

Analyse eines beispielhaften elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetriebes (ECVT)

Dipl.-Ing. **Benedikt Reick**, Dipl.-Ing. **Viktor Warth**,
ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen;
Prof. Dr.-Ing. **Marcus Geimer**,
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe;
Prof. Dr.-Ing. **Bernd Bertsche**, Universität Stuttgart, Stuttgart

1. Kurzfassung

Elektrische stufenlose Getriebestrukturen für Traktoren können bei der Entwicklung zukünftiger Fahrzeuggetriebe eine Schlüsselrolle spielen, was eine detaillierte Analysemöglichkeit erfordert. Aufbauend auf der in [5] vorgestellten Methodik zur effizienten Berechnung und Analyse beliebiger Stufenlosgetriebe wird eine Erweiterung vorgestellt, welche es ermöglicht genaue Aussagen zur Systemeffizienz von ECVTs durch Einbeziehung von Getriebeverlusten zu treffen. Darüber hinaus werden die möglichen Grundstrukturen unter dem Aspekt der Leistungsentnahme am Variator betrachtet. Angewendet auf ein beispielhaftes ECVT zeigt sich, dass es bei einer Leistungsentnahme in weiten Bereichen des betrachteten Kennfeldes durch den guten Teillastwirkungsgrad der Elektromotoren zur Verbesserung des Systemwirkungsgrads kommen kann.

2. Einleitung

Stufenlosgetriebe (Continuously Variable Transmission, CVT) bieten die Möglichkeit, die Motorbetriebspunkte auf der Leistungshyperbel entsprechend einer Regelstrategie zu wählen. Dies ermöglicht eine Anpassung der Leistungsfähigkeit, des Komforts oder auch der Effizienz des Fahrzeugs auf die Bedürfnisse des Fahrers und der zu bewältigenden Aufgaben [3]. Aufgrund dieser Variabilität und dem daraus gewonnenen Nutzen sind CVTs in Traktoren vor allem in mittleren, aber auch in sehr kleinen sowie sehr großen Leistungsklassen zu finden. Heute kommen dort vornehmlich hydraulisch leistungsverzweigte Stufenlosgetriebe zum Einsatz. Aufgrund der notwendigen Effizienzsteigerung und des Trends zur Elektromobilität geraten branchenübergreifend zunehmend elektrisch leistungsverzweigte CVTs, so genannte ECVTs, in den Fokus der Entwicklung. Durch eine Entnahme elektrischer Leistung aus dem elektrischen Variator ist es bei diesen Systemen möglich Zusatzfunktionen, wie beispielsweise eine elektrische Schnittstelle (EPTO), darzustellen, ohne großen zusätzlichen Mehraufwand zu generieren. Dadurch wird der Nutzen für den Anwender deutlich erhöht.

3. Grundlagen

Eine Darstellung von Getriebeelementen mit einfachen Symbolen wurde bereits 1958 von WOLF [6] als hilfreich zur Analyse von komplexen Getriebestrukturen angesehen. Darauf aufbauend wurde in [5] eine erweiterte Symbolik vorgestellt, welche eine Analyse stufenloser Getriebestrukturen mit mehreren Ein- und Ausgängen erlaubt. Zur Berechnung der Drehzahlen und Momente von stufenlosen Getriebestrukturen mit mehreren Schnittstellen wurde ebenfalls in [5] ein Verfahren vorgestellt, welches im Wesentlichen mit der Berücksichtigung von Wirkungsgraden auskommt. Für detaillierte Effizienzanalysen empfiehlt sich die Berechnung mit Verlustleistungen bzw. Verlustmomenten, wodurch eine Erweiterung der Gleichungen notwendig wird (Gleichungen 1 bis 3).

$$\underline{A}_{TP} \cdot \vec{t}_p = \vec{b}_{TP} \quad (1)$$

$$\underline{A}_{TP} = \begin{pmatrix} \underline{A}_{TP, RB} \\ \underline{A}_{T, UE} \\ \underline{A}_{T, SEO} \\ \underline{A}_{T, W} \\ \underline{A}_{TP, EW} \\ \underline{A}_{P, L} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\vec{b}_{TP} = \begin{pmatrix} \vec{r}_{RB} \\ \vec{t}_{v, UE} \\ \vec{t}_{v, SEO} \\ \vec{t}_{v, LD} \\ \vec{P}_{v, EW} \\ \vec{P}_{v, L} \end{pmatrix} \quad (3)$$

\underline{A}_{TP} beinhaltet die Teilmatrizen der Randbedingungen $\underline{A}_{TP, RB}$, der Übersetzungselemente $\underline{A}_{T, UE}$, der offenen Schaltelemente $\underline{A}_{T, SEO}$, der Wellengleichungen $\underline{A}_{T, W}$, der Energiewandler $\underline{A}_{TP, EW}$ und der Leitungen $\underline{A}_{P, L}$. Im Vektor \vec{b}_{TP} können Randbedingungen und entsprechende Verluste berücksichtigt werden. Es wird empfohlen die Verluste der Lager und Dichtungen $\vec{t}_{v, LD}$ den Wellengleichungen zuzuordnen. Die Leistungs- oder Drehmomentaufnahme der meist an die Motordrehzahl gebundenen Getriebepumpe kann beispielsweise direkt in den Randbedingungen \vec{r}_{RB} eingetragen werden.

Wie Bild 1 zeigt, existieren bei elektrisch stufenlosen Fahrtrieben (ECVT FA) für Traktoren die Grundstrukturen: „direct“ (D), „output coupled“ (OC), „input coupled“ (IC) und „compound coupled“ (CC). Die Grundstrukturen lassen sich durch die Anbindung der Energiewandler (EW), exemplarisch für das „D“-System in Bild 1 eingetragen, im Getriebe identifizieren. Sind beide Energiewandler des Variators mit der Ein- und Ausgangswelle wirkverbunden, so handelt es sich um ein „D“-System. Ist der Variator nur mit der Eingangswelle wirkverbunden, handelt es sich um ein „IC“-System. Bei drehfester Anbindung an den Abtrieb spricht man von einem „OC“-System. Sind beide Seiten nicht drehfest verbunden, so handelt es sich um ein „CC“-System. Zusätzlich sind in allen Strukturen eine Motorzapfwelle und eine elektrische Schnittstelle eingezeichnet. Über letztgenannte kann dem mechanischen Getriebe elektrische Leistung über einen Zwischenkreis zugeführt oder entnommen werden. Ist die verlust-

freie Leistungsbilanz der mechanischen Wellen am Variator nicht ausgeglichen, spricht man von einem offenen Variator.

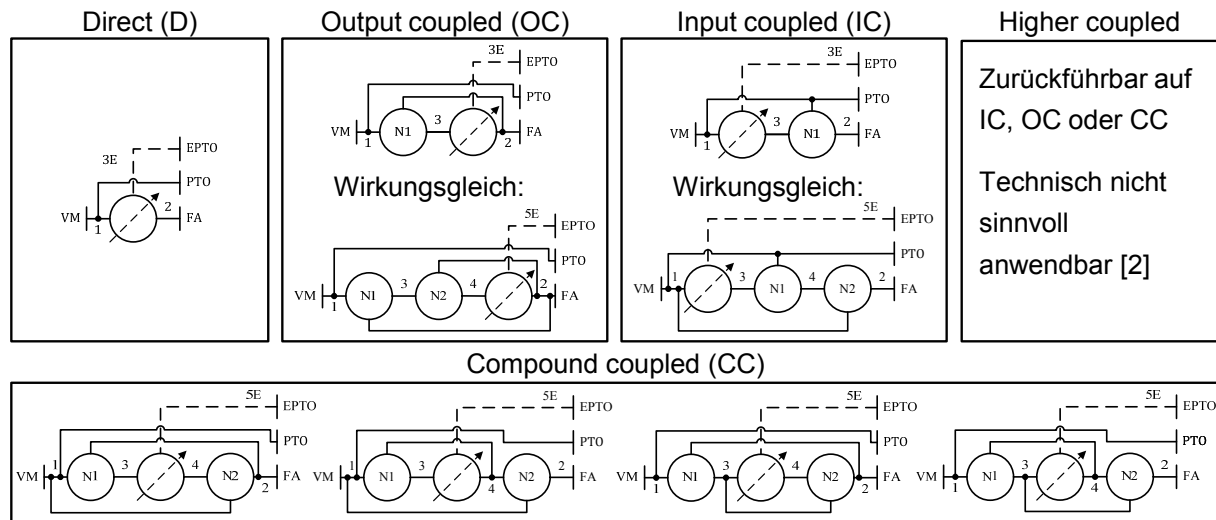


Bild 1: Grundstrukturen elektrischer stufenloser Traktorfahrertriebe (ECVT FA) mit Schnittstellen für die Motorzapfwelle (PTO) und eine elektrische Schnittstelle (EPTO)

Die Gleichungen 4 bis 6 beschreiben die im Folgenden verwendeten normierten Größen. Die Leistungen der EPTO P_{EPTO} und der beiden Energiewandler des Variators $P_{Var,x}$ beziehen sich auf die Eingangsleistung des Verbrennungsmotors P_{VM} . Die Drehzahlen der Variatorwellen n_x sind in Bild 2 auf die maximalen Drehzahlen der elektrischen Maschinen $n_{EM,max}$ normiert.

$$\tilde{P}_{EPTO} = \frac{P_{EPTO}}{P_{VM}} \quad (4) \quad \tilde{P}_{Var} = \frac{P_{Var}}{P_{VM}} \quad (5) \quad \tilde{n}_x = \frac{n_x}{n_{VM}} \sim \frac{n_x}{n_{EM,max}} \quad (6)$$

Für die einfache und allgemeingültige Darstellung der Grundgleichungen der Grundstrukturen in Tabelle 1 wird die Getriebekenngröße N verwendet [1]. Sie leitet sich nach Gleichung 7 aus der Willis-Gleichung ab und setzt das Übersetzungsverhältnis in den Kontext der Getriebestruktur. N ist zunächst unabhängig von der Anbindung an Sonne, Steg oder Hohlrad und kann bei Festlegung der Getriebewellen über die Willis-Gleichung

($0 = \omega_{Sonne} + (i_0 - 1)\omega_{Steg} - i_0\omega_{Hohlrad}$) in eine Standübersetzung i_0 umgerechnet werden.

$$0 = \omega_{Antriebsseitig} + (N_j - 1)\omega_{Variatorseitig} - N_j\omega_{Antriebsseitig} \quad (7)$$

Die Ratio R beschreibt den Kehrwert der Gesamtgetriebeübersetzung $R = 1/i_{Getriebe}$ welcher sich für die Darstellung des Leistungsflusses stufenloser Getriebestrukturen mit power zero ($n_{VM} \neq 0$ und $v_{Fzg} = 0$) Betriebsmodus eignet. Bild 2 zeigt den Leistungsfluss und die Drehzahlen der beiden Energiewandler der ECVT FA Grundstrukturen aus Bild 1 für ge-

geschlossene Variatoren mit ausgeglichener Leistungsbilanz. Ebenfalls ist die Zapfwellenleistung $P_{PTO} = 0$ angenommen. Die Struktur „D“ ist die einfachste und zeigt einen direkten Leistungsfluss über den Variator. Die Abtriebsdrehzahl n_2 steigt betragsmäßig linear mit der Ratio, wie auch n_2 bei der „OC“-Struktur. Dort reduziert sich im Gegensatz zum „D“-System die Variatorleistung $P_{2,Var}$ linear unter Leistungsteilung mit steigendem R . Bei hohen und negativen R kommt es bei der „OC“-Struktur zu Blindleistung.

Tabelle 1: Drehzahlen und Ratio der Grundstrukturen

Struktur	Wellennummer	\tilde{n}_{x_1}	\tilde{n}_{x_2}	R	
D	$x_1 = 1, x_2 = 2$	$\frac{1}{i_1}$	$R \cdot i_2$	$\frac{1}{i_{Var}}$	(8)
IC	$x_1 = 1, x_2 = 3$	$\frac{1}{i_1}$	$-\frac{i_2(R - N_1)}{N_1 - 1}$	$N_1 - \frac{N_1 - 1}{i_{Var}}$	(9)
OC	$x_1 = 3, x_2 = 2$	$-\frac{R - N_1}{i_1(N_1 - 1)}$	$R \cdot i_2$	$\frac{N_1}{i_{Var}(1 - N_1) - 1}$	(10)
CC1 ¹	$x_1 = 3, x_2 = 4$	$-\frac{R - N_1}{i_1(N_1 - 1)}$	$-\frac{i_2(R - N_2)}{N_2 - 1}$	$\frac{N_1 - N_1 N_2 - i_{Var}(N_2 - N_1 N_2)}{i_{Var}(N_1 - 1) - N_2 + 1}$	(11)

¹ CC1 beschreibt die Formeln zur CC-Grundstruktur mit den Knotenpunkten am Getriebe Ein- und Ausgang

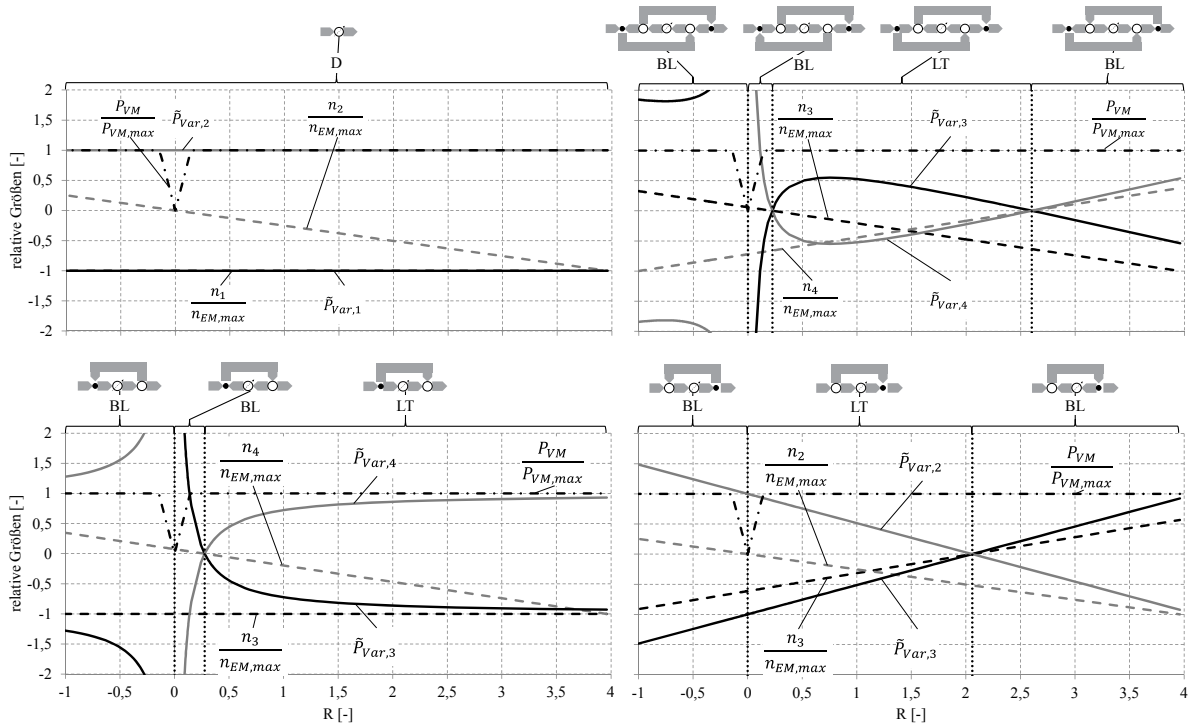


Bild 2: Leistungsflüsse und Drehzahlen der Grundstrukturen ohne Leistungsentnahme im Variator:
 „D“ (links oben), „CC“ (rechts oben), „IC“ (links unten) und „OC“ (rechts unten).
 Abk.: BL Blindleistung, LT: Leistungsteilung.

Besonders deutlich lässt sich die Blindleistung bei negativen R Werten und im Bereich kleiner positiver Ratio Werte in der „IC“- und „CC“-Struktur an den hohen Variatorleistungen erkennen.

Die „IC“-Struktur weist eine konstante Drehzahl n_1 und Leistungsteilung bei hohen Ratios auf, die „CC“-Struktur zeigt variable Drehzahlen n_3 und n_4 , sowie Blindleistung bei großen R . Werden Systeme mit offenen Variatoren betrachtet, d.h. mit möglicher elektrischer Leistungsentnahme, so beeinflusst diese den Leistungsfluss der Grundstrukturen in unterschiedlicher Weise, wie die Gleichungen in Tabelle 2 zeigen.

Tabelle 2: Leistungen im Variator der Grundstrukturen

Struktur	Wellennummer	$\tilde{P}_{Var,x1}$	$\tilde{P}_{Var,x2}$	
D	$x_1 = 1, x_2 = 2$	-1	$\tilde{P}_{EPTO} + 1$	(12)
IC	$x_1 = 1, x_2 = 3$	$\frac{N_1(\tilde{P}_{EPTO} + 1)}{R} - 1$	$-\left(\frac{N_1}{R} - 1\right)(\tilde{P}_{EPTO} + 1)$	(13)
OC	$x_1 = 3, x_2 = 2$	$\frac{(R - N_1)}{N_1}$	$-\left(\frac{R - N_1}{N_1}\right) + \tilde{P}_{EPTO}$	(14)
CC1	$x_1 = 3, x_2 = 4$	$\frac{(R - N_1)(N_2 - R + \tilde{P}_{EPTO}N_2)}{R(N_1 - N_2)}$	$\frac{(R - N_2)(N_1 - R + \tilde{P}_{EPTO}N_1)}{R(N_1 - N_2)}$	(15)

Der Leistungsfluss der „OC“-Struktur (vgl. Bild 3) zeigt, dass bei einer Leistungsentnahme von 50% ($\tilde{P}_{EPTO} = -0.5$) die Leistung $\tilde{P}_{Var,2}$ um genau diesen Anteil reduziert wird. Die abtriebsseitig angeordnete Maschine wird also entlastet, sofern sich die Antriebsleistung nicht ändert. Zusätzlich entsteht, wie bei allen leistungsverzweigten Grundstrukturen, ein weiterer Betriebsmodus, in dem beide elektrischen Maschinen generatorisch betrieben werden. Bei dem „OC“-System geschieht dies unter Leistungsteilung.

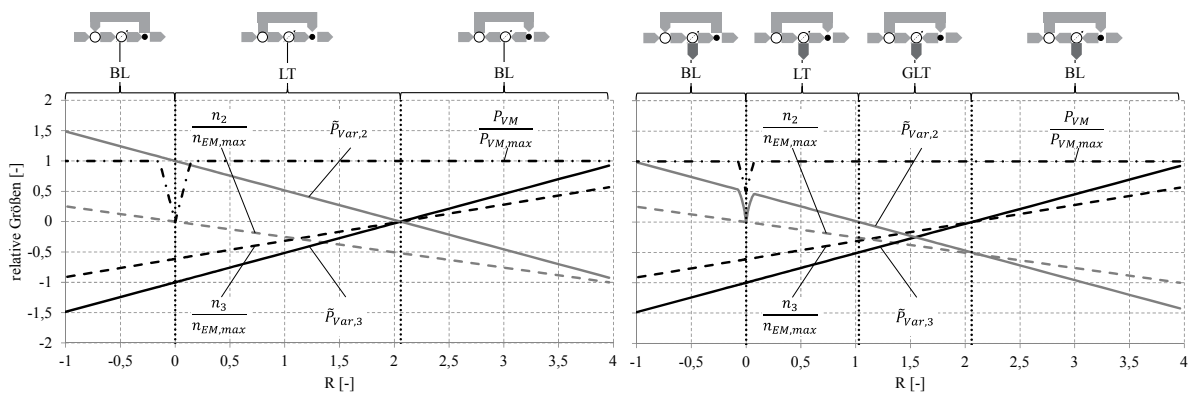


Bild 3: Leistungsflüsse und Drehzahlen der „OC“-Grundstruktur ohne Leistungsentnahme im Variator (links) und mit Leistungsentnahme (rechts). Abk.: BL Blindleistung, (G)LT: (Generatorische) Leistungsteilung.

In den Strukturen „IC“ und „CC“ wird im Gegensatz zum „OC“-System der Leistungsfluss durch beide Energiewandler über die Größe \tilde{P}_{EPTO} beeinflusst, siehe Tabelle 2.

4. Analyse eines beispielhaften elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetriebes

Im Folgenden wird der Einfluss der Leistung \tilde{P}_{EPTO} auf den Systemwirkungsgrad eines Beispielgetriebes aufgezeigt werden. Das Beispielgetriebe ist in Bild 4 dargestellt und ist gekennzeichnet durch einen ersten „OC“-Fahrbereich (K1) und einen darauf folgenden synchron geschalteten „CC“-Fahrbereich (K2).

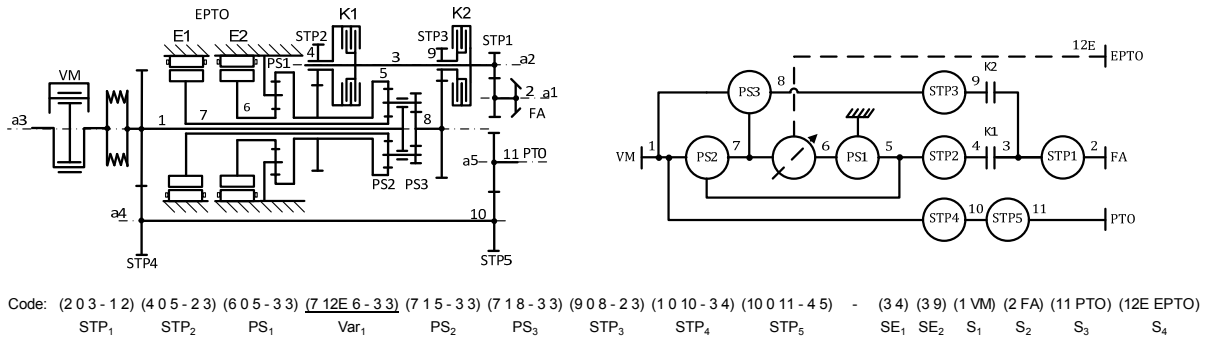


Bild 4: Strukturelle und mathematische Beschreibung eines leistungsverzweigten Fahrantriebs mit 2 Fahrbereichen und synchroner Bereichsumschaltung von OC nach CC aus [5]

Bild 5 (rechts) zeigt den berechneten Systemwirkungsgrad unter Verwendung der eingeführten Methodik, sowie bei Berücksichtigung der Verluste in Verzahnungen, Lagern, Kupplungen und elektrischen Maschinen bei einer konstanten abgeführten Systemleistung von 100 kW über der Fahrzeuggeschwindigkeit und einer Leistungsentnahme bis 80 kW.

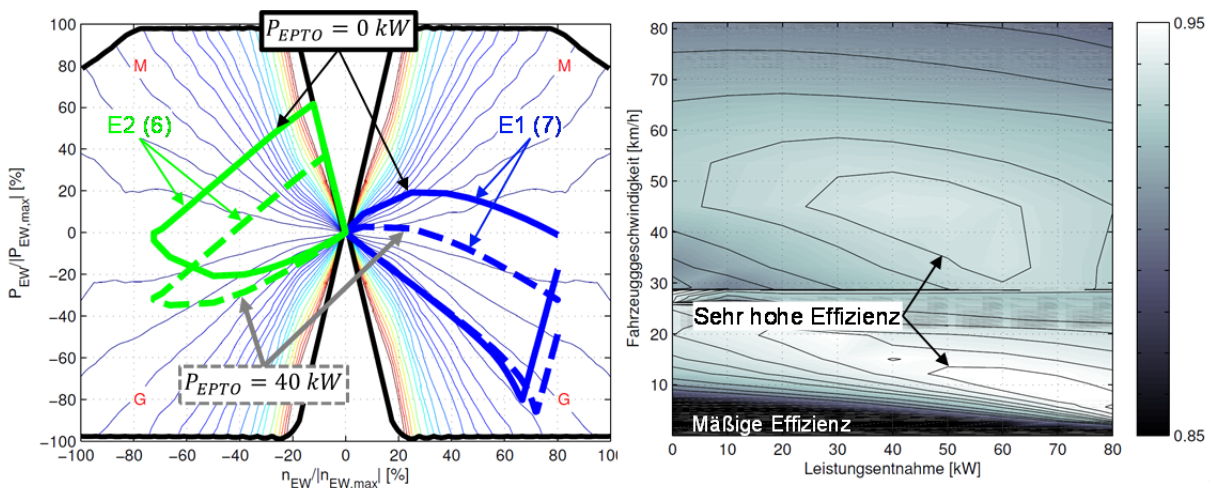


Bild 5: E-Maschinen Verlustleistung und Betriebspunkte mit und ohne Leistungsentnahme (links) und Systemwirkungsgrad des vorgestellten Beispielgetriebes in Abhängigkeit der Leistungsentnahme und der Fahrzeuggeschwindigkeit bei konstanter abgeführter Systemleistung

Der Fahrbereichswechsel bei ~28 km/h ist im Wirkungsgradkennfeld deutlich zu erkennen. Hier schaltet das System von einer „OC“-Struktur in eine „CC“-Struktur und der Leistungsfluss im Variator kehrt sich um. Weiter lässt sich durch die E-Maschinen Betriebspunkte in Bild 5 (links) zeigen, dass durch Betriebspunktverschiebung und Entlastung der abtriebsseitigen Maschine bei Leistungsentnahme der Systemwirkungsgrad in weiten Bereichen steigt, sofern die abgeführte Systemleistung konstant bleibt. Besonders signifikant ist das im Bereich niedriger Fahrzeuggeschwindigkeiten, da die abtriebsseitige E-Maschine ohne Leistungsentnahme hier relativ große Verlustleistungen aufweist. Die Bereitstellung von elektrischer Energie über ECVTs birgt großes Potenzial zur Elektrifizierung von fahrzeuginternen oder -externen Verbrauchern als auch elektrisch betriebene Anbaugeräte. Eine mögliche Beispielanwendung könnte ein Transportanhänger mit einer elektrischen angetriebenen Achse sein [4].

5. Literaturverzeichnis

- [1] FÖRSTER, H.J.: Stufenlose Fahrzeuggetriebe in mechanischer, hydrostatischer, hydrodynamischer, elektrischer Bauart und in Leistungsverzweigung: Grundlagen, Bauformen, Wechselwirkung. Fahrzeugtechnische Schriftenreihe. TÜV Rheinland Verlag, 1996.
- [2] GITT, C.: Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2004.
- [3] LECHNER, G.; NAUNHEIMER, H.: Fahrzeuggetriebe – Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1994
- [4] N., N.: Agrarheute: 11 t Zuladung, 30 Prozent Steigung: Mit der ZF-Triebachse kein Problem. <http://www.agrarheute.com/news/11-t-zuladung-30-prozent-steigung-zf-triebachse-kein-problem>, Juli 2016.
- [5] WARTH, V., B. REICK, B. BERTSCHE und M. GEIMER: Efficient analysis of complex continuously variable power split transmissions with multiple in- and outputs. In: 16. Internationaler VDI-Kongress Getriebe in Fahrzeugen 2016. VDI Verlag GmbH, Friedrichshafen, 2016
- [6] WOLF, A.: Die Grundgesetze der Umlaufgetriebe. Schriftenreihe Antriebstechnik. Vieweg Verlag, 1958.