ausgedrückt, die Fliehkraft an.

Bild 2 zeigt eine Wirkskizze. Die primäre Seite des Zweimassenschwungrades ist mit der sekundären lediglich über eine Koppelstange verbunden, die in ein Pendel, das auf der sekundären Seite sitzt, eingreift. Wird Moment aufgebracht, lenkt sich das Pendel aus. Infolge Fliehkraft will das Pendel aber wieder in die Ausgangslage zurückkehren. Es entsteht deshalb, wie bei einer Federkopplung, ein Moment, das mit zunehmendem Verdrehwinkel ansteigt. Diese Kennlinie ist jetzt aber nicht mehr konstant, sondern hängt von der Drehzahl ab. Es entsteht damit eine Kennlinienschar mit der Drehzahl als Parameter. Die Zwischenspeicherung der Energie für die Glättung der Motorungleichförmigkeit erfolgt dann ebenfalls über Veränderungen der potentiellen Energie der pendelnden Masse.

Die Isolationswerte eines solchen federlosen Zweimassenschwungrades entsprechen etwa denen eines konventionellen Zweimassenschwungrades (Bild 3).

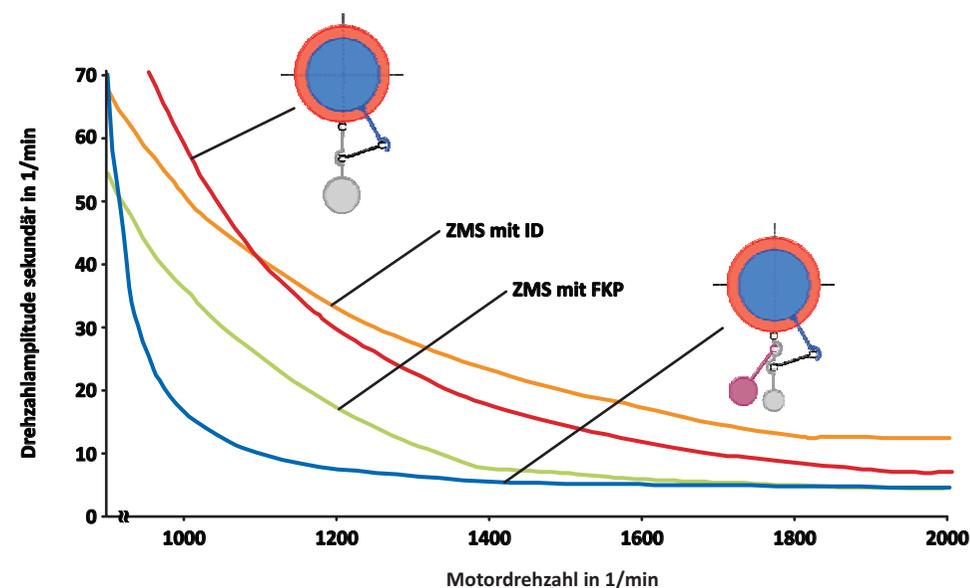


Bild 3 Isolationswirkung eines federlosen im Vergleich zu konventionellen Zweimassenschwungradern

Dazu sind große Pendelmassen von ca. 5 kg notwendig, die relativ raumerfüllende Bewegungen ausführen. Dies wird eine konstruktive Lösung erschweren. Das Isolationsverhalten dieses federlosen Zweimassenschwungrades lässt sich sogar noch erheblich verbessern, wenn das Pendel in ein Doppelpendel aufgeteilt wird, wie es in Bild 4 dargestellt ist. Das jetzt schwerere Pendel, das wie ein normales Fliehkraftpendel wirkt, ist am (leichteren) gekoppelten Pendel aufgehängt.

Bild 4 zeigt, dass mit einer solchen Anordnung sogar die Isolationswirkung eines normalen Zweimassenschwungrades mit Fliehkraftpendel übertroffen werden kann. Auch für den Fall des Doppelpendels gilt, dass das gekoppelte Pendel unter Fliehkraft wieder in den Ausgangszustand zurückkehren will. Dazu tragen beide Pendel bei. Es entstehen dadurch mit zunehmender Drehzahl steilere Kennlinien mit höherem maximalem Endmoment (Bild 5). Danach müssten die Pendelmassen so groß gewählt werden, dass bei niedrigen Drehzahlen das dort vorliegende Motormoment gerade abgedeckt werden kann. Bei höheren Drehzahlen könnte die Kennlinie sehr viel mehr Moment übertragen, als der Motor liefern kann. Dies wäre zwar nicht notwendig, schadet aber auch nicht.

Auch für das Doppelpendel gilt, dass die insgesamt relativ schweren Pendel (auch hier insgesamt ca. 5 kg) große Bereiche überstreichen und eine Konstruktion deshalb viel Bauraum bean-

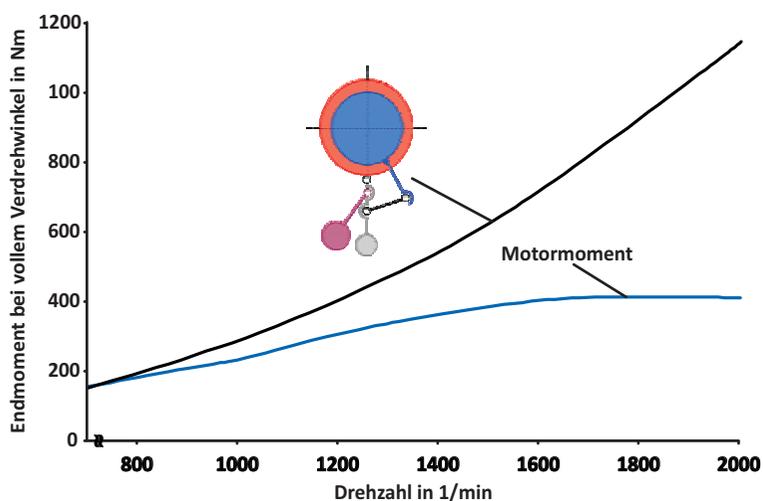


Bild 5 Anstieg des maximalen Momentes der Verdrehkennlinie über der Drehzahl

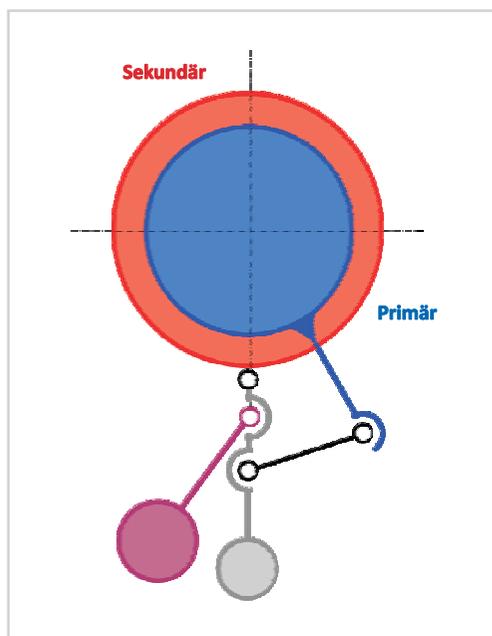


Bild 4 Federloses Zweimassenschwungrad mit zusätzlichem, frei schwingendem Fliehkraftpendel für beste Schwingungsisolierung

sprochen dürfte. Hinzu kommt, dass beim gänzlich federlosen Zweimassenschwungrad eine Verdrehkennlinie erst unter Fliehkraft entsteht. Im Stillstand würden die Pendelmassen einer Verdrehung der beiden Schwungrmassen gegenüber keinen Widerstand entgegensetzen.

Ein vollkommen federloses Zweimassenschwungrad ist daher eher von theoretischem Interesse, weil es aufzeigt, dass potentielle Energie eben nicht nur in Federn zwischengespeichert werden kann. Für eine praktische Auslegung würde man deshalb für den Fall extrem kleiner Drehzahlen und Stillstand eben doch wieder eine herkömmliche, jetzt aber sehr schwache, Feder einsetzen.

## Kupplung (fast) ohne Betätigungskraft

Weltweit ist ein klarer Trend hin zu automatisierten Antriebssträngen zu erkennen, auch wenn manche Regionen dieser Welt sich noch zu wehren scheinen. Wenn sich diese Entwicklung fortsetzt, braucht es dann noch Kupplungen? Diese Frage muss sich ein traditioneller Kupplungshersteller stellen. Die Antwort ist glücklicherweise sehr vielschichtig. Der relative Anteil der Handschaltgetriebe geht zurück. Aufgrund der wachsenden neuen Märkte steigt jedoch die absolute Stückzahl sogar an [1]. Zusätzlich gibt es neue Antriebsstrangkonzeppte, die ihrerseits nicht ohne Kupplung auskommen. Die folgende Tabelle zeigt die heutigen Entwicklungsrichtungen bis hin zum reinen E-Fahrzeug.

Antriebsstrangkonzeppte	Anzahl der Schaltelemente (Kupplungen + Bremsen)
Handschalter	1
Doppelkupplungsgetriebe	2
Automatikgetriebe	~ 5
Hybridantriebe	bis zu 3
E-Fahrzeuge	2 (falls Zweiganggetriebe erforderlich ist)

Interessanterweise benötigen auch viele der neueren Konzepte Kupplungen, und teilweise, wie beim Doppelkupplungsgetriebe oder Hybrid, sogar mehr

als eine. Erst das reine Elektrofahrzeug könnte man sich ganz ohne Kupplung vorstellen. Doch auch dann ist es wahrscheinlich, dass ein Zweiganggetriebe eingesetzt wird, um eine optimale Balance zwischen Höchstgeschwindigkeit und Anfahren am Berg zu erreichen. Und dann sind sofort wieder zwei Schaltelemente bzw. Kupplungen notwendig.

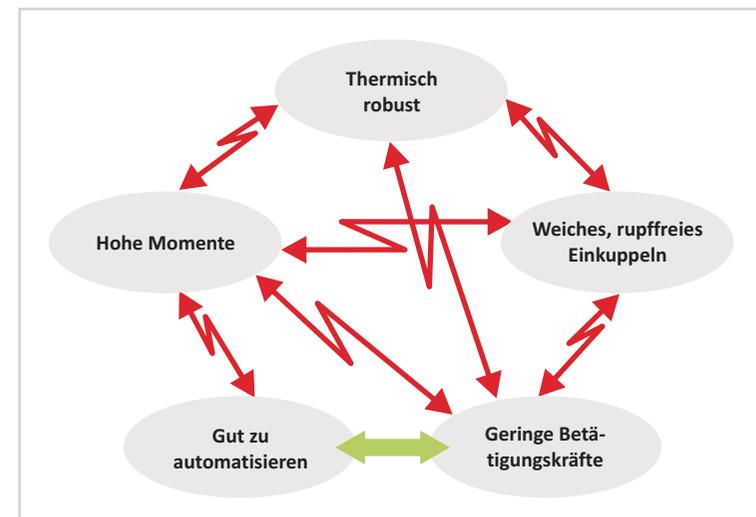
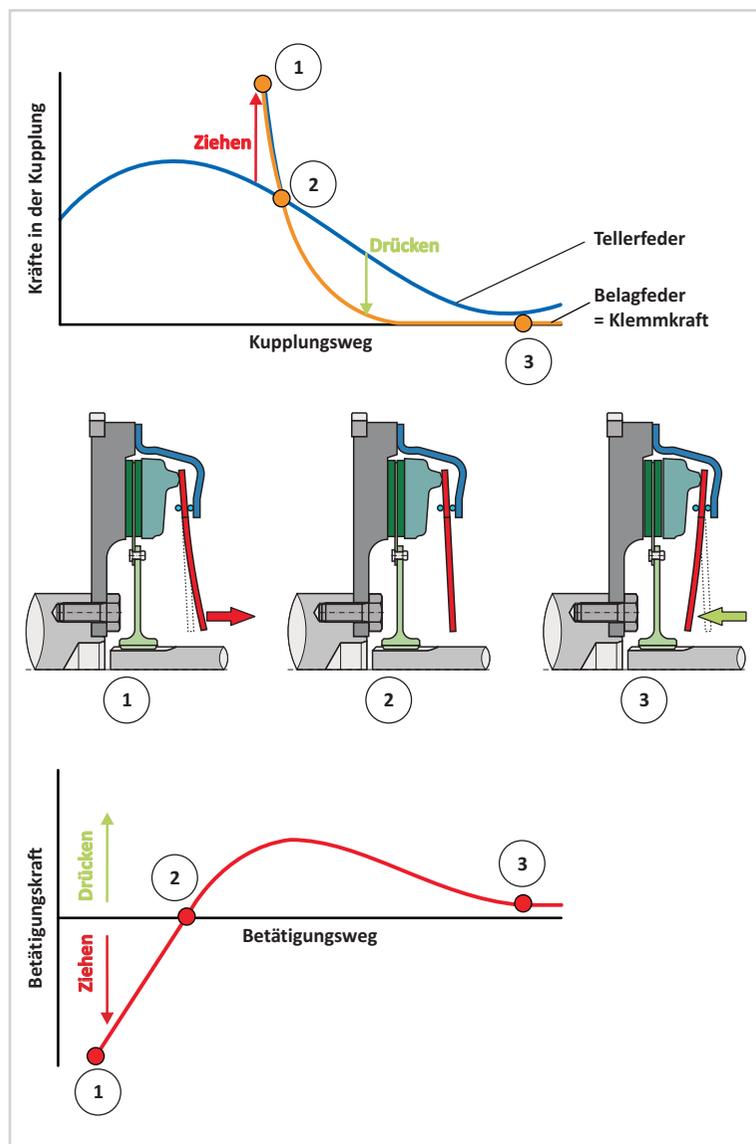


Bild 6 Die wichtigsten Anforderungen an Kupplungssysteme

Allerdings ist zu erwarten, dass sich die Kupplungen den zukünftigen Anforderungen anpassen müssen und sich in Konstruktion und Bauform erheblich von den heutigen Handschaltkupplungen unterscheiden werden. Trotzdem ist zu vermuten, dass die wesentlichen Funktionen, nämlich durch Reibung Moment zu übertragen um Drehzahlen anpassen zu können, erhalten bleiben. Damit bleiben auch die Grundanforderungen an ein Kupplungssystem im Wesentlichen die gleichen und es ist zu befürchten, dass sich damit die typischen Kupplungsthemen wie Wärmehaushalt, Rupfen, usw. auch bei neuen Antriebsstrangkonzeppte wiederfinden werden.

Die typischen Spannungsfelder, in denen sich die Kupplungsentwicklung bewegt, zeigt Bild 6. Fast jede der einzelnen Anforderungen widerspricht mehreren anderen. Lediglich der Wunsch nach guter Möglichkeit zur Automatisierung und niedriger Betätigungskraft scheinen sich geschickt zu ergänzen. Deshalb dürfte der Betätigungskraft, oder genauer gesagt einer niedrigen Betätigungsarbeit, eine besondere Bedeutung zukommen. Das soll im Folgenden betrachtet werden.



**Bild 7** Zustände einer Kupplung. Das mittlere Teilbild (2) stellt den geschlossenen Zustand einer üblichen Handschaltgetriebekupplung dar, rechts (3) geöffnet, links (1) durch Zuziehen mit erhöhter Klemmkraft.

Die eigentliche Aufgabe einer Kupplung ist in Bild 7 dargestellt. Zum Verbinden eines Momentenflusses wird eine (Kupplungs-)Scheibe zwischen zwei Anpressplatten verspannt oder eingeklemmt. Durch Reibung kann dann Moment übertragen werden. Zum Öffnen der Kupplung und damit zur Unterbrechung des Momentenflusses muss die Klemmkraft aufgehoben werden. Die Scheibe kann sich frei durchdrehen. Die Klemmkraft einer Kupplung wird

das Prinzip der Reduzierung der Betätigungskraft einfacher erklären lässt.

Ein weit verbreiteter Irrtum ist es, dass die Klemmkraft direkt etwas mit der Betätigungsarbeit zu tun hat, die erforderlich ist, um die Klemmkraft aufzuheben. Dies ist nicht der Fall. Denn die Klemmkraft setzt sich zusammen aus der inneren Verspannung der Tellerfeder, angedeutet durch deren Moment,

bei Handschaltern über eine Tellerfedervorspannung aufgebracht. Ohne äußere Beeinflussung ist die Kupplung also geschlossen. Zum Öffnen wird über die Tellerfederzungen, die als zweiarmige Hebel wirken, die Tellerfederkraft aufgehoben und die Kupplung lüftet.

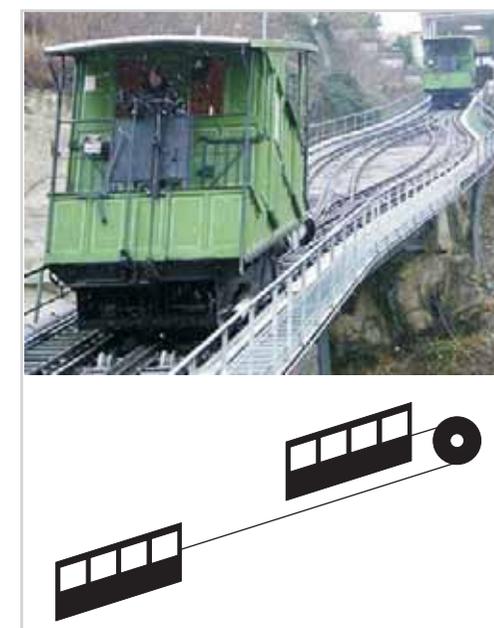
Daneben gibt es aber auch das umgekehrte Prinzip. Bei vielen nasslaufenden Kupplungen und auch bei trockenen Doppelkupplungen will man im Fehlerfall eine geöffnete Kupplung haben. In diesen Fällen wird die äußere Betätigung zum Schließen der Kupplung verwendet. Die Klemmkraft wird also von außen aufgebracht. Neuere Elektronik- und Softwarekonzepte können den Fehlerfall auch bei federkraftgeschlossenen Kupplungen beherrschen [2]. Man ist dann bei der Auswahl des Kupplungsprinzips freier und es ergeben sich sogar völlig neue Möglichkeiten. Für die folgenden Betrachtungen wird zunächst von einer federkraftgeschlossenen Kupplung ausgegangen, weil sich daran

und der äußeren Betätigungskraft. Am besten lässt sich das an einem einfacher zu verstehenden Beispiel, der Standseilbahn, erklären (Bild 8). Die innere Kraft, d. h. die Spannung des Zugseils, ist selbstverständlich proportional zum Gewicht der Fahrzeuge. Das Moment, das die Antriebsmaschine an der Umlenkrolle für das Zugseil aufbringen muss, hängt aber sehr viel mehr davon ab, wie gut die Gewichte der beiden Wagen austariert sind. Im günstigsten Fall könnte man, wenn die Reibung vernachlässigt wird, mit beliebig kleinen Momenten die Wagen in Bewegung setzen.

Ähnlich verhält es sich auch bei Kupplungen. Die Klemmkraft wird durch die Kraft oder besser durch die Kraftkennlinie der Tellerfeder bestimmt. Genauso wie bei der Standseilbahn muss für die Betätigung nur die Differenz der Kräfte (Tellerfeder und Belagfeder im quasi Gleichgewicht) aufgebracht werden. Es muss dementsprechend versucht werden, die Tellerfederkraft so degressiv zu gestalten, dass sie der Belagfederkraft möglichst nahe kommt (Bild 7 oben). Diese an sich nicht neue Erkenntnis [2], die bereits bei der Entwicklung der selbstnachstellenden Kupplung ein wesentlicher Treiber war, müsste sich bei aktorbetätigten Systemen noch beträchtlich ausweiten lassen. Während bei fußkraftbetätigten Kupplungen darauf geachtet werden muss, dass eine für den Fahrer angenehme Pedalkraftkennlinie entsteht, die ihm ein leichtes Modulieren der Kupplung ermöglicht, kann diese Forderung bei automatisierten Systemen weitgehend entfallen. Damit kann ein wesentlich stärkerer Betätigungskraftabbau realisiert werden.

Was die Umsetzung dieses einfachen Prinzips in der Vergangenheit immer wieder behinderte, waren die Toleranzen der Kennlinien und deren Verschiebung zueinander durch Verschleiß der Beläge. Aus diesen Gründen ist eine Kompensation des Belagverschleißes und der Toleranzen zwingend notwendig. Deshalb haben sich die selbstnachstellenden Kupplungen bei höheren Motormomenten weitgehend durchgesetzt. Da die Verschleißnachteile aber nicht absolut präzise arbeiten, war eine wirklich konsequente Umsetzung dieses Gedankens nicht möglich und die Absenkung der Betätigungskraft ließ sich deshalb nicht wesentlich über 25 % steigern.

Wie bereits erwähnt, gibt es auch Kupplungen, bei denen die Klemmkraft erst durch eine äußere Betätigungskraft erzeugt wird und es stellt sich jetzt die Frage, ob man diese beiden Prinzipien nicht ge-



**Bild 8** Kräftegleichgewicht einer Standseilbahn

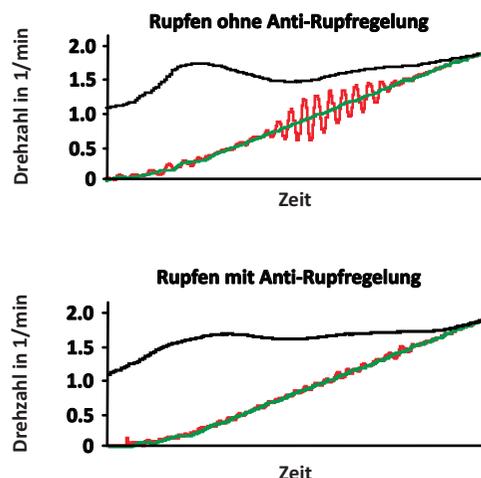
schildt miteinander kombinieren kann. Dazu wird das Betätigungssystem in die Tellerfederzungen so eingehängt, dass nicht nur auf die Tellerfederzungen gedrückt, sondern auch noch gezogen werden kann (Bild 7, linkes Teilbild, Position (1)). Durch Ziehen lässt sich die Klemmkraft der Kupplung und damit das zu übertragende Moment weiter erhöhen. Bei gegebenem Moment ließe sich die Betätigungskraft absenken (in etwa halbieren), wenn der Aktor für Drücken und Ziehen ausgelegt wird. Alle elektromechanischen Aktoren können das grundsätzlich. Ein Elektromotor ist in der Lage, in beiden Drehrichtungen das gleiche Moment aufzubringen.

Dieses neue Kupplungskonzept ist jetzt also in der Lage, ohne äußere Betätigung etwa das halbe Kupplungsmoment aufzubringen (Position (2)). Zum vollständigen Öffnen der Kupplung wird wie bei einer Handschaltkupplung auf die Tellerfederzunge gedrückt (Position (3)). Zum vollständigen Schließen der Kupplung wird an den Zungen gezogen und damit, wie bei einer kraftlos geöffneten Kupplung, von außen zusätzliche Klemmkraft aufgebracht (Position (1)). Es ist damit der neue Kupplungstyp der „kraftlos halbgeschlossenen“ Kupplung entstanden. Damit einher geht eine hohe Absenkung der Betätigungskraft.

Aber es ergibt sich noch ein weiterer Vorteil. Bis jetzt konnte das Austarieren der Tellerfeder- und

Belagfederkennlinien nur unzureichend erfolgen. Zu groß wäre die Gefahr, dass sich aus Toleranzgründen die Kennlinien überschneiden und sich die Kupplung ungewollt selbst betätigt, weil sie plötzlich umschnappen will. Dies lässt sich jedoch verhindern, wenn der Betätigungsaktor mit den Tellerfederungen so verbunden ist, dass sowohl Drücken als auch Ziehen ermöglicht wird. Es wird dann ganz bewusst zugelassen, dass während eines Betätigungsvorganges die Kraft ihr Vorzeichen wechseln kann. Der Klemmzustand wird dann nur noch über den Betätigungsweg bestimmt und nicht mehr über die Betätigungskraft. Diese selbst wird umso kleiner, je besser die Anpassung gelingt. Dies ermöglicht eine weitere Absenkung der Betätigungskräfte und damit kleinere Aktoren.

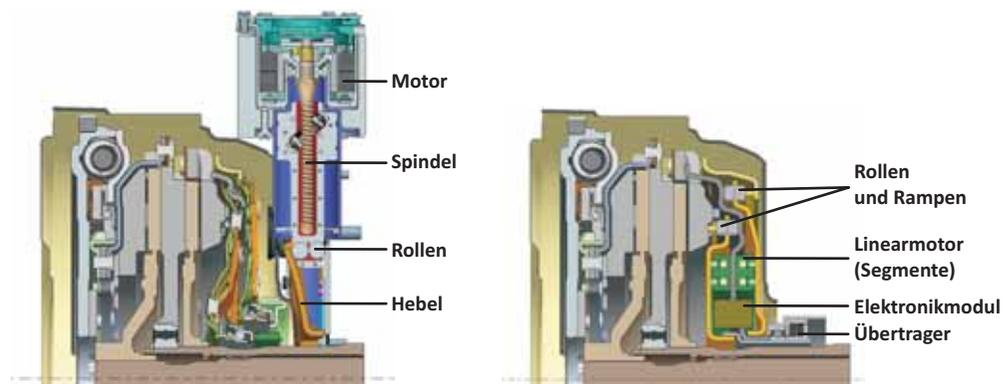
Die Betätigung kann umso schneller erfolgen, je kleiner ein Aktor ausgeführt werden kann. Dies ergibt die Möglichkeit ein Problem von Kupplungen zu bekämpfen, das sonst nur schwer in den Griff zu bekommen ist. Reibbeläge, unabhängig davon ob nass oder trocken, können während der Schlupfphase Rupfschwingungen erzeugen. Die Ursache sind Drehmoment-schwankungen, die entweder durch geometrische, kleine Fehler oder durch einen mit der Differenzdrehzahl abfallenden Gleitreibwert hervorgerufen werden. Die damit verbundenen Schwingungen des Antriebsstranges – beim Anfahren mit ungefähr 10 Hz – stellen ein schwerwiegendes Komfortproblem dar. Eine schnelle Aktorik kann diese Reibschwingungen praktisch vollständig beseitigen, wenn die Kupplung im Takt der Rupffrequenz entsprechend gegenmoduliert wird [3]. Bild 9 zeigt dies. Solch eine Antirupfregelung wird eine deutliche Komfortsteigerung ergeben. Sie wird darüber hinaus auch die Verwendung von Belägen mit höherem Reibwert erlauben. Dies ist



**Bild 9** Anfahrvorgang mit einem stark rupfenden Belag ohne (oben) und mit Antirupfregelung (unten).

heutzutage nicht möglich, da ein ungeschriebenes „Reibgesetz“ besagt, dass die Rupfneigung mit zunehmendem Reibwert ansteigt. Dafür gibt es zwar keine physikalische Erklärung, aber eine Vielzahl von praktischen Erfahrungen. Liegt also erst einmal eine funktionierende, schnelle Antirupfregelung vor, kann durch Verwendung von Belägen mit hohem Reibwert die Anpresskraft und damit auch die Betätigungsarbeit weiter abgesenkt werden.

All diese Schritte zur Reduzierung der Kraft und der Arbeit, um eine Kupplung kontrolliert zu schließen oder zu öffnen, sind dann entscheidend, wenn die Aktorik in die Kupplung integriert werden soll. Die Vision ist eine sogenannte Elektronikupplung, in der der Aktor in der Kupplung mitrotiert. Die Energie für den Aktor sowie die Verstellinformation soll über einen elektrischen



**Bild 10** Doppelkupplung mit externer Aktorik (links) und der Vision einer integrierten Betätigung (rechts)

Drehübertrager übermittelt werden. Bild 10 zeigt am Beispiel einer Doppelkupplung, wie dies etwa aussehen könnte. Die Hoffnung ist, dass sich damit kompakte Kupplungen verwirklichen lassen mit einer einfachen und platzsparenden Betätigung, die sich z. B. gut in Hybridantriebsstränge einpassen lassen.

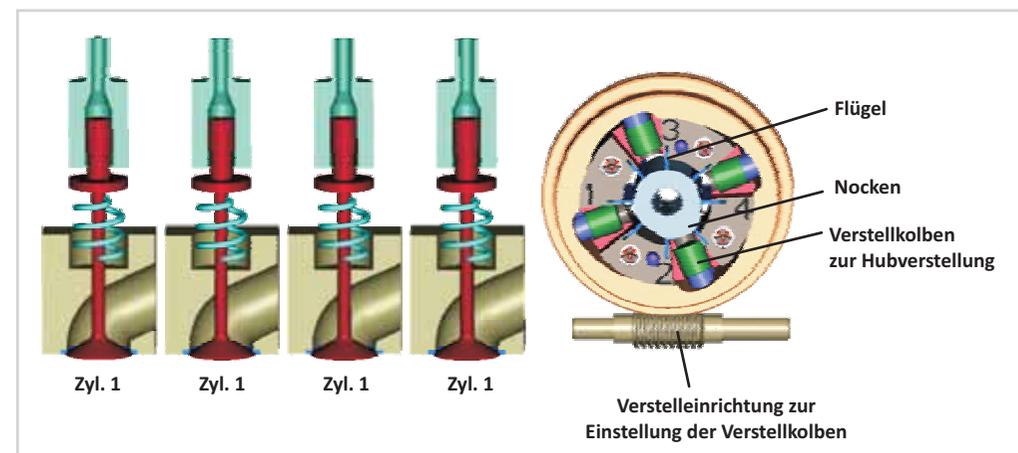
## Motor ohne Nockenwelle

In der Vergangenheit hat es eine Vielzahl von Entwicklungen gegeben, deren Ziel es war, den Ventiltrieb eines Verbrennungsmotors zu vereinfachen und daher die Nockenwelle als Antrieb der Ventile zu ersetzen. Die meisten dieser Bemühungen sind wieder aufgegeben worden, weil nicht zu überwindende Schwierigkeiten einen Erfolg verhinderten. Die Gründe dafür waren vielfältig. Es konnte nicht mit letzter Sicherheit eine Kollision Ventil mit Kolben verhindert werden, die für die Betätigung der Ventile erforderliche Energie war viel zu groß oder die Kosten sprengten den zulässigen Rahmen. Deshalb mag es verwundern, wenn hier doch noch einmal ein Vorstoß in diese Richtung unternommen wird. Der Grund hierfür liegt in der serienreifen Entwicklung des UniAir Systems [4] über das in diesem Tagungsband berichtet wird und das plötzlich neue Chancen bietet.

Das Wesentliche des UniAir Systems ist eine hydraulische Betätigung der Ventile über einen Nehmerzylinder. Der erforderliche hydraulische Druck und das Öl-

volumen werden über nockenwellengesteuerte Hydraulikpumpen realisiert, die man auch als Geberzylinder bezeichnen könnte. Durch diese hydraulische Auftrennung von Nockenweg zu Ventilweg ergeben sich ideale Beeinflussungsmöglichkeiten, wenn die hydraulische Leitung durch ein Magnetventil geöffnet oder geschlossen wird. Es lassen sich dann die Ventilerhebungskurven in weiten Grenzen in Hub und Zeit verändern. Sogar ein zweites Öffnen ist unter bestimmten Bedingungen möglich. Dieses Konzept lässt auch weitere Varianten zu bis hin zu einem nockenwellenlosen Motor.

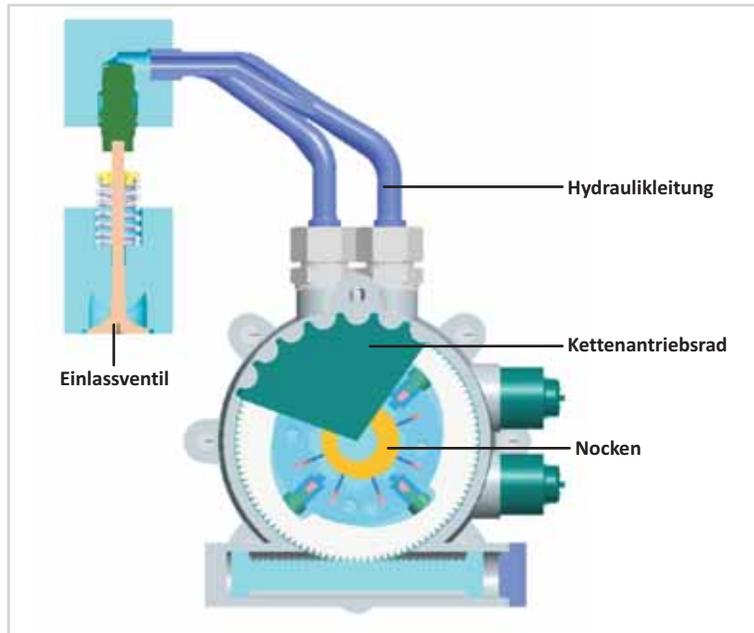
In einem ersten Schritt werden die einzelnen Nockenansätze mit den Geberzylindern in einer Einheit zusammengeführt. Es wurde dazu eine hydraulische Zentralpumpe entwickelt auf Basis einer Flügelzellenpumpe (Bild 14). Im Unterschied zu normalen Pumpen dieser Bauart besteht der Rotor aus einem nicht vollständig kreisrunden Verdränger. Der besitzt einen Grundkreis mit einem Nocken, ähnlich wie der Nocken auf einer Nockenwelle. Die Flügel, die im Stator radial verschiebbar angebracht sind, bilden jeweils paarweise Kammern, die mit dem Nehmerzylinder eines Einlassventils verbunden sind. Jedes Mal, wenn der Nocken über solch eine Kammer streicht, wird Öl verdrängt, das das Einlassventil öffnet und anschließend wieder schließt. Die Nockenform, der Flügelabstand und die Flügelbreite werden so gewählt, dass sich die gewünschte, maximale Ventilerhebungskurve ergibt. Sobald der Nocken eine Kammer verlassen hat, überstreicht er die nächste. So erzeugt ein Nocken der Reihe nach die hydraulische Verdrängung für alle Zylinder.



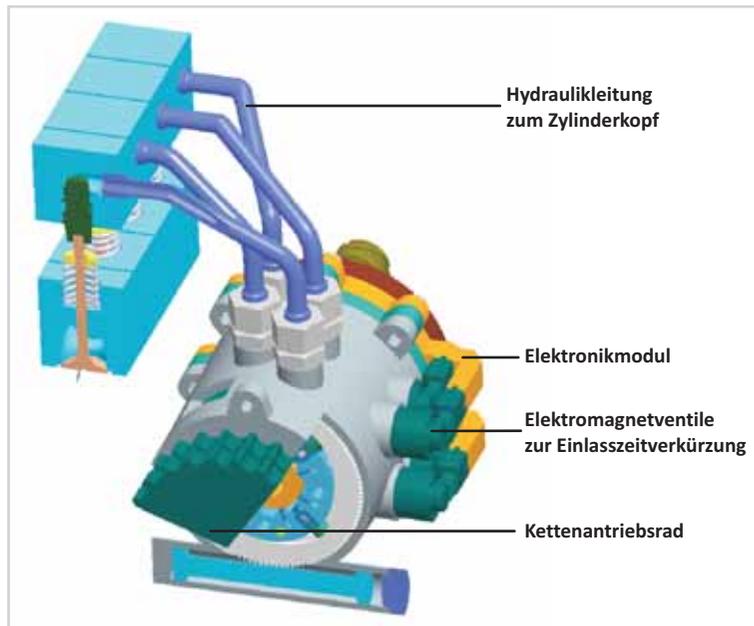
**Bild 14** Flügelzellenähnliche Zentralpumpe, deren Kammern mit den einzelnen Ventilen über Hydraulikleitungen verbunden sind

Eines der Entwicklungsziele war es, die hydraulischen Leitungen so auszulegen, dass die Zentralpumpe in genügend großem Abstand zu den einzelnen Zylindern angebracht werden kann. 40 cm Leitungslänge wurden erreicht bei guter Abbildung der Nockenform auf die Ventilerhebungskurve.

Nachdem dieser erste Schritt erfolgreich abgeschlossen werden konnte, soll die volle UniAir Funktionalität integriert werden. Dazu werden die hydraulischen Schaltventile samt Elektronik, die für eine Druckunterbrechung und damit früheres Schließen der Einlassventile notwendig sind, ebenfalls mit in die hydraulische Zentraleinheit integriert (Bilder 15 und 16). Die Zentraleinheit beinhaltet damit alles, was für die Steuerung der Ventile notwendig ist. Dies sind hydraulischer Nocken, elektrische Schaltventile für die Steuerung des Volumenstroms, Elektronik und die erforderliche hydraulische Verschaltung. Über eine hydraulische Leitung werden dann die einzelnen Ein- und Auslassventile der Zylinder mit dieser Zentraleinheit verbunden. Die Hydraulikeinheit kann fast beliebig angeordnet werden, z. B. seitlich vom Motor. Entscheidend ist, dass die Zentralpumpe mit halber Kurbelwelldrehzahl angetrieben werden kann. Das könnte mit einer Zahnkette, mit einem Zahnriemen, aber auch mit einer Stirnradverzahnung erfolgen.



**Bild 15** Zentralpumpe mit angeflanschter Elektronik und Magnetventilen für die Beeinflussung der Ventilerhebungskurven



**Bild 16** Seitenansicht von Bild 15

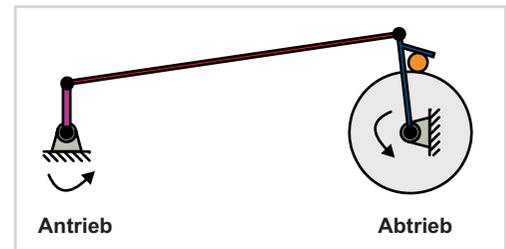
Die herkömmliche Nockenwelle entfällt und schafft damit Platz im Zylinderkopf. Die Höhe des Motors kann entsprechend niedriger ausgeführt werden. Die Forderungen bezüglich des Fußgängerschutzes können damit leichter erfüllt werden. Oder die

freigewordene Bauhöhe wird genutzt, um ein spezielles Getriebe direkt in das Motorgehäuse zu integrieren, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird. Im Unterschied zu anderen nokkenwellenlosen Ventiltrieben bestimmt der Nocken in der hydraulischen Zentralpumpe nach wie vor die maximale Ventilerhebungskurve, die so ausgelegt wird, dass eine Kollision Ventil mit Kolben sicher ausgeschlossen werden kann. Innerhalb dieser maximalen Kurve sind dann, wie beim UniAir System, fast alle kleineren Ventilhuber mit verkürzter Dauer möglich.

## Getriebe ohne Gehäuse

Wenn es im Fahrzeug klare Schnittstellen gibt, dann zwischen Motor und Getriebe. Die übliche Struktur bei den Fahrzeugherstellern spiegelt das wieder. Die Motoren- und Getriebeentwicklungen sind starke Abteilungen, die erst ganz oben in der Hierarchie zusammengeführt werden. Und dementsprechend sieht die Schnittstelle aus. Ein Flansch, an dem das Getriebe angeschraubt wird und ein Kurbelwellenlochbild, an dem das Schwungrad befestigt wird. Gerade wenn so eine Schnittstelle über Jahrzehnte nicht angetastet wird, könnte es sich lohnen, diese starre Grenze einzureißen und Motor und Getriebe stärker zu integrieren. Die folgenden Vorschläge sind daher eher als Anregungen zu verstehen und nicht als konkrete Ausführungsanleitung.

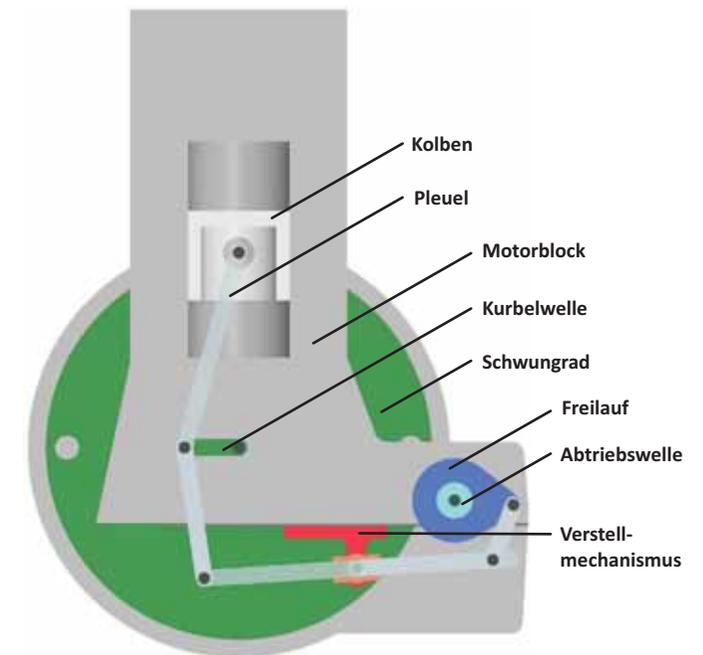
Ausgangspunkt der Betrachtung ist das bereits im LuK Kolloquium 2002 vorgestellte Kurbelgetriebe [5]. Damals, als stufenlose Getriebe noch in aller Munde waren, wurde vorgeschlagen, über einen verstellbaren Kurbel-



**Bild 17** Kurbelgetriebe mit dem eine stufenlose Übersetzung aus dem Stand heraus möglich wird

mechanismus eine hin- und hergehende Bewegung zu erzeugen, die auf einen Freilauf wirkt (Bild 17). Durch Verstellen der Kurbellänge am Antrieb kann die Ausgangsdrehzahl stufenlos von null bis zur Höchstdrehzahl verstellt werden. Je größer die Amplitude dieser Antriebsbewegung ist, desto stärker, d. h. schneller wird ein Freilauf angetrieben. Um einen gleichmäßigen Abtrieb zu erreichen, werden mehrere Freiläufe durch unterschiedliche Kurbeln zeitversetzt angetrieben. Damit ist dann stets mindestens ein Freilauf im Eingriff und die Abtriebsdrehzahl ist hinreichend geblättert.

Um diesen Vorschlag wurde es über Jahre hinweg ruhig. Ansatzpunkt der neuen Überlegung ist die



**Bild 18** Prinzipische Skizze eines in das Motorkurbelgehäuse integrierten Kurbelgetriebes

Tatsache, dass das Kurbelgetriebe eine Hin- und Herbewegung benötigt, die genau genommen im Motor bei den Zylindern schon vorliegt. Deshalb wurden, wie in Bild 18 dargestellt, weitere Pleuel eingeführt, die eine Wippe betätigen, deren Auflagepunkt verschoben werden kann. Damit wird am anderen Ende der Wippe eine Auf- und Abbewegung erzeugt, die stufenlos verändert werden kann und einen Freilauf antreibt. Die Ausgangsdrehzahl ist dann wieder stufenlos von null auf eine maximale Drehzahl verstellbar. Dieser Vorschlag würde nicht nur das Getriebe weitgehend in das Kurbelgehäuse integrieren. Es würde auch noch ein weiterer Vorteil entstehen. Die Kolbenkraft wird fast geradlinig auf die Wippe übertragen. Die Kurbelwelle überträgt im Idealfall nur noch geringe Momente und wird im Wesentlichen nur noch zur Synchronisierung der einzelnen Zylinder und Kurbeln benötigt.

Da für die gleichmäßige Momentenübertragung idealerweise acht Freiläufe zeitversetzt angetrieben werden sollten, entfallen bei einem Vierzylindermotor jeweils zwei Freilaufpleuel für die Wippenbetätigung auf ein Motorpleuel. Bild 19 zeigt, wie rechts und links eines jeden Motorpleuels die winkelversetzten Freilaufpleuellager angeordnet sind.

Es soll nicht verschwiegen werden, dass eine Reihe ungelöster Probleme einer solchen Integration von Motor und Getriebe im Wege stehen könnten. Es ist z. B. nicht sicher, ob Freiläufe mit verschmutztem Motoröl problemlos funktionieren können. Der Freilaufmechanismus kann in der einfachen Ausführung kein Schubmoment übertragen. Es wurde zwar in der Vergangenheit vorgeschlagen, umschaltbare Freiläufe einzusetzen. Dies würde den mechanischen Aufwand aber weiter erhöhen. Deshalb könnte eine Kombination mit einem Hybridantrieb die ideale Lösung darstellen. Der Elektromotor übernimmt das Schubmoment, gewinnt dabei die Bremsenergie zurück und ersetzt den Rückwärtsgang.

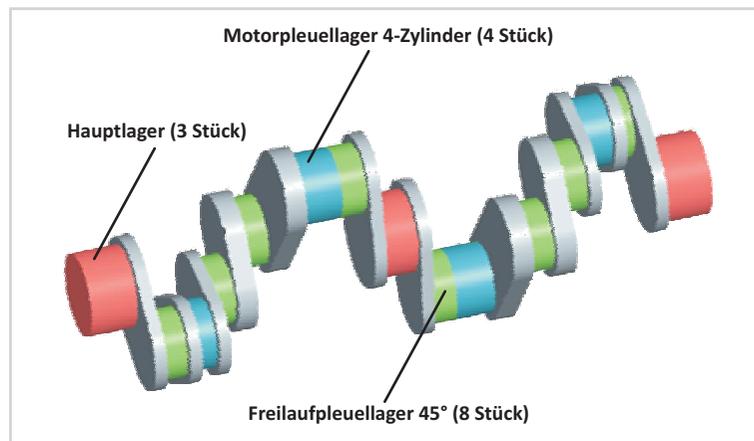


Bild 19 Kurbelwelle mit den zusätzlichen Lagern für die Getriebepleuel

## Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag behandelt einige Visionen rund um Motor und Getriebe. Wie eingangs schon erwähnt, handelt es sich dabei nicht um fertig entwickelte oder gar serienreife Produkte, sondern eher um vage Entwicklungsrichtungen.

Initiiert wurden diese Bestrebungen durch die rasanten Veränderungen, die die CO<sub>2</sub>-Problematik und die endliche Ressourcenverfügbarkeit mit sich bringen. Die Frage, ob und wie schnell E-Mobilität die heutigen Antriebsformen ablösen kann, wird ganz entscheidend davon abhängen, zu welchen Veränderungen die heutigen Technologien fähig sind. Und möglicherweise sind es nicht nur die kleinen Schritte, die ausreichend schnellen Fortschritt bringen, sondern die größeren Sprünge. Und dazu müssen auch unkonventionelle Wege gegangen werden. Hierzu sollte eine kleine Auswahl gegeben werden, die als Anregung zu verstehen ist.

## Literatur

- [1] Zink, M.; Hausner, M.: LuK Kupplungssysteme und Torsionsdämpfer – Schlüsselemente für effiziente Antriebsstränge; 9. Schaeffler Kolloquium, 2010
- [2] Reik, W.: Die selbsteinstellende Kupplung; 5. LuK Kolloquium, 1994, S. 43 ff.

- [3] Küpper, K.; Serebrennikov, B.; Göppert, G.: Software für automatisierte Getriebe – Erfahrbare Intelligenz; 8. LuK Kolloquium, 2006, S. 154
- [4] Haas, M.; UniAir - Der elektrohydraulische Ventiltrieb; 9. Schaeffler Kolloquium, 2010
- [5] Friedmann, O.; Haas, W.; Mair, U.: Das Kurbelgetriebe-CVT, 7. LuK Kolloquium, 2002