

Stufenlosgetriebe bei Traktoren – Teil I

(R)Evolutionäre Weiterentwicklung

Die letzte System-/Marktübersicht über stufenlose Traktorgetriebe erschien in der eilbote-Ausgabe 17/2015. Die bei Landwirtschaftstraktoren üblichen Konzepte mit hydrostatisch-mechanischer Leistungsverzweigung wurden seither weiterentwickelt und die Anwendungsvielfalt hat sich erneut vergrößert. Die jüngsten Entwicklungen zeigen den Trend zu Antriebsstrangkonzepthen, bei welchen neben Dieselmotor und Getriebe auch das Fahrwerk miteinbezogen wird. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über den Stand der Technik. Teil II im nächsten Heft präsentiert das aktuelle Marktangebot in Westeuropa.



Stufenlosgetriebe werden zunehmend zu Antriebsstrangkzepten weiterentwickelt, bei welchen neben dem Dieselmotor neu auch das Fahrwerk miteinbezogen wird.

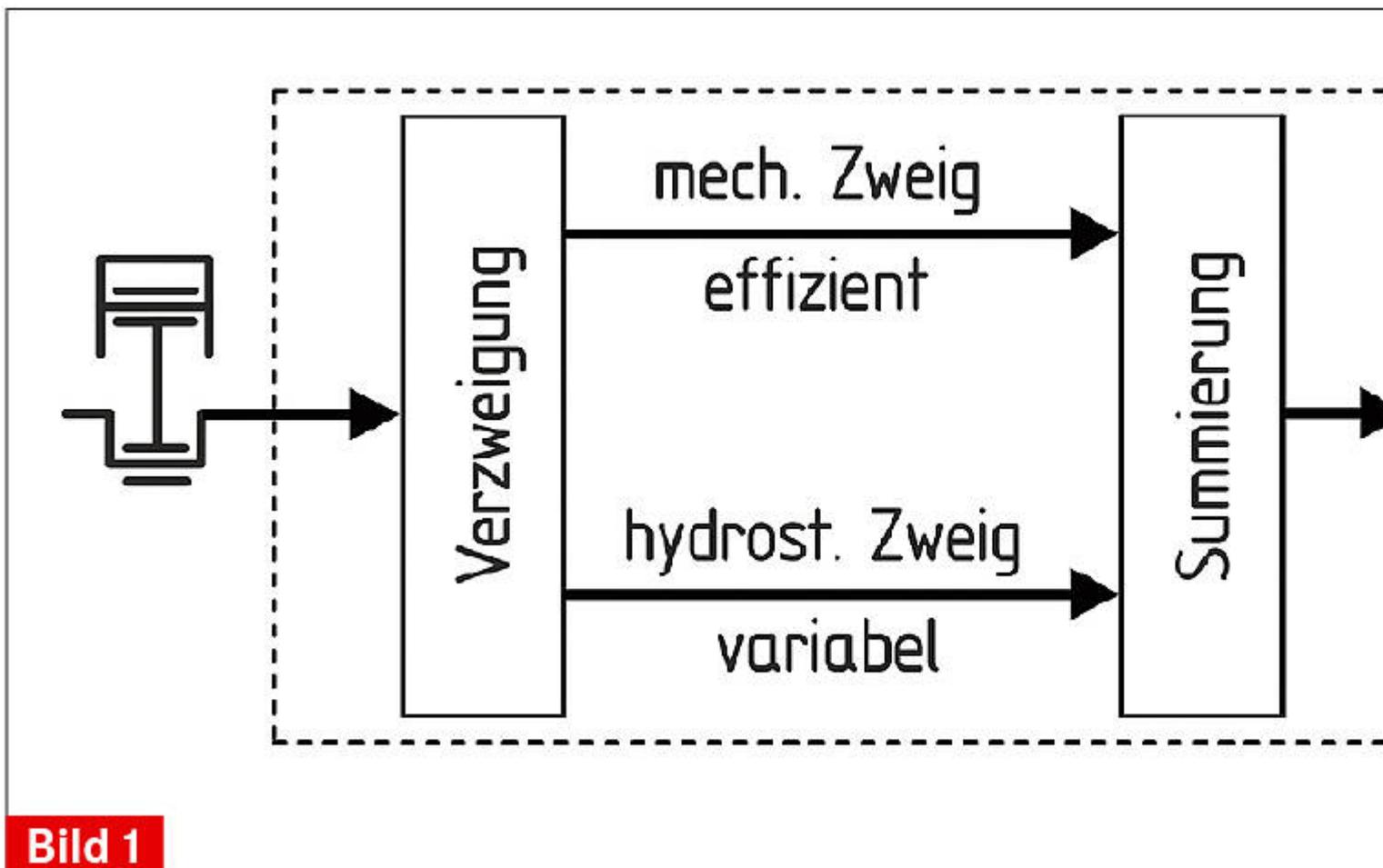


Bild 1

Grundprinzip der hydrostatisch-mechanischen Leistungsverzweigung.

Leistungsverzweigte Stufenlosgetriebe für Traktoren sind seit knapp 25 Jahren auf dem Markt. Wurden diese zuerst für Standardtraktoren in den mittleren und oberen Leistungsklassen angeboten, konnten sie sich in den letzten Jahren sowohl bei großen Systemtraktoren und Knickkernern als auch bei kleineren Traktoren im Leistungsbereich um 75 kW (100 PS) etablieren. Selbstfahrende Erntemaschinen (Mähdrescher, Feldhäcksler...) und auch Kompakttraktoren für den Kommunaleinsatz sind schon viel länger mit stufenloser Getriebetechnik unterwegs, verbaut werden hier aber direkte Hydrostaten, welche die gesamte Antriebsleistung für den Fahrtrieb hydrostatisch übertragen. Die Wirkungsgrade liegen damit auf einem wesentlich tieferen Niveau. Da hier mit dem Fahrtrieb in der Regel aber nur das Trägerfahrzeug selbst bewegt werden muss und der Großteil der Motorleistung für den Antrieb der Arbeitsorgane (Häcksler-/Dreschtrammel...) resp. der Anbaugeräte (Mähwerke, Gebläse...) gebraucht wird, kommt den Wirkungsgraden eine geringere Bedeutung zu.

Hydrostatisch-mechanische Leistungsverzweigung

Anders sieht es bei landwirtschaftlichen Traktoren aus, weil diese beim Ziehen von Arbeitsgeräten oder Anhängern oft die gesamte Motorleistung in Zugleistung umsetzen. Hohe Getriebewirkungsgrade sind hier deshalb sehr wichtig, weshalb die Hersteller fast ausschließlich auf stufenlose Getriebekonzepte mit hydrostatisch-mechanischer Leistungsverzweigung setzen. Die Motorleistung wird über ein Verzweigungselement in einen mechanischen und einen hydrostatischen Zweig aufgeteilt. Der mechanische Zweig ist sehr effizient, aber nicht variabel; der hydrostatische Zweig hingegen sehr variabel, aber weniger effizient. Nach der stufenlosen Wandlung von Drehmoment und Drehzahl werden die beiden Leistungswege über ein Summierenselement wieder zusammengeführt. Zur Erhöhung von Zugkraft und Geschwindigkeitsspreizung werden dem stufenlosen Getriebeteil meistens mechanische Fahrbereiche und – je nach Grundstruktur – mechanische Reversiereinrichtungen nachgeordnet, wie Bild 1 zeigt.

Aus der Kombination von effizienter Mechanik und variabler Hydrostatik ergeben sich stufenlose Fahrtriebe, die auch bei traktortypischen Zugarbeiten akzeptable Wirkungsgrade aufweisen.

Kernelemente: Planetengetriebe und Hydrostateinheit

In Stufenlosgetrieben mit hydrostatisch-mechanischer Leistungsverzweigung gibt es immer ein Planetengetriebe und eine Hydrostateinheit (Pumpe/Motor). Bei den Planetengetrieben kommen unterschiedliche Ausführungen zur Anwendung, die für das Verständnis wichtigen Eigenschaften sollen nachstehend anhand eines einfachen Standard-Planetengetriebes kurz erklärt werden. Ein solches besteht aus einem Sonnenrad, einem Hohlrad, einem Planetenträger (auch Steg genannt) und drei Planetenrädern, siehe Bild 2. Die drei erstgenannten Elemente können mit Wellen verbunden werden, die nach außen führen. Wird eine davon als Antriebswelle und die zwei anderen als Abtriebswellen benutzt, ergibt sich ein Verzweigungsgetriebe; bei zwei Antriebswellen und einer Abtriebswelle ein Summierungsgetriebe. Die Drehmomentverhältnisse zwischen den drei Wellen sind dabei – in Abhängigkeit der Zähnezahlen von Sonnen- und Hohlrad – in jedem Betriebszustand gleich. Die Drehzahlverhältnisse hingegen sind variabel, mit der Drehzahlvorgabe an zwei Wellen ergibt sich die Drehzahl der dritten Welle.

Mit der Hydrostateinheit wird einerseits das Übersetzungsverhältnis stufenlos verstellt, andererseits aber auch Leistung übertragen. Der Gesamtwirkungsgrad der Getriebe hängt deshalb relativ stark vom Wirkungsgrad des hydrostatischen Zweiges ab, was insbesondere für Grundstrukturen mit hohen hydrostatischen Leistungsanteilen gilt. Aus diesem Grund wurden hierfür spezielle Hydrostateinheiten entwickelt. Fendt leistete in Zusammenarbeit mit Sauer-Sundstrandt Pionierarbeit und brachte die Großwinkel-Schrägachsentechnik mit einem maximalen Schwenkwinkel von 45° in den 1990er-Jahren zur Serienreife (erstmaliger Einbau im Fendt Favorit 926 Vario, 1996). Solche Schrägachsen-Einheiten werden seit 2001 auch von John Deere in den eigenen Stufenlosgetrieben für die amerikanischen Standardtraktorbaureihen (7010/7020/7030/7R und 8030/8R) und seit 2014 auch von Claas für die Eigenentwicklungen EQ200/EQ220 verwendet. Auch die A41CT von Bosch-Rexroth zählt zu diesen speziellen Hydrostateinheiten, hier wird eine verstellbare Schrägscheibenpumpe (Schwenkwinkel max. 20°) mit einem fixen 40°-Schrägachsenmotor kombiniert. Verbaut werden solche Einheiten beispielsweise von Case New Holland in den eigenen CCM-Stufenlosgetrieben und zunehmend auch von ZF in ECCOM- und TERRAMATIC-Getriebemodellen.

Je nach Anordnung von Planetengetriebe und Hydrostateinheit im Leistungsfluss können drei leistungsverzweigte Grundstrukturen unterschieden werden: Ausgangskopplung, Eingangskopplung und Hybridkopplung (Compound). Diese Grundstrukturen wurden interessanterweise bereits Ende der 1960er-Jahre ausführlich beschrieben, u.a. vom amerikanischen John Deere-Ingenieur James H. Kress.

Einfache Mechanik bei der Ausgangskopplung

Bei der Ausgangskopplung erfolgt die Verzweigung über ein Planetengetriebe, die Summierung über eine Zahnradstufe. Im hydrostatischen Zweig werden große Schrägachsen-Maschinen mit Primär- und Sekundärverstellung (Pumpe/Motor) verwendet, die Anzahl Fahrbereiche kann dadurch klein gehalten werden. Aufgrund des Fahrtrichtungswechsels über negatives Ausschwenken der Pumpe ist zudem keine separate Reversiereinrichtung erforderlich, wodurch der mechanische Getriebeaufbau insgesamt einfach ausfällt (siehe Prinzipdarstellung in Tabelle 1). Die Bezeichnung Ausgangskopplung ist auf die „drehzahlstarre“ Anbindung der Hydrostateinheit an den Getriebeausgang zurückzuführen und es wird teilweise auch von Sekundärkopplung gesprochen. Eine weitere Bezeichnung ist Speed Split, welche die variable Drehzahl- und die fixe Drehmomentaufteilung im Verzweigungselement Planetengetriebe berücksichtigt.

Das Anfahren erfolgt bei ausgangsgekoppelten Getrieben rein hydrostatisch. Im Stillstand liegt der Schwenkwinkel der Pumpe bei 0° , derjenige des Motors bei 45° . Beim Beschleunigen wird zuerst die Hydropumpe auf 45° ausgeschwenkt, danach schwenkt der Hydromotor auf 0° zurück. Der hydrostatische Leistungsanteil nimmt damit +/- linear ab, am Ende der Fahrbereiche ist die Leistungsübertragung jeweils rein mechanisch (siehe Grafik mit mechanischen Leistungsanteilen in Tabelle 1). Bei Getriebeausführungen mit zwei Fahrbereichen werden diese nicht automatisch durchgeschaltet und müssen den Einsatzbedingungen entsprechend vorgewählt werden (Feld/Straße).

Die typischen Vollast-Wirkungsgradverläufe sind in der dritten Grafik in Tabelle 1 dargestellt. Der Wirkungsgrad steigt innerhalb der Fahrbereiche zuerst steil an, bleibt dann auf konstantem Niveau und fällt gegen das Ende hin wieder etwas ab. Der starke Anstieg zu Beginn der Fahrbereiche ist auf die relativ hohen Verlustanteile bei kleinen Geschwindigkeiten zurückzuführen, weil hier nicht die gesamte Motorleistung übertragen werden kann (Erreichen der Traktionsgrenze, dadurch hoher Schlupf der Antriebsräder). Insgesamt sind die Wirkungsgradverläufe bei ausgangsgekoppelten Getrieben eher gleichmäßig. Eine Besonderheit stellt die Rückwärtsfahrt dar: Aufgrund der hier negativen Drehrichtung des mechanischen Zweiges fließt ein Teil der Leistung zum Verzweigungsplanetengetriebe zurück und muss von der Hydrostateinheit zusätzlich übertragen werden. Die im Getriebe zirkulierende Blindleistung führt zu etwas geringeren Wirkungsgraden, weshalb die gezeigten Kurvenverläufe nur für die Vorwärtsfahrt gelten.

Kleine Hydrostateinheiten bei der Eingangskopplung

Die Eingangskopplung stellt das Gegenstück zur Ausgangskopplung dar. Die Verzweigung erfolgt hier in den meisten Fällen über eine Zahnradstufe, die Summierung immer über ein Planetengetriebe. Im hydrostatischen Zweig kommen i.d.R. kleine Schrägscheiben-Einheiten in back-to-back-Anordnung zur Anwendung, die Schrägscheibenpumpen werden aber – wie oben erwähnt – zunehmend mit Schrägachsenmotoren kombiniert. Verstellbar ist jeweils nur die Pumpe (Primärverstellung). Weil die Hydrostateinheiten relativ kompakt sind und der negative Schwenkbereich der Pumpe zur Vergrößerung der Geschwindigkeitsspreizung innerhalb der Fahrbereiche verwendet wird, sind bei eingangsgekoppelten Getrieben mehrere Fahrbereiche sowie eine zusätzliche Reversiereinrichtung erforderlich. Der mechanische Getriebeaufbau ist deshalb insgesamt eher groß (siehe Prinzipdarstellung in Tabelle 1). Die Bezeichnung Eingangskopplung ist auf die „drehzahlstarre“ Anbindung der Hydrostateinheit an den Getriebeeingang zurückzuführen. Weitere Bezeichnungen sind Primärkopplung und Torque Split. Letztere wird aus der variablen Drehmoment- und der fixen Drehzahlaufteilung im Verzweigungselement Zahnradstufe abgeleitet.

Bei eingangsgekoppelten Stufenlosgetrieben ist die Pumpe beim Anfahren in negative Richtung ausgeschwenkt, womit sich das über den hydrostatischen Zweig angetriebene Element im Summierungsplanetengetriebe (z.B. Hohlrad) rückwärts dreht. Das zweite Element (z.B. Sonnenrad) wird hingegen über den mechanischen Zweig in positiver Drehrichtung angetrieben. Liegen an Sonnen- und Hohlrad gleiche Umfangsgeschwindigkeiten vor, heben sich die Bewegungen gegenseitig auf und die dritte Welle – im vorliegenden Beispiel die mit dem Planetenträger verbundene Abtriebswelle – steht still. Das Fahrzeug bewegt sich trotz laufendem Motor und kraftschlüssigem Getriebe nicht, was als „aktiver Stillstand“ bezeichnet wird. Beim Beschleunigen schwenkt die Hydropumpe von maximal negativem Winkel über den Nullpunkt bis zu maximal positivem Winkel. Nach dem automatischen Wechsel in den nächsten Fahrbereich geht das Spiel in die andere Richtung weiter (positiver Winkel – Nullpunkt – negativer Winkel). Die maximal möglichen Schwenkwinkel der Schrägscheibenpumpen (Größenordnung +/- 20°) werden allerdings nicht bei allen eingangsgekoppelten Getrieben voll ausgenutzt. Über den hydrostatischen Zweig werden so maximal 30 – 45 % der Leistung mechanisch übertragen (siehe Grafik mit mechanischen Leistungsanteilen in Tabelle 1). Die Fahrbereichswchsel erfolgen i.d.R. automatisch und der Fahrer kann die Wahl nicht beeinflussen.

Beim Passieren des Pumpen-Nullpunktes wird die Leistung jeweils rein mechanisch übertragen, die Hydrostatik „stützt“ hier nur ab. Die Wirkungsgrad-Bestpunkte liegen bei eingangsgekoppelten Getrieben deshalb in der Mitte der Fahrbereiche, siehe Wirkungsgrad-Grafik in Tabelle 1. Das relativ tiefe Niveau bei Fahrgeschwindigkeiten unterhalb von 5 km/h ist auch hier auf den erhöhten Verlustleistungsanteil aufgrund von hohem Radschlupf zurückzuführen (Erreichen der Traktionsgrenze). Bedingt durch die negativen Pumpenschwenkwinkel in den ersten Fahrbereichshälften treten Blindleistungsflüsse auf, welche die Wirkungsgrade hier etwas mindern. Insgesamt sind die Wirkungsgradverläufe innerhalb der Fahrbereiche eher ungleichmäßig, dank mechanischen Reversiereinrichtungen gibt es aber kaum Wirkungsgradunterschiede zwischen Vorwärts- und Rückwärtsfahrt.

Hybridkopplung liegt in der Mitte

Hybridgekoppelte Getriebe stellen eine Mischform aus Eingangskopplung und Ausgangskopplung dar. Sowohl Verzweigung als auch Summierung erfolgen über ein zusammengesetztes Planetengetriebe, weshalb diese oft als Compound-Getriebe bezeichnet werden (das englische Wort compound steht u.a. für zusammengesetzt). Die Hydrostatischeinheit ist damit beidseitig drehzahlvariabel an das Planetengetriebe angebunden und es kommen mittelgroße Schrägachsen-Einheiten mit Primär- und Sekundärverstellung zur Anwendung. In den meisten Fällen erfolgt das Reversieren über eine separate Einrichtung, womit der mechanische Getriebeaufwand insgesamt mittelgroß ist (siehe Prinzipdarstellung in Tabelle 1).

Im ersten Fahrbereich ist das Betriebsverhalten von hybridgekoppelten Getrieben gleich wie bei solchen mit Ausgangskopplung und das Anfahren erfolgt deshalb auch hier rein hydrostatisch. In den nachfolgenden Fahrbereichen wird das Compound-Planetengetriebe sowohl für die Verzweigung als auch für die Summierung benutzt, was zur eigentlichen Hybridkopplung führt.* Die beiden hydrostatischen Maschinen fungieren hier abwechselungsweise als Pumpe und Motor. Der Wechsel der Fahrbereiche erfolgt wie bei der Eingangskopplung automatisch. Bei den Fahrbereichsübergängen liegen hydrostatische „Blockadepunkte“ vor, bei welchen die Leistung rein mechanisch übertragen wird. Zwischen diesen Punkten liegt der hydrostatische Leistungsanteil in der Größenordnung von maximal 25 %. Das widerspiegelt sich auch in der Wirkungsgradcharakteristik mit Bestpunkten bei den Fahrbereichsübergängen (siehe Grafiken in Tabelle 1). Der starke Wirkungsgradanstieg im ersten Fahrbereich ist wiederum den relativ hohen Verlustanteilen bei kleinen Fahrgeschwindigkeiten geschuldet (Erreichen der Traktionsgrenze).

In der nächsten Woche lesen Sie den zweiten Teil zum Thema mit einer Herstellerübersicht.

* beim AutoPowr-Getriebe für die 8R-Traktoren von John Deere gilt dies nur für die Fahrbereiche zwei und vier

Zusammenspiel Hydropumpe und -motor

Hydropumpe		Hydromotor	
Antriebsdrehzahl	Schwenkwinkel	Schwenkwinkel	Abtriebsdrehzahl
1	0 %	100 %	0
1	25 %	100 %	0.25
1	50 %	100 %	0.5
1	75 %	100 %	0.75
1	100 %	100 %	1
1	100 %	75 %	1.33
1	100 %	50 %	2
1	100 %	25 %	4
1	0 %	100 %	0
1	-25 %	100 %	-0.25
1	-50 %	100 %	-0.5
1	-75 %	100 %	-0.75
1	-100 %	100 %	-1
1	-100 %	75 %	-1.33
1	-100 %	50 %	-2
1	-100 %	25 %	-4

In der Tabelle ist das Zusammenspiel zwischen einer Hydropumpe und einem -motor dargestellt, die beide verstellbar sind und gleiche maximale Förder- resp. Schluckvolumina aufweisen (vereinfachtes Beispiel, ohne Berücksichtigung von Verlusten, gerundete Zahlen). Die Pumpe wird immer mit der gleichen Drehzahl 1 angetrieben. Mit zunehmendem Pumpen-Schwenkwinkel vergrößert sich die Drehzahl an der Abtriebswelle des voll ausgeschwenkten Motors, was hier in 25%-Schritten dargestellt ist, in der Realität aber stufenlos erfolgt. Ist die Pumpe voll ausgeschwenkt, dreht die Motor-Abtriebswelle ebenfalls mit Drehzahl 1. Diese kann weiter erhöht werden, indem der Schwenkwinkel des Motors bei gleichbleibendem Pumpen-Schwenkwinkel verringert wird, was hier wieder in 25%-Schritten dargestellt ist. Mit negativem Ausschwenken der Pumpe kann das „Spiel“ auch in die andere Richtung erfolgen, was zu einer Drehrichtungsumkehr an der Motor-Abtriebswelle führt.

Quelle: Stirnimann



45°-Großwinkel-Einheit (Hydropumpe oder -motor) in einfacher Joch-Bauweise. Das Hydrauliköl wird über Kanäle im Joch-Gehäuse nach außen bzw. nach innen geführt.

Tabelle 1: Eigenschaften von hydrostatisch-mechanischen Leistungsverzweigungsgetrieben (nach Grundstrukturen)

	Ausgangskopplung	Eingangskopplung
Allgemeine Informationen		
Prinzip-Darstellung		
Verzweigung der Motorleistung über...	Standard-Planetengetriebe	Zahnradstufe, Pumpendurchtrieb oder Kupplung
Summierung des hydrostat. und mechanischen Zweiges über ...	Zahnradstufe	Planetengetriebe
Hydrostatischer Leistungszweig		
Größe der Hydrostat-Einheit	relativ groß	relativ klein
Pumpenbauart	Großwinkel-Axialkolbenpumpe ¹⁾	Standard-Axialkolbenpumpe ¹⁾
Verstellbereich Hydropumpe	-30° bis +45°	ca. -/+20°
Motorbauart	Großwinkel-Axialkolbenmotor ¹⁾	Standard-Axialkolbenmotor ¹⁾ oder Großwinkel-Axialkolbenmotor ¹⁾
Verstellbereich Hydromotor	0 bis 45°	keiner (fixer Winkel von 20° resp. 40°)
Maximaler hydrostatischer Leistungsanteil	100% beim Anfahren, danach +/- lineare Abnahme auf 0% gegen Ende der FB	ca. 30 - 45% in allen FB
Grafiken mit mechanischen Leistungsanteilen ²⁾		
Mechanischer Getriebeteil		
Anzahl mechanische FB vorwärts	1 - 2	2 - 4
Automatischer FB-Wechsel beim Beschleunigen auf max. Geschwindigkeit	nein	ja
Aktiver Stillstand ³⁾	nein	ja
Fahrtrichtungswechsel	Hydrostatisch durch Ausschwenken der Pumpe in negative Richtung	Mechanisch über separate Reversiereinrichtung
Aufwand für den mechanischen Getriebeteil insgesamt	relativ klein	relativ groß
Wirkungsgradverläufe		
Grafische Darstellung ⁴⁾		
Anzahl dargestellte FB	2	4
Beschreibung der Verläufe	eher gleichmäßig	eher ungleichmäßig
Wirkungsgrad-Bestpunkte	im ersten FB-Drittel	in der FB-Mitte

Abkürzungen: FB Fahrbereich; AK Ausgangskopplung; EK Eingangskopplung

¹⁾ Schrägachsenbauweise, ²⁾ Schrägscheibenbauweise, ³⁾ Darstellung mit maximalen Fahrgeschwindigkeiten bei reduzierter Motordrehzahl,

⁴⁾ mechanisch, über gegenläufige Drehrichtungen der Antriebswellen im Summierungsplanetenge triebe,

⁵⁾ Qualitative Darstellung der Vollast-Wirkungsgradverläufe (Getriebeeingang bis Radnabe), die Grafiken basieren nicht auf quantitativen Messergebnissen; die Gesamtwirkungsgrade dürften nach Schätzungen des Autors aber bei allen Strukturen in der Größenordnung von 80 bis 85% liegen (u.a. abhängig von der Leistungsklasse).

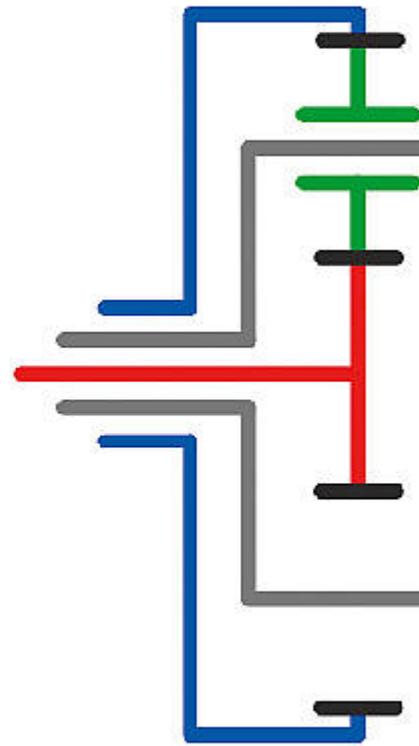
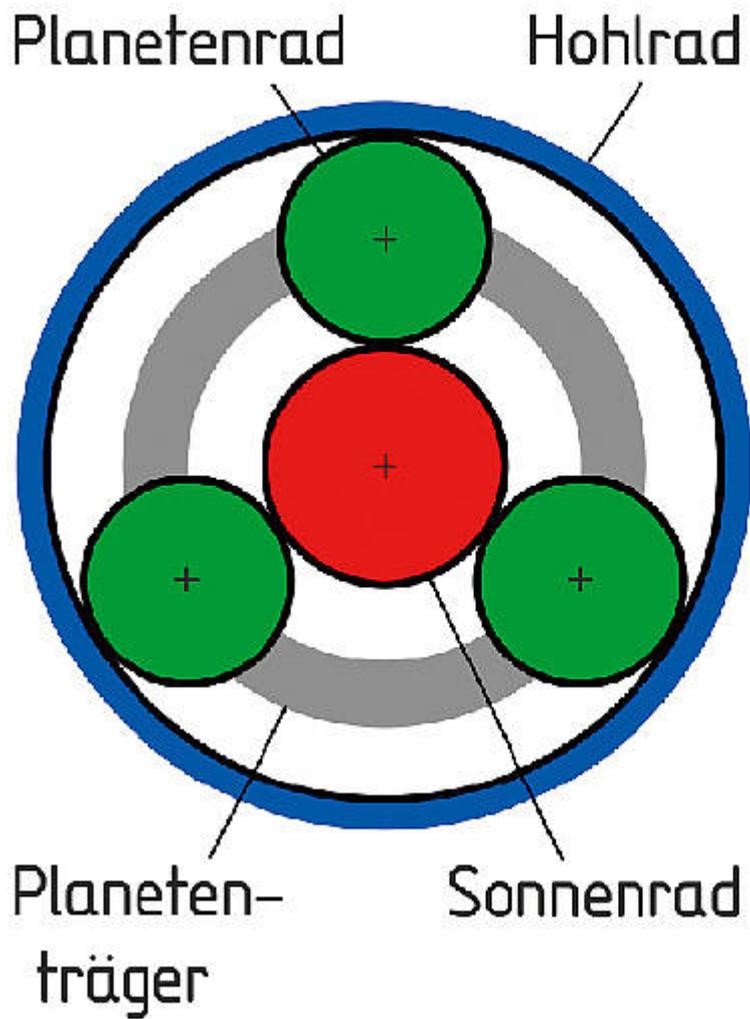


Bild 2

Planetengetriebe können sowohl als Verzweigungs- als auch als Summierungselemente verwendet werden.