



Bevor ich mich 2009 an die Entwicklung dieses stufenlosen Getriebes machte, habe ich nicht nur den Verbrenner als Antrieb in Betracht gezogen, sondern alle Antriebsarten.

Die Grundfunktion des Getriebes, basiert auf der Impuls-Addition. Diese Funktion habe ich in der Hydraulikvariante aufgebaut und auch ausprobiert.

Die hydraulische Lastpfadkombination aus Hydraulik-Verstell-Pumpe als Eintriebs-Element und Hydraulik-Konstant-Motor als Austriebs-Element ist ja allgemein bekannt. Dieses System hat aber den Nachteil, dass der Wirkungsgrad-Verlust durch diese hydraulischen Elemente immer vorhanden ist, also bei jeder Übersetzung. Dann kommt noch hinzu, dass die Übertragung hoher Leistungen auf hydraulischem Weg nur mit einem hohen Öl-Durchfluss realisiert werden kann. Hierzu die Formel: Druck in bar mal Durchfluss in Liter pro Minute, das Ganze geteilt durch 600, ergibt die Leistung in Kilowatt. Der Maximaldruck in der Fahrzeug-Leistungshydraulik liegt bei ca. 400 bar, 600 bar ist das höchste der Gefühle. Das Öl macht auch einen höheren Druck mit, das Problem ist das Material und die Grenze wird über den Elastizitätsmodul definiert.

Bei Hydrauliköl geht man davon aus, dass 1 Liter Öl etwa 10 mal in der Minute umgewälzt werden kann. Wenn ich also 10 Liter in der Minute Durchfluss benötige, muss ich einen Liter Öl vorhalten. Der Wirkungsgrad dieser Kombination liegt bei $0,9 \times 0,9 = 0,81$, wenn man hochwertige Hydraulikbauteile einsetzt.

Als Beispiel gerechnet bei 400 bar Druck, 10 Liter pro Minute Durchfluss, kommen 6,66 Kilowatt Eintriebs-Leistung und, multipliziert mit dem Wirkungsgrad 0,81, nur 5,4 Kilowatt Austriebs-Leistung heraus. Der Wirkungsgradverlust setzt sich in Wärme um, also haben wir

6,66 Kilowatt Eintriebs-Leistung abzüglich 5,4 Kilowatt Austriebs-Leistung gleich 1,26 Kilowatt Heizleistung, die man durch Kühlung aus dem Öl bekommen muss.

Bei meinen Überlegungen bin ich immer von einer Antriebs-Leistung von 30 kW ausgegangen. Das heisst dann, dass ich hydraulisch nur 24,3 kW Austriebs-Leistung habe, dafür aber 5,7 kW Heizleistung und bei 400 bar Betriebsdruck eben 4,5 Liter Öl.

Einen Vorteil hat diese Kombination allemal, man kann ein relativ hohes Austriebsmoment bei geringster Leistungszufuhr generieren. Der Nachteil ist halt der hohe Funktions-Verlust.

Jetzt hat ja die Menschheit nicht geschlafen und Irgendeiner ist dann auf das Teilen der Lastpfade gekommen. Seitdem gibt es die Kombination: Mechanischer Lastpfad und Hydraulischer Lastpfad.

Man nimmt also den normalen Planetensatz, treibt an dem zentralen Sonnenrad ein und treibt am Steg (Planetenträger) aus.

Dreht man am Sonnenrad, bei stehendem Steg, dreht sich das Hohlrad, also das innenverzahnte äussere Zahnrad.

Montiert man an die Eintriebswelle zum Sonnenrad einen Hydraulik-Verstell-Motor und an das Hohlrad eine Hydraulik-Konstant-Pumpe und stellt man den Hydraulik-Verstell-Motor auf maximale Schluckmenge (Fördermenge, Öldurchsatz), dreht sich das Hohlrad schnell.

Wird die Schluckmenge verringert, also das Hohlrad abgebremst, beginnt sich der Steg (Austriebs-Element) zu drehen.

Wie laufen die Impulse durch dieses System? Wir halten das Austriebs-Element, also den

Steg, fest. Dann geben wir dem Eintrieb, dem Sonnenrad des Planetentriebs, und damit auch dem auf der Eingangswelle montierten, auf maximale Schluckmenge gestellten Hydraulik-Verstell-Motor eine bestimmte Drehzahl. Am Eingang der Eintriebswelle und am Ende der Austriebswelle ist je ein(1) Drehmomentfühler montiert.

Die Impulse laufen also ausgehend vom Sonnenrad über die Planetenräder auf das Hohlrad, über die am Hohlrad montierte Hydraulik-Konstant-Pumpe, die Öl-Verbindungsleitung zum Hydraulik-Verstell-Motor und von diesem auf die Eintriebswelle.

So sieht also der Impuls-Weg aus, das heisst aber nicht, dass der Impulsweg auch Impulse durchleiten kann.

Hierzu muss der Impuls-Weg oder Impuls-Pfad, geschlossen werden.

Das Element zum schliessen des Impulspfades ist der Hydraulik-Verstell-Motor auf der Eingangswelle.

Wir halten also die Ausgangswelle hinter dem Drehmomentfühler fest und verringern das Schluckvolumen des Hydraulik-Verstell-Motors bis sich in der Verbindungs-Ölsäule zwischen Pumpe und Motor ein Druck aufbaut.

Nun ist der Impulspfad geschlossen und es werden auch schon Impulse transportiert, das sehen wir an dem Drehmoment an der Austriebswelle und dem sehr viel kleineren Drehmoment an der Eintriebswelle.

Installieren wir noch einen zusätzlichen Drehmomentfühler auf der Eintriebswelle zwischen Hydraulik-Motor und Sonnenrad, dann zeigt dieser Drehmomentfühler mehr Drehmoment an als der Drehmomentfühler nach dem Antriebsmotor.

Weshalb jetzt das?

Die am Hydraulikmotor ankommenden Impulse werden an die Eintriebswelle weitergegeben, also hinzuaddiert

Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem Druck in der Hydraulik-Verbindungsleitung, dem Austriebs-Moment, dem Antriebs-Moment und dem Eintriebsmoment.

Der Druck in der Verbindungsleitung wird gesteigert, indem man versucht, die Schluckmenge des Hydraulikmotors zu verringern.

Die genaue Herleitung ist in der VRG-Vorstellung genauer beschrieben.

Jetzt hat ja Leistung auch etwas mit Bewegung zu tun. Bei unserem Planetensatz sieht das dann so aus, dass das sich drehende Eintriebs-element, die Sonne, bei angelegtem Drehmoment auch eine Leistung transportiert. Das festgehaltene Austriebs-element gibt, da es nicht rotiert, keine Leistung ab, sondern nur ein Drehmoment, dafür transportiert das sich drehende Hohlrad wieder eine Leistung, weil auch dort ein Drehmoment anliegt. Diese Leistung wird durch die Konstant-Pumpe auf die fließende Ölsäule übertragen und diese fließende Ölsäule gibt diese Leistung über den sich drehenden Hydraulik-Motor auf die Eintriebswelle weiter.

Kommt das Hohlrad zum Stillstand, erreicht das Austriebs-element, der Steg, seine höchste Drehzahl und transportiert eine Leistung. Das stehende Hohlrad transportiert keine Leistung mehr, die Ölsäule hat keinen Ölfluss mehr und der Hydraulik-Motor überträgt keine Leistung auf die Eintriebswelle.

Es transportiert nur noch der Planetensatz in sich die Leistung, deswegen ist auch nur die Verlustleistung des Planetensatzes für den Gesamtverlust zum Ansatz zu bringen. Dieser Verlust beträgt etwa 2%.

Bei diesem System haben wir im Vergleich zu dem vollhydraulischen System den Vorteil, dass sich mit der Verringerung der Hohlrad-drehzahl auch der Gesamt-Wirkungsgradverlust verringert. Der Hydraulikverlust verringert sich von anfänglich 19% auf 0%. Der Wirkungsgradverlust des Planetensatzes von 2% ist immer vorhanden. Der Wirkungsgradverlust verläuft also von anfänglich 21% auf 2%.

Dies erkaufen wir uns aber mit der mehrfachen Ölmenge und zwar richtet sich diese dann nach dem Übersetzungsverhältnis des Planetensatzes von der Sonne zum Hohlrad. Ist dieses Übersetzungsverhältnis anfänglich 3:1, benötigen wir $3 \times 4,5 \text{ Liter} = 13,5 \text{ Liter Öl}$, natürlich abnehmend bis zum Stillstand der Ölpumpe/des Hohlrades. Der Wirkungsgradverlust verringert sich auch von anfänglich 21% auf dann 2%.

Der gleiche Zusammenhang besteht auch bei sich drehendem Austriebsselement. Wird das Hohlrad mit angebaute Pumpe abgebremst, steigt die Drehzahl des Austriebsselementes. Das Hohlrad fungiert also als sogenanntes Regelement.

Das Öl die Ölsäule, zwischen der Pumpe und dem Motor ist nichts Anderes als eine Stütze, also ein Stützelement. Die Verstelleinheit an dem Hydraulikmotor fungiert als Initiiererelement. Mit ihr wird der Impulskreis geschlossen und die Impulsstärke initiiert.

Wir haben also verschiedene Elemente für einen funktionierenden und addierenden Impulskreis.

Das Eintriebs-Element

Das Austriebs-Element

Das Regel-Element

Das Stütz-Element

Das Initiier-Element

Alle Elemente stehen in einem kausalen Zusammenhang zueinander.

Diese Elemente sind notwendig, ob nun der Impulskreis hydraulisch oder mechanisch geschlossen wird.

Den hydraulisch geschlossenen Impulskreis gibt es schon, den mechanisch geschlossenen Impulskreis eben nicht.

Alle bekannten Stufenlos-Getriebe basieren in ihrer Hauptfunktion auf dem Reibschluss. Die bekannten Umschlingungsgetriebe können in einem schmalen Bereich eine stufenlose Übersetzung generieren, eignen sich aber nicht für einen NULL-Durchgang.

Die Toroid-Getriebe basieren auf dem Reibrad-Prinzip und können einen NULL-Durchgang generieren.

Allen gemein ist die Grenze bei den Materialbelastungen an den Reibkontaktstellen und den dazu notwendigen hohen Anpress-Kräften.

Diese Funktionskräfte werden in der Regel hydraulisch erzeugt und gehen in vollem Umfang als wirkungsgradmindernd in die Wirkungsgradberechnung ein.

Ein Stufenlos-Getriebe muss über einen sogenannten Variator verfügen.

In dem von den USA erteilten Patent und der zur Prüfung an das EU-Patentamt eingereichten Schutzrechtsanmeldung ist der mechanisch geschlossene und initiierte Impulskreis beschrieben.

In den vergangenen 6 Jahren wurden alle erdenklichen Varianten und Lösungsansätze entwickelt und bewertet.

Eine Funktion stellt sich nur mit diesen oben beschriebenen Elementen ein, es sollte keines weggelassen werden und es muss auch kein zusätzliches hinzugefügt werden.

Es gab aber schon in gewissem Grad eine Weiterentwicklung, vor allem im Hinblick auf die Fertigungstechnik und die wirtschaftliche Herstellbarkeit.

Weshalb aber so eine Art von Getriebe?

So ein Verbrenner hat es an sich, dass er einfach eine Leerlaufdrehzahl braucht. Bei Leerlaufdrehzahl verbraucht er eben genau so viel Energie um sich selbst am Leben zu halten. Aus dieser zugeführten Energie generiert der Verbrenner eine bestimmte Leistung. Die Nennleistung eines Verbrenners bei einer bestimmten Drehzahl ist immer die an der Kurbelwelle abgegebene mechanische Leistung.

Diese mechanische Leistung errechnet sich ganz grob aus Drehzahl mal Drehmoment, genauer dann nach dieser Formel $P=(2*\pi*M*n)/60000$, also P in kW, M in Nm, n in 1/min.

Die Primärenergieausbeute liegt aber in der Verteilung bei: je etwa 30% mechanische Leistung, Wärme im Abgas und Wärme im Kühlsystem. Die restlichen etwa 10% sind die Reibungen, Schwungmomente, Funktionsmomente innerhalb des Motors.

Der sekundäre Wirkungsgrad liegt also bei etwa 30%.

Im Leerlauf muss er also nur diese 10% an Leistung des Nennmomentes bringen. Will man ihm also mehr Drehmoment und daher auch mehr an Leistung abverlangen, muss man ihn überfetten, da er ja im Leerlauf auf seinem optimalen Lamda-Wert läuft. Jetzt hat die Überfettung auch ihre Grenzen, man kommt

also nicht darum herum, die Drehzahl zu erhöhen wenn man ihm mehr Leistung abverlangen will.

Das heisst also, dass der Verbrenner bei Leerlaufdrehzahl relativ wenig abgegebene Leistung generieren kann.

Will man einen Gegenstand aus der Ruhelage in eine beschleunigte Bewegung bringen, braucht es das sogenannte Stossmoment oder einfach den Stoss in Bewegungsrichtung. Wurde der Gegenstand aus der Ruhelage, also der Statik, in eine Bewegung, der Dynamik, gebracht sinkt die Schiebe- oder Bewegungskraft je nach Beschleunigung ab oder bleibt bei maximaler Beschleunigung auf diesem Wert. Bei einem Verbrenner mit Trockenkupplung und Handschaltgetriebe ist das sehr schön zu sehen oder besser, zu fühlen.

Beim Anfahren gibt man für gewöhnlich ein wenig Gas, man erhöht also die Drehzahl des Motors. Dann lässt man die Kupplung kommen, für gewöhnlich etwas schneller, um sie dann bei der geringsten Bewegung des Fahrzeugs wieder ein wenig zu treten, sonst geht der Motor aus.

Was ist passiert? Durch die Erhöhung der Motordrehzahl wurde die Schwungmasse des Motors „aufgeladen“, durch das etwas ruckartige Einkuppeln wurde diese Schwungmassenenergie durch die Kupplung in das Getriebe an die Räder weitergeleitet, das Fahrzeug beginnt die Bewegung. Man hat nichts anderes als das Stossmoment eingeleitet.

Danach wird die Motordrehzahl, wenn sie noch nicht weit genug abgesunken ist durch das zweite Einkuppeln auf dann Getriebeeingangsdrehzahl gebracht und durch Gasgeben weiter beschleunigt.

Bei einem Verbrenner mit Wandlerkupplung ist die Generierung dieses Stossmomentes in der Wandlersteuerung integriert.

Einzig bei den Doppelkupplungsgetrieben wird versucht, dieses Stossmoment über Kennfelder zu generieren, was so mehr schlecht als recht funktioniert.

Eines ist aber immer gegeben: Solange es eine Differenz zwischen Antriebsdrehzahl und Eintriebsdrehzahl in das Getriebe gibt, gibt es auch immer eine Verlustleistung im Kuppel-

ment, welche meisst in Wärme umgesetzt wird.

Das VRG gibt diese in der Schwungmasse gespeicherte Energie bei der Drehzahlerhöhung aus der Leerlaufdrehzahl ebenso schlagartig ab, wie man dies mit dem schnellen Ankuppeln beim Handschaltgetriebe auch macht. Danach, sobald das Fahrzeug in Bewegung ist, fällt die Leistungsanforderung ab wenn man nur dahingleiten will. Will man schnell beschleunigen gibt man einfach Vollgas und erhöht somit die Eintriebsdrehzahl und damit das Übersetzungsverhältnis von Getriebe-Eintriebsdrehzahl zu Getriebe-Ausgangsdrehzahl. Je höher diese Übersetzung ist, umso höher ist auch die Drehmomentübersetzung.

Bei dem stufenlosen Getriebe mit hydraulischer Stütze, so wie schon beschrieben, ist der grösste Wirkungsgradverlust bei der grössten Übersetzung bei 21% und sinkt mit der Übersetzung auf 2%.

Bei dem VRG ist der grösste Wirkungsgradverlust ebenfalls bei der grössten Übersetzung, also bei 5% und sinkt mit der Übersetzung auf 2%.

Jetzt zu den Elektroantrieben und zur Elektromobilität.

Für einen reinen Maschinenbauer ist die Elektrizität etwas gewöhnungsbedürftig, aber durchaus auch begreifbar.

Ein Elektromotor kann über den Strom ein Stillstandsmoment generieren, was der Verbrenner eben nicht kann.

Mit einem Elektromotor kann man auch aus dem Stand heraus mit seinem Nennmoment am Antriebsrad anfahren, wenn man kein Getriebe dazwischen hat, mit einem Getriebe mit fester Übersetzung oder einem Schaltbaren Getriebe wird dieses Anfahrmoment eben durch die Getriebeübersetzung erhöht.

So richtig ausreichen wird's aber nicht, da die Momentübersetzung bei etwa 20:1 liegt.

Man muss also einen ganz kurzen Hochstromimpuls geben, in Ermangelung der Schwungmasse eines Verbrenners.

Jetzt kommt die Sache mit der Leistung über Drehzahl und Drehmoment und da ist der Elektromotor schon im Vorteil, hat er doch aus dem Stillstand heraus über den Nennstrom sein Nennmoment. Bei einem Verbrenner muss man sich da mit den Abgasturboladern behelfen um dieses Manko ein wenig zu lindern.

So richtig ordentlich wird die Beschleunigung bei einem Elektroantrieb allerdings durch die Möglichkeit der kurzzeitigen Überstromung und der damit einhergehenden Momenterhöhung und natürlich auch Leistungserhöhung.

Diese Aktion frisst natürlich auch ordentlich Strom, vor allem in den neuerdings angestrebten 30 km-Zonen und dann noch, wie in Stuttgart, wenn es nur bergauf oder bergab geht, eine Fahrt auf der Ebene quasi fast abgeschlossen ist.

Mit einem dem Elektromotor nachgeschalteten VRG braucht es weder einen kurzzeitigen Spitzenstrom, noch eine Stromerhöhung. Der Stromspareffekt liegt in der stufenlosen Übersetzung und dem niedrigen Wirkungsgradverlust.

Die Weiterentwicklung des VRG zielt natürlich auch da hin, dass dieses Getriebe mit einer (1) Eingangsdrehrichtung betrieben werden kann. Zum Drehrichtungswechsel an der Austriebswelle muss nicht angehalten und umgeschaltet werden, man kann schon noch während der langsamen, ausrollenden Vorwärtsfahrt die Rückwärtsfahrt anwählen. Das Getriebe bremst dann selbsttätig ab und erhöht die Geschwindigkeit in die andere Fahrtrichtung je nach Anforderung durch die Gaspedalstellung. Dies funktioniert Antriebsart-unabhängig. Der Elektromotor kann also auf nur eine Drehrichtung hin optimiert werden.

Jetzt kommt noch ein Vorteil dazu. Bei niederen Temperaturen sind die Batterien in der Regel etwas unwillig mit der hohen Stromabgabe, also da wills nicht so optimal nach vorne gehen. Das VRG benötigt zum Anfahren und zum Fahren bei niederen Geschwindigkeiten einen relativ geringen Strom.

Die Batterien haben also Zeit sich auf Betriebstemperatur zu bringen und eventuell kann die

Abwärme des Elektromotors auch zum temperieren der Batterien mitverwendet werden.

Jetzt noch ein paar Worte zum generellen Fahrzeugbau.

Es wird immer wieder beklagt, dass die Elektrofahrzeuge zu schwer sind. Diese Gewichtsproblematik ist auch bei den verbrennergetriebenen Fahrzeugen gegeben.

Ein Frontantrieb braucht zur Kraftübertragung auf der Antriebsachse ein permanent hohes Gewicht. Ein Heckantrieb erhöht die Achslast mit der Beschleunigung. Wird die Hinterachslast erhöht, sinkt in gleichem Maße die Vorderachslast.

Beim Frontantrieb ist dieser Sachverhalt auch gegeben, auch da wird die Hinterachse bei Beschleunigung belastet und die Vorderachse sinnigerweise entlastet. Bei Bergauffahrt sinkt die Achslast an der Vorderachse auch, das heisst, der Lastvektor wandert hinter die Vorderachse. Beim Heckantrieb wandert der Lastvektor auch hinter die Hinterachse, aber der Vorderwagen mit seinem Gewichts-Hebel sorgt eben doch für eine Achslasterhöhung, diesen Vorderwagen-Gewichts-Hebel hat der Fronttriebler nicht in diesem Maße.

Gewicht bewegen frisst natürlich Energie und erhöht auch den Reifenabrieb, was so mancher PKW.-Hersteller einfach nur in Abrede stellt.

Bei einem Fronttriebler ist dies noch durch die Achsgeometrie verstärkt worden.

Um das Ansteigen des Vorderwagens beim Beschleunigen zu verhindern, wurde der Lenkrollradius ins Negative verschoben. Das heisst dann, dass bei der Beschleunigung die Vorderachse in Nachspur geht und nicht in Vorspur wie früher oft gesehen. Nachspur hat auch den Vorteil, dass sie den Vorderwagen nach unten „zieht“, aber sie hat eben auch den Nachteil, dass die Reifen etwas mehr Abrieb produzieren, vor allem wenn die Achse nicht sauber eingestellt ist.

Dann kommt noch dazu, dass Breitreifen im Gegensatz zu normalbreiten Reifen bei gleicher Laufleistung eben auch mehr Abrieb produzieren, vom erhöhten Rollwiderstand gar nicht zu reden.