



Konzeption und Analyse einer magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Umlaufgetriebestufe zum Einsatz in einem landwirtschaftlichen Fahrzeug

vorgelegt von

M. Sc.

Matthias Lang

ORCID: 0000-0003-4221-6929

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Paul-Uwe Thamsen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Henning Jürgen Meyer

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 02. Dezember 2020

Berlin 2020

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als externer Doktorand bei Herrn Prof. Dr. Meyer am Lehrstuhl für Konstruktion von Maschinensystemen an der Technischen Universität Berlin und wurde von der Firma John Deere GmbH & Co. KG unterstützt.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Meyer für das entgegengebrachte Interesse und die Bereitschaft zur Betreuung dieser Arbeit. Sein Vertrauen und die wertvollen Anregungen trugen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Herrn Dr. Fritz und Herrn Dr. Gugel danke ich für die inhaltliche und organisatorische Betreuung innerhalb der Firma. Durch ihre kollegiale, freundliche und unbürokratische Zusammenarbeit konnte ich meine Ausarbeitung abteilungsübergreifend in großer Freiheit durchführen. Die zielführenden Diskussionen, die mir jederzeit entgegengebrachte Unterstützung und das angenehme Arbeitsklima in der Firma möchte ich hier besonders hervorheben.

Für ihre verlässliche Hilfe, das gezeigte Interesse und die kollegiale Unterstützung möchte ich mich auch bei allen weiteren Personen bedanken, die ihren Teil zum Gelingen dieser Arbeit durch Mitwirkung im Rahmen der Prüfstandsuntersuchungen, Beschaffungsprozesse, Organisation von Bauteiltransporten und Dienstreisen sowie im Rahmen technischer Fragestellungen beigetragen haben. Der Firma John Deere GmbH & Co. KG sei an dieser Stelle ebenfalls für die großzügige finanzielle Unterstützung des Forschungsvorhabens gedankt.

Kurzfassung

In landwirtschaftlichen Fahrzeugen haben sich in den letzten Jahren neben den manuellen Schaltgetrieben und den Lastschaltgetrieben auch die Stufenlosgetriebe etabliert. Diese ermöglichen eine Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeit unabhängig von der Drehzahl des Verbrennungsmotors und nutzen dafür üblicherweise ein kontrollierendes Element zur Drehzahlüberlagerung. Stand heute ist dieses kontrollierende Element eine mechanische Umlaufgetriebestufe, deren Abtriebsdrehzahl durch zwei Eingangsdrehzahlen, konkret die des Verbrennungsmotors und die eines variablen Antriebs, üblicherweise ein Hydromotor, bestimmt wird. Es ist absehbar, dass die Hydromotoren in diesen Anordnungen zukünftig durch Elektromotoren ersetzt werden können. Zusätzlich haben Forschungsergebnisse der jüngsten Vergangenheit gezeigt, dass das Getriebeelement zur Drehzahlüberlagerung nicht nur mechanisch, sondern auch magnetisch ausgeführt werden kann und ein gegebenenfalls vorhandener Elektromotor direkt in dieses Element integriert werden kann, was zu einer signifikanten Reduktion der Teilezahl führt. Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit war es, der Frage nachzugehen, ob ein Konzept für ein stufenloses, elektrisch leistungsverzweigtes Getriebe mit magnetischer Umlaufgetriebestufe und darin integrierter elektrischer Maschine für den Einsatz in einem landwirtschaftlichen Fahrzeug theoretisch existiert und ob dieses Konzept konstruktiv, technisch und wirtschaftlich sinnvoll in Traktorgetriebe der aktuellen und fiktiver zukünftiger Generationen integriert werden kann. In dieser Arbeit wurde nachgewiesen, dass ein solches Konzept existiert und vielfältige Potenziale bietet, bei der Neukonstruktion von Getrieben dezidierte Schwerpunkte zu setzen und sich daher zum Einsatz in bestimmten Leistungs- und Ausstattungsklassen von Traktoren eignet. Diese Erkenntnis steht insofern konform zur bisherigen Lehrmeinung, als dass das Konzept des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Getriebes große Parallelen zu existierenden Getrieben aufweist, die mit mechanischer Umlaufgetriebestufe und Hydromotor realisiert sind. Weiterhin sind in der Automobilindustrie Bestrebungen und Entwicklungen zu erkennen, magnetische Umlaufgetriebestufen für den Einsatz in Hybridfahrzeugen zu ertüchtigen, was deren grundsätzliche Einsatzmöglichkeit in Fahrzeuggetrieben unterstreicht. Besonders für zukünftig zu erwartende Entwicklungen im landwirtschaftlichen Bereich, die darauf abzielen, dass eine immer größer werdende Anzahl an Traktoranbaugeräten elektrifiziert und vom Traktor mit elektrischer Leistung versorgt werden müssen, stellen die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Konzepte attraktive Lösungen dar. Ein Aspekt, der noch weiterer empirischer Untersuchungen bedarf, ist die detaillierte Untersuchung der im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigten Alternativkonzepte, da sich die durchgeführten Messungen zunächst auf ein einzelnes ausgewähltes und dann konstruktiv umgesetztes Konzept beschränken.

Abstract

Continuously variable transmissions have been established in agricultural vehicles besides manual and power shiftable transmissions within the last few years. With continuously variable transmissions, the vehicle speed can be adjusted independent from the speed of the combustion engine, usually making use of a controlling element for superpositioning of speed. As of today, this controlling element usually is formed by a mechanical circumferential gearbox unit whose output speed is controlled by two independent input speeds, specifically the one of the combustion engine and the one of a variable drive, usually a hydraulic motor. The hydraulic motors in these arrangements are expected to be replaced by electric motors in the future. Furthermore, scientific research in the last few years has shown that circumferential gearbox units can not only be realized using a mechanical principle but also using a magnetic one. Additionally, a possibly present electrical motor in these arrangements can be integrated directly into a magnetic circumferential gearbox unit, leading to a significant reduction in part count. The goal of this work was to provide answers to the question, whether there is a concept for an electric power split transmission with a magnetic circumferential gearbox unit and inbuilt electrical machine and whether this concept can be integrated in tractor transmissions of current and fictitious future tractor generations in terms of technical feasibility, space claim and economics. Within the scope of this work, it could be shown that there is such a concept, providing diverse opportunities to emphasize dedicated design goals when designing new transmissions which is therefore suitable for application in certain power and technology classes of tractors. These results are compliant to the current state of the art regarding engineering research, as the transmission that was developed within this work shows many similarities to existing power split transmissions that are equipped with mechanical circumferential gearbox units and hydraulic motors. There is a tendency in automotive to qualify magnetic circumferential gearbox units for application in hybrid power trains, underlining their basic usage potential. Especially for expected future developments in agriculture regarding electrification of mounted implements that need to be powered by the tractor, the transmission concepts drafted within the scope of this work provide attractive solutions. One part requiring additional empiric research is the detailed investigation of the alternative concepts developed in this work, whereof a single one was selected, built and studied.

Inhaltsverzeichnis

Formelgrößenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	15
Abbildungsverzeichnis	17
Tabellenverzeichnis	19
1 Einleitung	21
1.1 Motivation	21
1.2 Methodische Vorgehensweise	22
2 Theoretische Grundlagen	25
2.1 Definitionen und Abgrenzungen	25
2.1.1 Traktorgetriebe	25
2.1.2 Umlaufgetriebe	25
2.1.3 Stufenlosgetriebe	26
2.1.4 Leistungsverzweigte Getriebe	28
2.1.5 Magnetische Getriebestufen	30
2.1.6 Permanentenerregte Synchronmaschinen	35
2.1.7 Hydraulisch leistungverzweigte Stufenlosgetriebe	35
2.1.8 Nachteile aktueller Getriebegenerationen	38
2.2 Methoden	40
2.2.1 Methodische Konstruktion nach VDI 2221	40
2.2.2 WOLF-Schema	40
2.2.3 Matrix-Rechenverfahren nach Stangl	41
2.3 Ziele und Forschungsfragen	42
3 Konzeption einer magnetisch-elektrisch leistungverzweigten Umlaufgetriebe- bestufe	45
3.1 Anforderungen an ein Traktorgetriebe	45
3.1.1 Anforderungsliste	46
3.1.2 Bedeutung der Anforderungen	48
3.2 Getriebesynthese	51
3.2.1 Synthese einer Variatorsektion mit dem WOLF-Schema	51
3.2.2 Interpretation der Ergebnisse der Synthese	52
3.3 Getriebeanalyse	57
3.3.1 Analyse der Drehmomente und Drehzahlen mittels Matrix- Rechenverfahren nach Stangl	57
3.3.2 Bedeutung der Ergebnisse der Analyse	62

3.3.3	Vergleich des gefundenen Konzeptes mit existierenden Stufenlosgetrieben	64
3.3.4	Analyse und Abschätzung des Wirkungsgrades	69
3.3.5	Analyse des Potenzials für elektrische Leistung auf Anbaugeräten .	94
3.4	Ausführung der Konstruktion	99
3.4.1	Schema des Prüfstandes	101
3.4.2	Lagerlebensdauerberechnung mit ROMAX	103
3.4.3	Auslegung des magnetisch-elektrischen Teils	109
3.4.4	Ergebnisse der Auslegung und Bedeutung für das weitere Vorgehen	109
3.5	Messungen am Prüfgetriebe	110
3.5.1	Auswertung der Messergebnisse	113
3.5.2	Betrachtung der Messunsicherheiten	118
3.6	Weitere Beobachtungen im Prüfbetrieb	119
4	Bewertung hinsichtlich Eignung zum Einsatz in einem landwirtschaftlichen Fahrzeug	121
4.1	Vorteile gegenüber den betrachteten elektrischen Stufenlosgetrieben	121
4.1.1	Wirkungsgrad	122
4.1.2	Kosten	122
4.1.3	Bauraum	122
4.1.4	Modularität und Skalierbarkeit	123
4.1.5	Überlastsicherheit	124
4.2	Nachteile gegenüber aktuellen Getrieben	125
4.2.1	Drehmoment, Kapazität und Leistungsdichte	125
4.2.2	Reparatur und Wartung	125
4.2.3	Komplexität	126
4.2.4	Zusammenbau	127
4.3	Vergleich der Vor- und Nachteile und abschließende Empfehlung	128
5	Zusammenfassung und Fazit	129
5.1	Reflexion der Vorgehensweise	131
5.2	Beantwortung der Forschungsfragen	132
5.3	Kritische Betrachtung	134
5.4	Ausblick	136
	Literatur	139
A	Rückführung der Gleichung 2.5 auf die WILLIS-Gleichung	147
B	Anforderungsliste	151
C	Herleitung der Drehrichtungen der WOLF-Schemata	153

Formelgrößenverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
Lateinische Formelzeichen		
A	mPa s	flüssigkeitsspezifische Konstante
b_{BL}	mm	Dicke der Belaglamellen
b_{ges}	mm	Gesamtdicke des Lamellenpakets
b_{SL}	mm	Dicke der Stahllamellen
B	T	Betrag der magnetischen Flussdichte
$B_{1,harm}$	T	Betrag der magnetischen Flussdichte des sich relativ zum Rotor bewegenden Feldes
B_1	T	Betrag der magnetischen Flussdichte des sich relativ zum Rotor nicht bewegenden Feldes
C	°C	flüssigkeitsspezifische Konstante
D	°C	flüssigkeitsspezifische Konstante
f	Hz	Frequenz
$f_{1,harm}$	Hz	Frequenz des sich relativ zum Rotor bewegenden Feldes
$f_{TS,M}$	Hz	Drehfrequenz des Modulationsrings
$f_{TS,R}$	Hz	Drehfrequenz des Rotors
$f_{TS,S}$	Hz	Frequenz des elektromagnetischen Drehfeldes im Stator
f_1	Hz	Frequenz des sich relativ zum Rotor nicht bewegenden Feldes
F_G	N	Gewichtskraft aus Traktorleergewicht
F_Z	N	Zugkraft an allen vier Rädern
h	mm	Lüftspiel
i_0	-	Standübersetzung
$i_{0,mag}$	-	Standübersetzung magnetische Umlaufgetriebestufe
$i_{0,mech}$	-	Standübersetzung mechanische Umlaufgetriebestufe
$i_{12,FD}$	-	Übersetzung des Endantriebs von Element 1 zu Element 2
i_{12}	-	Standübersetzung von Element 1 zu Element 2
$i_{1s,FD}$	-	Übersetzung des Endantriebs von Element 1 zur Stegwelle
i_{21}	-	Standübersetzung von Element 2 zu Element 1
i_{2s}	-	Übersetzung zwischen Zentralwelle 2 und Steg
i_A	-	Übersetzung des Ganges A
i_B	-	Übersetzung des Ganges B
I_N	A	Nennstromstärke der elektrischen Maschine
$I_{N,TS}$	A	Maximale Stromstärke im Stator
k	-	Faktor für die Teilung der ferromagnetischen Segmente
k_e	-	Proportionalitätsfaktor spezifische Wirbelstromverlustleistung

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$k_{e,M43}$	-	Proportionalitätsfaktor spezifische Wirbelstromverlustleistung für M43
k_h	-	Proportionalitätsfaktor spezifische Hystereseverlustleistung
$k_{h,M43}$	-	Proportionalitätsfaktor spezifische Hystereseverlustleistung für M43
k_m	-	Faktor für die Teilung der Polpaare
K_1	-	Geradensteigung
K_2	-	Geradensteigung
K_3	-	Geradensteigung
K_4	-	Geradensteigung
$m_{Rot,Fe}$	kg	Masse des Rotoreisens
$m_{Rot,M}$	kg	Masse der Rotormagnete
m_{Rot}	kg	Masse des Rotoreisens und der Rotormagnete
$m_{TS,MFe}$	kg	Masse der modulierenden Segmente des Modulationsrings
$m_{TS,S}$	kg	Masse des Statoreisens
M_1	N m	Drehmoment an Element 1
$M_{1,mag}$	N m	Drehmoment der Welle 1 der magnetischen Umlaufgetriebestufe
$M_{1,mech}$	N m	Drehmoment der Welle 1 der mechanischen Umlaufgetriebestufe
$M_{2,mag}$	N m	Drehmoment der Welle 2 der magnetischen Umlaufgetriebestufe
$M_{2,mech}$	N m	Drehmoment der Welle 2 der mechanischen Umlaufgetriebestufe
M_{Coils}	N m	Drehmoment des Stators der magnetischen Umlaufgetriebestufe
M_{el}	N m	Drehmoment der elektrischen Maschine
$M_{el,max}$	N m	Maximales Drehmoment der elektrischen Maschine
$M_{el,n,TS}$	-	Normiertes Drehmoment der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe
$M_{el,n}$	-	Normiertes Drehmoment der elektrischen Maschine
$M_{el,TS,max}$	N m	Maximales Drehmoment der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe
$M_{el,TS}$	N m	Drehmoment der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe
M_f	N m	Verlustmoment offener Lamellenkupplungen
$M_{h,max}$	Nm	Maximales Drehmoment des Hydrostaten
$M_{h,n}$	-	Normiertes Drehmoment des Hydrostaten
$M_{s,mech}$	Nm	Drehmoment der Stegwelle der magnetischen Umlaufgetriebestufe
$M_{s,mech}$	Nm	Drehmoment der Stegwelle der mechanischen Umlaufgetriebestufe
n_1	min^{-1}	Drehzahl der Zentralwelle 1
$n_{1,mag}$	min^{-1}	Drehzahl der Welle 1 der magnetischen Umlaufgetriebestufe
$n_{1,mech}$	min^{-1}	Drehzahl der Welle 1 der mechanischen Umlaufgetriebestufe
n_2	min^{-1}	Drehzahl der Zentralwelle 2
$n_{2,mag}$	min^{-1}	Drehzahl der Welle 2 der magnetischen Umlaufgetriebestufe
$n_{2,mech}$	min^{-1}	Drehzahl der Welle 2 der mechanischen Umlaufgetriebestufe
$n_{Coils,v}$	min^{-1}	virtuelle Drehzahl des elektromagnetischen Feldes
$n_{Control}$	min^{-1}	Drehzahl des kontrollierenden Elements
n_E	min^{-1}	Drehzahl des Dieselmotors

Symbol	Einheit	Bezeichnung
n_{el}	min^{-1}	Drehzahl der elektrischen Maschine
$n_{el,n}$	-	Normierte Drehzahl der elektrischen Maschine
$n_{el,N}$	min^{-1}	Nenn Drehzahl der elektrischen Maschine
n_{OUT1}	min^{-1}	Drehzahl der Ausgangswelle 1
n_{OUT2}	min^{-1}	Drehzahl der Ausgangswelle 2
n_s	min^{-1}	Drehzahl des Stegs
$n_{s,mag}$	min^{-1}	Drehzahl der Stegwelle der magnetischen Umlaufgetriebebestufe
$n_{s,mech}$	min^{-1}	Drehzahl der Stegwelle der mechanischen Umlaufgetriebebestufe
N_1	-	Polpaarzahl des inneren Rotors
N_2	-	Anzahl der ferromagnetischen Segmente des Modulationsrings
N_3	-	Polpaarzahl des äußeren Rotors
$N_{m,k}$	-	Anzahl der Polpaare auf Magnetring 2
N_p	-	Anzahl der Polpaare auf Magnetring 1
$N_{p,r}$	-	Polpaarzahl des Rotors
$N_{p,S}$	-	Polpaarzahl des Stators
N_{RF}	-	Anzahl der Reibflächen
N_s	-	Anzahl der ferromagnetischen Segmente des Modulationsrings
$p_{V,Fe,N,M43}$	W kg^{-1}	spezifische Eisenverlustleistung im Nennbetrieb für M43
$p_{V,Fe,N}$	W kg^{-1}	spezifische Eisenverlustleistung im Nennbetrieb
$p_{V,Fe}$	W kg^{-1}	spezifische Eisenverlustleistung
$p_{V,H_y,N}$	W kg^{-1}	spezifische Hystereseverlustleistung im Nennbetrieb
p_{V,H_y}	W kg^{-1}	spezifische Hystereseverlustleistung
$p_{V,W_i,N}$	W kg^{-1}	spezifische Wirbelstromverlustleistung im Nennbetrieb
p_{V,W_i}	W kg^{-1}	spezifische Wirbelstromverlustleistung
P_{an}	kW	Antriebsleistung des Hydrostaten
P_{el}	kW	zur Verfügung stehende elektrische Leistung
$P_{el,N}$	kW	Nennleistung der elektrischen Maschine
$P_{f(n=1 \text{ min}^{-1})}$	mW	Verlustleistung offene Lamellenkupplung bei Relativdrehzahl 1 min^{-1}
P_h	kW	Leistung des Hydrostaten
$P_{max,Engine}$	kW	maximale Leistung des Verbrennungsmotors
$P_{max,mech}$	kW	maximale Leistung der mechanischen Umlaufgetriebebestufe
$P_{mech,max}$	kW	maximale Leistung des mechanischen Pfades
P_{MG}	kW	Leistung der an den Inverter angeschlossenen elektrischen Maschine
$P_{MG1,akt}$	kW	aktuelle Leistung der elektrischen Maschine 1
$P_{MG1,max,G}$	kW	maximale generatorische Leistung der elektrischen Maschine 1
$P_{MG2,akt}$	kW	aktuelle Leistung der elektrischen Maschine 2
$P_{var,max}$	kW	maximale Leistung des variablen Pfades
P_V	kW	Verlustleistung des Getriebes
$P_{V,Cu,N}$	kW	Kupferverluste der elektrischen Maschine im Nennbetrieb
$P_{V,Cu,TS}$	kW	Stromwärmeverlustleistung des Stators
$P_{V,el,N}$	kW	Verlustleistung der elektrischen Maschine im Nennbetrieb
$P_{V,Fe,N}$	kW	Eisenverluste der elektrischen Maschine im Nennbetrieb

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$P_{V,Fe,N,Hy}$	kW	Hystereseverlustleistung der elektrischen Maschine im Nennbetrieb
$P_{V,Fe,N,Wi}$	kW	Wirbelstromverlustleistung der elektrischen Maschine im Nennbetrieb
$P_{V,Fe,TS,M}$	kW	Eisenverlustleistung des Modulationsrings
$P_{V,Fe,TS,R}$	kW	Eisenverlustleistung des Rotors
$P_{V,Fe,TS,S}$	kW	Eisenverlustleistung des Stators
$P_{V,h}$	kW	Verlustleistung des Hydrostaten
$P_{V,Hy}$	kW	Hystereseverlustleistung
$P_{V,Hy,TS,M}$	kW	Hystereseverlustleistung des Modulationsrings
$P_{V,Hy,TS,S}$	kW	Hystereseverlustleistung des Stators
$P_{V,Inv}$	kW	Verlustleistung des Inverters
$P_{V,Inv,B}$	W	Basisverlustleistung des Inverters
$P_{V,Rot}$	kW	Verlustleistung des Rotors
$P_{V,Rot,Hy}$	kW	Hystereseverlustleistung des Rotors
$P_{V,Rot,Wi}$	kW	Wirbelstromverlustleistung des Rotors
$P_{V,Wi}$	kW	Wirbelstromverlustleistung
$P_{V,Wi,TS,M}$	kW	Wirbelstromverlustleistung des Modulationsrings
$P_{V,Wi,TS,R}$	kW	Wirbelstromverlustleistung des Rotors
$P_{V,Wi,TS,S}$	kW	Wirbelstromverlustleistung des Stators
r_a	mm	Außenradius der Reibfläche
r_i	mm	Innenradius der Reibfläche
R_{Cu}	mΩ	Wicklungswiderstand der Kupferwicklungen
$R_{Cu,TS}$	mΩ	gesamter Wicklungswiderstand der Kupferwicklungen (dreiphasig)
S_F	-	Sicherheitsfaktor
t	-	Zeitanteil
t_i	-	Zeitanteil des Bereichs i
U_N	V	Nennspannung der elektrischen Maschine
$w1$	-	Exponent der Leistungsflussrichtung
X	min ⁻¹	Drehzahlvorgabe
Y	min ⁻¹	Drehzahlvorgabe
Z	Nm	Drehmomentvorgabe

Griechische Formelzeichen

γ	°	Winkel der Rotordrehung
η	-	Wirkungsgrad des Getriebes
η_0	-	Umlaufwirkungsgrad bei unbekannter Leistungsflussrichtung
η_{12}	-	Wirkungsgrad für Leistungsfluss von Element 1 zu Element 2
η_{21}	-	Wirkungsgrad für Leistungsfluss von Element 2 zu Element 1
η_{el}	-	Wirkungsgrad der elektrischen Maschine
η_{FD}	-	Wirkungsgrad des Endantriebs
η_{Inv}	-	Wirkungsgrad des Inverters
$\eta_{Inv,L}$	-	Lastwirkungsgrad des Inverters

Symbol	Einheit	Bezeichnung
η_{Stufe}	-	Wirkungsgrad einer einzelnen Stufe
$\eta_{Stufe,A}$	-	Wirkungsgrad einer einstufigen Außenverzahnung
$\eta_{Stufe,I}$	-	Wirkungsgrad einer einstufigen Innenverzahnung
$\eta_{Stufe,SB}$	-	Wirkungsgrad einer einzelnen spiralverzahnten Kegelradstufe
$\eta_{t,h}$	-	Wirkungsgrad des Hydrostaten
η_{Uml}	-	Umlaufwirkungsgrad
ϑ	°C	Temperatur
ϑ_3	°C	Getriebeauslegungstemperatur
μ	mPa s	dynamische Viskosität
μ_1	mPa s	dynamische Viskosität bei Temperaturpunkt 1
μ_3	mPa s	dynamische Viskosität bei Temperaturpunkt 3
μ_{ϑ}	mPa s	dynamische Viskosität bei der Temperatur ϑ
$\nu_{100\text{ °C}}$	mm s ⁻¹	kinematische Viskosität bei 100 °C
$\nu_{40\text{ °C}}$	mm s ⁻¹	kinematische Viskosität bei 40 °C
π	-	Kreiszahl
ρ	kg m ⁻³	Dichte
ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit
ω_1	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit von Element 1
ω_{BL}	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit der Belaglamellen
ω_{SL}	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit der Stahllamellen
ω_s	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit der Stegwelle
Ω_1	s ⁻¹	Drehzahl des inneren Rotors
Ω_2	s ⁻¹	Drehzahl des Modulationsrings
Ω_3	s ⁻¹	Drehzahl des äußeren Rotors

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
CVT	Continuously Variable Transmission – Stufenlosgetriebe
DDS	Differential Drive Shaft – Getriebeausgangswelle
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
DRNR	Double Row Needle Roller (Bearing) – zweireihiges Nadellager
EC	European Commission (Europäische Kommission)
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
eCVT	Electrical Continuously Variable Transmission – elektrisches Stufenlosgetriebe
eIVT	Electrical Infinitely Variable Transmission – elektrisches unendlich stufenloses Getriebe
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
hCVT	Hydraulic Continuously Variable Transmission – hydraulisches Stufenlosgetriebe
hIVT	Hydraulic Infinitely Variable Transmission – hydraulisches unendlich stufenloses Getriebe
HMP	Hydraulikmotor/-pumpe
IPM	Intelligent Power Management – intelligente Leistungsregulierung
ISO	International Organization for Standardization – Internationale Organisation für Normung
IVT	Infinitely Variable Transmission – unendlich stufenloses Getriebe
MG	Motor-Generator
PTO	Power Take-Off – Nebenabtrieb, Zapfwelle
RB	Radial Ball (Bearing) – Radialkugellager
sE	Small Electrical Machines – kleine elektrische Maschinen
TR	Tapered Roller (Bearing) – Kegelrollenlager
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VM	Verbrennungsmotor

Abbildungsverzeichnis

2.1	Typische Einteilung von CVTs mit Leistungsverzweigung nach [RR05]	28
2.2	Mechanische Umlaufgetriebestufe und magnetische Umlaufgetriebestufe, vgl. [Lat13]	31
2.3	Vereinfachtes Strichdiagramm hydrostatisches Stufenlosgetriebe ZF TerraMatic nach [Ren14]	35
2.4	Strichdiagramm hydrostatisches Stufenlosgetriebe für die Baureihen Case IH Maxxum und New Holland T6 nach [RGS15]	36
2.5	Strichdiagramm hydrostatisches Stufenlosgetriebe für die Baureihen Case IH Puma und Magnum sowie New Holland T7 und T8 nach [GR10]	37
2.6	Strichdiagramm hydrostatisches Stufenlosgetriebe Jarchow, nach [JHB83]	38
3.1	WOLF-Schema 1.1	53
3.2	WOLF-Schema 2.1	53
3.3	WOLF-Schema 2.2	53
3.4	Drehrichtungen der elektrischen Maschine für aktiven Stillstand, Möglichkeit 1.1	55
3.5	Benennung der Wellen und Anschlüsse, WOLF-Schema 2.2	58
3.6	Maximal in der magnetischen Umlaufgetriebestufe auftretendes Drehmoment und maximal in der mechanischen Umlaufgetriebestufe auftretendes Blindleistungsverhältnis, WOLF-Schema 2.2	62
3.7	WOLF-Schema Planetensätze Stufenlosgetriebe ZF TerraMatic, Fahrbereich F1	64
3.8	WOLF-Schema der Variatorsektion hydrostatisches Stufenlosgetriebe für die Baureihen Case IH Maxxum, Puma und Magnum sowie New Holland T6, T7 und T8	65
3.9	Strichdiagramme von möglichen Realisierungen als Traktorgetriebe, WOLF-Schema 2.2	68
3.10	Vereinfachte Strichdiagramme zur Wirkungsgradberechnung für die betrachteten Getriebe	89
3.11	Berechnete Triebstrangwirkungsgrade der verschiedenen Getriebe	90
3.12	Berechnete Triebstrangwirkungsgrade für hydrostatische und elektrische Stufenlosgetriebe	92
3.13	Berechnete und gemessene Triebstrangwirkungsgrade der hydrostatischen Stufenlosgetriebe	93
3.14	Maximal zur Verfügung stehende elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei verschiedenen Drehzahlen des Verbrennungsmotors	97
3.15	Vergleich der Offboard-Leistung der verschiedenen Getriebetopologien	98
3.16	Strichdiagramm Prüfstand	99
3.17	Schematische Darstellung des Prüfstandsgetriebes	101

3.18	Geschwindigkeitsverteilung nach [Res04]	104
3.19	Standardkollektiv nach [Ren04], zit. nach [Res04]	106
3.20	Schädigungssumme für die einzelnen Lager	108
3.21	Schematische Darstellung des Prüfstandes	111
3.22	Statorwirkungsgrad der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe bei konstanter Rotordrehzahl	113
3.23	Drehmoment an Rotor, Modulationsring und Stator in Abhängigkeit von der Statorstromstärke	115
3.24	Volllastwirkungsgrad der Prüfstandsgetriebestufe über der sich ergebenden Fahrgeschwindigkeit	116

Tabellenverzeichnis

3.1	Drehzahlmatrix für WOLF-Schema 2.2	59
3.2	Drehmomentmatrix für WOLF-Schema 2.2	59
3.3	Zeitanteile Standardkollektiv	107

1 Einleitung

Bis zu 5 % Kraftstoffeinsparung auf Komponentenebene sind durch neue Getriebekonzepte möglich. Zu diesem Schluss kommt eine Studie der EC zur Überarbeitung der Direktive 97/68/EC für Non Road Mobile Machinery [RA10]. Leistungsverzweigte Getriebe können nach Untersuchungen der DLG Kraftstoffeinsparungen von bis zu 15 % gegenüber bisher verwendeten Schaltgetrieben realisieren. Durch Stufenlosgetriebe ergeben sich darüber hinaus weitere Kraftstoffeinsparungen (ca. 10 %) durch die Möglichkeit zur Optimierung des Verbrennungsmotorbetriebs [Jac10]. „Die Fahrgeschwindigkeiten von Traktoren betragen in Europa typisch bis 50 km/h (vereinzelt 60 km/h), wobei Volllast ab etwa 4 km/h möglich ist. Getriebespreizungen von über 100 (unter Volllast bis etwa 15), ein hoher Automatisierungsgrad sowie viele Maßnahmen zur Energieeinsparung haben dabei zu sehr komplexen Konzepten geführt“ [Ren14]. Inzwischen bieten fast alle Traktorenhersteller stufenlose Getriebe an [Sti13]. Diese sind im Allgemeinen leistungsverzweigt mit einem hydraulischen variablen Pfad ausgeführt, der zusammen mit einer mechanischen Leistungsverzweigungs- und Leistungssummierungseinheit – üblicherweise eine Stirnradstufe und ein Planetengetriebe – den Variator bildet. Diesem nachgeschaltet sind meist mehrere Fahrbereiche, die in Synchronpunkten unter Last geschaltet werden. Wissenschaftliche Forschungsergebnisse in der jüngsten Vergangenheit haben gezeigt, dass eine Leistungsverzweigungs- oder Leistungssummierungseinheit nicht nur mechanisch, sondern auch mit einem magnetischen Wirkprinzip ausgeführt werden kann. Eine magnetische Umlaufgetriebestufe besteht aus einem inneren Ring mit einer Anzahl magnetischer Pole, einem modulierenden Ring und einem äußeren Ring mit einer zweiten Anzahl magnetischer Pole. Der modulierende Ring besteht aus abwechselnd ferromagnetischen und paramagnetischen Segmenten, die das durchdringende Magnetfeld leiten und modulieren. Der Wirkungsgrad magnetischer Umlaufgetriebe soll den ohnehin schon hohen Wirkungsgrad des mechanischen Pendants noch übertreffen [Lat13].

1.1 Motivation

Diese Entwicklungen sind insofern von wissenschaftlichem Interesse, als dass bereits bekannt ist, dass in einer magnetischen Umlaufgetriebestufe Magnete durch einen Stator mit Spulenwicklung ersetzt werden können. Dadurch wird eine elektrische Maschine in eine Umlaufgetriebestufe integriert. Elektrisch leistungsverzweigte Getriebe beinhalten zwei elektrische Maschinen. Es ergibt sich die Frage, ob ein komplexes, stufenloses, elektrisch leistungsverzweigtes Getriebe entwickelt werden kann, welches die Leistungsverzweigung mit einem magnetischen Wirkprinzip realisiert und zusätzlich eine der beiden für die Leistungsverzweigung nötige elektrische Maschine direkt in das Getriebe integriert. Ein solches Getriebe könnte die oben genannten quantifizierten Potenziale zur Kraftstoffeinsparung vereinen. Gerade im Hinblick auf die immer strenger werdenden Abgasvorschriften sowie die Endlichkeit der fossilen Energieträger und daraus resultierender langfristig steigender

Kraftstoffpreise wäre eine solche Entwicklung wünschenswert.

Im Rahmen dieser Dissertation sollen die Potenziale untersucht werden, die die stufenlose Leistungsverzweigung mit einem magnetischen Wirkprinzip in Verbindung mit der Integration der elektrischen Maschine direkt in das Getriebe in Form einer neuartigen Variatorstufe birgt. Es soll dabei explizit untersucht werden, ob der Einsatz einer solchen neuartigen Variatorstufe in einem Stufenlosgetriebe eines landwirtschaftlichen Fahrzeugs grundsätzlich bezüglich der auftretenden Drehmomente und Leistungen möglich ist und ob der Einsatz wirtschaftlich ist. Weiterhin soll darauf eingegangen werden, ob sich hieraus Vorteile im Bezug auf den Bauraum, den Wirkungsgrad sowie Montage und Wartung ergeben. Es soll hierbei nicht explizit untersucht werden, welchen quantitativen Einfluss ein dieser Stufe nachgeschaltetes Gruppengetriebe und eine mögliche Optimierung desselben hat. Nötige Gangstufen sollen lediglich theoretisch thematisiert werden. Weiterhin soll nicht auf die Leistungsverzweigung mit rein magnetischem Wirkprinzip, d.h. auf eine Umlaufgetriebestufe nur mit Permanentmagneten und modulierenden Segmenten, eingegangen werden. Hierzu liegen bereits ausreichend Forschungsergebnisse vor. Es kann zudem bereits zum jetzigen Zeitpunkt davon ausgegangen werden, dass ein Einsatz einer solchen Umlaufgetriebestufe in einem stufenlosen elektrisch leistungsverzweigten Traktorgetriebe der aktuellen Generation durch die Menge des benötigten Magnetmaterials unwirtschaftlich ist.

Der Themenschwerpunkt dieser Dissertation soll die theoretische Synthese und anschließende praktische Prüfstandsuntersuchung eines Variatorkonzeptes für ein stufenloses, elektrisch leistungsverzweigtes Traktorgetriebe zukünftiger Generationen bilden.

Hierbei wird erwartet, dass nach Abschluss der Untersuchungen Empfehlungen zum weiteren Einsatz oder zur weiteren Entwicklungsrichtung eines solchen Variatorkonzeptes gegeben werden können. Es wird weiterhin erwartet, dass eine Beurteilung stattfinden kann, in welchen Leistungsklassen und -grenzen sowie in welchen Traktorsegmenten (von Basisausstattung bis Premium) der Einsatz eines solchen Variatorkonzeptes sinnvoll ist.

1.2 Methodische Vorgehensweise

Zur Untersuchung der thematisierten Variatorstufe wird folgende methodische Vorgehensweise gewählt: Als Methode zur Entwicklung und Synthese einer Getriebestufe kommt insbesondere das sog. *WOLF-Schema* [Ges88] infrage. Das WOLF-Schema ermöglicht die Konzeption von mehrwelligen Umlaufgetriebestufen frei von konstruktiven Einschränkungen. Hiermit können Konzepte entwickelt werden, die im weiteren Verlauf in eine Vielzahl konstruktiver Lösungen umgesetzt werden können. Die Methode bietet sich daher beim Neudesign einer Getriebestufe besonders an, da hierdurch nicht schon durch konkrete konstruktive Ausführungen ein bestimmtes Konzept festgelegt wird. Mit dem WOLF-Schema wird lediglich die Anordnung von Summen- und Differenzwellen in einer Getriebestufe festgelegt, aus welcher sich die Kinetik einer solchen eindeutig ergibt. Das entwickelte WOLF-Schema führt dann durch Wahl der Standgetriebeübersetzungsverhältnisse und deren Vorzeichen zu einer größeren Zahl an konstruktiven Lösungen, von denen die kinematisch und wirtschaftlich günstigste ausgewählt werden kann.

Zur Berechnung einer entwickelten Getriebestufe kommt das Matrix-Rechenverfahren nach Stangl [Sta06] infrage. Hierbei handelt es sich um ein systematisches und damit prinzipiell auch rechnergeeignetes Verfahren zur Berechnung komplexer Getriebestrukturen. Das Verfahren basiert darauf, jeder Komponente – und damit jeder Drehzahl und jedem

Drehmoment – innerhalb des Getriebes eine Unbekannte zuzuordnen. Anschließend wird ein Gleichungssystem mit einer Anzahl an Gleichungen und Vorgaben in Höhe der Anzahl der Unbekannten aufgestellt und das Gleichungssystem gelöst. Die Lösung kann rechnergestützt durch Invertieren der Gleichungsmatrix erfolgen.

Zur konstruktiven Realisierung einer entwickelten und kinematisch und kinetisch berechneten Getriebestufe kommt das Verfahren nach VDI 2221 infrage [VDI93]. Hierbei handelt es sich um ein systematisches Vorgehen, welches mehrere verschiedene Arbeitsschritte und Methoden beinhaltet. Das Verfahren ist im konstruktiven Bereich bekannt und bewährt. Die Methoden werden nach folgenden Kriterien gewählt: Methoden, die für Kreativität sowie für Synthese und Entwicklung zur Anwendung kommen, sollen in einem frühen Entwicklungsstand die konstruktive Freiheit möglichst wenig einschränken und einen großen Lösungsraum erschließen. Dies ist insbesondere durch Verwendung des WOLF-Schemas gewährleistet.

Berechnungsmethoden sollen schnell, systematisch und unanfällig für Fehler sein und sich zusätzlich ohne großen Aufwand auf andere Konzepte übertragen lassen. Dies ist wiederum insbesondere beim Matrix-Rechenverfahren nach Stangl der Fall, da die Gleichungen nach einem einfachen Verfahren aufgestellt werden. Dieses Verfahren führt zu einer höheren Anzahl von Unbekannten als bei einer schrittweisen, für jedes Getriebekonzept einzeln entwickelten Berechnung, dafür aber zu einfacheren Gleichungen, die sich schematisch aufstellen lassen. Es ist somit unanfällig für Fehler und kann bei Konzeptänderungen sehr schnell angepasst werden.

Methoden zur konstruktiven Realisierung von Konzepten sollen ein breites Lösungsfeld ermöglichen, aber gleichzeitig die Anzahl an letztendlich zu untersuchenden Lösungen sinnvoll reduzieren und konsolidieren. Sie sollen durch Kombination, Rekombination und Synthese zu einem konstruktiv hochwertigen und wirtschaftlich attraktiven Produkt führen. Weiterhin soll durch die verwendete Methode sichergestellt werden, dass das letztendlich entwickelte Produkt auch den zu Anfang festgelegten Anforderungen entspricht. Die Methode soll ein iteratives Vorgehen ermöglichen, da bei einer Neuentwicklung, wie sie im Rahmen dieser Dissertation vorgenommen wird, davon ausgegangen werden kann, dass Erkenntnisse im Verlauf der Arbeit zu notwendigen Änderungen in einer früheren Phase führen. All diese Punkte werden von der systematischen Konstruktionsweise, die in der VDI 2221 beschrieben wird, in besonderem Maße erfüllt. Es wird auf die Verwendung rechnergestützter Syntheseprogramme verzichtet. Es kann erwartet werden, dass durch die hohe Anzahl an Randbedingungen, die an das Getriebe gestellt werden, eine Synthese mit rechnergestützten Verfahren kaum Mehrwert gegenüber einer systematischen Synthese mit dem WOLF-Schema bietet, da der Lösungsraum schon stark eingeschränkt ist. Der Aufwand für die Realisierung einer automatisierten Getriebesynthese steht hier in keinem guten Verhältnis zum Ergebnis.

Durch die hohe erwartete Komplexität der Getriebestufe soll auf eine alternativ zum Matrix-Rechenverfahren nach Stangl mögliche Schritt-für-Schritt-Berechnung mit eigens für jedes Konzept aufgestellten Gleichungen verzichtet werden. Zwar benötigt ein solches Berechnungsverfahren weniger Einarbeitungszeit, ist aber bei Anwendung auf mehrere verschiedene Konzepte mit einem höheren Aufwand verbunden und zudem anfälliger für Fehler. Es wird erwartet, dass mit dem WOLF-Schema eine Anordnung von Umlaufgetrieben und eine Festlegung der Lage von Summen- und Differenzwellen gefunden werden kann, die die kinematischen Bedingungen, also die Anforderungen bezüglich Drehrichtung und abhängigem

Drehzahlverhalten, an die Getriebestufe erfüllen kann. Es wird weiterhin erwartet, dass die mit dem WOLF-Schema gefundene Anordnung mit dem Matrix-Rechenverfahren verifiziert werden kann. Hierdurch kann dann ein konkretes Konzept entwickelt werden, welches neben den kinematischen auch die kinetischen Randbedingungen, also die Anforderungen nach maximal auftretenden Drehmomenten, Blindleistungen usw., erfüllt. Durch eine anschließende methodische Konstruktion nach VDI 2221 wird erwartet, dass eine Getriebestufe entwickelt werden kann, die entweder für den Einsatz im Standard- oder im Premiumsegment oder in beiden Segmenten geeignet ist.

Limitierungen können im Bereich der Leistung und des übertragbaren Drehmomentes auftreten. Zu Beginn der Dissertation kann nicht abgesehen werden, ob ein Konzept zum Einsatz in allen Leistungsklassen geeignet ist. Es ist daher denkbar, dass der Einsatz eines solchen Getriebekonzeptes durch die Randbedingungen für bestimmte Leistungsklassen aufgrund technischer oder wirtschaftlicher Gründe verworfen werden muss. Diese Schwierigkeit soll dadurch umgangen werden, dass zunächst versucht wird, ein Getriebekonzept für die höchste infrage kommende Leistungsklasse zu finden, welches im Premiumsegment zum Einsatz kommen soll. Kann ein solches Getriebekonzept gefunden werden, so kann es wahrscheinlich durch Skalierung und Reduktion von Funktionen für den Einsatz in niedrigeren Leistungsklassen und im Standardsegment angepasst werden. Zeigen sich im Verlauf der Arbeit technische Limitierungen im Bereich großer Leistungen, so soll die Entwicklung zunächst für die kleinste infrage kommende Leistungsklasse fortgeführt werden. Dann kann überlegt werden, zunächst ein Getriebekonzept für das Standardsegment zu entwickeln. Wenn ein solches Getriebe gebaut und auf dem Prüfstand vermessen wird, dann können hieraus Abschätzungen getroffen werden, ob durch Skalierung unter Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklung hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der zum Einsatz kommenden Komponenten ein Einsatz auch in höheren Leistungsklassen denkbar ist.

Aus der zuvor beschriebenen Vorgehensweise ergibt sich die Gliederung dieser Dissertation: Zunächst sollen im Rahmen der Darstellung der theoretischen Grundlagen Definitionen vereinbart werden. Dies ist bei den betrachteten neuen Technologien für nachfolgende Berechnungen von zentraler Bedeutung. Dieser Abschnitt soll ferner zur späteren Referenzierung dienen und die Definitionen und Vereinbarungen für zukünftige Entwicklungen beibehalten werden. Definitionen sollen sich wenn möglich aus Analogien ergeben und Grundlagenwerke im Bereich der Umlaufgetriebe referenzieren. Anschließend sollen die Methoden erläutert und beschrieben werden, um dem Leser zu ermöglichen die Entwicklung nachzuvollziehen. Die Erläuterung der Methoden soll der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse dienen. Auf der Basis der theoretischen Grundlagen sowie der Methodik sollen die Forschungsfragen aufgestellt werden, anschließend soll die Konzeption einer magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe vorgenommen werden. Hierbei sollen, wie oben beschrieben, gemäß VDI 2221 die Anforderungen an ein Traktorgetriebe in einer Liste festgehalten werden. Daran schließt sich eine Synthese und Analyse einer Getriebestufe an, die im Folgenden konstruktiv umgesetzt wird. Die am geeignetsten erscheinende Lösung soll als Prüfstandsgetriebe realisiert werden. Aufbauend auf den Messergebnissen des Prüfstandsbetriebs soll die Umlaufgetriebestufe bewertet werden. Hierbei sollen zunächst die Vor- und Nachteile einer solchen Umlaufgetriebestufe herausgearbeitet werden und diese anschließend miteinander verglichen werden. Ein Fazit und ein kurzer Ausblick beschließen die Dissertation. In diesem Teil soll eine kritische Reflexion der Vorgehensweise stattfinden sowie die aufgestellten Forschungsfragen beantwortet werden.

2 Theoretische Grundlagen

Im Folgenden werden zunächst die theoretischen Grundlagen betrachtet, die zum Verständnis und zur Durchführung der geplanten methodischen Vorgehensweise notwendig sind.

2.1 Definitionen und Abgrenzungen

Der erste Teil dieses Kapitels widmet sich der Definition wesentlicher, zum Verständnis der nachfolgenden Diskussion notwendiger Fachbegriffe. Hierbei werden sowohl Definitionen aus der Literatur übernommen als auch neue Definitionen vereinbart, um eine Konsistenz mit aktuellen Forschungsvorhaben zu erreichen und eine stringente Basis für detailliertere Erläuterungen im weiteren Verlauf dieser Arbeit zu erzeugen.

2.1.1 Traktorgetriebe

Jedes Jahr werden weltweit rund zwei Millionen Traktoren mit Motorleistungen oberhalb von 20 kW gefertigt. Das Getriebe mit Hinterachse, Bremsen, Wellen und Vorderachsenanschluss ist dabei die teuerste Komponente mit 25 bis 30 % der Gesamtkosten. Aufgrund der vielfältigen Anforderungen weltweit existieren heute die unterschiedlichsten Getriebekonzepte für Traktoren. Global agierende Unternehmen müssen heute alle Funktionen und Technologiestufen (von ganz einfach bis sehr aufwendig) abdecken. Während in weniger entwickelten Ländern bzw. den sogenannten *Emerging Markets* Konstruktionen einfacher Getriebe mit wenigen Gängen gefragt sind, die sich im europäischen Raum kaum noch wirtschaftlich herstellen lassen, wächst die Komplexität im Premiumbereich weiter an. Hier kommen synchronisierte, lastschaltbare Automatikgetriebe und Stufenlosgetriebe zum Einsatz, die sich durch eine hohe Anzahl an Gangstufen, mehrere einstellbare Zapfwellendrehzahlen und zuschaltbarem Allradantrieb auszeichnen [Ren14].

2.1.2 Umlaufgetriebe

In nahezu allen Traktoren kommen Umlaufgetriebestufen in Form von Planetensätzen zum Einsatz, in den niedrigen Technologiestufen als Endübersetzungsstufe in den Radnaben, in den höheren Technologiestufen auch zusätzlich als Elemente für Leistungsverzweigung und -summierung, Reversierung, Kriechgang und als komplexe Koppellemente in Automatikgetrieben. Ein Umlaufgetriebe entsteht aus einem Standgetriebe, wenn dessen Gehäuse nicht mehr länger mit dem Fundament verbunden ist, sondern drehbar gelagert wird und dessen Drehachse zu einer weiteren Welle ausgebildet wird [Mül98]. Kennzeichnend für alle Arten von Umlaufgetrieben ist, dass deren im Standgetriebe ursprünglich stillstehenden Übertragungselemente bei Erweiterung zum Umlaufgetriebe nicht mehr stillstehen, sondern mit dem als neue Welle entstandenen Steg umlaufen. Müller liefert hier konkrete Vorschläge zur Benennung: „War das einfache Übersetzungsgetriebe ein Rädergetriebe [...], so entsteht

daraus ein „Umlaufrädergetriebe“. Die Achsen seiner ursprünglich stillstehenden Übertragungselemente kreisen nun um die zentrale Achse und die Übertragungselemente drehen sich zusätzlich um sich selbst, wie Planeten die Sonne umkreisen. Daher haben diese Getriebe den Namen Planetengetriebe erhalten. Robert Willis hat bereits im 19. Jahrhundert in seinem Lehrbuch für Ingenieurstudenten die für alle Umlaufgetriebe gültige kinematische Gleichung, auch WILLIS-Gleichung genannt, angegeben [Wil75]:

$$i_0 = i_{12} = \frac{n_1 - n_s}{n_2 - n_s} \quad (2.1)$$

Diese lässt sich übersichtlich darstellen als

$$n_1 - i_0 n_2 - (1 - i_0) n_s = 0 \quad (2.2)$$

Da diese Gleichung im weiteren Verlauf der Arbeit von hoher Bedeutung ist, sei sie an dieser Stelle genannt. Auf deren detaillierte Herleitung sowie auf die Auflistung der weiteren für Planetengetriebe gültigen Gleichungen sei an dieser Stelle verzichtet. Sie sind hinreichend bekannt und in verschiedenen Lehrbüchern, zum Beispiel von Loomann [Loo09] oder Müller [Mül98], erläutert und zusätzlich in der VDI-Richtlinie 2157 [VDI12a] zusammengefasst. Willis nennt in seinem Lehrbuch vier besondere Einsatzmöglichkeiten, durch die sich alle Bauarten von Umlaufgetrieben von üblichen zwangsläufigen Standgetrieben unterscheiden. Von besonderer Bedeutung im Rahmen dieser Arbeit ist die vierte Eigenschaft:

- Zusammenführung (Überlagerung) von zwei oder mehr voneinander unabhängigen Drehbewegungen auf ein gemeinsames Abtriebsglied [Mül98].

Damit eignen sich die Umlaufgetriebe ideal, um die in Abschnitt 1.1 beschriebenen Leistungssummierungseinheiten in stufenlosen Getrieben zu realisieren.

2.1.3 Stufenlosgetriebe

Wie in Abschnitt 1.1 bereits erwähnt, haben sich in Traktoren in den letzten Jahren neben den manuellen Schaltgetrieben und den Lastschaltgetrieben auch die Stufenlosgetriebe, engl. continuously variable transmission (CVT), etabliert. Neben dem stets im Fokus stehenden Kraftstoffverbrauch eines Traktors werden heutzutage an Getriebe auch steigende Anforderungen an Bedien- und Fahrkomfort gestellt. Stufenlose Getriebe weisen einen hohen Fahrkomfort auf. Sie ermöglichen eine stufenlose Anpassung der Ausgangsdrehzahl bei konstanter Eingangsdrehzahl, d. h. bei konstanter Drehzahl des Dieselmotors. Der Motor kann so je nach Anforderung in seinem Wirkungsgradbestpunkt, dem Punkt des maximalen Drehmomentes, oder bei einer festgelegten konstanten Drehzahl für den Betrieb von Anbaugeräten mit bestimmter, konstanter Zapfwelldrehzahl betrieben werden. Die Motordrehzahl wird im höchsten Gang entsprechend der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (40 bzw. 50 km/h) abgeregelt. Der heute übliche Schongang ermöglicht das Erreichen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit mit reduzierter Motordrehzahl und sorgt so für kraftstoffsparende Transportarbeiten [See12] [RK11]. Nach der Art ihrer Leistungsübertragung lassen sich Stufenlosgetriebe in mechanische, hydraulische und elektrische Stufenlosgetriebe einteilen.

Da die Eingangsleistung eine mechanische Leistung ist, findet bei mechanischen Stufenlosgetrieben keine Wandlung der Energieform statt. Die Wandlung von Drehzahl und

Drehmoment wird meist kraftschlüssig über eine Veränderung der Wirkdurchmesser der Übertragungselemente vorgenommen. Verbreitet sind beispielsweise Umschlingungsgetriebe wie das Multitronic-Getriebe von Audi [Fis+12] oder im Zuge neuerer Entwicklungen auch Wälzgetriebe mit konischen Übertragungselementen wie das Konus-Ring-Getriebe [SR16] oder Toroidgetriebe [FG16]. Mechanische Stufenlosgetriebe haben den Nachteil, dass die gesamte Kraft meist über kleine Reibflächen übertragen wird und somit hohe lokale Beanspruchungen auftreten.

Hydrostatische Stufenlosgetriebe bestehen aus einer Pumpe, die die Eingangsleistung in hydraulische Leistung wandelt, und einem Hydraulikmotor. Indem mindestens eines dieser beiden Aggregate verstellbar ausgeführt wird (z. B. Schrägachsen-Axialkolbenmaschine), kann eine stufenlose Übersetzung realisiert werden. Durch diese Architektur lässt sich auch der aktive Stillstand, d. h. der Stillstand der Ausgangswelle bei laufender Eingangswelle, erreichen. Hydraulische Stufenlosgetriebe weisen üblicherweise einen niedrigen Wirkungsgrad auf [Kle05]. Neben den beschriebenen hydrostatischen Stufenlosgetrieben gibt es noch die hydrodynamischen Stufenlosgetriebe, die zusammen mit den hydrostatischen Stufenlosgetrieben die Gruppe der hydraulischen Stufenlosgetriebe bilden. Wegen der komplexen Drehzahleinstellung eignen sich diese nicht als Drehzahlwandler und damit als Fahrgetriebe. Sie werden unter den Namen *Trilok-Wandler* oder *Föttinger-Wandler* als verschleißfreies Anfahrlement vor allem in Automatikgetrieben eingesetzt [MPS04].

Kann mit einem Stufenlosgetriebe eine Ausgangsdrehzahl von 0 auch bei drehender Eingangswelle und damit eine Übersetzung von 0 bzw. je nach Definition unendlich realisiert werden, so spricht man auch von einem unendlich stufenlosen Getriebe, engl. *infinitely variable transmission* (IVT). Elektrische Stufenlosgetriebe (eCVT oder eIVT) arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie hydraulische Stufenlosgetriebe (hCVT oder hIVT). Die Eingangsleistung wird von einem Generator in elektrische Leistung gewandelt und zu einem Motor geleitet. Als zusätzliches Wandlungselement dient ein Inverterzwischenkreis, der die Frequenz wandelt und damit die Drehzahlanpassung übernimmt. Nachteilig bei elektrischen Stufenlosgetrieben sind deren mäßiger Wirkungsgrad und hohes Gewicht [Rei18]. Vorteile sind die gute Regelbarkeit, ein schnelles Ansprechverhalten, Wirkungsgradvorteile gegenüber hydrostatischen Getrieben bei kleinen Geschwindigkeiten [Her08] [BSP14] [Kun13] und Vorteile durch Integration. So kommt bei elektrischen Stufenlosgetrieben im Gegensatz zu hydrostatischen Getrieben kein zusätzlicher wartungs- und kostenintensiver Hochdruckhydraulikkreislauf zum Einsatz. Stattdessen findet Elektrotechnik Verwendung, die im Zuge der derzeit in der einschlägigen Fachpresse zu beobachtenden starken Aktivität rund um den elektrischen Betrieb von Arbeitsantrieben auf Anbaugeräten (statt Zapfwellenbetrieb) und Nebenaggregaten möglicherweise in Zukunft ohnehin auf Traktoren integriert ist. Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Umrichtertechnik, stetig kompakter bauende Leistungselektronik und permanenterregte Wechselstrommotoren mit hohen Wirkungsgraden machen diese Technik auch für landwirtschaftliche Fahrzeuge zunehmend interessanter [Rei18].

Stufenlosgetriebe bieten Funktions- und Leistungsvorteile, die einen höheren Anschaffungspreis rechtfertigen. Für die Zukunft ist ein Anstieg der stufenlosen Antriebssysteme zu erwarten, da sie weiterhin ein Downsizing des Motors ohne Einschränkung der Leistungsfähigkeit ermöglichen. Ein großer Vorteil von Stufenlosgetrieben liegt in den Möglichkeiten, das Gesamtsystem so weit abzustimmen, dass vorhandene Wirkungsgradnachteile in gewis-

sen Übersetzungsbereichen durch eine intelligente Regelungsstrategie kompensiert werden [Aiz12].

2.1.4 Leistungsverzweigte Getriebe

Leistungsverzweigte Getriebe teilen die Eingangsleistung in einen meist mechanischen Pfad mit fester Übersetzung und einen variablen Pfad (CVT-Einheit) auf. Auf der Ausgangsseite werden beide Leistungsflüsse vereinigt. Die Wirkungsgrade von leistungverzweigten Getrieben liegen typischerweise oberhalb des Wirkungsgrades der CVT-Einheit aufgrund der hohen Wirkungsgrade im mechanischen Pfad. Der Wirkungsgrad steigt mit sinkender Leistung im variablen Pfad und weist seinen Bestpunkt auf, wenn die Leistung im variablen Pfad auf 0 fällt [RR05]. Für CVTs mit Leistungsverzweigung und Dreiwellenstandardplanetensätzen gibt es zwei typische Gruppen, deren Betriebsverhalten sich maßgeblich unterscheidet:

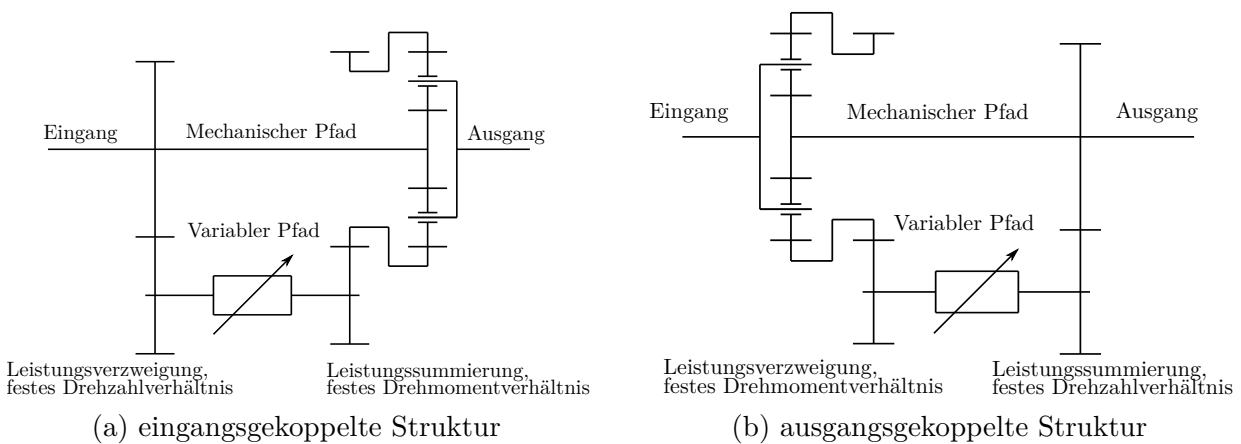


Abbildung 2.1: Typische Einteilung von CVTs mit Leistungsverzweigung nach [RR05]

Die eingangsgekoppelte Struktur (Abbildung 2.1a) – auch primäre Kopplung genannt – teilt die Eingangsleistung über ein festgelegtes Geschwindigkeitsverhältnis in den mechanischen und den variablen Pfad auf. Da die Geschwindigkeiten im Punkt der Leistungsverzweigung in einem festen Verhältnis zueinander stehen und das Verhältnis der Drehmomente am Eingang der beiden Pfade variiert, wird hier auch von *Torque-Split-Architektur* gesprochen. Beim Anfahren aus dem Stand ergibt sich für eingangsgekoppelte Strukturen ein hoher Anteil an zirkulierender Leistung [RR05] und daher niedrige Wirkungsgrade, die jedoch bei Traktoren durch die Schlupfgrenze oder durch eine intelligente Gesamtabstimmung bzw. Fahrstrategie (seriell hydraulisches bzw. seriell elektrisches Anfahren) gemildert werden können. Im Vorwärtsbetrieb tritt negative zirkulierende Blindleistung auf. Die Bezeichnung negativ rührt daher, dass die Leistung negativ durch den variablen Pfad läuft, also vom Ausgang zum Eingang. Im Rückwärtsbetrieb tritt positive zirkulierende Blindleistung auf. In diesem Fall muss die CVT-Einheit eine Gesamtleistung übertragen, die höher als die Eingangsleistung und damit Motorleistung ist, was zu einem niedrigen Gesamtwirkungsgrad führt. Der Wirkungsgradbestpunkt der eingangsgekoppelten Struktur tritt im Vorwärtsbetrieb bei stillstehender Variatorausgangswelle auf. In diesem Punkt fließt keine Leistung über den variablen Pfad. Bei weiterer Erhöhung der Ausgangsdrehzahl tritt Leistungsverzweigung auf, jetzt teilt sich die Eingangsleistung auf den mechanischen und den variablen Pfad auf

und wird vor dem Ausgang wieder summiert. Der Wirkungsgrad bei Rückwärtsfahrten mit geringen Geschwindigkeiten ist mäßig. Wenn diese von Bedeutung sind, kann eine mechanische Reversiereinheit eingesetzt werden, um akzeptable Wirkungsgrade zu liefern. Der Wirkungsgradverlauf im Vorwärtsbetrieb kann dann auch im Rückwärtsbetrieb genutzt werden. Wird dem Stufenlosgetriebe ein konventionelles Stufengetriebe nachgeschaltet, so kann der Wirkungsgradbereich des stufenlosen Getriebes über der Fahrzeuggeschwindigkeit analog zur Kennung eines Verbrennungsmotors mehrfach durchlaufen werden und es lassen sich so kontinuierlich hohe Wirkungsgrade erreichen.

Die ausgangsgekoppelte Struktur (Abbildung 2.1b) teilt die Eingangsleistung über eine Planetenstufe auf den mechanischen und den variablen Pfad auf. Diese Aufteilung erfolgt stets mit einem festen Verhältnis der Drehmomente, während das Verhältnis der Drehzahlen am Eingang der beiden Leistungspfade variiert. Daher wird hier auch von *Speed-Split-Architektur* gesprochen. Für die ausgangsgekoppelte Struktur gilt, dass beim Anfahren die Leistung im variablen Pfad zunächst gleich der Eingangsleistung ist, d. h. die gesamte Leistung fließt über den variablen Pfad, was zu niedrigen Gesamtwirkungsgraden führt. Die absoluten Verluste werden wiederum von der Schlupfgrenze gemildert. Bei Erhöhung der Ausgangsdrehzahl tritt Leistungsverzweigung auf und es wird immer mehr Leistung über den mechanischen Pfad übertragen. Die Leistung im mechanischen Pfad steigt proportional mit der Ausgangsdrehzahl an. Der Gesamtwirkungsgrad steigt daher linear, wenn für beide Pfade konstante Wirkungsgrade angenommen werden. Bei stillstehender Variatoreingangswelle wird die Leistung rein mechanisch übertragen, was wie bereits erläutert zu den besten Gesamtwirkungsgraden führt. Sobald die Variatoreingangswelle dann in die andere Richtung zu drehen beginnt, tritt negative Blindleistung auf und der Wirkungsgrad fällt linear ab. Im Rückwärtsbetrieb ändert die Sonnenwelle ihre Drehrichtung und wird damit zur Eingangswelle der Planetenstufe. Es tritt positive Blindleistung auf, die zu niedrigen Gesamtwirkungsgraden führt. Bei der ausgangsgekoppelten Struktur treten die niedrigen Wirkungsgrade im Rückwärtsbetrieb im Gegensatz zur eingangsgekoppelten Struktur bei hohen statt bei niedrigen Geschwindigkeiten auf. Wenn hohe Geschwindigkeiten im Rückwärtsbetrieb von großer Bedeutung sind, kann wiederum eine mechanische Reversiereinheit verwendet werden, um gute Wirkungsgrade zu erreichen. Als Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung ergeben sich:

- Leistungsverzweigte Stufenlosgetriebe können den Gesamtwirkungsgrad über den des stufenlosen Pfades hinaus erhöhen.
- Beide Prinzipien (eingangs- und ausgangsgekoppelt) sind von Bedeutung und werden kommerziell hergestellt und verkauft.
- Leistungsverzweigte CVTs können nicht den gesamten Geschwindigkeitsbereich eines Traktors abdecken, es sind zusätzliche mechanische Fahrbereiche erforderlich. Je kleiner die bezogene Leistung des variablen Pfades ist, desto höher fällt der Gesamtwirkungsgrad aus, aber desto mehr zusätzliche mechanische Fahrbereiche sind erforderlich.
- Fahrstrategie und Getriebekonzepte sollten die Wirkungsgradvorteile in dem Punkt berücksichtigen, in dem keine Leistung über den variablen Pfad fließt. Es ist vorteilhaft, diesen Punkt in Bereiche der schweren Feldarbeit (z. B. 6 – 12 km/h) und hoher Transportgeschwindigkeiten zu legen.

- Eingangsgekoppelte Strukturen können eine Ausgangsdrehzahl von 0 auch mit mechanischen Variatoren erreichen. Der prinzipbedingte Nachteil eingangsgekoppelter Strukturen von sehr hohen Blindleistungsanteilen um den Stillstandspunkt wird für Traktoren durch die Schlupfgrenze gemildert.

Um den Gesamtwirkungsgrad leistungsverzweigter Getriebe möglichst hoch zu halten, wird bei praktischen Anwendungen ein solches Getriebe mit mehreren konventionellen mechanischen Schaltstufen kombiniert. Üblich sind zum Beispiel vier einzeln schaltbare mechanische Gangstufen oder vier über eine vorgeschaltete Doppelkupplung mit verschiedenen Eingangsdrehzahlen und -drehmomenten schaltbare Gangstufen (ergibt acht Gänge) [GR10].

Als besonderer Vorteil eingangsgekoppelter Strukturen im Hinblick auf die zukünftig zu erwartenden Entwicklungen im Traktoren- und Anbaugerätebereich ergibt sich, dass für diese Strukturen die Drehzahl der Eingangswelle des variablen Pfades immer in direktem Verhältnis zur Drehzahl des Verbrennungsmotors steht. Besonders wenn eine eingangsgekoppelte Struktur mit einem elektrischen variablen Pfad umgesetzt wird, kann diese Tatsache genutzt werden, um über die mit der Eingangswelle des variablen Pfades verbundene elektrische Maschine zusätzliche elektrische Leistung für Anbaugeräte oder für das Bordnetz des Traktors zu generieren. Eine elektrische Maschine an der Eingangswelle des variablen Pfades einer eingangsgekoppelten Struktur ist auf eine ähnliche Art an den Dieselmotor des Fahrzeuges angebunden wie eine Lichtmaschine. Für die Zukunft kann daher erwartet werden, dass die Funktionen dieser beiden elektrischen Maschinen in einer Maschine vereint werden können.

2.1.5 Magnetische Getriebestufen

Mechanische Getriebestufen weisen eine hohe Drehmomentdichte auf und sind mit modernen Fertigungsverfahren kostengünstig herzustellen. Als Nachteile mechanischer Getriebestufen sind zu nennen, dass sie ein geräuschintensives Betriebsverhalten aufweisen, regelmäßige Wartung und Schmierung benötigen und Reibungsverluste erzeugen. Um diese Nachteile zu überwinden, wurde bereits 1901 in Form eines Patentversuchs, das Design mechanischer Stufengetriebe auf ein magnetisches Wirkprinzip zu übertragen [Arm01]. Magnetische Getriebestufen nutzen zur Kraft- bzw. Drehmomentübertragung keinen mechanischen Kontakt, sondern magnetischen Fluss und daraus resultierende Lorentz- und Reluktanzkräfte. Die in diesen anfänglichen Entwicklungen übertragbaren Drehmomente für magnetische Getriebestufen waren – verglichen mit den mechanisch übertragbaren Drehmomenten – gering, da durch die Natur des Designs mit parallelen Achsen stets nur ein kleiner Teil der Magnete in Wechselwirkung miteinander stand, während der überwiegende größere Teil der Magnete keine Kräfte auf das andere Rad übertragen konnte, ähnlich wie bei einem mechanischen Stufengetriebe stets nur wenige Zähne das Drehmoment übertragen. Eine wissenschaftliche Veröffentlichung, die breites Interesse im Bereich magnetischer Getriebestufen ausgelöst hat, ist die über eine magnetische Hochleistungsgetriebestufe von Atallah und Howe aus dem Jahr 2001 [AH01]. Die Getriebestufe verwendet erstmals ein koaxiales Design von An- und Abtriebswelle, analog zu mechanischen Getriebestufen mit koaxialer Lage von An- und Abtriebswelle wie Planetensätzen oder dem Harmonic-Drive-Getriebe. Das Design von Atallah und Howe weist Analogien zu einer mechanischen Planetenstufe auf:

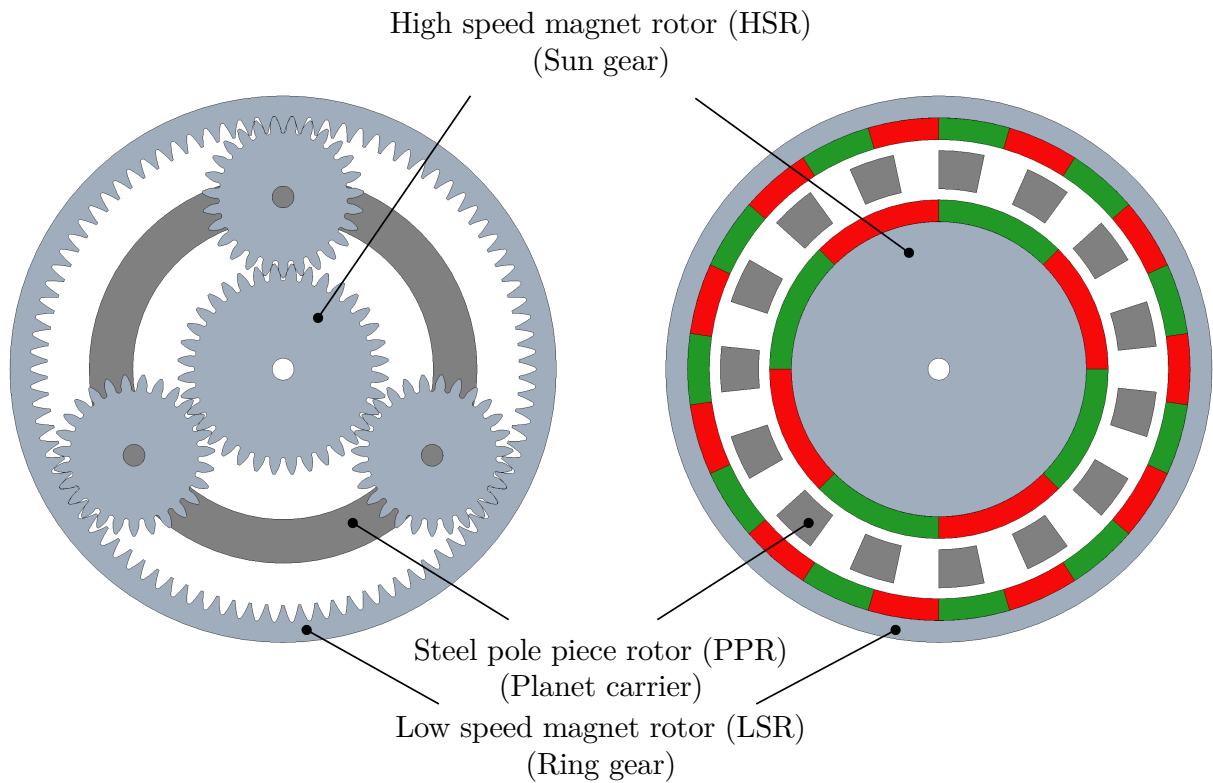


Abbildung 2.2: Mechanische Umlaufgetriebebestufe und magnetische Umlaufgetriebebestufe, vgl. [Lat13]

Abbildung 2.2 zeigt den grundsätzlichen Aufbau des von Atallah und Howe vorgeschlagenen neuartigen Designs verglichen mit einer mechanischen Planetenstufe, wie auch in [Lat13] zu sehen. Setzt man die in Unterabschnitt 2.1.2 vorgeschlagene Benennung nach Müller auf diese neuartige Getriebebestufe um, so ergibt sich Folgendes: Das ursprüngliche Getriebe war eine magnetische Getriebebestufe. Deren ursprünglich stillstehende Übertragungsorgane in Form der den Fluss modulierenden ferromagnetischen Segmente laufen nun um, womit sich der Name *magnetische Umlaufgetriebebestufe* ergibt. Zur Konkretisierung kann dieser Name noch zu *magnetische Dreiwellenumlaufgetriebebestufe* erweitert werden, da auch magnetische Umlaufgetriebebestufen mit mehr als drei drehenden Wellen denkbar sind. Die umgangssprachlich naheliegende Benennung *magnetische Planetenstufe* ist nicht korrekt, weist aber dennoch auf die bestehenden Analogien zum mechanischen Planetengetriebe hin. Die Übertragungselemente in einer magnetischen Umlaufgetriebebestufe drehen sich nicht um sich selbst, sondern es rotieren lediglich deren Achsen um die zentrale Achse. Die magnetische Getriebebestufe besteht aus einem inneren und einem äußeren Ring, die jeweils eine voneinander verschiedene Anzahl Magnetpolpaare aufweisen. Diese Magnetpolpaare bestehen ihrerseits stets aus zwei nebeneinander angeordneten Bogensegmentmagneten mit alternierender, radialer Polarisierung. Die Darstellung im Bild gibt für die einzelnen Bogensegmentmagnete deren Polarisierung an, wobei die rote Einfärbung signalisiert, dass die Polarisierung von innen nach außen vorliegt, während die grüne Einfärbung signalisiert,

dass die Polarisierung von außen nach innen vorliegt. Analog dazu weist das mechanische Pendant ein inneres (Sonne) und ein äußeres Zahnrad (Hohlrاد) auf, die jeweils eine voneinander verschiedene Anzahl Zähne besitzen. Zwischen dem inneren Ring der magnetischen Getriebestufe und dem äußeren Ring der magnetischen Getriebestufe befindet sich ein Ring mit einer Anzahl Segmente, die alternierend ferromagnetisch und paramagnetisch sind. Dieser Ring moduliert den magnetischen Fluss zwischen dem Innenring und dem Außenring. Bei dem von Atallah und Howe vorgeschlagenen Design sind stets alle Magnete an der Drehmomentübertragung beteiligt, wodurch das übertragbare Drehmoment bezogen auf den Bauraum und die Menge an verwendetem magnetischen Material signifikant erhöht werden konnte. Bei stillstehendem modulierenden Ring bildet sich ein festes Drehzahl- und Drehmomentverhältnis zwischen dem Innenring und dem Außenring. Dieses Verhältnis definiert – wie auch beim mechanischen Planetensatz – das Standübersetzungsverhältnis. Eine Unterscheidung, wie sie für Sonne und Hohlrاد des mechanischen Planetensatzes möglich ist, wobei das Hohlrاد stets mehr Zähne als die Sonne hat und die Verzahnung des Hohlrads stets eine Innenverzahnung ist, kann für die magnetische Umlaufgetriebestufe nicht vorgenommen werden. Daher werden deren beiden Zentralwellen basierend auf deren sich einstellenden relativen Drehzahlen bei stillstehendem Modulationsring als *High speed magnet rotor (HSR)* und *Low speed magnet rotor (LSR)* bezeichnet. Der HSR ist hierbei immer der Ring, der die betragsmäßig höhere Drehzahl aufweist und damit der Ring, der die geringere Anzahl an magnetischen Polpaaren aufweist. Die Anzahl an magnetischen Polpaaren ist bei der magnetischen Umlaufgetriebestufe nicht an geometrische Größen wie den Durchmesser der einzelnen Ringe gebunden, sondern kann frei gewählt werden. Hierzu wird der Bogensegmentwinkel der einzelnen Magnete entsprechend vergrößert oder verkleinert. Es ergibt sich somit die Möglichkeit, am äußeren Ring weniger Magnetpolpaare zu verwenden als am inneren Ring. Dies würde – bezogen auf das mechanische Pendant – einer Vertauschung von Sonne und Hohlrاد entsprechen, die für mechanische Planetensätze konstruktiv nicht realisierbar ist.

Für die Anzahl der Polpaare auf beiden Ringen und die Anzahl der ferromagnetischen Segmente gilt nach [AH01] folgender elementarer Zusammenhang:

$$N_{m,k} = |k_m \cdot N_p + k \cdot N_s| \quad (2.3)$$

Mit

- N_p Anzahl der Polpaare auf Magnetring 1
- $N_{m,k}$ Anzahl der Polpaare auf Magnetring 2
- N_s Anzahl der ferromagnetischen Segmente des Modulationsrings

k_m und k sind Faktoren für die Teilung der ferromagnetischen Segmente und der Polpaare, die das grundlegende Übersetzungsverhältnis nicht beeinflussen, wie auch analog die Veränderung des Moduls bei der mechanischen Planetenstufe das Übersetzungsverhältnis nicht beeinflusst. Es gilt $k_m \in \mathbb{N}$ und $k \in \mathbb{Z}$. Nach [AH01] gilt weiterhin, dass das übertragbare Drehmoment maximal wird, wenn k_m zu 1 und k zu ± 1 gesetzt wird. Weiterhin ergibt sich, dass die Anzahl der ferromagnetischen Segmente entweder aus der Summe der Anzahl der Polpaare von Innen- und Außenring oder aus deren Differenz gebildet werden kann:

$$N_s = |N_{m,k} \pm N_p| \quad (2.4)$$

So kann die Standübersetzung einer magnetischen Umlaufgetriebestufe nicht allein aus der Anzahl der Polpaare von Innen- und Außenring bestimmt werden. Entscheidend ist zusätzlich, ob die Anzahl der ferromagnetischen Segmente des modulierenden Rings aus der Summe oder der Differenz der Polpaarzahlen gebildet wurde. Die Bestimmung der Anzahl der ferromagnetischen Segmente des modulierenden Rings aus der Summe oder der Differenz der Polpaarzahlen entscheidet über das Vorzeichen der Standübersetzung und damit darüber, ob es sich bei der Getriebestufe um eine Plus- oder eine Minusgetriebestufe handelt. Die Analogie zur mechanischen Planetenstufe bildet der Einsatz von inneren und äußeren Planeten, die ebenfalls das Vorzeichen der Standübersetzung ändern. Wird die Anzahl der ferromagnetischen Segmente mit der Summe der Polpaarzahlen gebildet, handelt es sich um eine Minusgetriebestufe, andernfalls um eine Plusgetriebestufe. Das übertragbare Drehmoment ist für eine magnetische Minusgetriebestufe höher als für eine Plusgetriebestufe [AH01]. Analog ist auch das übertragbare Drehmoment für eine mechanische Minusgetriebestufe (aufgrund geringerer Reibungsverluste) geringfügig höher als für eine mechanische Plusgetriebestufe. Eine magnetische Minusgetriebestufe ist daher für den Einsatz in einem Variatormodul des Getriebes eines landwirtschaftlichen Fahrzeugs zu favorisieren. Abschließend ist anzumerken, dass die Wahl der Standübersetzung einer magnetischen Umlaufgetriebestufe für die elementaren Größen Drehzahl, Momente und Leistungen der Umlaufgetriebestufe entscheidend ist. Ausführungen mit dem HSR innen oder außen und mit der Anzahl der ferromagnetischen Segmente gebildet aus der Summe oder aus der Differenz der Polpaarzahlen sind dann nur konstruktive Varianten, die sich kinematisch nicht voneinander unterscheiden. Analog unterscheiden sich auch verschiedene konstruktive Ausführungen mechanischer Planetenstufen mit einer übereinstimmenden Stand- oder Umlaufübersetzung kinematisch nicht voneinander [Mül98].

Willis postuliert in seinem Lehrbuch, dass die von ihm angegebene kinematische Gleichung (Gleichung 2.2) für alle Umlaufgetriebe gültig ist [Wil75]. Zum Zeitpunkt des Erscheinens seines Lehrbuchs war noch keine magnetische Umlaufgetriebestufe bekannt. [Gou+11] liefert eine Gleichung, mit der sich die Drehzahlen einer magnetischen Umlaufgetriebestufe im Dreiwellenbetrieb bestimmen lassen:

$$\frac{-N_1}{N_3}\Omega_1 + \frac{N_2}{N_3}\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (2.5)$$

Hierin sind

- N_1 Polpaarzahl des inneren Rotors
- N_2 Anzahl der ferromagnetischen Stäbe des modulierenden Rings
- N_3 Polpaarzahl des äußeren Rotors
- Ω_1 Drehzahl des inneren Rotors
- Ω_3 Drehzahl des äußeren Rotors
- Ω_2 Drehzahl des modulierenden Rings

Im Anhang dieser Arbeit wird gezeigt, dass sich die Gleichung zurückführen lässt auf die übersichtliche Form der WILLIS-Gleichung (Gleichung 2.2), die für Umlaufgetriebestufen gilt:

$$n_1 - i_0 n_2 - (1 - i_0) n_s = 0$$

Mit

- n_1 Drehzahl der Zentralwelle 1
- n_2 Drehzahl der Zentralwelle 2
- n_s Drehzahl des Stegs
- i_0 Standübersetzung

Die WILLIS-Gleichung gilt damit auch für magnetische Umlaufgetriebestufen, wobei n_s der Drehzahl des modulierenden Rings entspricht.

Von besonderer Bedeutung bei der Betrachtung magnetischer Dreiwellen-Umlaufgetriebestufen ist, dass wie in Abschnitt 1.1 bereits kurz umrissen die Möglichkeit besteht, den äußeren Rotor mit seinen Magnetpolpaaren zu entfernen und durch einen Stator mit Spulen zu ersetzen. Die Konstruktion dieses innengenuteten Stators kann hierbei nach allen Möglichkeiten erfolgen, die auch für andere elektrische Maschinen mit innengenutetem Stator zur Verfügung stehen. Legt man Wechselstrom an diese Spulen an, so entsteht dadurch ein rotierendes elektromagnetisches Feld. Die Funktionsweise ähnelt der Funktionsweise bürstenloser Motoren mit Permanentmagneten. Das elektromagnetische Feld ist in seiner Funktion dem äußeren Rotor mit Permanentmagneten gleichwertig. Durch die Realisierung als Stator mit Spulen entfällt hierbei ein drehendes Teil (der Außenrotor), was die Lagerung der gesamten Umlaufgetriebestufe vereinfacht. Außerdem reduziert sich die Menge des benötigten magnetischen Materials um bis zu 70 % [CCC14]. Da die Werkstoffe für starke Permanentmagnete einen hohen Anteil seltener Erden beinhalten, sind diese ein maßgeblicher Kostentreiber für derartige magnetische Umlaufgetriebestufen. Magnetische Umlaufgetriebestufen mit einem Außenrotor mit Permanentmagneten weisen sehr hohe Wirkungsgrade auf, da die einzigen entstehenden Verluste die Ummagnetisierungsverluste (Hystereseverluste) in den ferromagnetischen Segmenten des modulierenden Ringes und deren Wirbelstromverluste, sowie ggf. Wirbelstromverluste in angrenzenden, elektrisch leitfähigen Bauteilen sind. Diese Verluste sind in erster Linie abhängig von den anliegenden Drehzahlen und weitgehend unabhängig vom übertragenen Drehmoment, da sie maßgeblich von der Frequenz und der magnetischen Flussdichte bestimmt werden, welche im betrachteten Fall durch die Permanentmagnete konstant ist [GHV03]. Ersetzt man den Außenrotor durch einen Stator, so ergibt sich eine andere Abhängigkeit der Verluste. Die elektrische Energie wird in diesem Fall direkt am für die Übertragung kritischen Luftspalt und an der für die Übertragung kritischen Geometrie des modulierenden Ringes zur Erzeugung eines elektrischen Drehfeldes verwendet. Die Stromstärke gilt als Maß für das übertragbare Drehmoment, welches eben durch den Luftspalt und die Geometrie des modulierenden Rings bestimmt und beschränkt wird. Daher ergeben sich die Verluste dann als in erster Linie abhängig vom übertragenen Drehmoment. Generell sind die Wirkungsgrade magnetischer Umlaufgetriebestufen mit zwei rotierenden Elementen und einem Stator niedriger als die Wirkungsgrade magnetischer Umlaufgetriebestufen mit drei rotierenden Elementen [CCC14]. Hierbei muss Beachtung finden, dass zum Antrieb des äußeren Rotors magnetischer Umlaufgetriebestufen ebenfalls eine verlustbehaftete Energieübertragung (z. B. Antrieb durch einen Elektromotor über eine Stirnradstufe mit im Motor und in der Verzahnung auftretenden Verlusten) stattfindet, was die in magnetischen Umlaufgetriebestufen mit Stator auftretenden Verluste relativiert.

2.1.6 Permanenterregte Synchronmaschinen

Magnetische Umlaufgetriebestufen mit Stator arbeiten analog zu permanentenerregten Synchronmaschinen. Bei stillstehendem modulierendem Ring ist die Drehzahl des inneren Rings immer proportional zur Frequenz, mit der das Statorfeld erzeugt wird. Diese Synchronität wird auch bei Belastung beibehalten, es entsteht kein Schlupf wie beim Asynchronmotor. Durch die WILLIS-Gleichung, deren Gültigkeit in Unterabschnitt 2.1.5 gezeigt wurde, stehen die Drehzahlen der beiden Rotoren und die Frequenz des Statorfeldes jederzeit in einem festen Verhältnis zueinander. Es bedarf daher keiner speziellen Drehzahlregelung. Ist eine Eingangsdrehzahl (z. B. durch Verbindung einer Welle mit der Motorwelle des Dieselmotors und Messung deren Drehzahl) bekannt, so kann durch Einstellen der Frequenz des Statorfeldes die Drehzahl des dritten Elementes festgelegt werden, ohne dass eine Messung dieser Drehzahl oder der Aufbau eines Regelkreises notwendig ist.

2.1.7 Hydraulisch leistungsverzweigte Stufenlosgetriebe

Als Basis für im Rahmen der Arbeit zu ziehende Vergleiche bieten sich verschiedene, sich bereits im Serieneinsatz befindliche Stufenlosgetriebe an. Diese arbeiten allesamt mit einem hydraulischen variablen Pfad, in welchem eine verstellbare Hydropumpe variablen Verdrängungsvolumenstroms mit einem festen Hydromotor konstanten Volumenstroms verbunden ist.

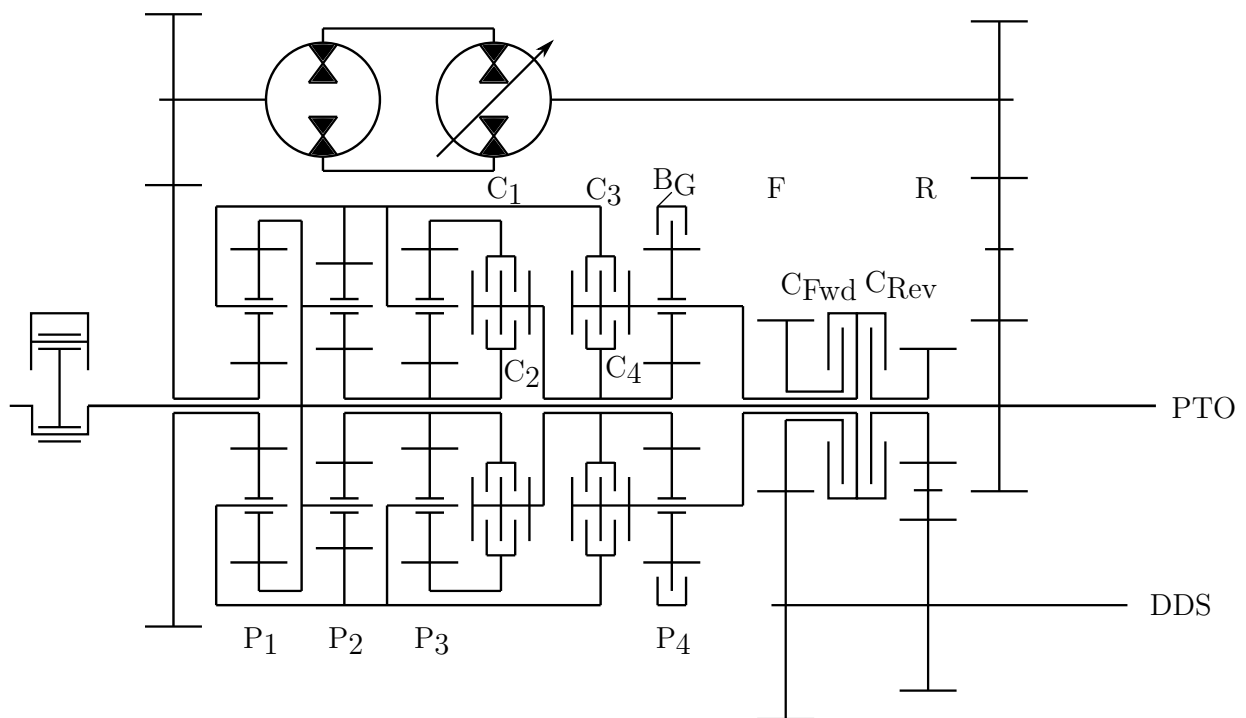


Abbildung 2.3: Vereinfachtes Strichdiagramm hydrostatisches Stufenlosgetriebe ZF Terra-Matic nach [Ren14]

Abbildung 2.3 zeigt ein Strichdiagramm des von der ZF Friedrichshafen entwickelten und gefertigten hydrostatischen Stufenlosgetriebes ZF TerraMatic, welches eine Weiterentwicklung des Stufenlosgetriebes ZF Eccom darstellt. Das Getriebe besteht aus vier in Reihe

angeordneten Planetensätzen P_1 , P_2 , P_3 und P_4 , mit denen vier Fahrbereiche realisiert sind und das Wandlerkennfeld der Hydrostaten somit viermal durchlaufen werden kann. Der Hauptteil des Getriebes, der die Gangstufen beinhaltet ist in Inline-Bauweise realisiert, was bedeutet dass alle Elemente koaxial angeordnet sind. Erst die Hauptkupplung und die Reversierkupplung, die hinter den Gängen angeordnet sind realisieren den Versatz zwischen Eingangs- und Ausgangswelle. Diese Bauform ist vor allem im Automobilbereich verbreitet. Jede Gangstufe des Getriebes kann somit vorwärts und rückwärts genutzt werden und es ist ein Reversieren unter Last möglich. Die Firmen Case IH und New Holland verwenden einen gemeinsamen Getriebekonstruktion für ihre Baureihen, innerhalb dessen ein Konzept für ein Stufenlosgetriebe zum Einsatz kommt und in zwei Leistungsklassen und Gangabstufungen verwendet wird:

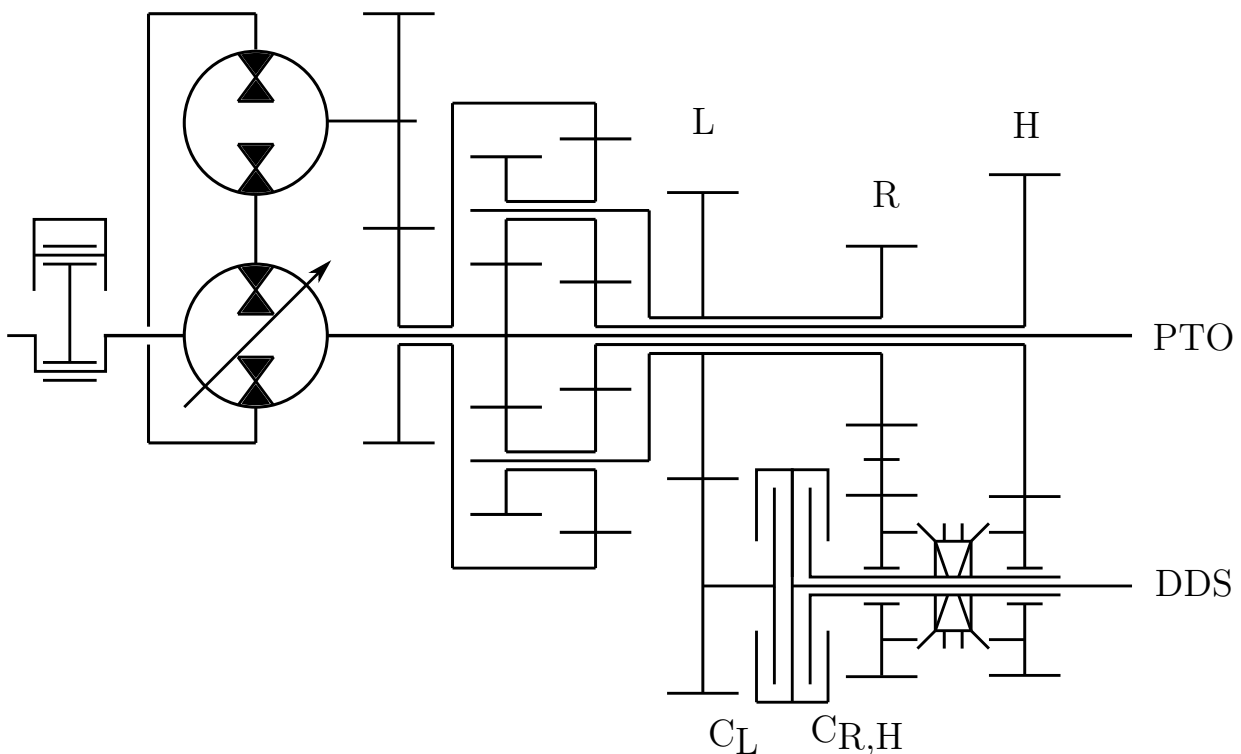


Abbildung 2.4: Strichdiagramm hydrostatisches Stufenlosgetriebe für die Baureihen Case IH Maxxum und New Holland T6 nach [RGS15]

Abbildung 2.4 zeigt das Strichdiagramm des in den Baureihen Case IH Maxxum und New Holland T6 zum Einsatz kommenden Stufenlosgetriebes. Das Getriebe wird auch in den kleinen Traktoren der nächstgrößeren Baureihen Case IH Puma und New Holland T7 verbaut. Es handelt sich um ein einfaches Stufenlosgetriebe mit einem Variator mit zwei unabhängigen Ausgangswellen, die für die beiden Fahrbereiche L und H verwendet werden. Der Variator besteht hierbei aus einem reduzierten Wolfromsatz. Der Rückwärtsgang wird auf der gleichen Variatorausgangswelle wie der langsame Vorwärtsgang L angeordnet, die Drehrichtungsumkehr wird über ein Zwischenzahnrad vorgenommen. Dies ermöglicht es, die zum Einsatz kommende Doppelkupplung, die im Synchronpunkt der beiden Vorwärtsgänge unter Last umschaltet, auch zum Reversieren unter Last zu verwenden. Das Getriebe verfügt damit über zwei Fahrbereiche im Vorwärtsbetrieb und einen Fahrbereich im Rückwärts-

betrieb. Ein ähnliches Stufenlosgetriebe kommt für die Traktoren der größeren Baureihen zum Einsatz:

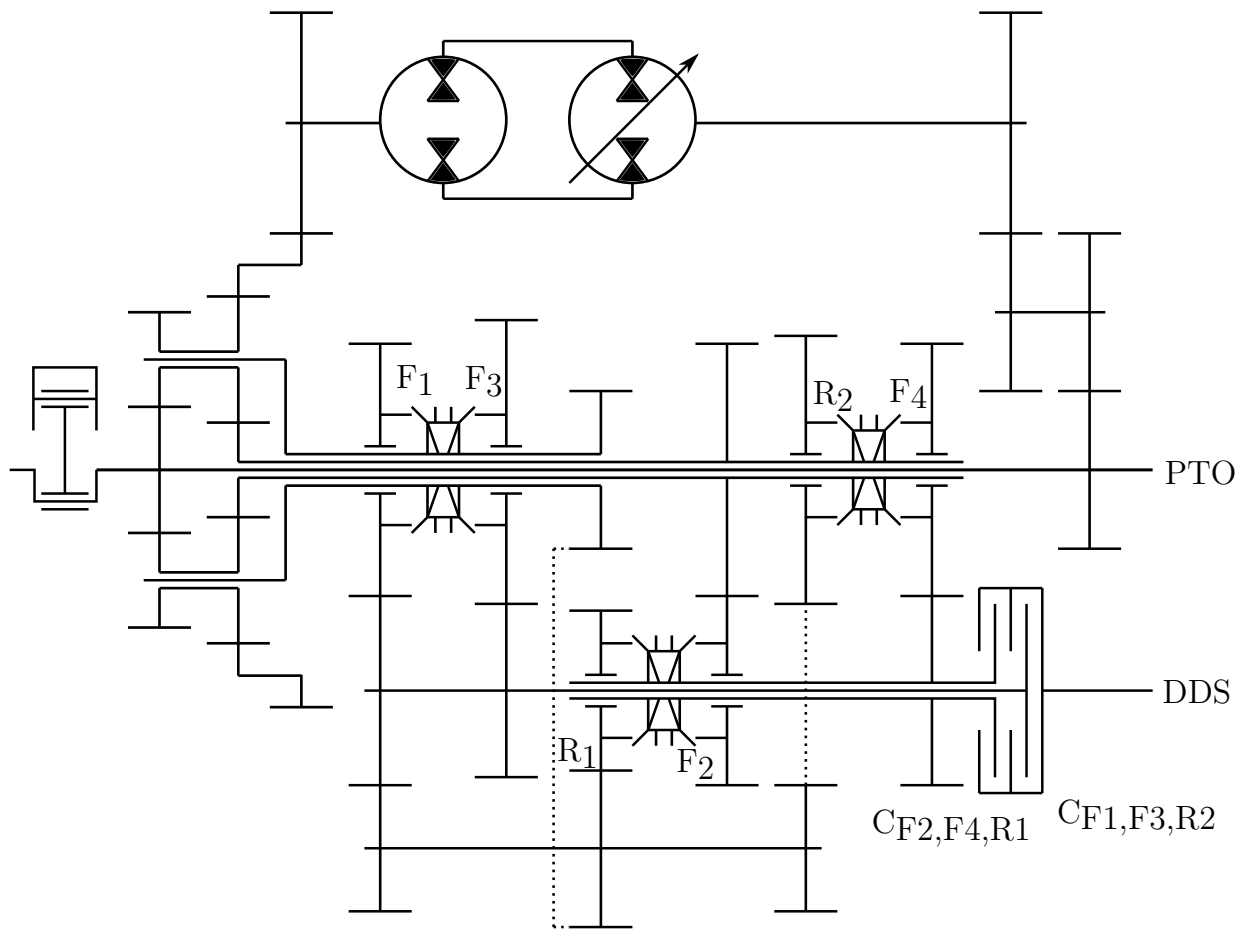


Abbildung 2.5: Strichdiagramm hydrostatisches Stufenlosgetriebe für die Baureihen Case IH Puma und Magnum sowie New Holland T7 und T8 nach [GR10]

Abbildung 2.5 zeigt das Strichdiagramm des in den Baureihen Case IH Puma und Magnum sowie New Holland T7 und T8 zum Einsatz kommenden Stufenlosgetriebes. Es handelt sich hierbei um eine komplexere Version des in den kleineren Traktoren verbauten Getriebes. Der Variator wird ebenfalls mit einem Wolfromsatz realisiert. Durch eine Erweiterung um zusätzliche Synchronringe und eine Zwischenwelle für Rückwärtsfahrt anstelle eines einzelnen Zwischenzahnrades ergeben sich bei diesem Getriebe vier Fahrbereiche im Vorwärtsbetrieb und zwei Fahrbereiche im Rückwärtsbetrieb. Auffällig ist weiterhin der geänderte Antrieb des hydrostatischen Wandlers. Diese Änderung ist für die Funktion des Getriebes ohne Bedeutung. Eine weitere Art von Stufenlosgetrieben, welche in jedem Fall als Referenz betrachtet werden muss, sind Stufenlosgetriebe nach dem von Jarchow 1982 vorgeschlagenen System [JHB83]. Diese Art Stufenlosgetriebe, die im Folgenden als Jarchow-Getriebe bezeichnet wird, wurde bereits 1982 zum Patent angemeldet. Der Patentschutz besteht folglich nicht mehr und das Jarchow-Getriebe ist allgemein bekannt und darf beliebig verwendet werden. Die grundlegende Struktur ist in Abbildung 2.6 dargestellt:

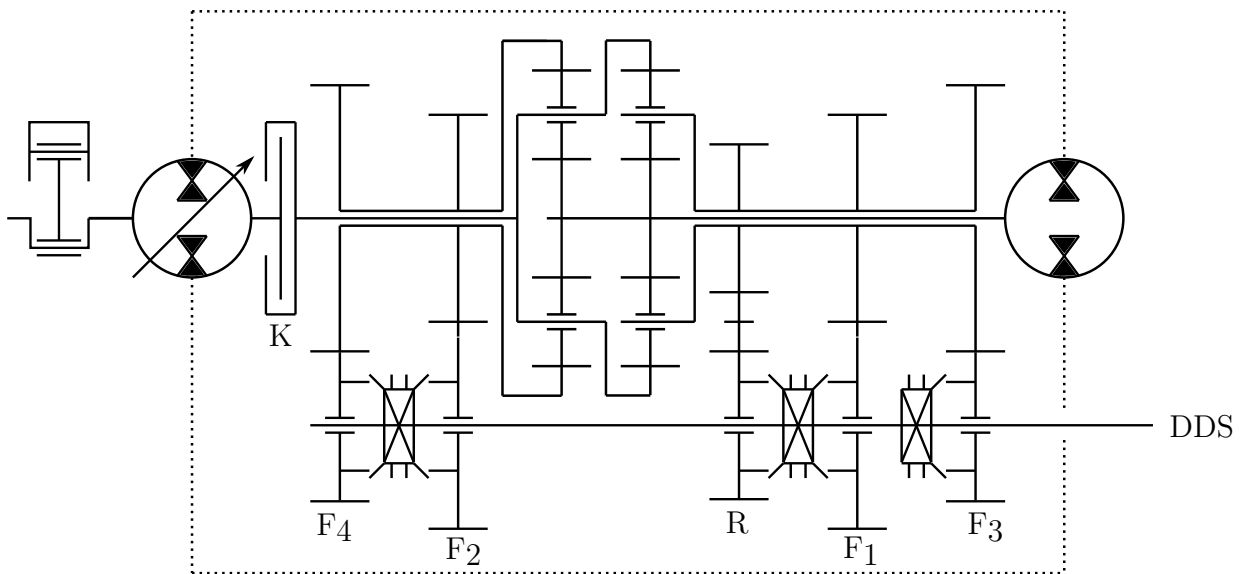


Abbildung 2.6: Strichdiagramm hydrostatisches Stufenlosgetriebe Jarchow, nach [JHB83]

Abbildung 2.6 zeigt beispielhaft ein Jarchow-Getriebe. Kennzeichnend für diese Familie von Stufenlosgetrieben ist, dass das die Geschwindigkeit kontrollierende Element – in der Originalanmeldung ein Hydromotor, auch denkbar mit einer elektrischen Maschine – in zwei voneinander unabhängigen Planetenstufen jeweils das Element mit dem kleinsten Drehmoment (in Minusgetriebestufen die Sonne) antreibt.

2.1.8 Nachteile aktueller Getriebegenerationen

Die sich aktuell im Serieneinsatz befindlichen leistungsverzweigten Stufenlosgetriebe weisen prinzipbedingte Nachteile auf, wenn man deren Hydromotoren und Hydropumpen durch elektrische Maschinen ersetzt, ohne die grundlegende Getriebestruktur zu ändern. Um dem Betriebsverhalten einer möglicherweise zum Einsatz kommenden elektrischen Maschine entgegenzukommen, muss die elektrische Maschine stets mit den Sonnen der Planetengetriebestufen verbunden werden. So wird die Welle angetrieben, die eine hohe Drehzahl und ein niedriges Drehmoment aufweist. Dies bringt konstruktive Herausforderungen mit sich, die sich in erhöhtem Platzbedarf niederschlagen, da die Sonnen weit innen liegende Bauteile sind, während die elektrischen Maschinen eher außen am Getriebe angeordnet sein müssen. Um den Leistungsbereich der elektrischen Maschinen ideal ausnutzen zu können, würde weiterhin eine zusätzliche Stirnradstufe zwischen der Sonnenwelle und der elektrischen Maschine benötigt, die ein für Stirnradstufen hohes Übersetzungsverhältnis von ungefähr 4 aufweisen müsste. Dies führt zu kostenintensiven Zahnradern. Weiterhin führt diese Stirnradstufe dazu, dass bei den aktuell zum Einsatz kommenden Variatormodulen leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe bei manchen Getriebearchitekturen im Punkt des aktiven Stillstandes sehr hohe Drehzahlen in den elektrischen Maschinen auftreten würden. Dies führt wiederum dazu, dass die Gefahr besteht die elektrische Maschine durch die auftretenden Zentripetalkräfte zu beschädigen. Außerdem birgt ein solcher Betriebspunkt ein weiteres Risiko: Wird der Traktor in den aktiven Stillstand geschaltet, so zirkuliert eine hohe Menge Energie innerhalb des Getriebes. Versagt jetzt ein mechanisches Bauteil und blockiert so einen Leistungspfad im Variatormodul, so kann es passieren, dass die zirkulie-

rende Leistung schlagartig zur – sich bereits im Leistungsfluss befindlichen – Ausgangswelle geleitet wird. Der Traktor kann dann eine unerwartete Bewegung nach vorne oder hinten machen und so nahe stehende Personen gefährden. Besonders kritisch ist dieses Verhalten zu sehen, wenn für zukünftige Traktorgenerationen überlegt wird, ein langsames Bewegen des Traktors im Zentimeterbereich über Bedienelemente an der Rückseite der Radabdeckung zu ermöglichen, zum Beispiel zum Anhängen von Anbaugeräten. Die bedienende Person steht bei dieser Tätigkeit zwischen Traktor und Anbaugerät. Ein unkontrolliertes Anfahren des Traktors ist hierbei unbedingt zu vermeiden. Um den durch Einsatz von elektrischen Maschinen auftretenden Herausforderungen im Punkt des aktiven Stillstands zu begegnen, muss die zirkulierende Leistung im Getriebe in diesem Punkt sehr gering (nahezu 0) ausfallen, damit bei Ausfall von Systemen keine hohen Energiemengen den Traktor ruckartig und unkontrolliert bewegen können. Hierfür kann beispielsweise ein zusätzlicher Gang durch eine mechanische Koppelung von zwei drehenden Wellen im Variatormodul (und damit Reduktion des kinematischen Freiheitsgrades um 1) integriert und somit seriell elektrisches oder seriell hydraulisches Anfahren realisiert werden. Dadurch bedingt sind die Wirkungsgrade in diesem Gang deutlich geringer als in den leistungsverzweigten Betriebsmodi des Getriebes.

Als weiterer Nachteil ist zu nennen, dass die elektrischen Maschinen maßgeblich die Länge des Getriebes bestimmen, da sie gegebenenfalls so montiert werden müssen, dass in dem Bereich, in dem sie sich befinden, aus Platzgründen keine anderen Funktionen des Getriebes parallel realisiert werden können. Die Länge der elektrischen Maschinen geht daher meist direkt in die Länge des gesamten Getriebemoduls ein. Dies ist auch insofern als Nachteil zu betrachten, als dass für das gleiche Getriebemodul verschieden große elektrische Maschinen angeboten werden könnten, je nachdem wie viel elektrische Leistung auf Anbaugeräten zur Verfügung gestellt werden soll. Dies kann auch dadurch realisiert werden, dass eine elektrische Maschine größer ausfällt als die andere, wobei die jeweils größere dann die Länge des Getriebes bestimmt. Im Zuge einer modularen Getriebebauweise bedeutet das wiederum, dass alle Getriebe so lang werden müssen, dass die größte elektrische Maschine daran verbaut werden kann, unabhängig davon, welche elektrische Maschine verbaut wird. Dies steht dem Wunsch nach kurzen Radständen entgegen.

Da sich die Entwicklung der elektrischen Antriebs- und Hybridtechnik in landwirtschaftlichen Fahrzeugen noch in einem frühen Stadium befindet, wäre es derzeit aus Gründen der einfachen Wartung wünschenswert, dass die elektrischen Maschinen so montiert werden, dass deren Demontage möglich ist, ohne das Getriebe aus dem Traktor zu entfernen. Es ist anzunehmen, dass in Zukunft bei weiterer Entwicklung und Steigerung der Zuverlässigkeit und damit auch des Vertrauens in elektrische Maschinen diese Restriktion aufgehoben werden könnte. Für die zukünftige Entwicklung elektrisch leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe ist es daher wünschenswert, die Nachteile der aktuellen Getriebegeneration zu überwinden. So würde beispielsweise die Kontrolle eines äußeren Elementes (Hohlrad oder Träger) im Variatormodul den Bauraum deutlich verkürzen, ein Wegfall des Kriechganges würde die Kosten senken und den Wirkungsgrad bei geringen Geschwindigkeiten erhöhen und eine konzentrische Anordnung der elektrischen Maschine zur Getriebeeingangswelle würde den zukünftig zu erwartenden Entwicklungen im Bereich der elektrischen Antriebs-technik Rechnung tragen.

Ob eine Entwicklung in diesem Sinne möglich ist und ob die Nachteile der aktuellen Getriebegeneration durch ein neuartiges, magnetisch-elektrisch leistungsverzweigtes Variatormodul

beseitigt werden können ist Gegenstand dieser Arbeit. Um diese Frage umfassend beantworten zu können wird eine methodische Vorgehensweise mit hohem Abstraktionsgrad gewählt, deren Grundlagen im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

2.2 Methoden

Der nachfolgende Teil dieses Kapitels erläutert die methodische Herangehensweise an die Konzeption und Konstruktion eines solchen neuartigen, magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Getriebes. Wie in Abschnitt 1.2 beschrieben wird hierfür ein ganzheitlicher, umfassender Ansatz gewählt, um sicherzustellen, dass alle infrage kommenden Lösungen systematisch erfasst und beurteilt werden.

2.2.1 Methodische Konstruktion nach VDI 2221

Das Vorgehen bei der Konzeption und Konstruktion des Variatormoduls richtet sich nach VDI 2221 [VDI93]: Zunächst erfolgt das Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung. Durch eine systematische Ermittlung der Anforderungen wird eine eindeutige und konkrete Basis für die weiteren Entwicklungsschritte sichergestellt [PL11]. Die Anforderungen an die Konstruktion werden ebenfalls gemäß VDI 2221 in einer Anforderungsliste dargestellt. Zur weiteren Konzeption wird das Produkt dann in seine Einzelfunktionen zerlegt, wofür anschließend in Einzelfällen (vor allem für ein magnetisch-elektrisch leistungsverzweigtes Variatormodul) Lösungsprinzipien gesucht werden. Die prinzipiellen Lösungen werden in realisierbare Module gegliedert, die im Rahmen von Vorentwürfen gestaltet werden. Hierbei wird darauf geachtet, dass diese Module frei miteinander kombiniert werden können. Ein gesamtes Produkt wird nicht gestaltet, die Vorentwürfe beschränken sich auf den Kerninhalt der neuen Technologie, das magnetisch-elektrisch leistungsverzweigte Variatormodul. Indem das hierfür geeignetste Modul mit anderen, bereits bekannten Modulen zum Beispiel für Drehrichtungsumkehr oder für Gruppenschaltungen kombiniert wird, kann dieses Modul zu einem Gesamtgetriebe entwickelt werden. Es wird davon ausgegangen, dass auf eine methodische technisch-wirtschaftliche Bewertung, wie sie zum Beispiel in VDI 2225–3 [VDI12b] vorgeschlagen wird, verzichtet werden kann, da das Produkt aufgrund der hohen und vielfältigen Anforderungen so stark limitiert ist, dass das geeignetste Modul zweifelsfrei aufgrund der technischen Anforderungen ohne Betrachtung der wirtschaftlichen Einflüsse identifiziert werden kann. Die Produktdokumentation ist zum einen durch diese Arbeit und zum anderen durch die im Rahmen der Konstruktion und Berechnung erstellten Begleitdokumente dargestellt.

2.2.2 WOLF-Schema

Eine abstrakte Möglichkeit zur Synthese komplexer Umlaufgetriebe liefert das WOLF-Schema [Wol54]. Grundlage dieses Verfahrens ist der Gedanke, dass für die Synthese eines Umlaufgetriebes dessen konkrete konstruktive Ausführung zunächst nicht betrachtet werden muss, da für jedes geforderte kinetische Verhalten stets mehrere konstruktive Lösungen existieren, die kinematisch gleichwertig sind [Mül98]. Nach Ermittlung der Standübersetzung und des Standgetriebewirkungsgrades sind weitere Größen zunächst für die Berechnung der elementaren Größen Drehzahl, Momente und Leistungen nicht relevant. Aus diesem

Grund hat Wolf eine Darstellungsform eingeführt, welche Umlaufgetriebe durch einen Kreis mit drei Strichen (den nach außen führenden Wellen) darstellt [Wol54]. Diese Darstellungsform beschränkt sich auf die wesentlichen Größen einer Umlaufgetriebestufe. Die genaue Darstellung dieser Symbole ist beispielsweise in [Ges88] erläutert. Die Stegwelle einer Umlaufgetriebestufe wird im WOLF-Schema immer mit einem Strich dargestellt, welcher den Kreis durchbricht, während die Striche, die die anderen beiden Wellen symbolisieren, am Kreis enden. Weiterhin wird die Summenwelle mit einem Doppelstrich dargestellt. So kann man auf den ersten Blick erkennen, ob es sich um ein Plus- oder ein Minusgetriebe handelt. Bei einem Minusgetriebe ist die Stegwelle stets auch die Summenwelle, im WOLF-Schema schnell und eindeutig daran zu erkennen, dass der doppelte Strich den Kreis durchbricht. An die einzelnen Wellen eines im WOLF-Schema dargestellten Umlaufgetriebes können Drehmomente, Drehzahlen und Leistungen angetragen werden, um so auch komplexe Probleme schrittweise lösen zu können. Das Antragen dieser Elementargrößen erfolgt oft nur durch Vorzeichen (+ oder –), um Drehrichtungen ermitteln zu können oder einen Überblick über Leistungsflüsse innerhalb komplexer Strukturen (v. a. bei Blindleistung) zu erhalten. Mit dem WOLF-Schema wird daher in einem ersten Entwurfsschritt die für die gewünschte Kinematik benötigte Lage von Summen- und Differenzwellen in einem ein- oder mehrstufigen Umlaufgetriebe ermittelt. Diese ergibt sich aus dem geforderten Verhalten der Drehrichtungen und aus Anforderungen hinsichtlich des möglichen Drehmomentes einzelner Wellen sowie konstruktiven Vorgaben bzgl. Koppelwellen und freien Wellen.

2.2.3 Matrix-Rechenverfahren nach Stangl

Die Berechnung von Drehzahlen und Drehmomenten nach einem klassischen, analytischen Verfahren bei dem die Drehzahl oder das Drehmoment jeder Komponente durch eine einzelne, nach dieser Komponente aufgelöste komplexe Gleichung bestimmt wird ist aufwendig und setzt Spezialkenntnisse voraus. Da sie auf Zuordnung und Aufstellung von komplexen Gleichungen anhand der Betrachtung eines Strichdiagramms oder eines vorliegenden WOLF-Schemas durch den Anwender aufbaut, ist sie darüber hinaus anfällig für Fehler und nicht zur Umsetzung in der EDV geeignet. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit ein alternatives Rechenverfahren, erstmals vorgeschlagen von Stangl [Sta06] angewandt. Dieses Verfahren, welches auch in der in der VDI-Richtlinie 2157 referenziert wird, basiert darauf, ein System mit so vielen Unbekannten aufzustellen, wie das zu berechnende Getriebe Zahnräder und Kraft einleitende bzw. ausleitende Elemente hat. Das Verfahren ist vom einfachen einstufigen Stirnradgetriebe bis hin zu hoch komplexen zusammengesetzten reduzierten Umlaufgetrieben schematisch anwendbar. Es erzeugt in seiner einfachsten Ausprägung zur Berechnung der Drehzahlen ein lineares Gleichungssystem, dessen Gleichungen je Zeile nur zwei von 0 verschiedene Werte aufweisen. Ein solches lineares Gleichungssystem kann übersichtlich dargestellt werden. Weitere Vorteile dieses Verfahrens sind, dass die verwendeten Gleichungen schematisch aufgestellt werden können und damit die Rechnerfähigkeit des Verfahrens erhöht und die Fehleranfälligkeit reduziert wird. Mit dem Verfahren werden Drehzahlgleichungen für jeden Stirnradeingriff aufgestellt, wobei reduzierte Geometrien wie Planetenstufen immer dahin gehend erweitert werden, dass jedes Element nur noch einen Eingriffspartner hat. So wird beispielsweise der Planet in einem Planetensatz gedanklich auf zwei Planeten auf einer gemeinsamen umlaufenden Welle erweitert. Von diesen beiden Planeten kämmt jetzt einer mit der Sonne, während der andere mit dem Hohlrad kämmt.

Dieses Vorgehen erzeugt zusätzliche Unbekannte, deren Berechnung durch zusätzliche, einfache Gleichungen (eine Erweiterung der Willis-Gleichung auf zwei einzelne Gleichungen) keine Schwierigkeit darstellt. Zudem liefert deren Einführung auch gegenüber der traditionellen Berechnung direkt zusätzliche Ergebnisse, wie die Drehzahl der Planeten gegenüber dem Steg oder das Drehmoment an den Planeten. Nach dem Aufstellen der Drehzahlgleichungen für jeden Stirnradeingriff werden Drehzahlgleichungen für diejenigen Elemente aufgestellt, die durch eine Welle drehfest miteinander verbunden sind. Hierbei gilt, dass deren Differenzdrehzahl immer gleich 0 ist. Dann werden ggf. Gleichungen für geschlossene Kupplungen erzeugt, die wie die Wellengleichungen aufgestellt werden. Als Letztes müssen noch Vorgabegleichungen gemäß des kinetischen Freiheitsgrades des Getriebes aufgestellt werden, um ein lösbares Gleichungssystem zu erhalten. In einem zweiten Gleichungssystem werden für die Drehmomente ebenfalls Gleichungen aufgestellt, wobei zunächst wieder die Gleichungen für die Stirnradstufen aufgestellt werden. Diese Gleichungen weisen wie die Gleichungen für die Drehzahlen je Zeile nur zwei von 0 verschiedene Werte auf. Nach Aufstellen der Gleichungen für die Stirnradstufen werden die Gleichungen für die Elemente aufgestellt, die durch eine Welle miteinander verbunden sind. Hierbei gilt, dass die Summe der Drehmomente aller durch eine Welle verbundenen Teile stets 0 ergibt. Diese Gleichungen sind für jeden eventuellen Schaltzustand – sollte das Getriebe über schaltbare Kupplungen verfügen – getrennt aufzustellen. Zuletzt müssen wiederum Vorgabegleichungen für die Drehmomente gemäß des statischen Freiheitsgrades des Getriebes aufgestellt werden. Für die gewählten Berechnungspunkte werden die beiden Gleichungssysteme dann durch Invertieren gelöst und es ergeben sich so direkt die Drehzahlen und Drehmomente aller Elemente des Getriebes. Um verschiedene Betriebspunkte des Getriebes zu berechnen, können die Vorgabegleichungen und die Gleichungen für geschlossene Kupplungen zum Beispiel mit einer Tabellenkalkulationssoftware in Einzelschritten geändert werden und so jeder Betriebspunkt erfasst werden. Zum Berechnen der Leistungen aller Elemente des Getriebes ist es ausreichend diese beiden Werte miteinander zu multiplizieren. Das Matrix-Rechenverfahren nach Stangl bietet gegenüber einem klassischen, analytischen Verfahren, bei dem die Drehzahl jeder Komponente durch eine nach dieser Komponente aufgelöste komplexe Gleichung bestimmt wird, eine Reihe von Vorteilen: Das Aufstellen der Gleichungen ist für beliebig komplexe Getriebe immer gleich einfach, da immer nur zwei im Eingriff stehende Teile betrachtet werden, oder alle Teile, die drehfest miteinander verbunden sind. Liegt bereits ein aufgestelltes Gleichungssystem vor, sind diese einfachen Gleichungen leicht zu überprüfen. Durch die Einfachheit der aufzustellenden Gleichungen ist das Verfahren sehr schnell, und es können innerhalb kürzester Zeit Aussagen zum Gesamtverhalten eines Getriebes getroffen und dessen Drehzahl-Drehmoment-Diagramm erstellt werden. Da im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept hinsichtlich seiner Eignung bezogen auf Drehmomente und Leistungen überprüft werden soll, wird ein Verfahren benötigt, welches schnell Ergebnisse liefert. Das Matrix-Rechenverfahren nach Stangl ist hier besonders geeignet.

2.3 Ziele und Forschungsfragen

Aus der bisherigen Darstellung sowie der Betrachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und den einsetzbaren Methoden ergeben sich hinsichtlich der zu betrachtenden Thematik folgende Forschungsfragen:

1. Existiert ein Variatorkonzept für ein stufenloses, elektrisch leistungsverzweigtes Getriebe, welches eine elektrische Maschine direkt in das Getriebe integriert?

Bei dieser Frage soll zunächst untersucht werden, ob ein solches gesuchtes Variatorkonzept überhaupt theoretisch existiert. Durch die vielfältigen und hohen Anforderungen an Traktorgetriebe und die besondere Charakteristik stufenloser Getriebe sowie Umlaufgetriebestufen mit magnetischem Wirkprinzip und integrierter elektrischer Maschine ist zu erwarten, dass bei der Synthese eines solchen Variatorkonzeptes bereits starke Limitierungen auftreten.

2. Kann ein solches Variatorkonzept innerhalb des zur Verfügung stehenden Bauraumes in Getrieben der aktuellen und zukünftigen Traktorgenerationen realisiert werden?

Durch modulare Bauweise sind die Schnittstellen von Traktorgetrieben bereits zu Beginn der Entwicklung und langfristig festgelegt. Ein neues Getriebe muss sich zwischen die bestehenden Schnittstellen einfügen, wichtige Randdaten wie der Abstand und die Lage von Eingangs- zu Ausgangswelle, deren Drehrichtungen (relativ und absolut) sind für eine gesamte Getriebefamilie definiert worden und können nicht verändert werden. Bei der Entwicklung eines neuen Variatorkonzeptes kann davon ausgegangen werden, dass Bauraum an gewissen Stellen eingespart wird, während an anderen Stellen zusätzlicher Bauraum benötigt wird. Im Rahmen dieser Forschungsfrage ist zu klären, ob sich ein Getriebe mit dem zu entwickelnden neuartigen Variatorkonzept in die bestehenden Grenzen der Bauräume und Schnittstellen integrieren lässt.

3. Ist der Einsatz eines solchen Variatorkonzeptes in Getrieben der aktuellen und zukünftigen Traktorgenerationen wirtschaftlich sinnvoll?

Die hochgradige Integration einer elektrischen Maschine und der Einbau von starken Permanentmagneten sowie deren Handhabung birgt Risiken bei der Montage. Es handelt sich um neue Technologien, deren volles Potenzial und Einfluss auf die Gesamtkosten eines Traktorgetriebes noch nicht im Detail ersichtlich sind. Im Rahmen dieser Forschungsfrage soll beantwortet werden, was die Kostentreiber in einem solchen neuen Variatorkonzept sind und ob diesen an anderer Stelle Einsparungen in ausreichender Höhe gegenübergestellt werden können, die einen Einsatz wirtschaftlich machen.

4. In welchen Leistungssegmenten und in welchen Traktorkonfigurationen bietet sich der Einsatz eines solchen Variatorkonzeptes besonders an?

Hierbei soll untersucht werden, ob das Variatorkonzept auf die Leistungsklassen des für einen Einsatz infrage kommenden Traktorsegmentes ausgeweitet und skaliert werden kann, oder ob es sich zum Einsatz innerhalb bestimmter Leistungsklassen besonders eignet. Weiterhin soll beantwortet werden, ob sich ausgehend von dem entwickelten Variatorkonzept eher ein Getriebe für das Standard- oder ein Getriebe für das Premiumsegment oder für beide Segmente ergibt. So ist beispielsweise denkbar, dass anhand der Ergebnisse deutlich wird, dass der Einsatz eines solchen Variatorkonzeptes wirtschaftlich sinnvoll ist, aber Einschränkungen im Betriebsverhalten gegenüber Getrieben der aktuellen Generation mit sich bringt. Dieses Ergebnis würde den Einsatz dann eher in Getrieben im Standardsegment attraktiv machen. Andererseits kann sich auch ergeben, dass ein solches Variatorkonzept Vorteile im Betrieb, Komfort und Wirkungsgrad mit sich bringt und finanziell einen höheren Aufwand birgt als aktuelle Getriebe. Dieses Ergebnis würde den Einsatz im Premiumsegment attraktiv machen.

5. Welche Vor- und Nachteile ergeben sich durch den Einsatz eines solchen Variator-konzeptes gegenüber stufenlosen, leistungsverzweigten Traktorgetrieben der aktuellen Generation und gegenüber zu erwartenden elektrisch leistungsverzweigten Getrieben?

Im Rahmen dieser Forschungsfrage soll geklärt werden, in welchen Bereichen ein derartiges Variatorkonzept Vorteile gegenüber Getrieben der aktuellen Generation aufweist. Da es sich hierbei um eine Neuentwicklung handelt, ist noch offen, welche konkreten Vorteile sich ergeben. Es wird zum Beispiel erwartet, dass sich durch Integralbauweise Vorteile im Bereich Kosten und Bauraum ergeben, die andererseits Nachteile bei Reparatur, Wartung, Modularität, Komplexität und Zusammenbau mit sich bringen könnten. Je nach gewähltem Einsatzbereich und Segment können die Vor- und Nachteile gegenüber Getrieben der aktuellen Generation auch unterschiedlich ausfallen. Es existiert derzeit noch kein elektrisch leistungsverzweigtes Traktorgetriebe, eine zukünftige Markteinführung eines solchen durch verschiedene Traktorhersteller scheint durchaus wahrscheinlich, da es sich um eine nahe-liegende Weiterentwicklung hydraulisch leistungsverzweigter Getriebe handelt. Daher soll das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Variatorkonzept auch auf seine Vor- und Nach-teile gegenüber solchen zu erwartenden elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetrieben zukünftiger Traktorgenerationen untersucht werden. Diese fiktiven elektrisch leistungs-verzweigten Stufenlosgetriebe entstehen, indem bestehende hydraulisch leistungsverzweigte Stufenlosgetriebe betrachtet werden, und deren Hydrostaten durch elektrische Maschinen ersetzt werden.

Neben der Beantwortung der Forschungsfragen ist weiterhin Ziel im Rahmen der Arbeit, ein Verständnis dafür zu entwickeln, ob und wie eine magnetisch-elektrische Umlaufge-triebestufe mit einem Stator und zwei konzentrischen und ineinander laufenden Rotoren funktioniert und wie diese betrieben bzw. im Rahmen des zum Einsatz vorgesehenen Traktorgetriebekonzeptes weiterentwickelt werden kann.

3 Konzeption einer magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Umlaufgetriebestufe

Auf den in Abschnitt 2.1 erläuterten theoretischen Grundlagen und Definitionen aufbauend wird im zweiten Teil dieser Arbeit gezeigt, wie eine Variatorsektion nach dem Gegenstand der Forschungsfragen entwickelt und untersucht werden kann. Hierbei findet die in Abschnitt 2.2 dargestellte methodische Vorgehensweise konsequent Anwendung.

3.1 Anforderungen an ein Traktorgetriebe

Wie in Unterabschnitt 2.2.1 erläutert, ist zunächst die Aufgabenstellung im Rahmen der Zusammenstellung von Anforderungen in der Anforderungsliste zu konkretisieren und zu präzisieren. Die vier Hauptanforderungen eines Fahrzeuggetriebes können zusammengefasst werden zu:

- Anfahren ermöglichen
- Anpassung von Fahrgeschwindigkeit und Zugkraft an den jeweiligen Bedarf vornehmen (inklusive Rückwärtsfahrt ermöglichen)
- Permanente Leistungsübertragung ermöglichen
- Leistungsanpassung steuern

Neben den Hauptanforderungen werden an ein Getriebe noch zahlreiche weitere Nebenanforderungen – auch Betriebsanforderungen genannt – gestellt. Die Nebenanforderungen lassen sich folgenden Gruppen zuordnen:

- Betriebssicherheit
- Kosten
- Reparaturfreundlichkeit
- Bedienbarkeit
- Leistungsanpassung
- Maße und Gewicht

- Variationsmöglichkeiten
- Emissionen (Geräusche, Öl)

Speziell die technischen Anforderungen an ein Traktorgetriebe sind weltweit einem raschen Wandel unterworfen, wobei auch hier neue Grenzwerte für Abgasemissionen die hauptsächlichen Treiber sind. Kraftstoffeinsparung kann in einem ersten Ansatz vor allem durch den Betrieb des Motors in seinem Wirkungsgradbestpunkt, also im Bereich seines geringsten spezifischen Kraftstoffverbrauchs erreicht werden. Dies zieht einen Schongang für Transporte bei gleichzeitig noch höheren Endgeschwindigkeiten und damit eine immer größer werdende Spreizung nach sich [Gra+11].

3.1.1 Anforderungsliste

Gemäß [VDI93] werden die Anforderungen an die Konstruktion in einer Anforderungsliste dokumentiert. Im speziellen Fall der im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Variatorsektion ergeben sich folgende Anforderungen, die maßgeblich die Konzeption und Konstruktion dominieren:

1. Alle Schaltpunkte müssen bei vollständiger Drehzahlsynchronität realisiert werden.

Diese Anforderung besagt, dass alle Schaltpunkte nur echte nahtlose Schaltpunkte sein dürfen. Dies bedeutet, dass das gesamte Getriebe derart realisiert werden muss, dass bei einem Gangwechsel keine einzige Komponente innerhalb des Getriebes ihre Drehzahl ändern darf. Dies führt zu sehr angenehmen und kaum wahrnehmbaren Schaltpunkten.

2. Es muss jederzeit von jedem Gang in jeden anderen gewechselt werden können.

Diese Anforderung führt dazu, dass die einzelnen Gänge jeweils mit einer eigenen Kupplung ausgestattet werden. Eine Verteilung der Gänge auf zwei Seitenwellen mit je einer Kupplung und Vorwahl der Gänge durch Synchronringe ist durch diese Anforderung ausgeschlossen. Die Anforderung trägt der Tatsache Rechnung, dass mit einem solchen Konzept große Freiheiten bei der Ansteuerung und bei der Realisierung der Software für das Getriebe entstehen. Das Getriebe ist so für alle Situationen gerüstet, die Schaltstrategie kann so implementiert werden, dass der Wunsch der fahrzeugführenden Person jederzeit Vorrang hat. Ein Wechsel des Ganges außerhalb von Schaltpunkten zieht eine Drehzahlanpassung von Komponenten innerhalb des Getriebes nach sich und ist daher zwangsläufig kein nahtloser Schaltpunkt. Die Vorteile, die sich im Betrieb daraus ergeben, wie z. B. das Überspringen von Gängen oder schnelle Reaktionen auf eine plötzliche Veränderung der Fahrsituation, überwiegen zum jetzigen Zeitpunkt die Nachteile, die hauptsächlich aus erhöhten Kosten durch mehr Kupplungen bestehen. Es ist denkbar, dass diese Anforderung zu einem späteren Zeitpunkt aufgehoben oder abgeschwächt wird.

3. Es darf nur eine magnetisch-elektrische Dreiwellenumlaufgetriebestufe zum Einsatz kommen.

Diese Anforderung limitiert den Einsatz von teuren Magnetmaterialien und elektrischen Komponenten. Es ergeben sich hieraus Einschränkungen bei der Konzeption, da nicht alle möglichen Konzepte mit nur einer magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe realisiert werden können. Die Anforderung stellt sicher, dass sich die Kosten in einem überschaubaren Rahmen bewegen.

4. Das Getriebe muss alle Fahrbereiche vorwärts wie rückwärts durchfahren können.

Mit einem elektrisch leistungsverzweigten Getriebe in Torque-Split-Architektur ist Rückwärtsbetrieb grundsätzlich ohne Vorgelegewelle oder Reversiereinheit möglich. Durch die besondere Charakteristik dieser Architektur ergeben sich bei Realisierung ohne Vorgelegewelle oder Reversiereinheit tendenziell niedrigere Wirkungsgrade im Rückwärtsbetrieb. Die Anforderung 4 erzwingt ein Getriebe, dessen Betriebsverhalten im Vorwärtsbetrieb und Rückwärtsbetrieb identisch ist. Dies bringt Vorteile bei der Schaltstrategie und Entwicklung der Schaltsoftware mit sich. Außerdem vereinfacht diese Anforderung die Konzeption, da sie auf den Vorwärtsbetrieb beschränkt werden kann, weil der Rückwärtsbetrieb kinematisch identisch ist.

5. Aktiver Stillstand muss möglich sein.

Zusätzlich zur Unterbrechung des Leistungsflusses, welche jederzeit möglich sein muss und üblicherweise durch eine Hauptkupplung bzw. Fahrkupplung realisiert wird ist diese Anforderung den Hauptanforderungen eines Fahrzeuggetriebes zuzuordnen, mit ihr lässt sich nämlich eine andere Art des Anfahrens realisieren. Aktiver Stillstand bedeutet, dass das Getriebe sich im Leistungsfluss befindet und die Abtriebsdrehzahl durch den variablen Pfad bei konstanter Motordrehzahl im Motorbetriebspunkt auf 0 abgesenkt wird. Der Betriebspunkt des aktiven Stillstandes unterscheidet sich dahin gehend vom passiven Stillstand, dass die Fahrkupplung eingelegt ist. Das Anfahren ist somit möglich, ohne dass die Fahrkupplung Reibenergie beim Beschleunigen aufnehmen muss. Dies führt dazu, dass die Fahrkupplung kompakter dimensioniert werden kann, da die eingetragene Wärmeenergie deutlich geringer ausfällt als bei einer reibschlüssigen Kupplung, die als Anfahrlement dient. Die Fahrkupplung wird weiterhin benötigt, um die Rückwärtsfahrt zu ermöglichen. Hierfür wird die Fahrkupplung getrennt und die Rückwärtskupplung betätigt, was die Drehrichtung am Getriebeeingang umkehrt. Hierdurch können alle Fahrbereiche des Getriebes vorwärts und rückwärts genutzt werden. Dies führt zu einer einfachen Regelungsstrategie und ermöglicht einen schnellen Wechsel von der Vorwärtsfahrt in die Rückwärtsfahrt und anders herum, was speziell bei Arbeiten mit einem Frontlader von hoher Bedeutung ist. Neben diesen konzeptionellen Randbedingungen ergeben sich quantitative Anforderungen:

6. Die höchste auftretende Drehzahl des elektromagnetischen Feldes soll 5000 min^{-1} nicht überschreiten, da sich in ersten Betrachtungen gezeigt hat dass die auftretenden Verluste sonst schwer beherrschbar sind.
7. Die höchste auftretende Leistung der elektrischen Maschine soll 100 kW nicht überschreiten, da die Größe der elektrischen Maschine sonst in keinem guten Verhältnis zur Größe des Verbrennungsmotors mehr steht.
8. Das höchste an beliebiger Stelle in der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe auftretende Drehmoment soll 950 Nm nicht überschreiten, da es der hauptsächliche Treiber für die radialen Abmessungen der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe ist.
9. Die Motordrehzahl bei 60 km h^{-1} soll 2100 min^{-1} nicht überschreiten, was ein gängiges Auslegungskriterium für einen Schongang für Transporte bei hoher Fahrgeschwindigkeit darstellt.

Selbstverständlich ergeben sich noch eine Vielzahl weiterer Anforderungen an das zu entwickelnde Getriebe wie in Abschnitt 3.1 beschrieben. Da es sich hierbei um Nebenanforderungen handelt, werden diese der Übersichtlichkeit halber nicht im Textteil dieser Arbeit behandelt. Sie sind in der Anforderungsliste aufgeführt, die im Anhang zu finden ist.

3.1.2 Bedeutung der Anforderungen

Aus der Anforderung 1.4, dass alle Schaltunkte in absoluter Drehzahlsynchronität stattfinden sollen, ergibt sich, dass die Variatorsektion des Getriebes zwei Ausgangswellen aufweisen muss. Die Drehzahl der einen Welle muss bei steigender Drehzahl des kontrollierenden Elementes (Stator) steigen, während die andere fallen muss. Nur so können mit dem Variator mehrere Gänge durchfahren werden, in dem das kontrollierende Element immer von einer niedrigen Drehzahl zu einer hohen Drehzahl verstellt wird, dann im Synchronpunkt der Gang gewechselt wird und anschließend das kontrollierende Element wieder in die Gegenrichtung verstellt wird. Diese Charakteristik ist notwendig, um den stufenlosen Teil dazu nutzen zu können, den Wirkungsgrad des Gesamtgetriebes über den des stufenlosen Pfades zu erhöhen. Dies bringt eine Einschränkung des Wandlungsbereiches des Gesamtgetriebes mit sich, der wiederum durch die verschiedenen Gänge begegnet wird. Um diese benötigte Charakteristik – unabhängig von der später zum Einsatz kommenden Anzahl von Gängen – realisieren zu können, lassen sich für die Synthese einer Variatorsektion für das Getriebe folgende Synthesebedingungen aufstellen:

1. Bei konstanter Drehzahl des Dieselmotors muss eine Erhöhung der Drehzahl des kontrollierenden Elementes im variablen Pfad (Stator) bei einer Ausgangswelle zu einer Erhöhung, bei der anderen zu einer Absenkung der Drehzahl führen.

Im Idealfall soll der Dieselmotor bei einer konstanten Drehzahl betrieben werden und die Fahrgeschwindigkeit nur über das kontrollierende Element im variablen Pfad und Schaltung der zur Verfügung stehenden Gänge realisiert werden. Wie oben beschrieben muss dafür eine Erhöhung der Drehzahl des kontrollierenden Elementes im variablen Pfad (Stator) bei einer Ausgangswelle zu einer Erhöhung, bei der anderen zu einer Absenkung der Drehzahl führen. Trägt man die Drehzahlen der beiden Ausgangswellen über der Drehzahl des kontrollierenden Elementes im variablen Pfad auf, so ergibt sich eine steigende und eine fallende Gerade, die sich im Synchronpunkt, welcher der Drehzahl im Betriebspunkt des Dieselmotors entspricht, schneiden. Da eine Ermittlung der Lage von Summen- und Differenzwellen, wie sie mit dem WOLF-Schema vorgenommen wird, ohne konkrete Zahlenwerte vorgenommen werden kann, lässt sich diese Bedingung für die Getriebesynthese weiter abstrahieren. Die Betriebsdrehzahl des Dieselmotors soll konstant sein. Da die Synthese für jede beliebige Drehzahl des Dieselmotors funktionieren muss, kann diese Drehzahl auch (für die Synthese) zu 0 angenommen werden. Dies vereinfacht die Bedingung dahin gehend, dass durch die beiden Geraden, die sich ergeben, wenn man die Drehzahlen der beiden Ausgangswellen über der Drehzahl des kontrollierenden Elementes aufträgt, jetzt sofort erkennbar wird, dass bei einer Erhöhung der Drehzahl des kontrollierenden Elementes die Drehzahl einer Ausgangswelle ein positives Vorzeichen aufweist, während die der anderen negativ ist. Der Schnittpunkt der beiden Geraden liegt durch die gedankliche Festlegung der Dieselmotordrehzahl auf 0 jetzt bei einer Ausgangsdrehzahl von 0 und damit auf der x-Achse. Da von den beiden Geraden eine steigt und die andere fällt, müssen sie bei jeglicher

Abweichung vom Schnittpunkt immer unterschiedliche Vorzeichen aufweisen. Mathematisch lässt sich diese erste Synthesebedingung wie folgt ausdrücken:

$$n_E = \text{const.} = 0 \quad (3.1)$$

$$n_{OUT1} = +|K_1| \cdot n_{Control} \quad (3.2)$$

$$n_{OUT2} = -|K_2| \cdot n_{Control} \quad (3.3)$$

Hierbei entspricht

- n_E Drehzahl des Dieselmotors
- n_{OUT1} Drehzahl der Ausgangswelle 1
- n_{OUT2} Drehzahl der Ausgangswelle 2
- $n_{Control}$ Drehzahl des kontrollierenden Elements

und K_1 und K_2 den Steigungen der beiden Geraden. Da die absoluten Drehzahlen der beiden Ausgangswellen für die Ermittlung der Lage von Summen- und Differenzwellen ohne Bedeutung sind, können die beiden Konstanten K_1 und K_2 zu 1 gesetzt werden, was die Synthesebedingung weiter vereinfacht.

Die zweite Synthesebedingung ergibt sich aus der Tatsache, dass der Betriebspunkt des Dieselmotors frei gewählt werden können muss:

2. Bei konstanter Drehzahl des kontrollierenden Elementes im variablen Pfad (Stator) muss eine Erhöhung der Drehzahl des Dieselmotors bei beiden Ausgangswellen zu einer Erhöhung des Betrages der Drehzahl führen.

Beindet sich das Getriebe in einem bestimmten Betriebspunkt, dann muss eine Verschiebung des Motorbetriebspunktes möglich sein, ohne dass sich die Schaltpunkte und Schaltlogik des Getriebes ändern. Eine Verschiebung des Motorbetriebspunktes kann nötig sein, um auf geänderte Lastsituationen zu reagieren, oder um zum Beispiel den Motor bei Transportfahrten bei Maximalgeschwindigkeit mit niedriger Drehmomentanforderung bei einer niedrigeren Drehzahl betreiben zu können. Daraus ergibt sich, dass die Drehzahlen der beiden Ausgangswellen bei konstant gehaltener Drehzahl des kontrollierenden Elements im variablen Pfad direkt proportional zur Drehzahl des Dieselmotors sein müssen. Mathematisch formuliert lautet die Synthesebedingung wie folgt:

$$n_{Control} = \text{const.} = 0 \quad (3.4)$$

$$n_{OUT1} = K_3 \cdot n_E \quad (3.5)$$

$$n_{OUT2} = K_3 \cdot |K_4| \cdot n_E \quad (3.6)$$

Wobei K_3 und K_4 Konstanten für die Geradensteigung der beiden Ausgangsdrehzahlen, aufgetragen über der Dieselmotordrehzahl, sind und mit dem Gleichungssystem lediglich ausgedrückt wird, dass diese beiden Steigungen unterschiedliche Werte aufweisen können, aber gleiches Vorzeichen (ob positiv oder negativ) aufweisen müssen. Für die Synthese mit dem WOLF-Schema spielen absolute Werte keine Rolle, weshalb K_3 und K_4 ebenfalls zu 1 gesetzt werden können. Eine weitere Synthesebedingung ergibt sich aus Anforderung 1.6:

3. Das kontrollierende Element im variablen Pfad darf nur mit einer Getriebestufe verbunden sein.

Hieraus folgt, dass das kontrollierende Element nicht mit einer Koppelwelle verbunden werden darf. Würde das kontrollierende Element (Stator) mit einer Koppelwelle verbunden werden, so würde das bedeuten, dass beide Umlaufgetriebestufen des Variators als elektromagnetische Umlaufgetriebestufen ausgeführt werden müssen. Dies ist im Zuge einer Limitierung der Kosten und des zur Verfügung stehenden Bauraums zum jetzigen Zeitpunkt zunächst zu vermeiden.

Neben den Synthesebedingungen, die sich aus den Anforderungen ableiten lassen, ergeben sich noch weitere Bedeutungen der aufgestellten Anforderungen. Aus der Forderung, dass alle Schaltpunkte bei absoluter Drehzahlsynchronität aller Elemente im Getriebe liegen müssen, ergibt sich, dass auch die Drehzahl des kontrollierenden Elements im Variator im Schaltpunkt konstant sein muss. Sind zwei Drehzahlen einer Umlaufgetriebestufe festgelegt, dann ist auch die dritte bestimmt. Dies kann insofern als ein Nachteil angesehen werden, als dass das kontrollierende Element in der untersuchten Getriebekonfiguration kein physikalisches Trägheitsmoment mehr aufweist und seine Drehzahl innerhalb von Sekundenbruchteilen beliebig ändern kann. Im Gegensatz zu einer elektrischen Maschine, die über eine Stirnradstufe mit einem Planetengetriebe verbunden ist und damit die kontrollierende Funktion übernimmt, hat der Stator in einer elektromagnetischen Umlaufgetriebestufe keine physikalische Drehzahl und auch kein Trägheitsmoment. Er erzeugt ein elektromagnetisches Feld, welches mit einer bestimmten Frequenz wandert und dem damit eine Drehzahl zugeschrieben werden kann. Um dieses Potenzial zu nutzen, müssten Schaltpunkte zugelassen werden, bei denen Komponenten innerhalb des Getriebes ihre Drehzahl ändern. Bei konstanter Drehzahl von Dieselmotor und Ausgang müssen hierbei Wellen innerhalb des Getriebes durch Kupplungen oder durch das kontrollierende Element synchronisiert werden. Es kann hierbei angenommen werden, dass ein Schaltpunkt, bei welchem Elemente im Getriebe auf eine andere Drehzahl gebracht werden müssen, komfortabler ausfällt als wenn er – wie bei aktuell betrachteten Konzepten – mit einer elektrischen Maschine, die ein physikalisches Trägheitsmoment aufweist, realisiert wird. Die Schaltpunkte, bei denen Komponenten innerhalb des Getriebes ihre Drehzahl ändern, ergeben sich direkt aus der Nutzung der Änderung der Drehzahl des kontrollierenden Elementes: Ändert sich eine Drehzahl in einer Umlaufgetriebestufe, so kann eine zweite Drehzahl (die der Ausgangswelle) nur dann konstant gehalten werden, wenn sich gleichzeitig die dritte Drehzahl ändert. Eine Änderung von nur einer einzigen Drehzahl innerhalb der elektromagnetischen Umlaufgetriebestufe (die des Stators) ist sonst nur dann denkbar, wenn gleichzeitig die Standübersetzung geändert wird. Dies ist grundsätzlich durch elektrisches Umschalten der Anzahl der Spulen denkbar. Aufgrund der Komplexität einer solchen Umschaltung und der benötigten zusätzlichen elektrischen Komponenten soll diese Möglichkeit hier lediglich theoretische Erwähnung finden und im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt werden.

Eine weitere Nutzung der Änderung der Drehzahl des kontrollierenden Elements im variablen Pfad im Schaltpunkt lässt sich dadurch realisieren, dass das kontrollierende Element beide Variatorstufen und damit beide Umlaufgetriebestufen direkt beeinflussen kann. Dies führt wie in Synthesebedingung 3 bereits beschrieben dazu, dass beide Umlaufgetriebestufen des Variators als elektromagnetische Umlaufgetriebestufen ausgeführt werden müssen und wird deshalb zum jetzigen Zeitpunkt zunächst verworfen.

3.2 Getriebesynthese

Im folgenden Abschnitt wird dargelegt, wie aus den in Abschnitt 3.1 erläuterten Anforderungen und den daraus abgeleiteten Randbedingungen mittels der in Abschnitt 2.2 dargestellten Methoden eine Getriebestufe bzw. ein komplettes Getriebe systematisch entwickelt werden kann, wobei der Abstraktionsgrad schrittweise verringert wird.

3.2.1 Synthese einer Variatorsektion mit dem WOLF-Schema

Das WOLF-Schema der zu entwickelnden Variatorsektion besteht aus zwei einzelnen Umlaufgetriebestufen (eine mit mechanischem und eine mit magnetischem Wirkprinzip), die durch zwei Koppelwellen miteinander verbunden sind. Beide Koppelwellen sind gleichzeitig Anschlusswellen. Die zu entwickelnde Umlaufgetriebestufe weist zwei voneinander unabhängige Ausgangswellen auf, von denen jeweils eine ein Drehmoment führt, während das Drehmoment der anderen 0 ist. Damit ergibt sich je nach Betriebsart entweder ein zwangsläufiges, elementares Umlaufgetriebe mit einem kinematischen Freiheitsgrad von 2 und einem statischen Freiheitsgrad von 1 (vgl. [Mül98]) oder eine einfache Umlaufgetriebestufe. In einem Betriebspunkt, in der eine Ausgangswelle, die auch Koppelwelle ist, kein Drehmoment führt, wird die Welle zur inneren Koppelwelle; der nach außen führende Anschluss kann, da er kein Drehmoment führt, gedanklich entfernt werden. Die Welle kann nur noch Leistung von der einen Umlaufgetriebestufe zur anderen übertragen. In einem Betriebspunkt, in der eine Ausgangswelle, die keine Koppelwelle ist, kein Drehmoment führt, kann die Umlaufgetriebestufe, der diese Welle angehört, gedanklich komplett entfernt werden. Durch die Gleichungen der Standübersetzung und über die Momentensumme am Umlaufgetriebe können alle anderen Wellen jetzt auch kein Drehmoment mehr führen. In diesem Fall ist die Berechnung auf ein einfaches Umlaufgetriebe reduziert. Aus der Anforderungsliste und der Beschreibung der Bedeutung der Anforderungen (vgl. Unterabschnitt 3.1.1 und Unterabschnitt 3.1.2) ergeben sich im Getriebeschema nach WOLF zwei prinzipielle Möglichkeiten der Realisierung. Diese unterscheiden sich in der Art des Anschlusses des Dieselmotors voneinander. Bei vier nach außen geführten Wellen kann der Dieselmotor entweder an eine freie Welle oder eine Koppelwelle angeschlossen werden. Eine der vier nach außen geführten Wellen ist keine physische Welle, sondern der Statorring der elektrischen Maschine, der nur Drehmoment in die magnetische Umlaufgetriebestufe einleiten kann und deshalb keine Koppelwelle sein kann. Die beiden anderen Wellen ergeben sich dann jeweils als die Ausgangswellen. Diese beiden grundsätzlichen Varianten werden deshalb nach der Art des Anschlusses des Dieselmotors benannt.

Anschluss des Verbrennungsmotors an eine freien Welle

Wird der Motor an eine freie Welle angeschlossen, ergeben sich die Ausgangswellen als die beiden Koppelwellen. Nach Synthesebedingung 1 müssen die Drehzahlen der beiden Ausgangswellen bei stillstehendem Dieselmotor unterschiedliche Drehrichtungen, d.h. unterschiedliche Vorzeichen in der Drehzahl aufweisen. Im WOLF-Schema werden daher unterschiedliche Vorzeichen an die beiden Ausgangswellen angetragen. Da sich die Vorzeichen der Drehzahl an mechanisch fest miteinander verbundenen Wellen nicht ändern können, können die Vorzeichen bis zu den Anschlusswellen der Umlaufgetriebestufen fortgeführt werden. Aus den Vorzeichen ergibt sich dann direkt die benötigte Lage der Summen-

und Differenzwellen in dem Planetensatz, der mit dem Dieselmotor verbunden ist. Ist der Dieselmotor an eine freie Welle angeschlossen, ergibt sich somit, dass die zum Dieselmotor führende Welle das Summendrehsmoment führen muss. Mit der ermittelten benötigten Lage von Summen- und Differenzwellen wird die Synthesebedingung 2 überprüft. Diese Anforderung besagt, dass bei Stillstand der elektrischen Maschine (bzw. bei Drehzahl 0 min^{-1} im Stator) die beiden Ausgangswellen gleiches Vorzeichen aufweisen müssen. In das um die Lage von Summen- und Differenzwellen in dem einen Planetensatz ergänzte WOLF-Schema werden jetzt an den beiden Ausgangswellen gleiche Vorzeichen für die Drehzahl angetragen, ob positiv oder negativ spielt hierbei keine Rolle. Durch die mechanisch feste Verbindung der Ausgangswellen mit den Koppelwellen können diese Vorzeichen wieder bis zu den Anschlusswellen der Umlaufgetriebestufen fortgeschrieben werden. Die Anordnung dieser Vorzeichen kann nicht realisiert werden, wenn der Stator in der magnetischen Umlaufgetriebestufe das Summendrehsmoment führt. Diese Anordnung entfällt daher. Die beiden anderen möglichen Lagen der Summenwelle in der magnetischen Umlaufgetriebestufe sind identisch, da sie durch Spiegelung an der Horizontalen ineinander übergehen. Die übrig bleibende Möglichkeit der Realisierung im WOLF-Schema wird WOLF-Schema 1.1 genannt.

Anschluss des Verbrennungsmotors an eine Koppelwelle

Wird der Verbrennungsmotor an eine Koppelwelle angeschlossen, so ergibt sich durch die anderen Anforderungen, dass eine Abtriebswelle eine Koppelwelle ist und die andere Abtriebswelle keine Koppelwelle ist. Es wird wieder Bedingung 1 angesetzt und verschiedene Vorzeichen für die Drehzahl der beiden Ausgangswellen bei stillstehendem Dieselmotor angetragen. Daraus ergeben sich die Vorzeichen der Drehzahl der Koppelwellen. Da an der Umlaufgetriebestufe, die mit beiden Ausgangswellen verbunden ist, zwangsläufig verschiedene Drehrichtungen an den beiden Ausgangswellen auftreten, muss die übrige Welle der Umlaufgetriebestufe, die mit dem Dieselmotor verbunden, die Summenwelle der Stufe sein. Weitere Erkenntnisse lassen sich durch Bedingung 1 nicht gewinnen. Daher wird mit der ermittelten Lage der ersten Summenwelle nun Bedingung 2 überprüft. Bei stillstehender elektrischer Maschine bzw. Drehzahl 0 min^{-1} im Stator werden an die beiden Ausgangswellen gleiche Vorzeichen angetragen. Wie im zuvor betrachteten Fall ergibt sich daraus, dass der Stator nicht das Summendrehsmoment führen kann. Es bleiben somit für den Fall, dass der Verbrennungsmotor mit einer Koppelwelle verbunden wird, ausgehend von der WOLF-Symbolik zwei Lösungen übrig, die sich hinsichtlich ihres Betriebsverhaltens unterscheiden. Die erste Lösung besteht darin, dass die zum Dieselmotor führende Welle, die gleichzeitig Koppelwelle der beiden Getriebestufen ist, in beiden Stufen die Summenwelle ist. Die zweite Lösung besteht darin, dass die aus der mechanischen Stufe zum Dieselmotor führende Welle Summenwelle ist, während die aus der elektromagnetischen Stufe zum Dieselmotor führende Welle eine Differenzwelle ist. Die Summenwelle der elektromagnetischen Stufe ist in diesem Fall mit einer Ausgangswelle verbunden. Die beiden sich hierbei im WOLF-Schema ergebenden Lösungsmöglichkeiten werden WOLF-Schema 2.1 und WOLF-Schema 2.2 genannt.

3.2.2 Interpretation der Ergebnisse der Synthese

Ausgehend von der auf hohem Abstraktionsgrad durchgeführten systematischen Synthese mit dem WOLF-Schema bleiben drei Lösungsmöglichkeiten übrig, die einer weiteren Analyse

zu unterziehen sind. Es wird erwartet, dass diese sich hinsichtlich ihres Betriebsverhaltens unterscheiden.

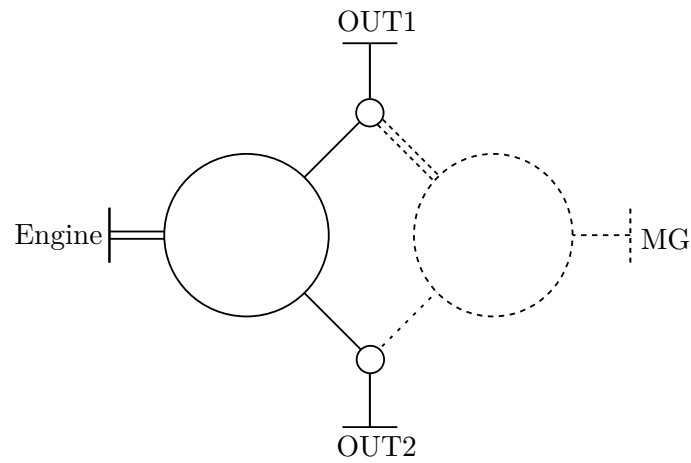


Abbildung 3.1: WOLF-Schema 1.1

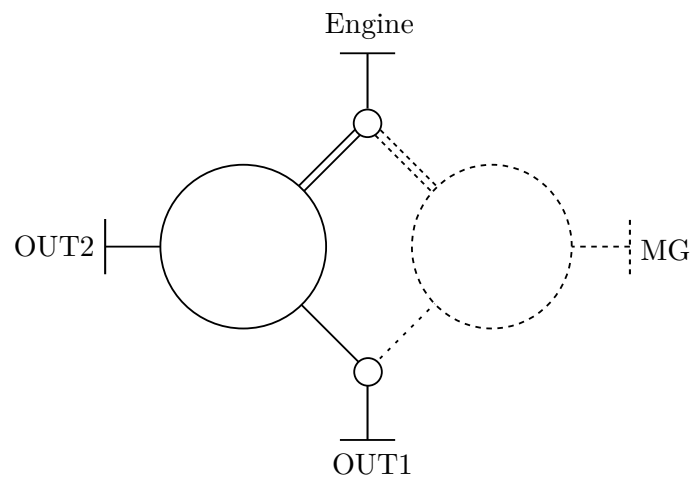


Abbildung 3.2: WOLF-Schema 2.1

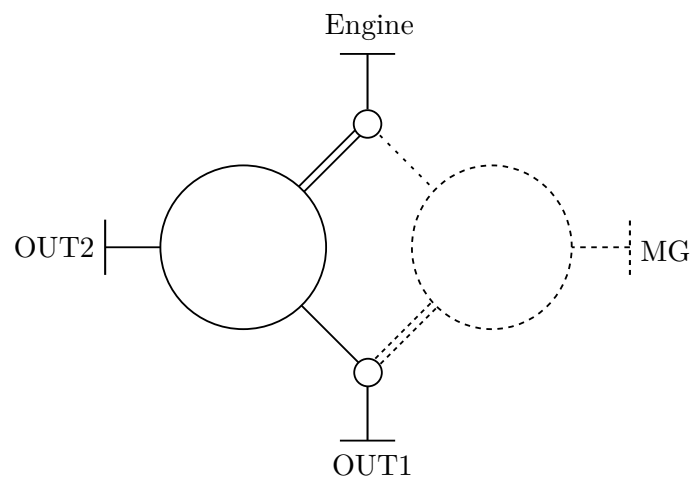


Abbildung 3.3: WOLF-Schema 2.2

Abbildung 3.1, Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 zeigen die drei prinzipiellen Möglichkeiten für die Realisierung der Variatorsektion. Zum jetzigen Zeitpunkt sei davon ausgegangen, dass daraus ein komplettes Traktorgetriebe entwickelt werden kann. Hierfür wird der Variatorsektion ein Modul zur Drehrichtungsumkehr vorgeschaltet und ein im Synchronpunkt lastschaltbares Gruppengetriebe mit mindestens zwei Gängen nachgeschaltet.

Für alle Konzepte gilt, dass der Umschaltpunkt innerhalb des gleichen Ganges immer im Betriebspunkt des Blockumlaufs auftritt, da nur dort die beiden Ausgangswellen *OUT1* und *OUT2* die gleiche Drehzahl aufweisen. Da im Blockumlauf alle Wellen die gleiche Drehzahl aufweisen, kann dieser Betriebspunkt bestimmt werden, sobald eine Drehzahl bekannt ist, die diesem Betriebspunkt zugeordnet werden kann. Im Normalfall ist dies die Nenndrehzahl des Dieselmotors, die für die für einen Einsatz infrage kommenden Traktorfamilien bei 2100 min^{-1} liegt. Die Variatorausgangsdrehzahlen lassen sich daher durch zwei Geraden (eine fallend, die andere steigend) darstellen, die sich bei der Ausgangsdrehzahl – und damit auch bei einer virtuellen Drehzahl des elektromagnetischen Feldes in der magnetischen Umlaufgetriebestufe – von 2100 min^{-1} schneiden. Es ergeben sich daher für den aktiven Stillstand zwei Schnittpunkte mit der x-Achse, welche einer Ausgangsdrehzahl von 0 min^{-1} entsprechen. Jede der beiden Ausgangswellen des Variators kann daher zum Anfahren verwendet werden. Anfahren soll grundsätzlich bei Motornenndrehzahl möglich sein (aktiver Stillstand). Mit dem WOLF-Schema kann untersucht werden, welche Drehrichtung die integrierte elektrische Maschine zum Anfahren aufweisen muss. Diese Untersuchung kann für jedes der Konzepte vorgenommen werden, wobei jedes Konzept wiederum zwei Möglichkeiten aufweist, einen Anfahrang zu realisieren. Die Drehrichtung des Verbrennungsmotors muss für diese Untersuchung angenommen werden. Die Drehrichtung der Verbrennungsmotoren der bei der John Deere GmbH & Co. KG gefertigten Traktoren ist mathematisch positiv, wenn die x-Achse im allgemeinen Fahrzeugkoordinatensystem nach DIN ISO 8855 betrachtet wird [DIN13]. Dies kann einfach aus der festgeschriebenen Drehrichtung der Zapfwelle eines jeden Traktors [Rei18] und dem einstufigen, bei der John Deere GmbH & Co. KG eingesetzten Zapfwellengetriebe abgeleitet werden [Dee19a]. Damit können nun folgende Betrachtungen angestellt werden: Für jedes der ermittelten Getriebeschemata wird an jeweils eine Ausgangswelle die Drehzahl 0 angetragen, während an den Motor eine positive Drehrichtung angetragen wird. Die Drehrichtungen werden über die Koppelwellen fortgeführt. Sind zwei Drehrichtungen an einer Umlaufgetriebestufe bekannt, kann über die Lage der Summen- und Differenzwellen die dritte Drehrichtung bestimmt werden. Damit können alle Drehrichtungen im jeweils betrachteten Konzept bestimmt werden. Dieses Verfahren wird für jedes der Konzepte angewandt, wobei einmal die Ausgangswelle 1 und einmal die Ausgangswelle 2 die Drehzahl 0 erhalten.

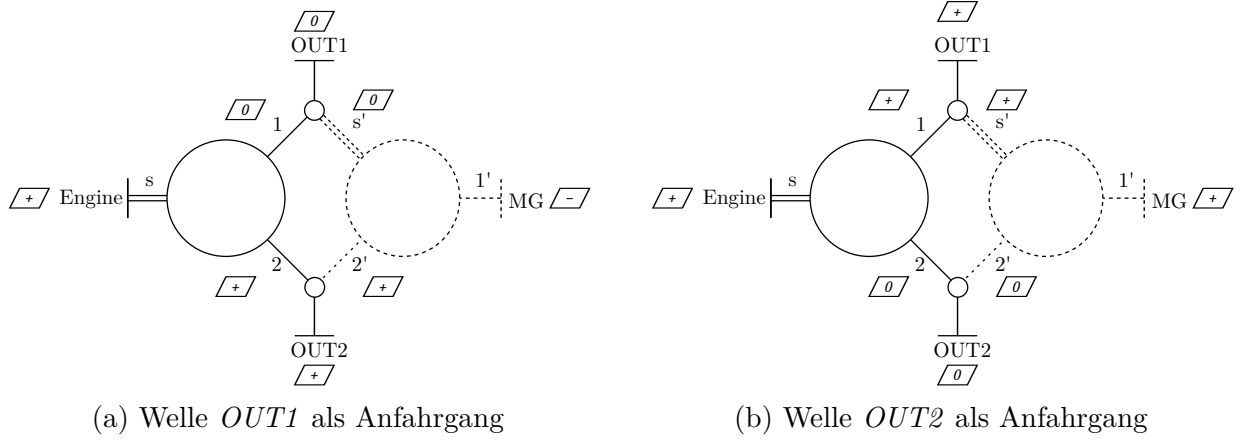


Abbildung 3.4: Drehrichtung der elektrischen Maschine für aktiven Stillstand, Möglichkeit 1.1

Abbildung 3.4 zeigt die Drehrichtungen des elektromagnetischen Feldes für WOLF-Schema 1.1 für jede Lage des Anfahranges. Die vollständige Herleitung der Drehrichtungen durch ein schrittweises Befüllen der WOLF-Schemata ist im Anhang gezeigt. Es ergibt sich, dass bei WOLF-Schema 1.1 ein Anfahrang mit der Koppelwelle, die mit der Summenwelle der magnetischen Umlaufgetriebestufe verbunden ist, realisiert werden kann, wenn der Stator der magnetischen Umlaufgetriebestufe eine negative Drehzahl aufweist, vgl. Abbildung 3.4a. Zur Realisierung eines Anfahranges mit der Koppelwelle, welche aus zwei Differenzwellen besteht, muss der Stator der elektromagnetischen Umlaufgetriebestufe eine positive Drehzahl aufweisen, vgl. Abbildung 3.4b. Da der Punkt des Blockumlaufs und damit der Umschaltunkt wie oben beschrieben ebenfalls bei einer positiven Drehzahl auftritt, ist der Verstellbereich der elektrischen Maschine in einem solchen Fall limitiert und reicht von einer positiven Drehzahl bis zur ebenfalls positiven Drehzahl des Blockumlaufs. Dieses Betriebsverhalten ist nachteilig für das Gesamtgetriebe, da der komplette Betriebsbereich negativer Drehzahlen des elektrischen Feldes nicht nutzbar ist. Dies führt zu einer deutlichen Einschränkung der Spreizung im Bereich der elektrischen Maschine. Durch diese Einschränkung des drehzahlmäßig nutzbaren Betriebsbereichs ist zu erwarten, dass deshalb manche der auftretenden Drehmomente die bei der Realisierung des Anfahranges mit der Koppelwelle, die mit der Summenwelle der elektromagnetischen Umlaufgetriebestufe verbunden ist, auftretenden Drehmomente um ein Vielfaches übersteigen. Eine solche Limitierung des Einsatzbereiches des betrachteten Getriebes ist nicht zielführend. Aus diesem Grund wird diese Möglichkeit ab diesem Punkt nicht weiter verfolgt. Mit der Synthesebedingung 1 lässt sich für die übrig bleibende Möglichkeit der Lage des Anfahranges zeigen, dass dieser nur dann realisiert werden kann, wenn die mechanische Umlaufgetriebestufe als Minusgetriebe ausgeführt wird. Indiziert man die Wellen wie in Abbildung 3.4 dargestellt nach Müller mit 1, 2 und s und betrachtet

$$\frac{n_2}{n_s} = i_{2s} = 1 - \frac{1}{i_{12}} \quad (3.7)$$

so wird erkennbar, dass die Welle mit dem Index 2, also die Koppelwelle, die aus zwei Differenzwellen besteht, bei geforderter negativer Standübersetzung i_{12} stets schneller dreht als die mit dem Verbrennungsmotor verbundene Welle, wenn die Differenzwelle mit dem Index 1 stillsteht. Dies ist von besonderer Bedeutung für den Anfahrang, da die Bedingung des Stillstehens der Welle mit dem Index 1 hier erfüllt ist. Durch die mechanisch festen

Verbindungen ergibt sich analog für das Anfahren, dass hierbei die Summenwelle in der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe stillsteht, während die Differenzwelle mit dem Index 2 schneller dreht als der Verbrennungsmotor. Die Differenzdrehzahl zwischen Modulationsring – der die Summenwelle in der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe ist – und der Differenzwelle mit dem Index 2 wiederum ist kritisches Auslegungskriterium für die magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe. Sie bestimmt maßgeblich die auftretenden Eisen- und Magnetverluste. Um diese Relativedrehzahl unterhalb der geforderten 1500 min^{-1} zu halten, wird deutlich, dass z. B. selbst bei der (relativ) groß gewählten Standübersetzung der mechanischen Stufe von $i_{12} = -3$ ein Anfahren nur dann realisiert werden kann, wenn die Dieselmotordrehzahl auf 1100 min^{-1} abgesenkt wird. Dies ist grundsätzlich möglich. Da die magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe Kernuntersuchungselement in dieser Arbeit ist, ist diese Limitierung zum jetzigen Zeitpunkt nicht wünschenswert, da zu erwarten ist, dass sich hierdurch zu starke Einschränkungen ergeben. Aus diesem Grund werden Möglichkeiten, bei denen der Verbrennungsmotor an eine freie Welle angeschlossen wird, für den Forschungsteil dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Auf WOLF-Schema 1.1 wird in einem späteren Teil dieser Arbeit erneut eingegangen und es kann als Alternative betrachtet werden, wenn ein besseres Verständnis der Funktion und der Verluste der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe gewonnen wurde. Für die Möglichkeiten des Anschlusses des Verbrennungsmotors an eine Koppelwelle ergibt sich, dass bei WOLF-Schema 2.1 ein Anfahrang realisiert werden kann, bei welchem die elektrische Maschine eine negative Drehrichtung aufweist. Für die magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe soll eine Minusgetriebestufe zum Einsatz kommen, da diese derzeit die wirkungsgradmäßig deutlich günstigere Ausführung darstellt. Weiter sei angenommen, dass der Stator das Teil darstellt, welches in den kritischen Betriebspunkten die höchste Drehzahl und das geringste Moment aufweist, um der physikalischen Natur der Konstruktion Rechnung zu tragen. Es kann dann gezeigt werden, dass die Relativedrehzahl zwischen der Summenwelle und dem Rotor der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe beim Anfahren nicht unterhalb der Drehzahl des Dieselmotors realisiert werden kann. Wie oben bereits detailliert beschrieben, ist ein solches Betriebsverhalten nicht gewünscht. Aus diesem Grund wird WOLF-Schema 2.1 ab diesem Punkt ebenfalls nicht weiter verfolgt und die weiteren Analysen beziehen sich ausschließlich auf WOLF-Schema 2.2. Für WOLF-Schema 2.2 lässt sich zeigen, dass ein Anfahrang existiert, bei welchem die elektrische Maschine eine positive Drehrichtung aufweist, und ein zweiter, bei welchem die elektrische Maschine eine negative Drehrichtung aufweist. Um einen möglichst großen Betriebsbereich der elektrischen Maschine nutzen zu können, ist hier der Gang als Anfahrang vorzuziehen, der den aktiven Stillstand bei negativer Drehrichtung der elektrischen Maschine ermöglicht, da sonst ähnliche Limitierungen wie bei WOLF-Schema 2.1 auftreten. Mit diesen Festlegungen wird die Analyse fortgesetzt. Die beiden möglichen WOLF-Schemata weisen jeweils Betriebsbereiche auf, in denen die Ausgangswelle *OUT2* kein Drehmoment und damit auch keine Leistung führt, sondern als Koppelwelle zwischen den beiden Umlaufgetriebestufen wirkt. In diesen Betriebsbereichen, in denen die Ausgangsleistung über die Welle *OUT1* fließt, tritt damit zwangsläufig zirkulierende Blindleistung in irgendeiner Form (positive zirkulierende Blindleistung oder negative zirkulierende Blindleistung, abhängig von den Drehzahlen) auf. Das Auftreten dieser Blindleistung ist prinzipbedingt aus der Anforderung, dass das elektromagnetische Drehfeld nur in eine Umlaufgetriebestufe einwirken kann, um nicht beide Umlaufgetriebestufen mit einem magnetischen Wirkprinzip umzusetzen. Die Blindleistung ist damit unvermeidlich und mit

keiner konkreten konstruktiven Ausführung eines der beiden WOLF-Schemata aufzuheben. Dies ist im weiteren Verlauf der Konzeption und Konstruktion sowie in anschließenden Beurteilungen entsprechend zu berücksichtigen. Die zirkulierende Blindleistung führt dazu, dass die mechanische Umlaufgetriebestufe in bestimmten Betriebspunkten eine Leistung übertragen muss, die oberhalb der Motorleistung und damit der zur Verfügung stehenden Eingangsleistung liegt. Da sich diese Leistungsüberhöhung in Form von Drehmoment äußert, kommt es in diesen Betriebspunkten zu erhöhten lastabhängigen Verlusten in der mechanischen Umlaufgetriebestufe und damit zu einem niedrigeren Gesamtwirkungsgrad. Zu untersuchen ist daher, ob der Wirkungsgrad des Gesamtgetriebes auf dem Niveau der Wirkungsgrade von aktuellen leistungsverzweigten Stufenlosgetrieben realisiert werden kann, wenn diese mit elektrischen Maschinen ausgestattet wären. Weiterhin ist im folgenden Abschnitt der Getriebeanalyse zu untersuchen, ob sich die Punkte niedrigen Wirkungsgrads des weiter verfolgten WOLF-Schemas in Betriebspunkten realisieren lassen, die eine niedrige relative Nutzungsdauer aufweisen und so deren niedrige Effizienz für den gesamten Energiebedarf eine untergeordnete Rolle spielt. Kann der Gesamtgetriebewirkungsgrad nicht auf dem Niveau von aktuellen leistungsverzweigten Stufenlosgetrieben realisiert werden, so ist zu untersuchen, ob diese Einbußen im Wirkungsgrad durch Kostenersparnis in Kauf genommen werden können. Möglicherweise eignet sich ein neuartiges Getriebe mit einer Variatorsektion mit magnetischem Wirkprinzip auch als Alternative für zukünftige elektrisch leistungsverzweigte Getriebe mit zwei unabhängigen Umlaufgetriebestufen in Traktoren niedriger Leistungs- und Komfortklassen. In diesen Leistungsklassen wird dem Treibstoffverbrauch keine so hohe Bedeutung zugemessen wie in den hohen Leistungs- und Komfortklassen.

3.3 Getriebeanalyse

Über die im unmittelbar vorangehenden Abschnitt dargelegten Überlegungen zu Betriebsverhalten, die auf Vergleich relativer Drehrichtungen und einfachen Proportionalitätsverhältnissen aufbauen, konnte eines der WOLF-Schemata als besonders geeignet identifiziert werden. Daher wird im nun folgenden Abschnitt dargelegt, wie dieses abstrakte Getriebe-Modell detaillierteren Analysen unterzogen wird, um quantifizierbare Aussagen bezüglich der auftretenden Betriebskenngrößen treffen zu können und diese gegen die Anforderungen vergleichen zu können.

3.3.1 Analyse der Drehmomente und Drehzahlen mittels Matrix-Rechenverfahren nach Stangl

Das aus der Synthese hervorgehende Konzept wird mittels des in Unterabschnitt 2.2.3 vorgestellten Matrix-Rechenverfahrens nach Stangl analysiert. Hierfür erfolgt zunächst eine Benennung der einzelnen Komponenten und Drehzahlen anhand der folgenden Abbildung:

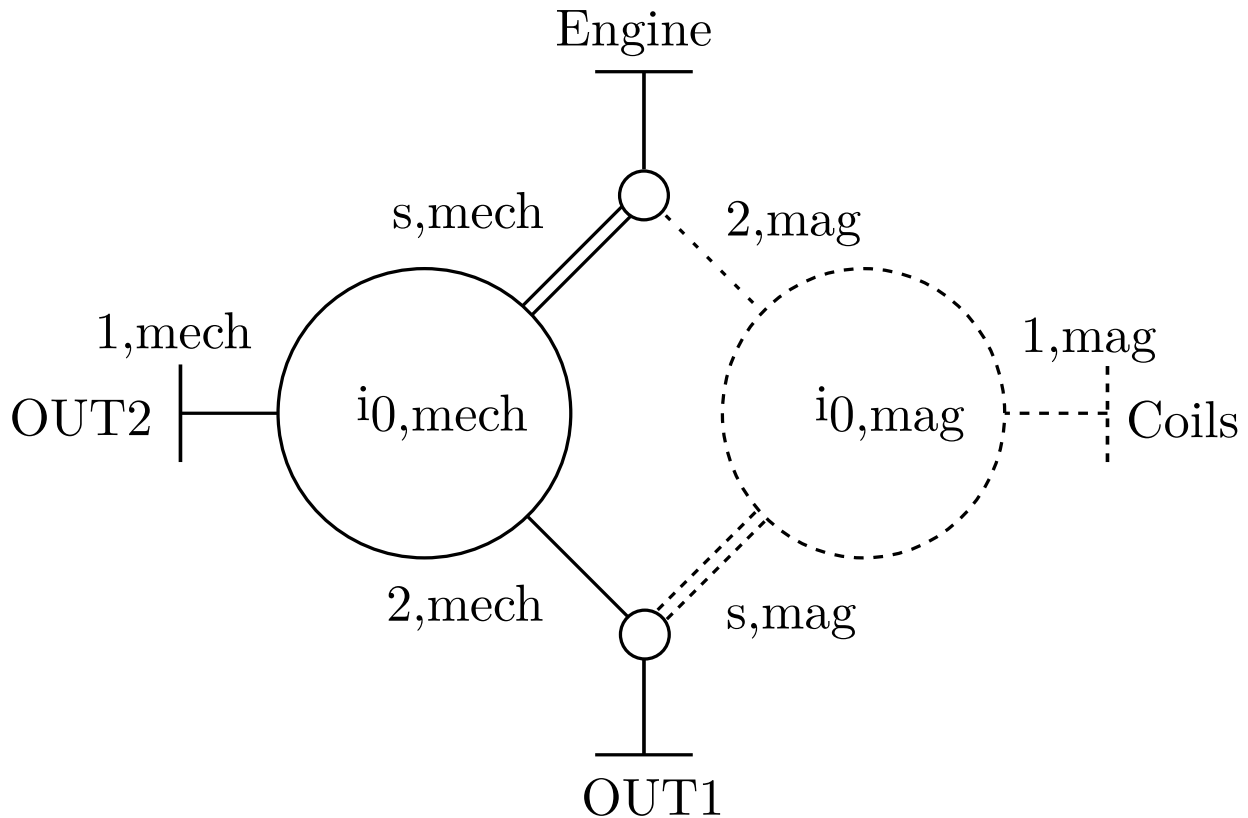


Abbildung 3.5: Benennung der Wellen und Anschlüsse, WOLF-Schema 2.2

Die Anschlusswellen der jeweiligen Umlauftriebbestufen werden mit den Indizes 1, 2 und s (für Stegwelle bzw. im Falle der magnetischen Umlauftriebstufe für den Modulationsring) bezeichnet. Diesem Index wird ein zweiter Index (*mech* oder *mag*) nachgestellt, um zu unterscheiden, ob die Welle der mechanischen oder der magnetischen Umlauftriebstufe zugeordnet ist. Die Ausgangswellen werden zusätzlich zur eindeutigen Identifikation mit *OUT1* und *OUT2* bezeichnet, die Spulen mit *Coils* und die Motorwelle mit *Engine*. Die Standgetriebeübersetzungsverhältnisse der beiden Umlauftriebbestufen werden analog zur Benennung der Wellen mit $i_{0,mech}$ und $i_{0,mag}$ bezeichnet. Die Festlegung von Welle 1 und Welle 2 in den jeweiligen Umlauftriebbestufen ist willkürlich und hat keinen Einfluss auf die weitere Analyse, da eine Vertauschung der beiden Zentralwellen für die Kinematik ohne Bedeutung ist und lediglich die Standgetriebeübersetzung umkehrt. Je nach Standgetriebeübersetzung, die erst zu einem späteren Zeitpunkt ermittelt wird, kann dann festgelegt werden, welche Zentralwelle mit dem Hohlrad und welche mit der Sonne verbunden werden soll. Es wird die Drehzahlmatrix für das WOLF-Schema 2.2 aufgestellt:

Drehzahlen

Tabelle 3.1: Drehzahlmatrix für WOLF-Schema 2.2

Hierin sind die ersten beiden Zeilen die in Form der WILLIS-Gleichung zusammengefassten Stufenbeziehungen des Getriebes, die Zeilen 3 bis 8 die Wellenbeziehungen (Bindungen) und die Zeilen 9 und 10 die Vorgaben. Da das Getriebe über einen kinematischen Freiheitsgrad von 2 verfügt, ergeben sich auch zwei Vorgabegleichungen, die durch die Vorgabe der Drehzahl des Motors und durch die Vorgabe der Drehzahl des durch die Spulen erzeugten elektromagnetischen Feldes realisiert werden. Um zu zeigen, dass diese Vorgaben beliebige Werte annehmen können, sind die Werte im Lösungsvektor mit X und Y bezeichnet. Um weiterhin darzustellen, dass es sich bei der Drehzahl des durch die Spulen erzeugten elektromagnetischen Feldes nicht um eine physikalische Drehung handelt, sondern nur um eine virtuelle Drehung, wird der Variable für die Drehzahl des durch die Spulen erzeugten elektromagnetischen Feldes zusätzlich der Index v nachgestellt. Ebenso ergibt sich die Drehmomentmatrix für WOLF-Schema 2.2:

Drehmomente

$$\begin{pmatrix} -i_{0,mech} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -i_{0,mag} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & * & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & * \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_{1,mech} \\ M_{2,mech} \\ M_{s,mech} \\ M_{1,mag} \\ M_{2,mag} \\ M_{s,mag} \\ M_{Engine} \\ M_{Coils} \\ M_{OUT1} \\ M_{OUT2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ Z \\ 0 \end{pmatrix}$$

Tabelle 3.2: Drehmomentmatrix für WOLF-Schema 2.2

Hierin sind die Zeilen 1 bis 4 die Stufenbeziehungen (Standübersetzung und Momentensumme am Umlaufgetriebe), die Zeilen 5 bis 8 die Wellenbeziehungen (starre Verbindungen)

und die Zeilen 9 und 10 die Vorgaben. Das Getriebe verfügt über einen statischen Freiheitsgrad von 2, also können bzw. müssen zwei Momente an zwei beliebigen Elementen vorgegeben werden. Da das vorliegende Getriebekonzept darauf basiert, dass die Leistung stets nur über eine von zwei Ausgangswellen fließt, muss eine Vorgabe stets lauten, dass das Drehmoment an einer der beiden Ausgangswellen 0 ist. Diese Vorgabe ist in Zeile 10 mathematisch abgebildet. Um darzustellen, dass die Vorgabe entweder an Ausgangswelle 1 oder an Ausgangswelle 2 erfolgen muss, ist der Wert in der Koeffizientenmatrix mit einem Stern angegeben. Die zweite Vorgabe für das Drehmoment kann an jedem Element erfolgen und damit dynamisch an dem Element, welches im jeweiligen Betriebspunkt das Drehmoment limitiert. Dieses Element ist entweder die leistungsführende Ausgangswelle, wenn das Traktionslimit erreicht ist, die Motorwelle, wenn das Leistungslimit des Motors erreicht ist, oder die Spulen, wenn das Leistungslimit der elektrischen Maschine erreicht ist. Um diese Charakteristik in der Koeffizientenmatrix darzustellen, ist der Wert wiederum mit einem Stern markiert und der Lösungsvektor mit der Variablen Z befüllt.

Die Matrizen für die Drehzahlen und Drehmomente werden in Microsoft Excel implementiert und durch Invertieren dynamisch gelöst. Für die Drehzahlvorgaben wird hierfür die Drehzahl des Dieselmotors im Auslegungspunkt (2100 min^{-1}) konstant gehalten und die Drehzahl des elektromagnetischen Feldes innerhalb der durch die Anforderungsliste vorgegebenen Grenzen in kleinen Schritten vom Minimum zum Maximum erhöht. Durch das dynamische Lösen der Matrizen kann so jeder Betriebspunkt berechnet und tabellarisch aufgelistet werden. Die Matrix für die Drehmomente wird gelöst, indem nach Berechnung der Drehzahlen zuerst die aktive Ausgangswelle ermittelt wird und das Drehmoment der anderen Welle zu 0 gesetzt wird. Anschließend werden mit dem maximal auf den Boden übertragbaren Drehmoment als Vorgabe an der anderen Ausgangswelle die Drehmomente im Getriebe berechnet. Dann wird überprüft, welches Element im jeweiligen Betriebspunkt das limitierende Element ist, die Drehmomentvorgabe wird ggf. angepasst und an dem limitierenden Element vorgenommen und die Drehmomente werden erneut berechnet. Die Berechnung erfolgt hierzu verlustfrei. Um eine Auslegung dieser Variatorsektion in einem gesamten Traktorgetriebe vornehmen zu können, werden den Ausgangswellen noch die beiden Gangstufen A und B nachgeschaltet, die Drehzahlen bzw. Drehmomente über die jeweiligen Stirnradstufen berechnet und so die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Getriebeausgangsdrehmomente abgeleitet.

Für den Dieselmotor wird hier vereinfachend davon ausgegangen, dass er bei einer konstanten Drehzahl von 2100 min^{-1} betrieben wird und eine Leistung von 114 kW bereitstellen kann [Dee19c]. Hierbei handelt es sich um den leistungsstärksten bei John Deere in den 6R-Traktoren mit mittlerem Rahmen zum Einsatz kommenden Motor. Die Motoren in den Traktoren von John Deere sind mit dem *Intelligent Power Management* (IPM) ausgestattet, welches in bestimmten Situationen – bei eingeschalteter Zapfwelle oder bei Transportarbeiten – dem Traktor eine kontrollierte Leistungserhöhung zur Verfügung stellt, deren Höhe abhängig von der Nennleistung des jeweiligen Traktors ist [Lan19]. Diese Zusatzleistung ist für Fahrzeuge, deren Motor nicht bei konstanter Drehzahl betrieben werden kann, also immer dann, wenn kein Stufenlosgetriebe zum Einsatz kommt, im Transportbereich ab einer Motordrehzahl von 1600 min^{-1} abrufbar, von wo aus sie bis zu einer Motordrehzahl von 1900 min^{-1} linear auf ihren Maximalwert von 30 kW [Dee19c] ansteigt und dann bis zur Nenndrehzahl von 2100 min^{-1} konstant zur Verfügung steht [Dee19b]. Für die Auslegung des Getriebes kann dies folgendermaßen vereinfacht werden: Von Straßenfahrt und damit von Transportarbeiten spricht man bei Traktoren allgemein, wenn Geschwindigkeiten größer

20 km/h gefahren werden [UK11]. Für ein gestuftes Getriebe kann davon ausgegangen werden, dass die für IPM mindestens nötige Motordrehzahl von 1600 min^{-1} bei 20 km/h erreicht werden kann. Berechnet man dann mittels Dreisatz bei gleicher Gangabstufung die sich bei 1900 min^{-1} einstellende Fahrgeschwindigkeit, so ergibt sich diese zu ca. 24 km/h. Damit kann für den Motor in Kombination mit den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Stufenlosgetrieben gelten, dass bis zu einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 20 km/h eine Leistung von 114 kW zur Verfügung steht. Ab einer Fahrzeuggeschwindigkeit größer 20 km/h erhöht sich die zur Verfügung stehende Leistung linear auf bis zu 144 kW, die erstmalig bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 24 km/h erreicht werden.

Die maximale Leistung im elektromagnetischen Teil der Variatorsektion wird gemäß Anforderungsliste auf 100 kW festgelegt. Um für die Auslegung des Drehmomentes auf der konservativ sicheren Seite zu sein, wird der größte für das Getriebe infrage kommende Hinterachsreifen mit einem Reifenradius von 1,0 m [Dee19c] und einer dazugehörigen Radnabenübersetzung von 6,4 sowie einer Kegelradübersetzung auf das Hinterachsdifferential von -4,154 gewählt [Dee13]. Diese Werte stammen von einem John-Deere-Traktor der Baureihe 6150R, die mechanisch identisch mit der Baureihe 6155R ist, da diese durch eine Anpassung des Motors Mitte 2015 aus Ersterer hervorging, um den gestiegenen Abgasanforderungen Rechnung zu tragen. Im Zuge dieser Anpassung konnte die Nennleistung des Traktors 6150R von 150 PS auf 155 PS erhöht werden, woraus sich die Namensänderung ergab [Ash17]. Mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 11750 kg [Dee19c] und dem Auslegungsreibbeiwert zwischen Reifen und Untergrund von 0,635 [Ste77] ergibt sich damit eine maximal auf den Boden übertragbare Zugkraft von 73,2 kN und damit ein auf der Getriebeausgangswelle (vor dem Hinterachsdifferenzial) auftretendes Auslegungs-drehmoment von 2866 Nm. Für den Rückwärtsgang wird an dieser Stelle vereinfachend davon ausgegangen, dass er in Vorgelegebauweise mit einem Übersetzungsverhältnis von 1 realisiert wird. Diese Annahme erspart die Berechnung der Rückwärtsfahrt, da sich alle Werte analog zur Vorwärtsfahrt ergeben.

Das konzipierte Getriebe nach Konzept 1 kann jetzt mit einem Tabellenkalkulationsprogramm mittels Zielwertsuche und durch Anwendung von Makros folgendermaßen berechnet werden: Als Erstes wird das Übersetzungsverhältnis des Anfahranges i_A so berechnet, dass beim Anfahren von der Summenwelle der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe maximal die nach Anforderungsliste erlaubten 950 Nm übertragen werden müssen. Diese Berechnung erfolgt im Punkt des Anfahrens, da hier das Drehmoment der Getriebeausgangswelle bekannt ist. Anschließend wird $i_{0,mag}$ so berechnet, dass der Betriebspunkt des aktiven Stillstandes bei der höchsten zulässigen Drehzahl des elektromagnetischen Feldes liegt. Nun wird $i_{0,mech}$ beliebig innerhalb des nach dem WOLF-Schema zulässigen Bereichs von $0 > i_{0,mech}$ gewählt, wobei aus Gründen der konstruktiven Realisierbarkeit zunächst ebenfalls $i_{0,mech} > -4$ gewählt wird. Die Übersetzung des 2. Ganges i_B wird dann so bestimmt, dass die Relativgeschwindigkeit in der elektrischen Maschine bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 60 km/h und Motornenndrehzahl das nach Anforderungsliste erlaubte Maximum nicht überschreitet. Da diese Berechnung nur eine unabhängige Variable hat ($i_{0,mech}$), kann diese nun systematisch variiert werden und ihr Einfluss auf andere wichtige Auslegungsgrößen wie das maximal in der magnetischen Umlaufgetriebestufe auftretende Drehmoment oder die maximal in der mechanischen Umlaufgetriebestufe auftretende Blindleistung ermittelt werden.

3.3.2 Bedeutung der Ergebnisse der Analyse

Trägt man für WOLF-Schema 2.2 das maximal in der magnetischen Umlaufgetriebestufe auftretende Drehmoment sowie die maximal in der mechanischen Planetenstufe auftretende Leistung, bezogen auf die Motorleistung, über der Standübersetzung der mechanischen Planetenstufe auf, so ergibt sich folgendes Diagramm:

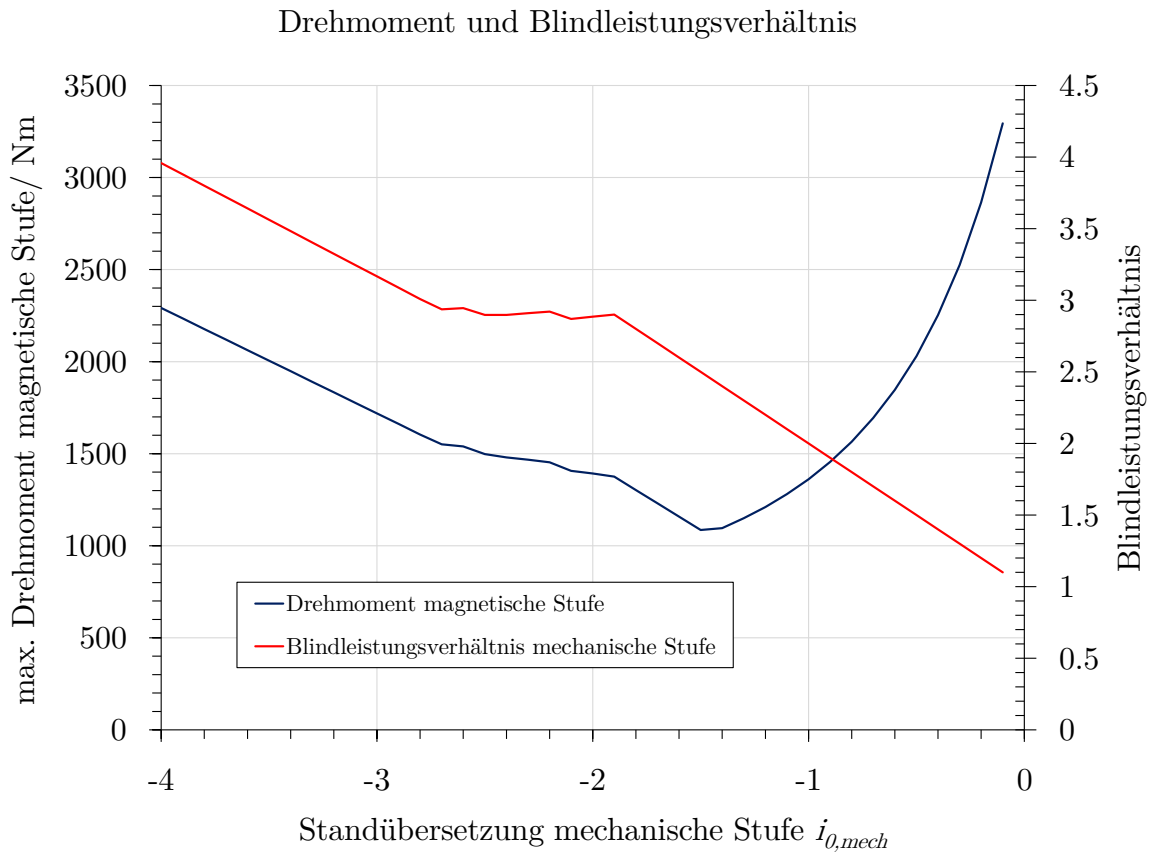


Abbildung 3.6: Maximal in der magnetischen Umlaufgetriebestufe auftretendes Drehmoment und maximal in der mechanischen Umlaufgetriebestufe auftretendes Blindleistungsverhältnis, WOLF-Schema 2.2

In Abbildung 3.6 dargestellt ist das maximal in der magnetischen Umlaufgetriebestufe auftretende Drehmoment, abhängig von der Wahl der Standübersetzung der mechanischen Umlaufgetriebestufe im Bereich $0 > i_{0,mech} > -4$. Der Punkt des maximal in der magnetischen Umlaufgetriebestufe auftretenden Drehmoments findet sich je nachdem, welchen konkreten Wert $i_{0,mech}$ annimmt, in verschiedenen Betriebspunkten. Er tritt nie im ersten Gang auf, da die Übersetzung dieses Ganges, in welchem die mechanische Planetenstufe lastfrei läuft und somit das Getriebe als einfaches Umlaufgetriebe arbeitet, mit dem maximal aus der Anforderungsliste möglichen Drehmoment berechnet wurde und das auftretende Drehmoment somit immer genau dem möglichen Drehmoment entspricht. Er tritt im Synchronpunkt der beiden höheren Gänge $B1$ und $B2$ auf und wird bestimmt von den Blindleistungsverhältnissen in der mechanischen Planetenstufe, die wiederum von deren Standübersetzung abhängen. Das maximal in der magnetischen Umlaufgetriebestufe auftretende Drehmoment kann daher nicht aus der Wahl der Übersetzung des ersten Ganges

alleine bestimmt werden und seine Höhe in Abhängigkeit der unabhängigen Variable in der Berechnung ist eine wichtige Bewertungsgröße für die weitere Auslegung des Getriebes. Im Bereich von $0 > i_{0,mech} > -1,5$ fällt das maximal in der magnetischen Umlaufgetriebestufe auftretende Drehmoment zunächst hyperbelförmig ab, erreicht bei $-1,5$ dann sein Minimum und steigt anschließend linear wieder an. Der lineare Anstieg wird von einem unregelmäßigen Teil unterbrochen. Dieser entsteht dadurch, dass bereits bei dieser Auslegung die IPM-Funktion des Verbrennungsmotors berücksichtigt wurde. Ist $i_{0,mech} > -1,9$, dann fällt der Synchronpunkt der beiden höheren Gänge in den Bereich, in dem das IPM voll ausgenutzt wird. Das maximal in der magnetischen Stufe auftretende Drehmoment fällt in diesem Bereich mit kleiner werdendem $i_{0,mech}$ zunächst hyperbelförmig ab, bevor es ab einem Wert von $i_{0,mech} < -1,5$ linear ansteigt. Für $-1,9 > i_{0,mech} > -2,7$ fällt der Synchronpunkt der beiden höheren Gänge in den Bereich, in dem das IPM aktiv ist. Mit größer werdendem i_B , was sich aus kleiner werdendem $i_{0,mech}$ ergibt, fällt der Synchronpunkt jetzt in niedrigere Geschwindigkeitsbereiche, wodurch die zur Verfügung stehende Leistung und damit auch das auftretende Drehmoment durch das IPM sinkt. Daher fällt der Anstieg des maximal in der magnetischen Stufe auftretenden Drehmoments mit fallendem $i_{0,mech}$ im Bereich $-1,9 > i_{0,mech} > -2,7$ weniger stark aus, als er es bei konstanter Leistung tun würde. Für $-2,7 > i_{0,mech}$ schließlich fällt der Synchronpunkt der beiden höheren Gänge in den Geschwindigkeitsbereich, in dem IPM nicht genutzt werden kann. Das maximal in der magnetischen Umlaufgetriebestufe auftretende Drehmoment steigt jetzt mit fallendem $i_{0,mech}$ wieder linear an, die Steigung der Geraden entspricht dem linearen Abschnitt zwischen dem Minimum und dem unregelmäßigen, durch IPM verursachten Teil. Weiterhin ist in dem Diagramm der Wert aufgetragen, der sich ergibt, wenn die maximal in einem beliebigen Betriebspunkt auftretende Leistung im mechanischen Planetensatz durch die maximale Motorleistung (mit IPM) geteilt wird. Dieser Wert ist ein Maß für die im mechanischen Planetensatz auftretende Blindleistung. Dieses Verhältnis steigt ausgehend von dem Wert 1 mit fallender Standübersetzung der mechanischen Planetenstufe zunächst linear an. Für $-1,9 > i_{0,mech} > -2,7$ ergeben sich dann durch oben erklärte Effekte Unregelmäßigkeiten im weiteren Verlauf. Für $-2,7 > i_{0,mech}$ schließlich steigt das Leistungsverhältnis in der mechanischen Planetenstufe mit fallendem $i_{0,mech}$ wieder linear an, die Steigung der Geraden entspricht dem linearen Abschnitt von $0 > i_{0,mech} > -1,9$. Es ist klar zu erkennen, dass das Leistungsverhältnis in der mechanischen Planetenstufe mit steigendem Betrag der Standübersetzung ebenfalls steigt. Im Sinne der Minimierung der auftretenden Blindleistung ist daher gefordert, das Standgetriebeübersetzungsverhältnis der magnetischen Umlaufgetriebestufe betragsmäßig so klein wie möglich zu wählen, dass dabei noch die Anforderung von 950 Nm Drehmoment in der magnetischen Umlaufgetriebestufe eingehalten wird. Aus dem Verlauf des maximal in der magnetischen Umlaufgetriebestufe auftretenden Drehmoments lässt sich erkennen, dass die Anforderung von maximal 950 Nm Drehmoment an der Summenwelle nicht eingehalten werden kann. Zur weiteren Untersuchung ist daher für die Auslegung der Punkt zu wählen, in dem das maximal in der magnetischen Umlaufgetriebestufe auftretende Drehmoment sein Minimum aufweist. Es ist dann zu untersuchen, ob das in der Anforderungsliste festgelegte maximale Drehmoment gegebenenfalls durch günstige Auslegung der magnetischen Umlaufgetriebestufe erhöht werden kann. Für die weitere Untersuchung wird daher $i_{0,mech} \approx -1,5$ gewählt. Das Übersetzungsverhältnis der magnetischen Umlaufgetriebestufe ergibt sich dadurch zu $i_{0,mag} = -2,25$.

3.3.3 Vergleich des gefundenen Konzeptes mit existierenden Stufenlosgetrieben

Das gefundene und weiter verfolgte Konzept bietet sich auf dem Abstraktionsgrad des WOLF-Schemas für einen Vergleich mit den in Unterabschnitt 2.1.7 vorgestellten hydraulisch leistungsverzweigten Stufenlosgetrieben an. Zeichnet man von dem dort vorgestellten Getriebe ZF TerraMatic (Abbildung 2.3) das WOLF-Schema im ersten Gang, so ergibt sich folgendes Bild:

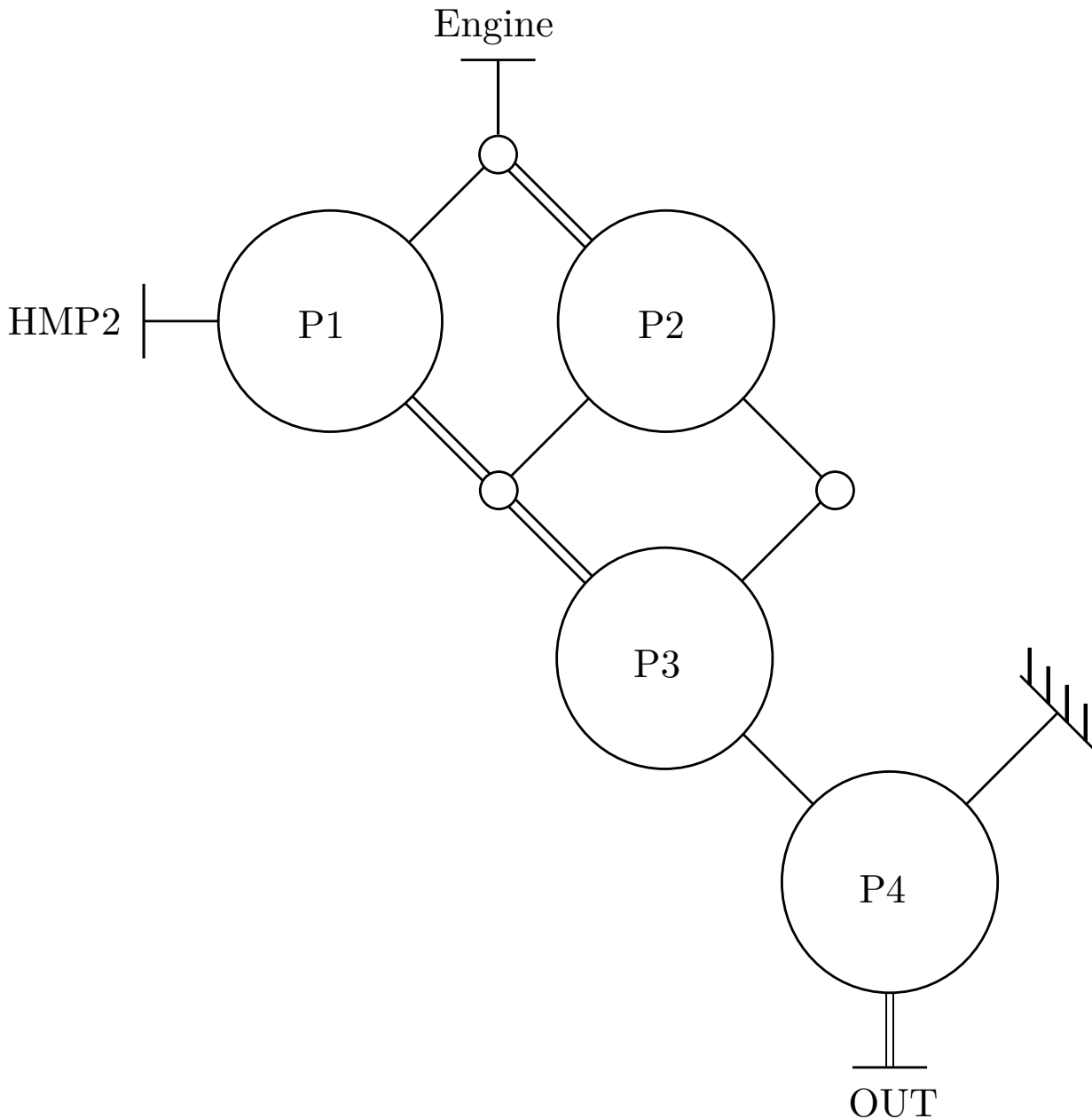


Abbildung 3.7: WOLF-Schema Planetensätze Stufenlosgetriebe ZF TerraMatic, Fahrbereich F1

Abbildung 3.7 zeigt das WOLF-Schema der Planetenwalzen im Stufenlosgetriebe ZF TerraMatic. Isoliert man die ersten beiden Planetensätze, so ist zu erkennen, dass das WOLF-

Schema dem in dieser Arbeit abgeleiteten Schema für WOLF-Schema 2.2 entspricht. Der Hydrostat kann nur in ein Element kontrollierend eingreifen, während der Verbrennungsmotor mit zwei Elementen, einmal über eine Summenwelle und einmal über eine Differenzwelle, verbunden ist. Auch wenn beim ZF TerraMatic die Fahrbereiche nicht durch zwei voneinander unabhängige Ausgangswellen aus einem Variator realisiert werden, sondern die beiden Ausgänge abhängig vom gewählten Gang durch verschiedene Kupplungen nochmals miteinander kombiniert werden, um die gewünschten Ausgangsdrehzahlen zu erreichen, soll an dieser Stelle die Ähnlichkeit zum WOLF-Schema 2.2 hervorgehoben werden. Die in Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5 gezeigten Getriebe weisen große Ähnlichkeiten bezüglich des Variators auf, der sich als Teil des Getriebes isolieren lässt. Das WOLF-Schema dafür sieht wie folgt aus:

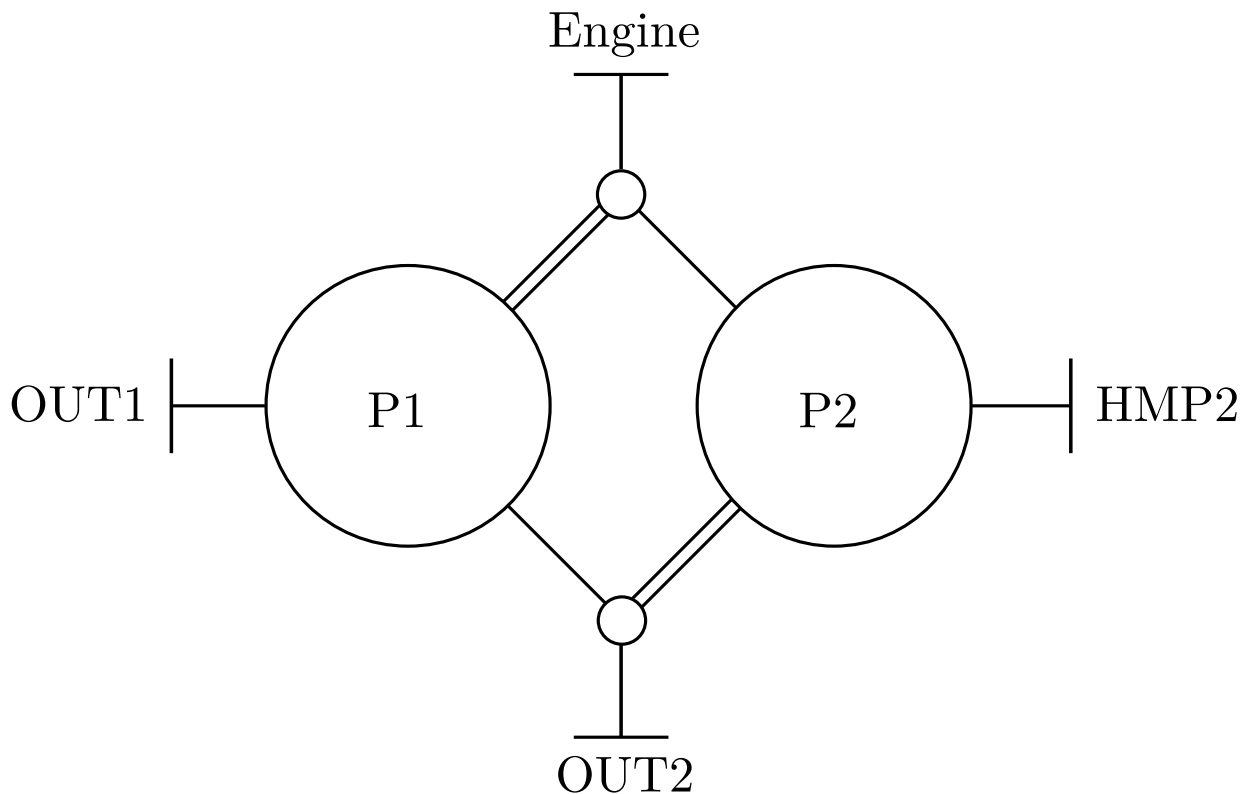


Abbildung 3.8: WOLF-Schema der Variatorsektion hydrostatisches Stufenlosgetriebe für die Baureihen Case IH Maxxum, Puma und Magnum sowie New Holland T6, T7 und T8

Abbildung 3.8 zeigt das WOLF-Schema der Variatorsektion des hydrostatischen Stufenlosgetriebes für die Baureihen Case IH Maxxum, Puma und Magnum sowie New Holland T6, T7 und T8. Dieses stimmt mit dem WOLF-Schema 2.2 überein. Das Baukastengetriebe von Case IH und New Holland verwendet eine Variatorsektion bestehend aus einem reduzierten Planetensatz, der auch als zwei einzelne Planetensätze angesehen werden kann, von denen einer eine Plusgetriebestufe und der andere eine Minusgetriebestufe ist. Die Sonne, die mit dem Verbrennungsmotor verbunden ist, ist einmal Differenzwelle in der Minusgetriebestufe, die aus der großen Sonne, dem Doppelplaneten auf dem Planetenträger und dem mit dem Hydrostaten verbundenen Hohlrad besteht, und einmal Summenwelle in der Plusgetriebestufe, die aus der großen Sonne, dem Doppelplaneten auf dem Planetenträger und der kleinen

Sonne besteht. Der Hydrostat kann damit nur ein Element einer Planetenstufe kontrollieren, während der Verbrennungsmotor mit zwei Elementen verbunden ist, einmal über eine Summenwelle und einmal über eine Differenzwelle. Beide Getriebe des Getriebebaukastens von Case IH und New Holland verfügen über zwei komplett unabhängige Variatorausgangswellen, von denen immer nur eine Leistung führt, während die andere ausgangsseitig kein Drehmoment abgibt, sondern höchstens – im Falle der Koppelwelle – Leistung zwischen den beiden Planetenstufen transferiert. Die Tatsache, dass die sich im Serieneinsatz befindlichen Stufenlosgetriebe das gleiche bzw. ein ähnliches WOLF-Schema verwenden wie das für das im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchende Getriebe, legt nahe, dass die Synthese für ein Getriebe mit einer solchen Charakteristik sehr stark determiniert ist und so immer zu ähnlichen Ergebnissen und damit auch Konzepten führt. Sie lässt weiterhin vermuten, dass die Überlegungen zu den auftretenden deutlich höheren Drehmomenten und zur Leistungslimitierung des variablen Pfades im alternativ möglichen WOLF-Schema 2.1 korrekt sind und auch von anderen Herstellern erkannt wurden.

Für das in Abbildung 2.6 gezeigte Jarchow-Getriebe ergibt sich, dass eine derartige Ausführung der Anschlusswellen mit einem Getriebe, wie es im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden soll, nicht möglich ist, da der Stator der elektrischen Maschine keine mechanisch drehende Welle antreibt die mit zwei Elementen verbunden werden könnte, sondern ein elektromagnetisches Drehfeld erzeugt. Um dieses Drehfeld in zwei voneinander unabhängigen magnetischen Umlaufgetriebestufen zu nutzen, müsste folglich der Rotor und der Modulationsring je zweimal vorhanden sein und der Stator darüber hinaus in seiner axialen Länge verdoppelt werden, was dem Einsatz von zwei elektrischen Maschinen gleichkommt. Diese Möglichkeit soll aus Kostengründen nicht betrachtet werden. Auf die Darstellung eines WOLF-Schemas für das gezeigte Jarchow-Getriebe wird daher an dieser Stelle verzichtet. Das im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Getriebe soll dennoch mit einem Jarchow-Getriebe verglichen werden, um sicherzustellen, dass nicht mit einem solchen Stufenlosgetriebe deutliche Vorteile erreicht werden können, die konstruktionsbedingt für das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Getriebe dann nicht nutzbar wären. Einer der Vorteile eines Jarchow-Getriebes ist, dass die beiden eingesetzten Umlaufgetriebestufen kinetisch unabhängig voneinander sind. Das bedeutet, dass immer nur eine der beiden Stufen mit Drehmoment belastet ist, während die Drehmomente an der anderen Stufe an allen drei Elementen 0 sind. Dies führt dazu, dass zwischen den beiden Umlaufgetriebestufen keine zirkulierende Blindleistung auftreten kann, die durch die dann in den Planetenstufen wirkenden Drehmomente zusätzliche Verluste verursacht. Blindleistung im Jarchow-Getriebe kann dennoch entsprechend der Charakteristik von eingangsgekoppelten Strukturen über den variablen Pfad auftreten. Nachteilig beim Jarchow-Getriebe ist, dass sich konzeptbedingt beim Anfahren sehr hohe Drehzahlen am die Ausgangsdrehzahl kontrollierenden Element ergeben, da mit dem in der jeweiligen Umlaufgetriebestufe die höchste Drehzahl aufweisenden Element die Ausgangsdrehzahl 0 bei konstanter Motordrehzahl realisiert werden muss. Das kontrollierende Element ist an die Umlaufgetriebestufen meist zusätzlich über eine Stirnradstufe angeschlossen, die deren Drehzahl nochmals erhöht, um das benötigte Drehmoment zu senken. Hieraus ergeben sich hohe, über den variablen Pfad zirkulierende Blindleistungen und damit niedrige Wirkungsgrade beim Anfahren. Während die niedrigen Wirkungsgrade beim Anfahren durch die lastunabhängigen Verluste eines Antriebsstrangs nicht weiter ins Gewicht fallen, so dominiert die beim Anfahren auftretende Blindleistung beim Jarchow-Getriebe die Auslegung des variablen Pfades und damit dessen Verlustcha-

rakteristik im gesamten Getriebebetriebsbereich. Die Verluste fallen dann auch bei höheren Geschwindigkeiten hoch aus, da der variable Pfad – auch wenn dann nicht mehr so viel Leistung über den variablen Pfad fließt wie beim Anfahren – durch die Überdimensionierung jetzt erhöhte Verluste verursacht. Dieser Nachteil kann umgangen werden, indem das Getriebe mit einem zusätzlichen – üblicherweise seriell hydraulisch ausgeführtem – Anfahrang ausgestattet wird (Kriechgang). Dieser kommt im traktionslimitierten Bereich zum Einsatz, in dem die auf den Boden übertragbare Zugleistung geringer als die über den variablen Pfad maximal übertragbare Leistung ist. Bei geschickter Auslegung ermöglicht es dieser Anfahrang, die im variablen Pfad benötigte Maximalleistung gegenüber einem System ohne Kriechgang ungefähr auf den Faktor 0,5 zu reduzieren. Dies hat bedeutende Vorteile hinsichtlich des Wirkungsgrades bei höheren Geschwindigkeiten zur Folge. Der serielle Gang wird konstruktiv realisiert, indem der Verbrennungsmotor vom festen Pfad des Getriebes getrennt wird und nur noch Leistung in den variablen Pfad einspeisen kann. Das Getriebe wird durch Schließen mehrerer ausgangsseitiger Kupplungen oder Einlegen von zwei ausgangsseitigen Synchronisierungen so verschaltet, dass die Ausgangsdrehzahl des variablen Pfades direkt proportional zur Ausgangsdrehzahl des Getriebes ist. So kann dann seriell hydraulisch angefahren werden. Diese Möglichkeit ist in Abbildung 2.6 gegeben, indem die Kupplung K geöffnet und dann gleichzeitig beispielsweise die Synchronisierungen für F_1 und F_2 eingelegt werden.

3 Konzeption einer magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Umlaufgetriebebestufe

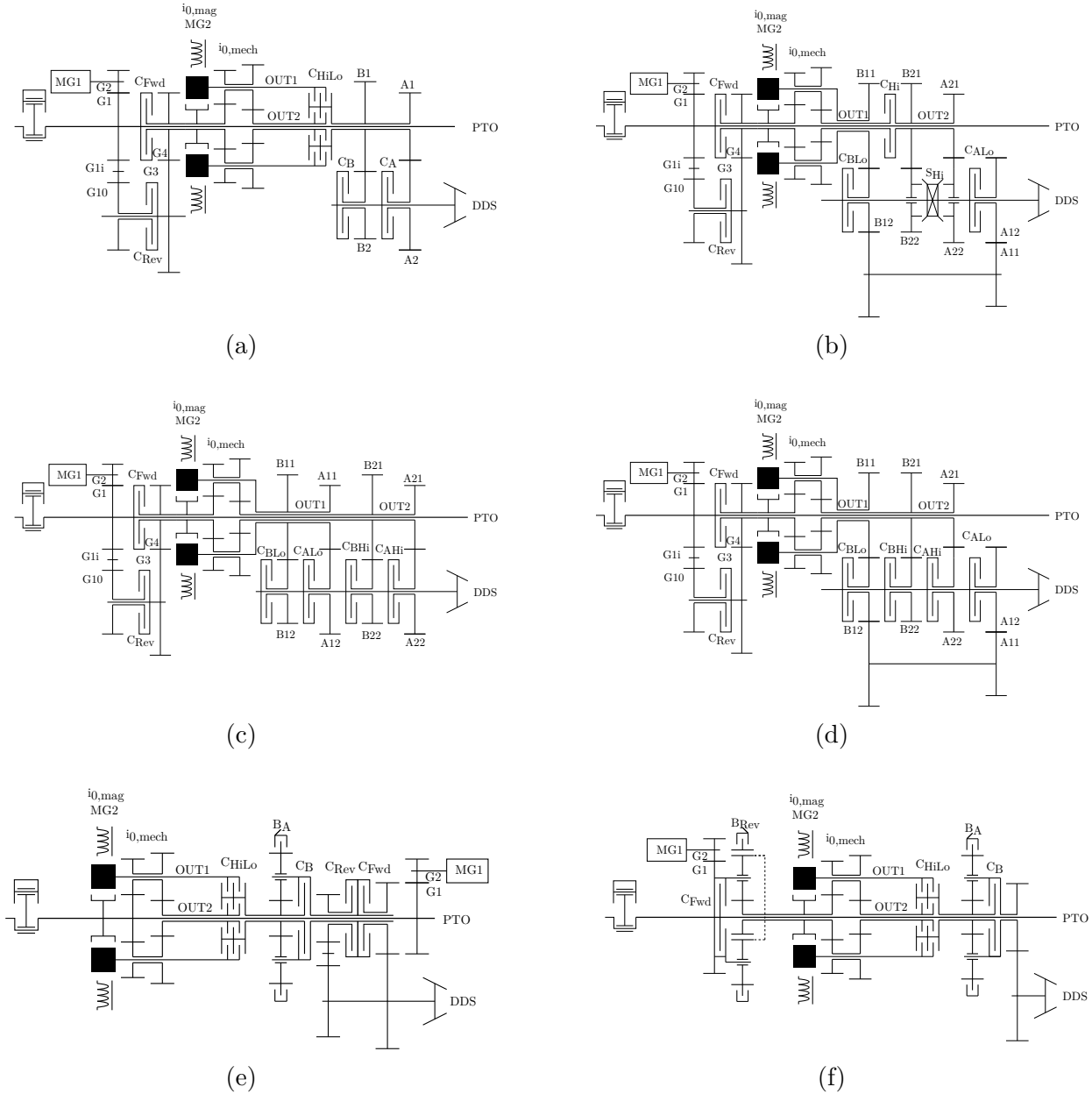


Abbildung 3.9: Strichdiagramme von möglichen Realisierungen als Traktorgetriebe, WOLF-Schema 2.2

Abbildung 3.9 zeigt Strichdiagramme möglicher konstruktiver Umsetzungen von WOLF-Schema 2.2. Auf der linken Seite jedes Konzeptes ist der Dieselmotor dargestellt, während rechts der Durchgang zur Zapfwelle und die Getriebeausgangswelle mit Kegelrad zu erkennen ist. Daran angeschlossen ist über die Stirnradstufe $G1/G2$ die erste elektrische Maschine $MG1$. Die Räderkette $G1$, $G1i$, $G10$, $G3$ und $G4$ bildet zusammen mit den nasslaufenden Lamellenkupplungen C_{Fwd} und C_{Rev} bei den Ausführungen nach Abbildung 3.9a, Abbildung 3.9b, Abbildung 3.9c und Abbildung 3.9d den Rückwärtsgang in Vorgelegebauweise. Alternativ ist der Rückwärtsgang auch als hinteres Modul im Getriebe wie bei Ausführung nach Abbildung 3.9e oder als Planetensatz wie bei Ausführung nach Abbildung 3.9f realisierbar. Für alle Ausführungen gleich ist die Variatorsektion nach WOLF-Schema 2.2, welche

aus der magnetischen Umlaufgetriebestufe mit integrierter zweiter elektrischer Maschine $MG2$ und Standübersetzung $i_{0,mag}$ und aus der mechanischen Umlaufgetriebestufe mit der Sonne S , den Planeten P , und dem Hohlrad R besteht. Die beiden lastschaltbaren Gänge, die hinter dem Variatormodul angeordnet sind, können auf verschiedene Arten konstruktiv realisiert werden. Die Übersetzungen der Gänge sind durch die Stirnradstufen $A1/A2$ bzw. bei verschiedenen Übersetzungsverhältnissen $A11/A12$ und $A21/A22$ sowie $B1/B2$ bzw. $B11/B12$ und $B21/B22$ umgesetzt. Die Möglichkeit, im Bedarfsfall jederzeit von jedem Gang in jeden anderen schalten zu können, wird durch die Kupplungen C_A und C_B sowie innerhalb der Gänge für die beiden Ausgangswellen des Variators durch die Kupplungen C_{Hi} und C_{Lo} sichergestellt. Die beiden Ausgangswellen des Variators können auch – da sie nie gleichzeitig aktiv sein können – durch eine Doppelkupplung C_{HiLo} geschaltet werden wie in den Ausführungen nach Abbildung 3.9a, Abbildung 3.9e und Abbildung 3.9f dargestellt. Wird Gang A nicht durch eine Kupplung, sondern mit einer Bremse realisiert, erfolgt eine Umbenennung zu B_A . Analog werden die Kupplungen mit C_{ALo} , C_{AHi} , C_{BLo} und C_{BHi} bezeichnet, wenn für die Gänge vier verschiedene Übersetzungsverhältnisse und damit vier unabhängige Kupplungen, die nicht gleichzeitig betätigt werden, zum Einsatz kommen. Gegebenenfalls können Kupplungen auch durch Synchronringe ersetzt werden, wie in Ausführung nach Abbildung 3.9b dargestellt. Damit entfällt die Möglichkeit, jederzeit von jedem Gang in jeden anderen schalten zu können, da eine Umschaltung von den beiden mit dem Synchronring betätigten Gängen mehr Zeit in Anspruch nimmt als eine Umschaltung von einem mit einer Kupplung betätigten Gang in einen anderen, mit einer unabhängigen anderen Kupplung betätigten Gang. Diese Möglichkeit sei daher nur der Vollständigkeit halber hier aufgeführt. Den Ausgang des Getriebes bildet das Kegelrad des Hinterachsdifferenzials. Es lässt sich zeigen, dass eine Verringerung der auftretenden Blindleistung erreicht werden kann, wenn eine Konfiguration verwendet wird, die es ermöglicht, die Übersetzungen der beiden Stirnradstufen des A -Ganges unterschiedlich voneinander zu wählen, während die Übersetzungen der beiden Stirnradstufen des B -Ganges identisch sind. Dies führt zu einer Verschiebung lediglich des Schaltpunktes von A nach B , der für die auftretenden hohen Blindleistungen maßgeblich ist. Eine solche Umsetzung der Übersetzungsverhältnisse ist zum Beispiel mit den Ausführungen nach Abbildung 3.9c und Abbildung 3.9d möglich.

3.3.4 Analyse und Abschätzung des Wirkungsgrades

Um Empfehlungen zum zukünftigen Einsatz eines Getriebes mit magnetisch-elektrischer Umlaufgetriebestufe geben zu können, ist eine Betrachtung des Wirkungsgrades unabdingbar. Die Betrachtung des Wirkungsgrades soll in verschiedenen Stufen ablaufen: Zunächst sollen die Wirkungsgrade vereinfachter hydrostatischer Getriebe berechnet werden, die in ihrer grundlegenden Struktur den Stufenlosgetrieben von ZF bzw. Case IH und New Holland ähnlich sind. Anschließend soll für diese beiden Getriebe der Wirkungsgrad berechnet werden, der sich ergeben würde, wenn man anstelle der Hydrostateinheiten elektrische Maschinen verwenden würde. Es entstehen so fiktive elektrische Stufenlosgetriebe (feIVT). Betrachtungen zum Bauraum sollen hierbei außen vor bleiben und die Analyse soll auf eine akademische Betrachtung des Wirkungsgrades reduziert werden, selbst wenn eine spätere konstruktive Realisierung eines sich daraus ergebenden Konzeptes nicht möglich erscheint. Danach soll der Wirkungsgrad für das im Rahmen dieser Arbeit gefundene Getriebe mit einer magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe berechnet werden, wobei die gefunde-

ne Variatorsektion den Kern darstellt, der auch die Verlustcharakteristik und damit die Charakteristik des Wirkungsgrades bestimmt. Für die Elemente des Getriebes, die nicht den Kern der Arbeit abbilden wie zum Beispiel die Reversiereinheit oder das Gruppengetriebe, sollen Vereinfachungen getroffen werden. Da Reversieren und Gruppenwechsel im einfachsten Fall – zu sehen bei den Getrieben von Case IH und New Holland – nur zusätzliche Zahneingriffe bedeuten, haben diese nur einen Einfluss auf die absolute Höhe des Wirkungsgrades, nicht aber auf dessen Charakteristik, die maßgeblich von dem Betriebsverhalten der Planetenstufen und den Verlusten des variablen Pfades bestimmt wird. Die berechneten Wirkungsgrade der hydrostatischen Getriebe und der fiktiven elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetriebe sollen dann mit dem berechneten Wirkungsgrad des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Getriebes verglichen werden. Da für die hydrostatischen Getriebe teilweise Messergebnisse zum Wirkungsgrad vorliegen, sollen diese Ergebnisse ebenfalls dargestellt werden, um die Korrektheit der Berechnungsergebnisse, insbesondere im Bezug auf die Charakteristiken der Wirkungsgrade zu belegen. Für die Berechnung der Wirkungsgrade werden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Alle Getriebe werden am gleichen Motor und im gleichen Traktor betrieben.
- Alle Getriebe verwenden die gleiche Endübersetzung in den Radnaben und die gleichen Reifen, eventuelle Unterschiede zwischen den Getrieben hinsichtlich der Auslegung der im Getriebe auftretenden Drehzahlen werden durch unterschiedliche Kegelraddifferenzialübersetzungen (Übersetzung von der Getriebeausgangswelle auf die Hinterachse) realisiert.
- Verluste für Kühlung und Hilfsantriebe werden nicht betrachtet. Diese Vereinfachung ergibt sich durch das Verfahren, nach dem die gemessenen und vorliegenden Wirkungsgrade ermittelt wurden. Die DLG bestimmt den Antriebsstrangwirkungsgrad wie folgt: Zunächst wird für alle Fahrgeschwindigkeiten die maximale Zapfwellenleistung gemessen. Anschließend wird für alle Fahrgeschwindigkeiten die Zugleistung gemessen und durch die bei gleicher Geschwindigkeit erreichte Zapfwellenleistung geteilt [Wil16]. Da die Zapfwelle in den betrachteten Getrieben direkt mit dem Verbrennungsmotor und damit auch mit der Getriebeeingangswelle verbunden ist, sind hier die Verluste für Kühlung und Hilfsantriebe auch nicht berücksichtigt, da sie schon vor der Getriebeeingangswelle anfallen. Daher bietet es sich im Rahmen dieser Arbeit an, die für Kühlung und Hilfsantriebe anfallenden Verluste im Rahmen des Triebstrangwirkungsgrades nicht zu betrachten. Dies führt zusätzlich zu Vorteilen bei der Vergleichbarkeit mit der Zielvorgabe von Renius [Ren94], bei der der Volllast-Triebstrangwirkungsgrad ebenfalls als Quotient der Radnabenleistung und der Getriebeeingangsleistung gebildet wird.
- Die Berechnung der Verluste erfolgt ohne Iteration. Um Verluste korrekt zu berechnen, muss die Berechnung iterativ erfolgen. So führen zum Beispiel die in der ersten Verzahnungsstufe auftretenden Verluste dazu, dass das in der zweiten Verzahnungsstufe auftretende Drehmoment niedriger ist als bei verlustfreier Berechnung und damit die Verluste in der zweiten Verzahnungsstufe bereits niedriger ausfallen. Hierauf wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Die Verluste im Getriebe werden so berechnet, dass das Drehmoment an jedem Getriebeelement mittels Matrix-Rechenverfahren verlustfrei berechnet wird und damit dann die Verluste an jedem Getriebeelement

berechnet werden. Die Verluste werden dann aufaddiert und von der im jeweiligen Betriebspunkt zur Verfügung stehenden Leistung abgezogen bzw. der benötigten Leistung hinzuaddiert, wenn der Betriebspunkt unterhalb der maximal möglichen Motorleistung liegt, was vor allem im zugkraftlimitierten Bereich der Fall ist. Hierdurch ergeben sich leicht höhere lastabhängige Verluste als in Realität, der Fehler ist aber für die verschiedenen Konzepte ähnlich hoch und ermöglicht daher eine Vergleichbarkeit.

- Lagerverluste werden nicht betrachtet. Lager verursachen Verluste durch Reibung und durch Schmierung. Die Reibungsverluste sind lastabhängig, während die Schmierungsverluste weitgehend lastunabhängig sind und nur von der Drehzahl bzw. Relativgeschwindigkeit der betrachteten Komponenten abhängen [LN94]. Der Aufwand zur Ermittlung der Verluste in Lagern ist unverhältnismäßig hoch, da hierfür neben dem Strichdiagramm die Einbausituation der Lager – insbesondere zum Bestimmen von Relativgeschwindigkeiten – und der Lagertyp sowie eventuell weitere Parameter wie Vorspannung bekannt sein müssen. Daher wird auf die Berechnung der Lagerverluste verzichtet. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch die gleichen Anforderungen an die verschiedenen Getriebe die Verluste aus Lagern in etwa gleich hoch ausfallen. Dies stellt sicher, dass die berechneten Wirkungsgrade untereinander weiterhin vergleichbar sind, auch wenn sich gegenüber den gemessenen Wirkungsgraden hierdurch ein Fehler einstellt. Der Fehler führt dazu, dass die berechneten Verluste niedriger ausfallen als die tatsächlichen Verluste, was sich teilweise mit dem Fehler aus der vorhergegangenen Erklärung zur nichtiterativen Berechnung der lastabhängigen Verluste kompensiert.
- Vereinfachend werden alle Getriebe betrachtet, als wären alle Schaltelelemente nasslaufende Lamellenkupplungen. Die Platzierung der Lamellenkupplungen in den jeweiligen Getrieben wird im nachfolgenden Abschnitt thematisiert. Diese Vereinfachung ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit der verschiedenen Konzepte, da eventuelle Unterschiede in der Kupplungsauslegung und der Einsatz von Synchronisierungen nicht betrachtet werden müssen. Der Einsatz von nasslaufenden Lamellenkupplungen für jedes Schaltelement ermöglicht es, jederzeit – beispielsweise in einer kritischen Fahrsituation – von einem beliebigen Gang in einen beliebigen anderen Gang zu schalten, was mit Synchronisierungen üblicherweise nicht möglich ist. Im Sinne einer universal einsetzbaren Fahrstrategie mit möglichst vielen Freiheiten sind unabhängige, nasslaufende Lamellenkupplungen den Synchronisierungen zunächst vorzuziehen. Im weiteren Entwicklungsverlauf der betrachteten Getriebe ist dann ein Ersatz der nasslaufenden Lamellenkupplungen durch Synchronringe aus Kosten- und Effizienzgründen bei gleichzeitiger Einschränkung der Fahr- und Schaltstrategie denkbar.
- Vereinfachend werden die Wirkungsgrade aller Getriebe nur im Vorwärtsbetrieb berechnet und das Strichdiagramm für die Verlustberechnung für die jeweiligen Getriebe wird so gestaltet, dass es keinen Rückwärtsgang aufweist. Dies beschleunigt die Berechnung. Zum jetzigen Zeitpunkt sei davon ausgegangen, dass der Rückwärtsgang für jedes Getriebe in Vorgelegebauweise realisiert werden kann und die Wirkungsgrade bei Rückwärtsfahrt sich daher aus den entsprechenden Wirkungsgraden bei Vorwärtsfahrt durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor für die zusätzlichen Zahneingriffe ergeben. Die für den Vorwärts- und Rückwärtsgang nötigen Kupplungen werden als

Verluste verursachende Elemente gemäß dem im nächsten Abschnitt vorgestellten Modell berücksichtigt.

Verlustmodell offene Lamellenkupplungen

Geöffnete Kupplungen verursachen Verluste durch Ölscherung zwischen den Kupplungs-scheiben und Kupplungslamellen. Die Berechnung und Simulation dieser Verluste ist häufig Gegenstand von Diskussionen in der Fachliteratur und bietet aufgrund ihrer Komplexität genug Potenzial für dezidierte Forschungsarbeiten zu diesem Thema. Eine detaillierte Berechnung der Verluste in offenen Lamellenkupplungen kann daher im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen. Eine vereinfachte Umsetzung der Verluste offener Lamellenkupplungen ist umsetzbar. Hierzu wird davon ausgegangen, dass die Verluste in offenen Lamellenkupplungen ausschließlich linear abhängig von der Differenzgeschwindigkeit zwischen den Kupplungslamellen sind (newtonsches Modell). Die Integration in die Gesamtverluste der betrachteten Getriebe folgt folgendem Schema: Für jedes Getriebe wird angenommen, dass alle Gänge über Kupplungen und nicht über Synchronringe geschaltet werden. Ein Getriebe, in welchem die Gänge mit Synchronringen vorgewählt werden, hat Nachteile gegenüber einem Getriebe, in welchem die Gänge über unabhängige Kupplungen geschaltet werden, da bei der Verwendung von Synchronringen die beiden mit einem gemeinsamen Synchronring geschalteten Gänge nicht unter Last gewechselt werden können. Dafür ergeben sich bei der Verwendung von Synchronringen gegenüber Kupplungen üblicherweise leichte Vorteile im Bezug auf die Verlustleistung. Um die Getriebe bezüglich ihrer Funktionalität und Flexibilität und ihrer Verluste vergleichbar zu machen wird daher an dieser Stelle vereinfachend angenommen, dass alle Gänge über unabhängige, nasslaufende Lamellenkupplungen geschaltet werden, auch wenn dies im vorliegenden realen Getriebe nicht der Fall ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass Synchronringe in den betrachteten Getrieben (z. B. in dem Getriebe von Case IH und New Holland aus Abbildung 2.4) Verluste verursachen, die charakteristisch mit denen einer offenen Lamellenkupplung vergleichbar sind und damit den Wirkungsgrad in erster Linie nur in seiner Höhe und nicht in seiner Charakteristik beeinflussen. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass die Fahrkupplung eines jeden Getriebes am Getriebeeingang realisiert ist und jedes Getriebe einen in Vorgelegebauweise realisierten Rückwärtsgang aufweist, dessen Kupplung im Vorwärtsbetrieb stets eine Relativedrehzahl zwischen den Lamellen aufweist, die der doppelten Motordrehzahl entspricht. Für die Eingangskupplung – da deren Drehzahl und Drehmoment in jedem betrachteten Getriebe gleich ist – wird dann ein Kennwert errechnet, der die Abhängigkeit der Verluste von der Relativedrehzahl wiedergibt. Dieser Kennwert wird dann für alle Kupplungen in den betrachteten Getrieben angesetzt, um deren Verluste in erster Näherung zu berechnen. Hierbei sei davon ausgegangen, dass alle Kupplungen für die jeweiligen Gänge bei Zahnradpaaren immer an dem Zahnrad realisiert werden, welches das kleinere Drehmoment aufweist, falls deren Anordnung nicht wie z. B. bei Inline-Getrieben wie dem ZF TerraMatic (Abbildung 2.3) festgelegt ist. Damit ist sichergestellt, dass die maximalen an der Kupplung auftretenden Drehmomente im Bereich des an der Eingangskupplung auftretenden Drehmomentes liegen und der an dieser Kupplung ermittelte Kennwert damit realistisch ist. Würden Kupplungen bei Zahnradpaaren am Zahnrad mit dem größeren Drehmoment platziert, so würden diese eine geringere Relativgeschwindigkeit als bei Platzierung am Zahnrad mit dem kleineren Drehmoment aufweisen, dafür müssten sie aber über eine größere Reibfläche verfügen, was den Kennwert der drehzahlabhängigen Verluste vergrößern

würde. Die Festlegung, Kupplungen bei Zahnradpaaren am Zahnrad mit dem geringeren Drehmoment zu realisieren, führt weiterhin dazu, dass verschiedene Konzepte auf einer einheitlichen und unverfälschten Basis miteinander verglichen werden können und stellt eine mögliche spätere Automatisierung des Berechnungsverfahrens sicher.

Nach [Rao10] kann das Verlustmoment offener Lamellenkupplungen im newtonschen Bereich berechnet werden zu:

$$M_f = \frac{1}{2} N_{RF} \frac{\pi \mu}{h} (r_a^4 - r_i^4) (\omega_{SL} - \omega_{BL}) \quad (3.8)$$

wobei N_{RF} die Anzahl der Reibflächen, μ die dynamische Viskosität des Öls in der Kupplung, h das Lüftspiel, r_a der Außenradius und r_i der Innenradius der Reibflächen und ω_{SL} die Winkelgeschwindigkeit der Stahllamellen sowie ω_{BL} die Winkelgeschwindigkeit der Belaglamellen ist. Die hintere Klammer steht damit für die Relativgeschwindigkeit in der Kupplung. Als Öl kommt in Traktoren der John Deere GmbH & Co. KG ein eigens entwickeltes Multifunktionsöl zum Einsatz. Da dessen Daten für eine Veröffentlichung in einem akademischen Kontext nicht geeignet sind, werden stattdessen die Daten eines Öls verwendet, welches die Werksnorm J20C erfüllt und welches damit als gleichwertiger Ersatz verwendet werden kann. Es handelt sich um *Divinol Spezialöl HGB* des Herstellers Zeller + Gmelin, welches die folgenden Kennwerte aufweist [Zel19]:

- kinematische Viskosität bei 40 °C $\nu_{40^\circ\text{C}}: 60 \text{ mm s}^{-1}$
- kinematische Viskosität bei 100 °C $\nu_{100^\circ\text{C}}: 9,6 \text{ mm s}^{-1}$
- Dichte (bei 15 °C) $\rho: 875 \text{ kg m}^{-3}$

Die entsprechenden dynamischen Viskositäten ergeben sich bei als konstant angenommener Dichte dadurch zu:

$$\mu_{40^\circ\text{C}} = \nu_{40^\circ\text{C}} \cdot \rho \quad (3.9)$$

$$\mu_{40^\circ\text{C}} = 60 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1} \cdot 875 \text{ kg m}^{-3} = 52,5 \text{ mPa s} \quad (3.10)$$

$$\mu_{100^\circ\text{C}} = \nu_{100^\circ\text{C}} \cdot \rho \quad (3.11)$$

$$\mu_{100^\circ\text{C}} = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1} \cdot 875 \text{ kg m}^{-3} = 8,4 \text{ mPa s} \quad (3.12)$$

Mit der Gleichung nach Vogel-Cameron [Her14] [Wir12]

$$\mu_\vartheta = A \cdot e^{\frac{D}{\vartheta+C}} \quad (3.13)$$

welche umgestellt werden kann zu

$$\ln A + \frac{D}{\vartheta+C} - \ln \mu_\vartheta = 0 \quad (3.14)$$

kann gefolgert werden:

$$\ln A + \frac{D}{\vartheta_1+C} - \ln \mu_1 = \ln A + \frac{D}{\vartheta_2+C} - \ln \mu_2 \quad (3.15)$$

Für Mineralöle gilt $C = 95^\circ\text{C}$. Hieraus folgt:

$$D = \frac{\ln \mu_1 - \ln \mu_2}{\frac{1}{\vartheta_1+C} - \frac{1}{\vartheta_2+C}} \quad (3.16)$$

$$D = \frac{\ln 52,5 \text{ mPa s} - \ln 8,4 \text{ mPa s}}{\frac{1}{(40^\circ\text{C}+95^\circ\text{C})} - \frac{1}{(100^\circ\text{C}+95^\circ\text{C})}} \quad (3.17)$$

$$D = 804^\circ\text{C} \quad (3.18)$$

3 Konzeption einer magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Umlaufgetriebestufe

wobei sich die Einheit von D aus Gleichung 3.13 per Definition zu $^{\circ}\text{C}$ ergibt. Damit kann A bestimmt werden zu

$$\ln A = \ln \mu_1 - \frac{D}{\vartheta_1 + C} \quad (3.19)$$

$$A = e^{\ln \mu_1 - \frac{D}{\vartheta_1 + C}} \quad (3.20)$$

$$A = \mu_1 \cdot e^{-\frac{D}{\vartheta_1 + C}} \quad (3.21)$$

$$A = 52,5 \text{ mPa s} \cdot e^{-\frac{804^{\circ}\text{C}}{(40^{\circ}\text{C} + 95^{\circ}\text{C})}} = 0,136 \text{ mPa s} \quad (3.22)$$

wobei sich die Einheit von A aus Gleichung 3.13 per Definition zu mPa s ergibt. Jetzt kann die dynamische Viskosität des Öls bei der Getriebeauslegungstemperatur von $\vartheta_3 = 80^{\circ}\text{C}$ [Ste08] aus Gleichung 3.13 berechnet werden zu:

$$\begin{aligned} \mu_3 &= A \cdot e^{\frac{D}{\vartheta_3 + C}} \\ \mu_3 &= 0,136 \text{ mPa s} \cdot e^{\frac{804^{\circ}\text{C}}{(80^{\circ}\text{C} + 95^{\circ}\text{C})}} \\ \mu_3 &= 13,5 \text{ mPa s} \end{aligned}$$

Um den Verlustkennwert der Kupplungen als Verlustleistung pro Relativumdrehung zu bestimmen, wird aus dem Kupplungskatalog des Herstellers Ortlinghaus exemplarisch eine Kupplung ausgewählt, die das vom Verbrennungsmotor maximal aufgebrachte Drehmoment von 724 Nm mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 im schlupffreien Betrieb [Ort19c] übertragen kann. Die für Gleichung 3.8 relevanten Durchmesser r_a und r_i ergeben sich aus einem Datenblatt [Ort19a] zu $r_a = 72 \text{ mm}$ und $r_i = 51 \text{ mm}$, wobei hier die Kupplung *0022-39-Größe-003-00* zum Einsatz kommt, da sie die kleinste Kupplung ist, die im Nasslauf das geforderte Moment unter Beachtung des Sicherheitsfaktors übertragen kann. Die Dicke der Lamellen wird aus einem anderen Datenblatt des gleichen Herstellers [Ort19b] abgelesen zu:

- $b_{SL} = 2,3 \text{ mm}$ für die Stahllamellen und
- $b_{BL} = 2,4 \text{ mm}$ für die Belaglamellen

Mit der aus dem Kupplungsdatenblatt abgelesenen Gesamtlänge des Lamellenpaketes von $b_{ges} = 38 \text{ mm}$ und einem angenommenen Lüftspiel von $h = 0,2 \text{ mm}$ [Kön19] kann damit die Anzahl der Reibflächenpaare berechnet werden zu:

$$N_{RF} = 2 \cdot \frac{b_{ges}}{b_{SL} + b_{BL} + 2 \cdot h} \quad (3.23)$$

$$N_{RF} = 2 \cdot \frac{38 \text{ mm}}{2,3 \text{ mm} + 2,4 \text{ mm} + 2 \cdot 0,2 \text{ mm}} \quad (3.24)$$

$$N_{RF} \approx 15 \quad (3.25)$$

Da jetzt alle Werte bekannt sind, kann das Verlustmoment der Kupplung für die Relativedrehzahl 1 min^{-1} berechnet werden zu:

$$\begin{aligned} M_f &= \frac{1}{2} N_{RF} \frac{\pi \mu}{h} (r_a^4 - r_i^4) (\omega_{SL} - \omega_{BL}) \\ M_f &= \frac{1}{2} \cdot 15 \cdot \frac{\pi \cdot 13,5 \text{ mPa s}}{0,2 \text{ mm}} \cdot [(72 \text{ mm})^4 - (51 \text{ mm})^4] \cdot \left(1 \text{ min}^{-1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} - 0 \right) \\ M_f &= 3,35 \text{ mNm} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Bei der Relativedrehzahl 1 min^{-1} ergibt sich damit die Verlustleistung zu

$$P_{f(n=1 \text{ min}^{-1})} = M_f \cdot \omega \quad (3.27)$$

$$P_{f(n=1 \text{ min}^{-1})} = 3,35 \text{ mNm} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{1}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} \quad (3.28)$$

$$P_{f(n=1 \text{ min}^{-1})} \approx 0,335 \text{ mW} \quad (3.29)$$

Der Verlustkennwert offener Lamellenkupplungen wird damit festgelegt zu 0,335 mW pro Relativedrehung pro Minute bzw. anschaulicher 335 W pro 1000 Umdrehungen pro Minute Differenzdrehzahl. Für die Hinterachsbremse, die eine besondere Rolle bei der Verlustbetrachtung aufweist, wird folgende Festlegung getroffen: Der Verlustkennwert der Hinterachsbremse – gemessen in Verlustleistung pro 1000 Umdrehungen pro Minute der Hinterachse – ergibt sich, indem der Verlustkennwert der offenen Lamellenkupplungen mit dem Betrag der Kegelradübersetzung der Getriebeausgangswelle multipliziert wird. Diese Erhöhung des Kennwertes trägt der Tatsache Rechnung, dass die Hinterachsbremse deutlich niedrigeren Relativedrehzahlen ausgesetzt ist als die Kupplungen im Getriebe und ihre geometrischen Abmessungen aufgrund des deutlich höheren auftretenden Drehmomentes dazu führen, dass der Verlustkennwert deutlich höher ausfällt als in den Kupplungen im Getriebe. Da die Hinterachsbremse gedanklich auf die Getriebeausgangswelle reduziert bzw. transferiert werden kann, ist diese vereinfachte Berechnung des Verlustkennwertes zulässig, sie erspart zudem die erneute, aufwendige Berechnung des speziellen Verlustkennwertes der Hinterachsbremse. Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Kupplungen existieren entweder nicht oder ihre genaue Geometrie ist nicht bekannt, sodass die Berechnung mit dem vereinfachten newtonschen Verfahren und einem einzigen Kennwert für alle Kupplungen an dieser Stelle ein probates Mittel darstellt, welches durch seinen konsistenten Einsatz eine mathematische Vergleichbarkeit der für die jeweiligen Getriebe berechneten Wirkungsgrade sicherstellt.

Verlustmodell elektrische Maschinen und Inverter

Die Verluste eventuell im Getriebe vorhandener elektrischer Maschinen, mit Ausnahme der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe, deren Verluste im nachfolgenden Abschnitt thematisiert werden, werden nach folgendem Modell berechnet: Nach [JHB83] lassen sich durch geschickt gewählte Konzepte bei Leistungsverzweigung in Kombination mit der bei niedrigen Abtriebsdrehzahlen auftretenden Zugkraftlimitierung Konzepte finden, bei denen die bezogene Zweigleistung im variablen Pfad ca. 0,34-mal der maximalen Antriebsleistung des Fahrzeuges beträgt. Um hier eine breitere Anzahl an Konzepten untersuchen zu können und nicht zu stark durch diese bezogene Leistung limitiert zu sein, wird die bezogene Zweigleistung mit dem Sicherheitsfaktor 2 multipliziert und anschließend eine elektrische Maschine gesucht, die eine Nennleistung von

$$P_{el,N} = \frac{P_{var,max}}{P_{mech,max}} \cdot S_F \cdot P_{mech,max} = 0,34 \cdot 2 \cdot 144 \text{ kW} = 97,9 \text{ kW} \quad (3.30)$$

aufweist. Diese erste überschlägige Überdimensionierung der elektrischen Maschinen stellt zudem sicher, dass in einem möglichen Getriebe abhängig vom Betriebspunkt mit den integrierten elektrischen Maschinen zusätzliche elektrische Leistung erzeugt werden kann, um

3 Konzeption einer magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Umlaufgetriebestufe

diese im Bordnetz oder auf Anbaugeräten zur Verfügung zu stellen. Als permanenterregte Synchronmaschine hoher Leistungsdichte, die im Motor- und Generatorbetrieb zur Erzeugung von elektrischer Leistung für eine magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe oder als fiktiver Ersatz für Hydrostaten zur Modellierung eines elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetriebes verwendet werden kann, kommt hier das Modell G185-225 der Firma Schabmüller infrage [Sch19], welches durch die folgenden Kenngrößen charakterisiert ist:

- Nennspannung (dreiphasig): 480 V
- Nennleistung im S1-Betrieb: 106 kW
- Nenndrehzahl: 5500 min^{-1}
- Nenndrehmoment: 185 Nm
- Außendurchmesser: 225 mm
- Länge: 290 mm

Mit dem angegebenen Wirkungsgrad $\eta_{el} > 95\%$ und der daraus folgenden konservativen Annahme $\eta_{el} = 95\%$ lassen sich damit die Verluste im Nennbetrieb berechnen zu:

$$P_{V,el,N} = P_{el,N} \cdot (1 - \eta_{el}) = 106 \text{ kW} \cdot (1 - 0,95) = 5,3 \text{ kW} \quad (3.31)$$

Für eine erste Abschätzung kann in guter Näherung davon ausgegangen werden, dass sich diese Verluste im Nennbetrieb zu gleichen Teilen in Kupferverluste und Eisenverluste aufteilen [Jun16], sodass sich die Kupferverluste im Nennbetrieb ergeben zu:

$$P_{V,Cu,N} = \frac{P_{V,el,N}}{2} = \frac{5,3 \text{ kW}}{2} = 2,65 \text{ kW} \quad (3.32)$$

Aus der Nennleistung ergibt sich weiterhin mit der Nennspannung auch die Nennstromstärke zu:

$$I_N = \frac{P_{el,N}}{U_N} = \frac{106000 \text{ W}}{480 \text{ V}} = 221 \text{ A} \quad (3.33)$$

Mit den Kupferverlusten kann dann der Wicklungswiderstand der Kupferwicklungen berechnet werden:

$$R_{Cu} = \frac{P_{V,Cu,N}}{I_N^2} = \frac{2650 \text{ W}}{(221 \text{ A})^2} = 54,3 \text{ m}\Omega \quad (3.34)$$

An dieser Stelle wird weiterhin davon ausgegangen, dass das von der Maschine aufgebrachte Drehmoment direkt proportional zur Stromstärke ist und bei einer Stromstärke von 221 A ein Drehmoment von 185 Nm erreicht wird, während über den gesamten Betriebsbereich linear skaliert wird. Dann wird das normierte Drehmoment definiert zu:

$$M_{el,n} = \frac{M_{el}}{M_{el,max}} \quad (3.35)$$

wobei $M_{el,max}$ sich aus dem Datenblatt zu 185 Nm ergibt. Damit ergeben sich die Kupferverluste in Abhängigkeit des von der Maschine aufgebrachten normierten Drehmomentes zu:

$$P_{V,Cu} = (M_{el,n} \cdot I_N)^2 \cdot R_{Cu} \quad (3.36)$$

Ohne genauere Kenntnis der inneren Details der elektrischen Maschine, wie die Anzahl der Pole im Rotor, die Blechstärke, die Anzahl der Windungen im Stator usw., können die Eisenverluste in Abhängigkeit vom Betriebspunkt nach folgendem vereinfachten Modell berechnet werden: Zunächst wird davon ausgegangen, dass die Wirbelstromverluste aufgrund dünner Blechdicken im Auslegungspunkt maximal genauso hoch sind wie die Hystereseverluste [Wil19] [GHV98].

$$P_{V,Fe,N} = P_{V,Cu,N} \quad (3.37)$$

$$P_{V,Fe,N} = P_{V,Fe,N,Hy} + P_{V,Fe,N,Wi} \quad (3.38)$$

$$P_{V,Fe,N,Hy} = P_{V,Fe,N,Wi} = \frac{1}{2} \cdot P_{V,Cu,N} \quad (3.39)$$

$$P_{V,Fe,N,Hy} = P_{V,Fe,N,Wi} = \frac{1}{2} \cdot 2,65 \text{ kW} = 1,325 \text{ kW} \quad (3.40)$$

Die Eisenverluste bestehen daher dann aus Hystereseverlusten, welche proportional zur Frequenz der Magnetfeldänderung sind, und aus Wirbelstromverlusten, welche proportional zum Quadrat der Frequenz der Magnetfeldänderung sind [GHV98]. Diese wiederum ist direkt proportional zur Drehzahl der elektrischen Maschine. Weiterhin wird die normierte Drehzahl der elektrischen Maschine an dieser Stelle definiert zu:

$$n_{el,n} = \frac{n_{el}}{n_{el,N}} \quad (3.41)$$

wobei $n_{el,N}$ sich aus dem Datenblatt zu 5500 min^{-1} ergibt. Damit sind auch erhöhte Eisenverluste bei Betrieb im Feldschwächebereich bzw. bei Überdrehzahl berücksichtigt. Jetzt kann weiterhin angenommen werden, dass die Eisenverluste bei Nenndrehzahl ihren Nennwert $P_{V,Fe,N}$ erreichen, der sich bei Nenndrehzahl zu gleichen Teilen aus Hystereseverlusten und Wirbelstromverlusten zusammensetzt. Diese steigen linear bzw. quadratisch mit der Drehzahl an, wodurch sich für die Eisenverluste in Abhängigkeit vom Betriebspunkt der elektrischen Maschine ergibt:

$$P_{V,Fe} = P_{V,Fe,Hy} + P_{V,Fe,Wi} \quad (3.42)$$

$$P_{V,Fe} = n_{el,n} \cdot P_{V,Fe,N,Hy} + n_{el,n}^2 \cdot P_{V,Fe,N,Wi} \quad (3.43)$$

Für die insgesamt in einer elektrischen Maschine in Abhängigkeit vom Betriebspunkt anfallenden Verluste gilt dann:

$$P_{V,el} = P_{V,Cu} + P_{V,Fe} \quad (3.44)$$

$$P_{V,el} = (M_{el,n} \cdot I_N)^2 \cdot R_{Cu} + n_{el,n} \cdot P_{V,Fe,N,Hy} + n_{el,n}^2 \cdot P_{V,Fe,N,Wi} \quad (3.45)$$

Dieses Polynom ermöglicht eine bessere Abschätzung der Verluste in den elektrischen Maschinen als eine Berechnung mit als konstant angenommenem Wirkungsgrad. Verglichen mit der Realität werden in diesem Polynom eine Reihe von zusätzlichen Verlusten, wie der Anstieg der Ummagnetisierungsverluste wegen Strom, der Stromverdrängungseffekt und Basisverluste vernachlässigt [MVP12]. Die Integration dieser Verluste ist an dieser Stelle mit unverhältnismäßig hohem Aufwand verbunden (vgl. [LDL10]) und ohne Kenntnis von Details zu den elektrischen Maschinen kaum möglich. Die gesamte Verlustberechnung kann als konservativ sicher angesehen werden, da sie auf Basis des niedrigsten angegebenen

Wirkungsgrades im Nennbetrieb vorgenommen wurde, wodurch o. g. Effekte durch die größer ausfallenden Kupfer- und Eisenverluste abgedeckt werden. Weiterhin wird an dieser Stelle vereinfachend davon ausgegangen, dass die Verluste in dieser elektrischen Maschine im motorischen und im generatorischen Betrieb mit dem gleichen Polynom aus Gleichung 3.45 berechnet werden können. Für die Verluste ist die Auswahl der elektrischen Maschine von untergeordneter Bedeutung, da diese abhängig von Drehmoment und Drehzahl – also betriebspunktspezifisch und leistungsabhängig – berechnet werden. Wenn ein Getriebe untersucht wird, welches eine elektrische Maschine mit weniger als der hier festgelegten elektrischen Nennleistung benötigt, dann werden deren Verluste auch automatisch geringer ausfallen. Die Vorauswahl der elektrischen Maschine dient hier nur der überschlägigen Ermittlung deren innerer Kenngrößen zur vereinfachten Verlustberechnung. Für die im Wechselrichter auftretenden Verluste wird ein stark vereinfachtes Modell gewählt. Die Verluste in Wechselrichtern setzen sich zusammen aus den Durchlassverlusten, den Schaltverlusten und der Basisversorgung [Bin16]. Diese werden mit komplexen Gleichungen aus der Elektrotechnik zum Schaltverhalten der integrierten Schalttransistoren und Freilaufdioden berechnet. Die Kenngrößen sind hochgradig abhängig von den tatsächlich verbauten Modulen im Wechselrichter und deren Kennlinien und nur mit mehreren Vereinfachungen und Approximationen durchführbar. Eine solche detaillierte Berechnung ist zum Zeitpunkt der Arbeit nicht zweckmäßig. In [Bin16] werden die Basisverluste eines Wechselrichters für einen Fahrtrieb mit einer Leistung von ca. 40 kW mit ungefähr 50 W angegeben. Dieser Wert wird mit dem Faktor 3 multipliziert, um das für das im Rahmen dieser Arbeit benötigte Leistungsniveau des Wechselrichters zu berücksichtigen. Die Basisverluste des im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Wechselrichters sollen daher

$$P_{V,Inv,B} = 150 \text{ W} \quad (3.46)$$

betragen. Weiterhin wird der Wirkungsgrad des betrachteten Wechselrichters in [Bin16] mit $\eta_{Inv} > 0,98$ angegeben, womit konservativ angenommen werden kann

$$\eta_{Inv,L} = 0,98 \quad (3.47)$$

wobei $\eta_{Inv,L}$ zur Berechnung der lastabhängigen Verluste verwendet wird. Um diese zu berechnen, muss die Leistung der elektrischen Maschine bekannt sein, die mit dem Wechselrichter verbunden ist. Die Gesamtverluste des Wechselrichters ergeben sich dann zu:

$$P_{V,Inv} = P_{V,Inv,B} + P_{MG} \cdot (1 - \eta_{Inv,L}) \quad (3.48)$$

Bereits diese einfache Gleichung für die Verlustleistung im Wechselrichter erzeugt dessen charakteristische Wirkungsgradkurve, deren Verlauf durch mehrere andere Quellen bestätigt wird [FD19] [Bro18] [VMK08]. Die Basisverluste werden in der gewählten Größenordnung relativ schnell von den lastabhängigen Verlusten dominiert, sodass deren konkrete Höhe und damit die ursprüngliche Annahme keine signifikanten Auswirkungen auf die Gesamtverluste im Wechselrichter hat, solange sie zumindest größenordnungsmäßig richtig ist. Für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Getriebe ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass diese im Normalfall über zwei elektrische Maschinen verfügen und damit auch zwei Wechselrichter benötigen. Die Verluste sind entsprechend für jeden Wechselrichter einzeln zu berechnen und zu berücksichtigen.

Verlustmodell magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe

Für die magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe existiert kein Modell für die Verluste, daher wird an dieser Stelle ein eigenes Modell entwickelt, welches Teile der Verlustberechnung für die elektrischen Maschinen mit neuen Ansätzen vereint. Die in der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe auftretenden Verluste setzen sich aus mehreren Teilen zusammen:

- Stromwärmeverluste in den Kupferwicklungen des Stators
- Hysteres- und Wirbelstromverluste im Statoreisen
- Hysteres- und Wirbelstromverluste im Eisen des Modulationsrings
- Wirbelstromverluste in den Rotormagneten und im Rotorblechpaket

Da die Rotormagnete sehr stark sind und die Magnetisierung des Rotorblechpakets durch die Rotormagnete dominiert wird, werden die in diesen beiden Komponenten auftretenden Ummagnetisierungsverluste vernachlässigt. Die Firma Magnomatics Limited spezifiziert in einem Datenblatt eine magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe mit einem Nenndrehmoment von 1000 Nm bei einem Durchmesser von 460 mm und einer Länge von 300 mm [Bla14]. Dies entspricht dem für das Getriebe im Rahmen dieser Arbeit benötigten Drehmoment von ca. 950 Nm. Rechnet man die den Abbildungen in [Kir13] entnehmbaren Größenverhältnisse auf die oben spezifizierten Außenmaße um, so ergeben sich für eine Erstausslegung der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe folgende mechanische Kenngrößen:

- Außendurchmesser Stator: 390 mm, außerhalb davon Kühlung
- Innendurchmesser Stator: 280 mm
- Außendurchmesser Modulationsring: 275 mm
- Innendurchmesser Modulationsring: 245 mm
- Außendurchmesser Rotor: 243 mm
- aktive Länge: 200 mm

Der Innenwiderstand der Kupferwicklungen und die maximale Stromstärke am Stator werden festgelegt auf die Werte, die für die zuvor beschriebene elektrische Maschine ermittelt wurden, da beide Maschinen eine Leistung in gleicher Höhe übertragen müssen. Ebenso werden Nenndrehzahl (des elektromagnetischen Feldes) und Nenndrehmoment auf den gleichen Wert festgelegt.

- Innenwiderstand Kupferwicklungen insgesamt (dreiphasig) $R_{Cu,TS}$: 54,3 m Ω
- magnetische Feldstärke im Modulationsring, Rotor- und Statoreisen B : 1,15 T
- maximale Stromstärke im Stator $I_{N,TS}$: 221 A

3 Konzeption einer magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Umlaufgetriebestufe

Bei diesen Werten handelt es sich um Annahmen, die ohne Kenntnis der inneren Details der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe getroffen werden. Die Berechnungsvorschriften für die Verluste der im vorangehenden Abschnitt beschriebenen elektrischen Maschinen kommen auch für die magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe zum Einsatz. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit den Werten die grundsätzliche Verlustcharakteristik gut erfasst werden kann. Selbst wenn später die Werte für die maximale Stromstärke und maximale Drehzahl von den festgelegten Werten abweichen, ist das grundsätzliche Leistungsniveau für die Maschine größenordnungsmäßig richtig gewählt und damit die Werte der maximalen Stromstärke und maximalen Drehzahl wechselseitig voneinander abhängig. Fällt die eine Größe höher aus, dann fällt die andere bei gleicher Maximalleistung automatisch niedriger aus, was zu einer ähnlichen Verlustcharakteristik führt. Die Stromwärmeverluste im Stator können mit diesen Daten direkt analog zu Gleichung 3.36 berechnet werden zu:

$$P_{V,Cu,TS} = (M_{el,n,TS} \cdot I_{N,TS})^2 \cdot R_{Cu,TS} \quad (3.49)$$

wobei $M_{el,n,TS}$ das normierte Drehmoment der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe

$$M_{el,n,TS} = \frac{M_{el,TS}}{M_{el,TS,max}} \quad (3.50)$$

ist, welches per Definition immer am Modulationsring anliegt und aus dem im jeweiligen Betriebspunkt am Modulationsring auftretenden Drehmoment geteilt durch das maximal am Modulationsring mögliche Drehmoment berechnet wird. In einer magnetischen Umlaufgetriebestufe finden mehrere Relativbewegungen von Magnetfeldern über elektrisch leitendes Material statt. Nach der Lenz'schen Regel werden hierdurch Ströme induziert, die der Ursache ihrer Entstehung entgegenwirken. Dadurch entstehen Wirbelstromverluste, die sich in Wärmeenergie äußern. Durch die Änderung der Magnetfelder in den ferromagnetischen Teilen der Umlaufgetriebestufe kommt es weiterhin zu Hystereseverlusten, die ebenfalls einen Wärmeeintrag in das Eisenmaterial bedeuten. Diese Verluste treten im Statoreisen auf, da sich hier das Magnetfeld, welches durch die Spulen erzeugt wird, gegenüber dem unbeweglichen Statorblechpaket bewegt, und in den ferromagnetischen Segmenten des Modulationsrings, da sich dieser durch ein Magnetfeld bewegt. Hierbei sei angenommen, dass die Struktur, welche die ferromagnetischen Segmente trägt, aus unmagnetischem Material – z. B. laminierte Glasfaserstäbe – besteht, um weitere parasitäre Verluste zunächst auszuschließen. Wird die Struktur, die die ferromagnetischen Segmente trägt, aus elektrisch leitfähigem, aber paramagnetischem Material (z. B. Aluminium, Edelstahl) gefertigt, so treten dort zusätzlich Wirbelstromverluste – analog zum Prinzip der Wirbelstrombremse – auf, die entsprechend zu berücksichtigen sind, Hystereseverluste treten in einem solchen Material nicht bzw. nur in vernachlässigbarer Höhe auf. Wie bereits im vorherigen Abschnitt dargelegt setzen sich die Eisenverluste in der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe ebenfalls aus Hystereseverlusten und Wirbelstromverlusten zusammen. Grundsätzlich erfolgt die Berechnung der Eisenverluste auf Basis einer diskreten Anzahl von Messwerten bei diskreten Frequenzen und magnetischen Flussdichten. Da mit einfachen mathematischen Mitteln eine analytische Berechnung der Verluste nicht möglich ist [Vah+09], wird ein in [Ion+08] vorgestellter Ansatz zur näherungsweisen Berechnung herangezogen. Bei den hierin untersuchten Werkstoffen M43 und SP handelt es sich um typische Werkstoffe für elektrische Maschinen, M43 als Elektrolech nach AISI-Standard mit einer Dicke von 0,35 mm und

SP als nicht vollständig bearbeitetes Elektrobloch. Für die Wirbelstromverlustleistung gilt folgende Abhängigkeit:

$$P_{V,Wi} \propto f^2 \cdot B^2 \quad (3.51)$$

mit

- $P_{V,Wi}$ Wirbelstromverlustleistung
- f Frequenz
- B magnetische Flussdichte des Magnetfeldes

Die Hystereseverluste wiederum sind abhängig von dem Flächeninhalt der materialabhängigen Hystereseschleife und der Häufigkeit (Taktfrequenz), mit der diese durchfahren wird. Für magnetische Werkstoffe gilt in guter Näherung, dass der Flächeninhalt der Hystereseschleife proportional zu B^2 ist [Ion+08]. Damit folgt für die Hystereseverlustleistung:

$$P_{V,Hy} \propto f \cdot B^2 \quad (3.52)$$

mit

- $P_{V,Hy}$ Hystereseverlustleistung
- f Frequenz
- B magnetische Flussdichte des Magnetfeldes

Dividiert man die Wirbelstromverlustleistung bzw. die Hystereseverlustleistung durch die Masse der Teile, in denen diese Verluste entstehen, so erhält man die spezifischen Verlustleistungen $p_{V,Wi}$ und $p_{V,Hy}$, die in W kg^{-1} angegeben werden. Hierbei gilt ebenfalls

$$p_{V,Wi} \propto f^2 \cdot B^2 \quad (3.53)$$

und

$$p_{V,Hy} \propto f \cdot B^2 \quad (3.54)$$

wie auch für die Verlustleistungen. Die Proportionalität kann aufgelöst werden, indem für beide spezifische Verlustleistungen ein Proportionalitätsfaktor eingeführt wird, k_h für die Hystereseverluste und k_e für die Wirbelstromverluste. Für verschiedene Elektrobloche lassen sich in zahlreichen Publikationen Werte für die spezifische Eisenverlustleistung, üblicherweise in W kg^{-1} bei einer Frequenz von 50 Hz und verschiedenen Flussdichten – z. B. 1 T – angegeben, finden. Es sei wieder wie im vorherigen Abschnitt angenommen, dass sich die spezifische Eisenverlustleistung im in den Publikationen angenommenen Auslegungspunkt zu gleichen Teilen aus der spezifischen Hystereseverlustleistung und aus der spezifischen Wirbelstromverlustleistung zusammensetzt. Dann gilt analog zu Gleichung 3.38:

$$p_{V,Fe} = p_{V,Hy} + p_{V,Wi} \quad (3.55)$$

$$p_{V,Hy} = k_h \cdot f \cdot B^2 \quad (3.56)$$

$$p_{V,Wi} = k_e \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (3.57)$$

$$p_{V,Fe} = (k_h + k_e \cdot f) \cdot (f \cdot B^2) \quad (3.58)$$

Mit

$$p_{V,Hy,N} = p_{V,Wi,N} = \frac{p_{V,Fe,N}}{2} \quad (3.59)$$

sowie der für M43 garantierten spezifischen Eisenverlustleistung von $4,0 \text{ W kg}^{-1}$ bei 50 Hz und 1,5 T [EMT07] [Geb11] kann dann zunächst $k_{h,M43}$ berechnet werden zu:

$$\begin{aligned} \frac{p_{V,Fe,N,M43}}{2} &= k_{h,M43} \cdot f \cdot B^2 \\ k_{h,M43} &= \frac{p_{V,Fe,N,M43}}{2 \cdot f \cdot B^2} = \frac{4,0 \text{ W kg}^{-1}}{2 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot (1,5 \text{ T})^2} \\ &= 0,018 \text{ W kg}^{-1} \text{ Hz}^{-1} \text{ T}^{-2} \end{aligned} \quad (3.60)$$

Anschließend wird $k_{e,M43}$ analog berechnet zu:

$$\begin{aligned} \frac{p_{V,Fe,N,M43}}{2} &= k_{e,M43} \cdot f^2 \cdot B^2 \\ k_{e,M43} &= \frac{p_{V,Fe,N,M43}}{2 \cdot f^2 \cdot B^2} = \frac{4,0 \text{ W kg}^{-1}}{2 \cdot (50 \text{ Hz})^2 \cdot (1,5 \text{ T})^2} \\ &= 0,00036 \text{ W kg}^{-1} \text{ Hz}^{-2} \text{ T}^{-2} \end{aligned} \quad (3.61)$$

Mit den Annahmen, dass sämtliche geblechten Bauteile in der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe – das Rotoreisen, die modulierenden Segmente und das Statoreisen – aus M43 bestehen, kann bei bekannter Masse dieser Teile für die jeweilige auftretende Frequenz der Magnetfeldänderung und die jeweilige Magnetfeldstärke die auftretende Verlustleistung bestimmt werden. Die Hystereseverlustleistung und Wirbelstromverlustleistung sind – wie bereits im vorangegangenen Abschnitt dargelegt – unabhängig von der Last. Die Frequenz bestimmt maßgeblich die Verluste, und diese wiederum ergibt sich aus der Relativdrehzahl des Magnetfeldes gegenüber dem Material, welches ummagnetisiert wird. Für das Statoreisen ergibt sich diese Frequenz aus dem Betrag der Winkelgeschwindigkeit des Statordrehfeldes multipliziert mit der Anzahl Polpaare des Statordrehfeldes. Für den Modulationsring ergibt sich diese Frequenz aus dem Betrag der relativen Winkelgeschwindigkeit des Rotors gegenüber dem Modulationsring multipliziert mit der Anzahl der Polpaare des Rotors. Die Beträge sind zu verwenden, da die Ummagnetisierungsfrequenz keine negativen Werte annehmen kann. Für die Wirbelströme ist die Drehrichtung unerheblich. Bei Berechnungen, in denen die Ummagnetisierungsfrequenz quadratisch eingeht, kann auf die Beträge verzichtet werden, da das Quadrat der Ummagnetisierungsfrequenz stets positiv ist. Im Rotor treten ebenfalls Verluste auf. Im Luftspalt zwischen Rotor und Modulationsring entstehen elektromagnetische Felder, die gegenüber dem von den Permanentmagneten des Rotors erzeugten Magnetfeld schwanken. Diese Schwankungen haben mehrere Ursachen [Hei90] und liegen unter anderem in der Nutung des Stators und den damit verbundenen Ungleichmäßigkeiten in der Ausbildung des Magnetfeldes begründet. Diese Schwankungen sind abhängig von der konkreten Geometrie der Nutung der elektrischen Maschine [Jun16] [Hen06], die zum Zeitpunkt der Erstausslegung meistens noch nicht bekannt ist. Eine detaillierte analytische Berechnung der Rotorverluste ist sowohl generell als auch im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich und auch nicht zweckmäßig. Die Rotorverluste sind von Bedeutung, um eine Abschätzung über die Erwärmung der Magnete treffen zu können und den Gesamtwirkungsgrad des Getriebes abschätzen zu können. Daher werden die Verluste

im Rotoreisen und in den Rotormagneten nach folgenden Annahmen berechnet: Zunächst gilt

$$P_{V,Rot} = P_{V,Rot,Hy} + P_{V,Rot,Wi} \quad (3.62)$$

wobei die Hystereseverluste vernachlässigt werden, da das von den Permanentmagneten erzeugte Magnetfeld die Magnetisierung des Rotoreisens und auch der Rotormagnete maßgeblich dominiert und so für die Verluste im Rotor hauptsächlich die Wirbelstromverluste verantwortlich sind, die in den elektrisch leitfähigen Magneten und im Rotoreisen durch den Anteil des Magnetfeldes auftreten, der sich relativ zum Rotor bewegt, wodurch übrig bleibt:

$$P_{V,Rot} = P_{V,Rot,Wi} \quad (3.63)$$

Die Wirbelstromverluste setzen sich zusammen aus den im Rotoreisen auftretenden Wirbelstromverlusten und den in den Rotormagneten auftretenden Wirbelstromverlusten. Da das Rotoreisen den gewichtsmäßig größten Teil hierbei ausmacht, werden diese Verluste zusammengefasst als Rotorwirbelstromverluste, indem angenommen wird, dass der gesamte Rotor aus Rotoreisen besteht, die Masse der Magnete wird der Masse des Rotoreisens zugeschlagen und die Verluste werden dann mit den Kennwerten des Rotoreisens berechnet. Weiterhin wird angenommen, dass gemäß Gleichung 3.57 gilt:

$$P_{V,Rot} = P_{V,Rot,Wi} = m_{Rot} \cdot k_e \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (3.64)$$

Wobei m_{Rot} die sich aus Rotoreisen und Rotormagneten ergebende Gesamtmasse ist, f die Frequenz des Magnetfeldes im Luftspalt zwischen Rotor und Modulationsring – also deren relative Winkelgeschwindigkeit multipliziert mit der Anzahl Polpaare des Rotors – und B die Stärke des Magnetfeldes. Hierbei handelt es sich um eine grobe Vereinfachung, da die Stärke des Magnetfeldes, welches sich relativ zum Rotor bewegt, nur einen Bruchteil der Stärke des im Luftspalt auftretenden Magnetfeldes aufweist. Da die Schwankungen unter anderem durch die Nutung des Stators hervorgerufen werden, ist auf der anderen Seite die Frequenz, mit der die Schwankungen auftreten, um ein Vielfaches höher als die Winkelgeschwindigkeit des Magnetfeldes im Luftspalt multipliziert mit der Anzahl der Polpaare des Rotors. Da beide Größen quadratisch in die Verlustleistung eingehen, kann in erster Näherung oben angegebene Formel gelten. Die Annahme kann durch ein Beispiel bestätigt werden. In [Hen06] sind Verläufe der Luftspaltflussdichte bei Last, aufgeteilt in den Anteil, der sich relativ zum Rotor bewegt, und in den Anteil, der sich relativ zum Rotor nicht ändert, angegeben. Bildet man für diese Kurven die Integrale von B über dem Winkel γ , um ein Maß für das Verhältnis der Magnetfeldstärke des Teils B_1 , der sich relativ zum Rotor nicht bewegt, und des Teils $B_{1,harm}$, der sich relativ zum Rotor bewegt, zu erhalten, z. B. durch geometrische Approximation, so lässt sich zeigen dass:

$$\frac{\int B_{1,harm} d\gamma}{\int B_1 d\gamma} = \frac{B_{1,harm}}{B_1} \approx 0,17 \quad (3.65)$$

Gleichzeitig kann für das Verhältnis der Frequenzen des Teils f_1 , der sich relativ zum Rotor nicht bewegt, und des Teils $f_{1,harm}$, der sich relativ zum Rotor bewegt, abgelesen werden:

$$\frac{f_{1,harm}}{f_1} = 6,0 \quad (3.66)$$

Bildet man nun das Produkt der beiden Quadrate der Verhältnisse, so ergibt sich

$$\left(\frac{B_{1,harm}}{B_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{f_{1,harm}}{f_1}\right)^2 = 0,17^2 \cdot 6,0^2 = 1,04 \approx 1 \quad (3.67)$$

wodurch beispielhaft gezeigt ist, dass die Verluste im Rotor nach Gleichung 3.64 näherungsweise größenordnungsmäßig und qualitativ richtig bestimmt werden können. Die Gesamtverluste in der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe lassen sich dann für jeden Betriebspunkt ausdrücken durch:

$$P_{V,TS} = P_{V,Cu,TS} + P_{V,Fe,TS,S} + P_{V,Fe,TS,M} + P_{V,Fe,TS,R} \quad (3.68)$$

$$\begin{aligned} P_{V,TS} = & P_{V,Cu,TS} + \\ & P_{V,Hy,TS,S} + \\ & P_{V,Wi,TS,S} + \\ & P_{V,Hy,TS,M} + \\ & P_{V,Wi,TS,M} + \\ & P_{V,Wi,TS,R} \end{aligned} \quad (3.69)$$

$$\begin{aligned} P_{V,TS} = & \left(\frac{M_{el,TS}}{M_{el,TS,max}} \cdot I_{N,TS} \right)^2 \cdot R_{Cu,TS} + \\ & m_{TS,S} \cdot k_h \cdot f_{TS,S} \cdot N_{p,S} \cdot B^2 + \\ & m_{TS,S} \cdot k_e \cdot (f_{TS,S} \cdot N_{p,S})^2 \cdot B^2 + \\ & m_{TS,M,Fe} \cdot k_h \cdot |f_{TS,M} - f_{TS,R}| \cdot N_{p,R} \cdot B^2 + \\ & m_{TS,M,Fe} \cdot k_e \cdot [(f_{TS,M} - f_{TS,R}) \cdot N_{p,R}]^2 \cdot B^2 + \\ & (m_{Rot,M} + m_{Rot,Fe}) \cdot k_e \cdot [(f_{TS,M} - f_{TS,R}) \cdot N_{p,R}]^2 \cdot B^2 \end{aligned} \quad (3.70)$$

Wie auch bei den Verlusten in elektrischen Maschinen wird an dieser Stelle vereinfachend davon ausgegangen, dass die Verluste in der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe im motorischen und im generatorischen Betrieb mit dem gleichen Polynom aus Gleichung 3.70 berechnet werden können.

Verlustmodell Hydrostaten

Für die Hydrostaten wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sie in beiden Betriebsarten – Betrieb als Hydropumpe und als Hydromotor – die gleiche Verlustcharakteristik aufweisen und dass diese weiterhin unabhängig von der Drehzahl und für beide Maschinen, egal ob konstant oder verstellbar, gleich ist. Da keine veröffentlichten Daten zum Betriebsverhalten und zu den Verlusten der Hydrostaten der verschiedenen Hersteller vorliegen, wird ein eigenes Verlustmodell erstellt. Der Wirkungsgradverlauf eines Schrägachsen-Hydraulikmotors der Firma Hydro Leduc mit konstantem Schluckvolumen wird als Basisverlauf herangezogen [Hyd16]. Die Motoren bieten sich hierfür an, da sie ähnliche Betriebspunkte hinsichtlich des Schluckvolumens und der auftretenden Drücke und Drehzahlen aufweisen wie die Hydrostaten in den betrachteten hydraulischen Stufenlosgetrieben. Der Wirkungsgrad wird dann normiert, sodass zu seiner Berechnung nicht länger der Druck des Hydraulikmediums bekannt sein muss, sondern das Verhältnis des von der Hydraulikeinheit aufgebrauchten Drehmomentes zu dem von der Hydraulikeinheit maximal aufbringbaren Drehmoment. Da

der Druck des Hydraulikmediums und das von der Hydraulikeinheit aufgebraachte Drehmoment zueinander direkt proportional sind, ist diese Umrechnung zulässig. Dies vereinfacht die Berechnung des Wirkungsgrades des Gesamtgetriebes derart, dass nur noch das Drehmoment an den beiden hydraulischen Komponenten bestimmt werden muss, um deren Wirkungsgrad und damit die im variablen Pfad auftretenden Verluste zu bestimmen. Indem das maximal von den Hydraulikeinheiten aufbringbare Drehmoment gleichgesetzt wird mit dem in der jeweiligen Getriebekonfiguration benötigten maximalen Drehmoment, werden die Verluste in den Hydraulikeinheiten zusätzlich unabhängig von eventuellen Vorübersetzungen zu den Hydraulikeinheiten gemacht. Diese Vereinfachung trägt der Tatsache Rechnung, dass für jede Getriebekonfiguration eine ideale Kombination aus Vorübersetzung zu den Hydraulikeinheiten und detaillierter Auslegung der Hydraulikeinheiten gefunden werden kann, die zu besonders günstigen Wirkungsgraden führt. Die Berechnung des Wirkungsgrades aus dem anliegenden Drehmoment im Verhältnis zum maximal zu erbringenden Drehmoment eliminiert die Notwendigkeit, eine solche Optimierung vornehmen zu müssen. Der Wirkungsgrad der Hydrostaten wird durch die folgende Gleichung dargestellt:

$$\eta_{t,h} = \tanh\left(\frac{M_h}{M_{h,max}} \cdot 5,2\right) \cdot 0,93 \quad (3.71)$$

Die Verlustleistung eines Hydrostaten beträgt damit:

$$P_{V,h} = (1 - \eta_{t,h}) \cdot P_h = \left(1 - \tanh\left(\frac{M_h}{M_{h,max}} \cdot 5,2\right) \cdot 0,93\right) \cdot P_h \quad (3.72)$$

Der Tangens hyperbolicus ermöglicht hier eine gute Übereinstimmung der sich ergebenden Wirkungsgradkurve mit den zur Verfügung stehenden Daten des Schrägachsen-Hydraulikmotors der Firma Hydro Leduc mit konstantem Schluckvolumen. Die beiden Koeffizienten 5,2 und 0,93 dienen dazu, die Steigung und den Grenzwert des Tangens hyperbolicus an die angegebene Wirkungsgradkurve bestmöglich anzupassen. Der Tangens hyperbolicus in dieser einfachen Form führt weiterhin zu einer guten Umsetzbarkeit in der EDV für die nachfolgende Wirkungsgradberechnung. Der grundsätzliche Verlauf der Wirkungsgradkurve von Hydrostaten wird durch weitere Quellen bestätigt [HAW19] [Exx16]. Da die Hydrostaten einen sehr charakteristischen Wirkungsgradverlauf haben, der sich maßgeblich im Triebstrangwirkungsgrad des Gesamtgetriebes niederschlägt, kann über die zur Verfügung stehenden Daten der Triebstrangwirkungsgrade der betrachteten hydraulischen Stufenlosgetriebe im weiteren Verlauf der Arbeit zusätzlich beurteilt werden, inwiefern das Verlustmodell für die Hydrostaten zutreffend ist.

Verluste in einstufigen Verzahnungen

Für den Wirkungsgrad η eines Getriebes und damit auch jeder einzelnen Getriebestufe gilt nach [Mül98]

$$\eta = 1 + \frac{P_V}{P_{an}} \quad (3.73)$$

woraus direkt folgt:

$$P_V = -P_{an} (1 - \eta) \quad (3.74)$$

Wobei für den Wirkungsgrad η_{Stufe} einer einzelnen Stufe nach [Mül98] gilt:

$$\eta_{Stufe} \approx 0,995 \quad \text{für eine Hohlradstufe} \quad (3.75)$$

$$\eta_{Stufe} \approx 0,990 \quad \text{für eine Stirnradstufe} \quad (3.76)$$

Der Wirkungsgrad einer Hohlradstufe sei im Folgenden mit $\eta_{Stufe,I}$, der einer Stirnradstufe mit $\eta_{Stufe,E}$ bezeichnet. Mit der Gleichung 3.74 und den oben angegebenen Werten lassen sich dadurch die Verluste in einstufigen Verzahnungen rechnerisch und automatisiert unter Anwendung der zu Beginn von Unterabschnitt 3.3.4 angegebenen Vereinfachungen berechnen. Für den Wirkungsgrad spiralverzahnter Kegelräder, die üblicherweise für die Übertragung von Drehmoment und Drehzahl von der Getriebeausgangswelle auf die Hinterachse verwendet werden, wird

$$\eta_{Stufe} \approx 0,980 \quad \text{für eine spiralverzahnte Kegelradstufe} \quad (3.77)$$

angenommen [Ges12], was im Folgenden als $\eta_{Stufe,SB}$ bezeichnet wird.

Verlustmodell Planetenstufen

Die in den Planetenstufen auftretenden Verluste sind in hohem Maße abhängig vom konkreten Betriebspunkt des Planetengetriebes. Ein Planetensatz überträgt Leistung immer als Kupplungsleistung und Wälzleistung, wobei die Kupplungsleistung verlustfrei übertragen wird und nur die Wälzleistung verlustbehaftet ist [Mül98]. Abhängig vom Betriebspunkt – beim Auftreten von Blindleistung – können sich Vorzeichen von Wälz- und Kupplungsleistung auch unterscheiden. Im Planetensatz treten dann zirkulierende Leistungen auf, die höher sind als die Eingangsleistung und die Ausgangsleistung. Diese Leistungen belasten die Verzahnungen im Planetensatz und die Verluste sind in diesen Betriebspunkten besonders hoch. Die in den Planetenstufen anfallenden Verluste werden nach folgendem Verfahren bestimmt: Zunächst werden mit dem Matrix-Rechenverfahren für den jeweiligen Betriebspunkt die Drehzahlen der beiden Differenzwellen und der Summenwelle berechnet. Auf die Berechnung der Drehzahlen der Planeten wird verzichtet, da diese Drehzahlen nur einen Einfluss auf die Lagerverluste hätten, die wie zuvor beschrieben nicht betrachtet werden. Nach Müller gilt für die Verlustleistung bezogen auf die gesamte Antriebsleistung eines Planetengetriebes im Zweiwellenbetrieb

$$-\frac{P_V}{P_{an}} = 1 - \eta_{Uml} \quad (3.78)$$

sowie gleichzeitig als vereinfachte Berechnungsformel für den Umlaufwirkungsgrad für einen beliebigen Betriebszustand

$$\eta_{Uml} = 1 - \frac{M_1 (\omega_1 - \omega_s) (1 - \eta_0^{w1})}{\Sigma P_{an}} \quad (3.79)$$

was sich umformen lässt zu:

$$1 - \eta_{Uml} = \frac{M_1 (\omega_1 - \omega_s) (1 - \eta_0^{w1})}{\Sigma P_{an}} \quad (3.80)$$

Die rechte Seite von Gleichung 3.80 lässt sich jetzt mit der linken Seite von Gleichung 3.78 gleichsetzen und es ergibt sich:

$$-\frac{P_V}{P_{an}} = \frac{M_1 (\omega_1 - \omega_s) (1 - \eta_0^{w1})}{\Sigma P_{an}} \quad (3.81)$$

Die Verluste im Planetengetriebe entstehen nur durch die Wälzleistung, die ermittelt wird, indem der Punkt des stillstehenden Steges betrachtet wird, der bei Überlagerung mit Blockumlauf den Betriebspunkt ergibt. Da es sich in diesem Punkt um einen Zweiwellenbetrieb handelt, kann es nur eine Antriebswelle und eine Abtriebswelle geben. So lassen sich bei gleichzeitiger Definition von Welle 1 als Antriebswelle sowohl ΣP_{an} als auch P_{an} gleichwertig ersetzen durch P_1 , was dann direkt beidseitig gekürzt werden kann. Übrig bleibt:

$$P_V = -M_1 (\omega_1 - \omega_s) (1 - \eta_0^{w1}) \quad (3.82)$$

Der Exponent $w1$, der dem Vorzeichen des Produktes $M_1 (\omega_1 - \omega_s)$, entspricht stellt hierbei sicher, dass die Verluste unabhängig vom tatsächlichen Leistungsfluss immer richtig berechnet werden; ist das Produkt positiv, wird $\eta_0^{w1} = \eta_{12}$, ist es negativ, $\eta_0^{w1} = 1/\eta_{21}$ [Mül98]. Einen Sonderfall nimmt hierbei die Radnabenübersetzung ein, die ebenfalls ein Planetengetriebe ist, welches immer mit festgesetztem Hohlrads betrieben wird, während die Hinterachse die Sonne antreibt und das Hinterrad mit dem Steg verbunden ist. Da die Drehzahlverhältnisse somit immer gleich sind, ergibt sich ein konstanter Wirkungsgrad. Dieser lässt sich aus Gleichung 3.80 berechnen, indem ΣP_{an} wieder gleichwertig ersetzt wird durch P_{an} , da im Radnabengetriebe das Hohlrads immer stillsteht und es somit wie oben immer nur eine Antriebswelle und eine Abtriebswelle geben kann. Per Definition und durch Einsatz des Exponenten $w1$ wird die Sonnenwelle zur Antriebswelle und P_{an} damit zu $M_1 \omega_1$. M_1 lässt sich kürzen, was zeigt, dass der Wirkungsgrad im Radnabengetriebe lastunabhängig ist. Übrig bleibt

$$\eta_{FD} = 1 - \frac{(\omega_1 - \omega_s) (1 - \eta_0^{w1})}{\omega_1} \quad (3.83)$$

Mit der übersichtlichen Form der Willis-Gleichung (Gleichung 2.2) können im Betriebspunkt des stillstehenden Hohlrads $n_2 = 0$ die Winkelgeschwindigkeiten ω_1 und ω_s in ein konstantes Verhältnis gesetzt werden, da $n \propto \omega$ gilt:

$$\frac{\omega_s}{\omega_1} = \frac{1}{1 - i_{12,FD}} \quad (3.84)$$

ω_1 kann dann in Gleichung 3.83 ausgeklammert und gekürzt werden, wodurch sich ergibt:

$$\eta_{FD} = 1 - \left(1 - \frac{\omega_s}{\omega_1}\right) (1 - \eta_0^{w1}) \quad (3.85)$$

was durch Einsetzen von Gleichung 3.84 schließlich zu

$$\eta_{FD} = 1 - \left(1 - \frac{1}{1 - i_{12,FD}}\right) (1 - \eta_0^{w1}) \quad (3.86)$$

wird. Der Exponent $w1$ ergibt sich durch die Definition $M_1 \omega_1 > 0$ zu $+1$ und kann damit entfallen. Das Verhältnis der Drehzahlen $n_{s,FD}$ und $n_{1,FD}$ beträgt gemäß Anforderungsliste 6,4. Hierbei handelt es sich um die Umlaufübersetzung i_{1s} nach [Mül98]. $i_{12,FD}$ kann nach [Mül98] daraus folgendermaßen berechnet werden:

$$i_{12,FD} = 1 - i_{1s,FD} = 1 - 6,4 = -5,4 \quad (3.87)$$

3 Konzeption einer magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Umlaufgetriebestufe

η_0 ergibt sich aus dem Produkt der Wirkungsgrade einer einstufigen Außenverzahnung und einer einstufigen Innenverzahnung nach [Mül98] zu:

$$\eta_0 = \eta_{Stufe,I} \cdot \eta_{Stufe,E} = 0,995 \cdot 0,990 = 0,98505 \quad (3.88)$$

Setzt man diese Werte in Gleichung 3.86 ein, ergibt sich abschließend für den konstanten Wirkungsgrad der Radnabenübersetzung:

$$\eta_{FD} = 1 - \left(1 - \frac{1}{1 - (-5,4)}\right) \cdot (1 - 0,98505) = 0,98739 \quad (3.89)$$

Für das aus dem Getriebe für die Baureihen Case IH Puma und Magnum sowie New Holland T7 und T8 abgeleitete vereinfachte hydrostatische Wolfrom-Stufenlosgetriebe und das daraus hervorgehende vereinfachte elektrische Wolfrom-Stufenlosgetriebe wurden die Geschwindigkeiten der einzelnen Gänge wie folgt festgelegt: Bei dem Getriebe handelt es sich um ein Getriebe mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Der Wirkungsgrad bei Getrieben mit variablem Pfad weist Buckel auf, deren niedrigste Punkte stets die Randpunkte des Fahrbereiches sind, sodass die Fahrbereiche aus den Wirkungsgradmessungen abgelesen werden können. Aus Wirkungsgradmessungen des hydrostatischen Stufenlosgetriebes für die Baureihen Case IH Puma und Magnum sowie New Holland T7 und T8 [Wil16] kann abgelesen werden, dass der erste Gang bis 7 km/h und der zweite Gang von 7 km/h bis 14,5 km/h verwendet wird. Skaliert man diese Geschwindigkeiten zwecks Vergleichbarkeit mit dem im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Getriebe linear für eine Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h, so ergeben sich die Schaltpunkte bei 8,4 km/h und 17,4 km/h. Der Punkt, ab dem in den 4. Gang geschaltet wird, wird dann so gelegt, dass im Schaltpunkt die Leistungen der elektrischen Maschinen bzw. der Hydrostaten betragsmäßig gleich bleiben und lediglich ihr Vorzeichen ändern. Der Schaltpunkt ergibt sich daher bei ca. 34,6 km/h. Für das aus dem ZF-TerraMatic-Getriebe abgeleitete vereinfachte Inline-Stufenlosgetriebe gestaltet sich die Festlegung der Schaltpunkte einfacher, da sie aus [Ren14] direkt abgelesen werden können. Das Getriebe ist weiterhin ein Getriebe für eine Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h, sodass hier keine Skalierung der Schaltpunkte nötig ist. Der erste Gang wird bis 7,6 km/h, der zweite von 7,6 km/h bis 16 km/h, der dritte von 16 km/h bis 33 km/h und der vierte ab 33 km/h verwendet. Mit den oben genannten Vereinfachungen und Verlustmodellen ergeben sich die Strichdiagramme für die Verlust- und Wirkungsgradberechnung der vier betrachteten Getriebe wie folgt:

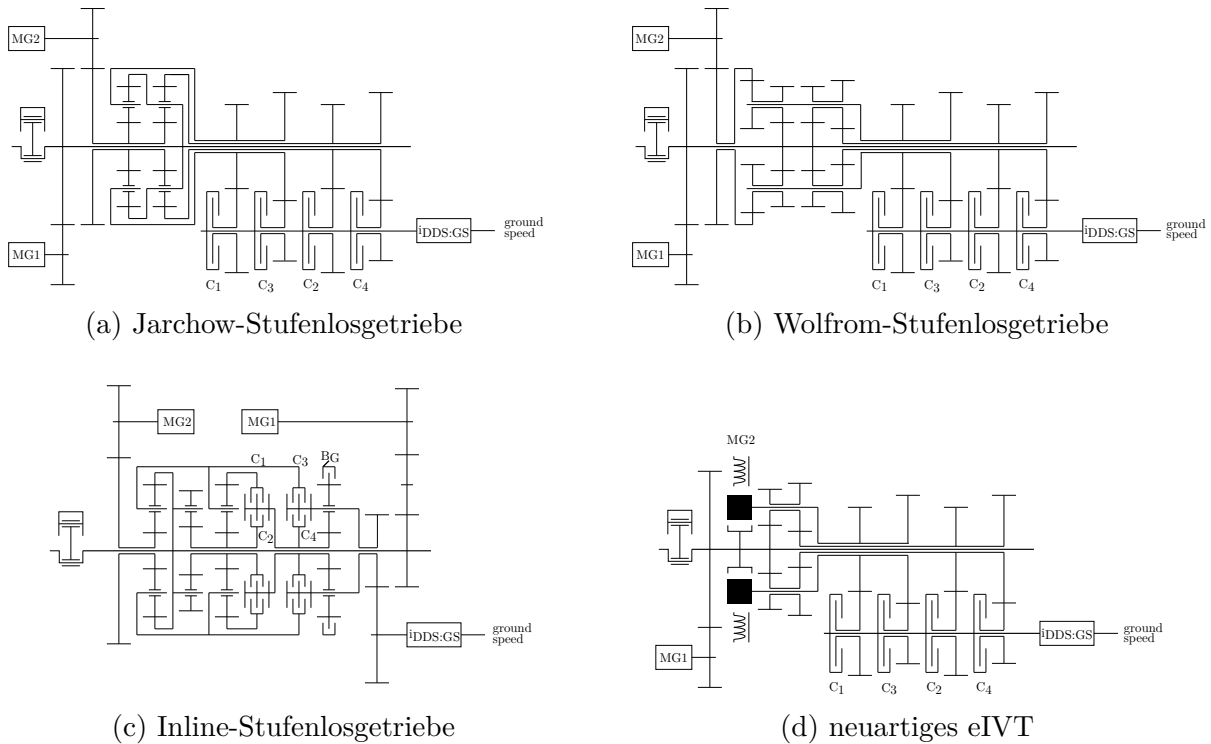


Abbildung 3.10: vereinfachte Strichdiagramme zur Wirkungsgradberechnung für die betrachteten Getriebe

Abbildung 3.10 zeigt die vereinfachten Strichdiagramme, die sich aus den in den in Abbildung 2.3, Abbildung 2.4 und Abbildung 2.6 betrachteten Getrieben unter Anwendung oben beschriebener Vereinfachungen für die Wirkungsgradberechnungen ergeben. Für das Wolfrom-Stufenlosgetriebe und das Inline-Stufenlosgetriebe werden die Maschinen *MG1* und *MG2* einmal als Hydrostaten und einmal als elektrische Maschinen betrachtet und berechnet. Für diese Getriebe liegen Messergebnisse zum Wirkungsgrad vor, sodass diese mit den berechneten Wirkungsgraden verglichen werden können und daraus eine Abschätzung über die Güte der Berechnung für die Getriebe mit elektrischen Maschinen getroffen werden kann. Das Jarchow-Getriebe und das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte neuartige magnetisch-elektrische Stufenlosgetriebe existieren nicht physisch, sodass es hierfür auch keine Messergebnisse zum Wirkungsgrad gibt. Eine Berechnung mit Hydrostaten in den beiden Getrieben liefert daher keinen Mehrwert und wird nicht durchgeführt. Ein Betrieb mit Hydrostaten ist für das neuartige Getriebe nicht möglich. Für die betrachteten Getriebe werden hinsichtlich Vorzeichen und Benennung von Komponenten folgende Vereinbarungen getroffen:

- Blickt man von der Seite des Hinterachsdifferenzials zur Seite des Verbrennungsmotors, also in Fahrtrichtung bzw. positive x-Richtung im allgemeinen Fahrzeugkoordinatensystem nach [DIN13], dann ist die Drehrichtung als positiv anzusehen, die sich dann als entgegen dem Uhrzeigersinn darstellt.
- Liefert der Dieselmotor Leistung, so weist dessen Leistung positives Vorzeichen auf. Durch das Vorzeichen der Drehrichtung ergibt sich dann das Vorzeichen des Drehmoments.

3 Konzeption einer magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Umlaufgetriebestufe

- Die Ausgangswelle, welche zum Anfahren verwendet wird, soll mit *OUT1* bezeichnet werden, die andere Ausgangswelle mit *OUT2*.
- Die in festem Drehzahlverhältnis zum Dieselmotor stehende elektrische Maschine bzw. der in festem Drehzahlverhältnis zum Dieselmotor stehende Hydrostat soll mit *MG1* bezeichnet werden.
- Die in ihrer Drehzahl frei einstellbare elektrische Maschine bzw. der in seiner Drehzahl frei einstellbare Hydrostat soll mit *MG2* bezeichnet werden.
- Die Gänge sollen gemäß ihrer Reihenfolge in der Schaltstrategie mit den Kupplungen C_1 bis C_4 gekennzeichnet werden, eine eventuell nötige Bremse bei einem Getriebe in Inline-Bauweise soll mit B_G bezeichnet werden.

Die Triebstrangwirkungsgrade der betrachteten Getriebe ergeben sich unter Anwendung aller beschriebenen Verlustmodelle wie folgt:

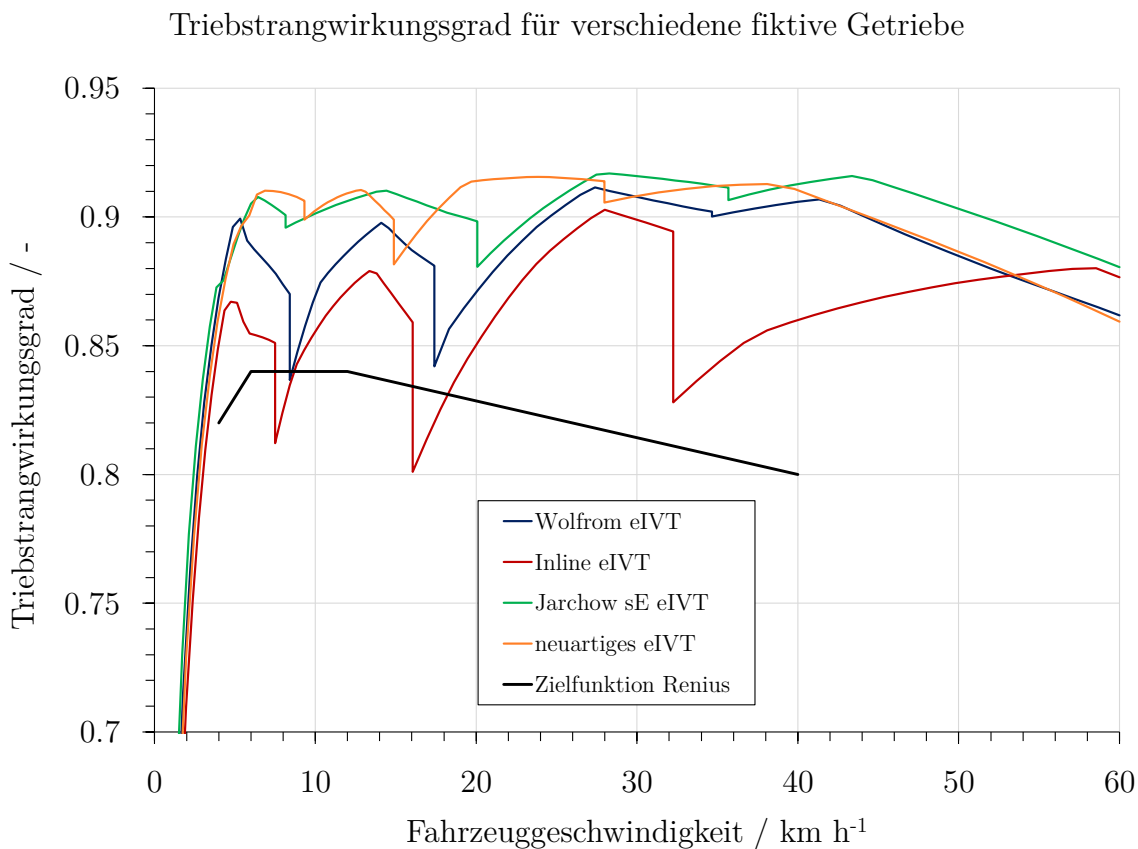


Abbildung 3.11: Berechnete Triebstrangwirkungsgrade der verschiedenen Getriebe

Abbildung 3.11 zeigt die berechneten Triebstrangwirkungsgrade für das fiktive elektrische Wolfrom-Stufenlosgetriebe und das fiktive elektrische Inline-Stufenlosgetriebe sowie den berechneten Triebstrangwirkungsgrad des im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Getriebes. Weiterhin in das Diagramm eingezeichnet ist die von Renius aufgestellte Zielfunktion für den Triebstrangwirkungsgrad von Stufenlosgetrieben [Ren94]. Der nach Renius definierte Vollastwirkungsgrad ergibt sich aus dem Quotienten der Radnabenleistung und der

Getriebeeingangsleistung und entspricht damit den im Rahmen dieser Arbeit berechneten Wirkungsgraden, die ohne Berücksichtigung von Verlusten für Motor, Kühlung und Hilfsaggregate gewonnen wurden, was eine Vergleichbarkeit sicherstellt. Die berechneten Wirkungsgrade aller betrachteten Getriebe liegen in weiten Bereichen über dem Grenzpolygon von Renius, was dessen anspruchsvolle, aber nicht unrealistische Höhe unterstreicht. Generell fällt auf, dass der Wirkungsgrad des im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Getriebes in weiten Teilen über dem Wirkungsgrad der aus den hydrostatisch leistungsverzweigten Getrieben abgeleiteten fiktiven elektrisch leistungsverzweigten Getriebe liegt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Getriebe weniger Komponenten aufweist, die lastabhängige Verluste verursachen. So ist zum Beispiel eine der beiden elektrischen Maschinen im variablen Pfad ohne Stirnradstufe eingebunden, was die lastabhängigen Verluste im variablen Pfad senkt und bei Getrieben mit zwei regulären elektrischen Maschinen nicht möglich ist. Des Weiteren treten in dem neuartigen Getriebe nur in einer mechanischen Planetenstufe Verzahnungsverluste auf. Die zweite Planetenstufe ist in die magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe integriert, in welcher keine Verluste durch mechanisches Abwälzen auftreten können, da die Drehmomentübertragung kontaktlos stattfindet. Der Wirkungsgrad des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Getriebes ist daher maßgeblich abhängig von der in der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe erreichten Effizienz, die unter anderem wiederum von der Kühlung abhängt. Um ein solches Getriebe effizient zu gestalten, sind daher besonders Kenntnisse im Bereich dieser magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufen nötig. Um diese Kenntnisse zu erlangen, ist der im weiteren Verlauf der Arbeit folgende Prüfstandsbetrieb gedacht. Vergleicht man jeweils eines der hydrostatischen Stufenlosgetriebe mit seinem fiktiven elektrischen Äquivalent, so ergibt sich folgendes Diagramm:

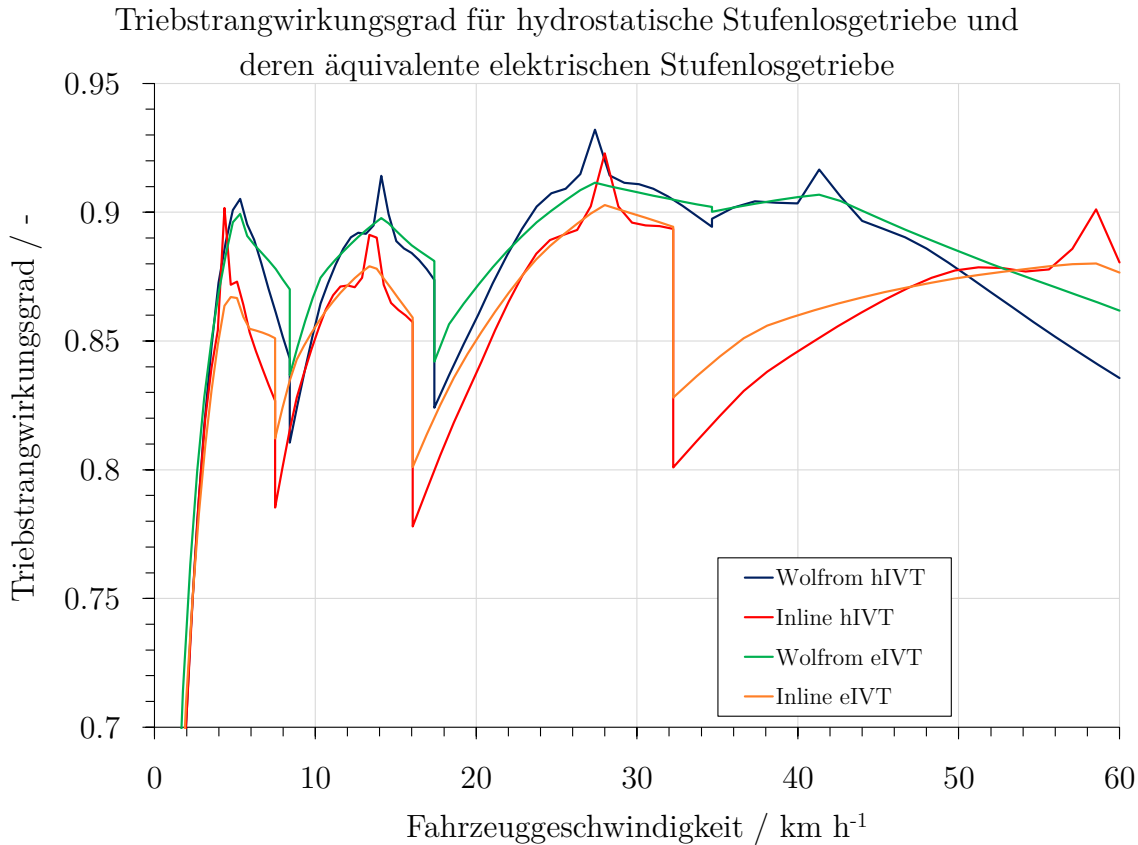


Abbildung 3.12: Berechnete Triebstrangwirkungsgrade für hydrostatische und elektrische Stufenlosgetriebe

Abbildung 3.12 zeigt die berechneten Triebstrangwirkungsgrade für das hydrostatische Wolfrom-Stufenlosgetriebe und das hydrostatische Inline-Stufenlosgetriebe sowie die bereits in Abbildung 3.11 gezeigten berechneten Wirkungsgrade der aus den hydrostatischen Getrieben hervorgehenden fiktiven äquivalenten elektrischen Stufenlosgetriebe. Hierbei fällt auf, dass die Wirkungsgrade des elektrischen Äquivalentes an den Rändern der einzelnen Fahrbereiche stets höher als die Wirkungsgrade der hydrostatischen Getriebe ausfallen, während sie in der Mitte der Fahrbereiche niedriger ausfallen. In der Mitte der Fahrbereiche beträgt die über den variablen Pfad der Stufenlosgetriebe übertragene Leistung 0, die Variatorausgangswelle steht still. Während dies bei hydrostatischen Stufenlosgetrieben über ein Blockieren der Hydraulikleitungen so realisiert werden kann, dass der stillstehende Hydrostat immer noch der Abstützung von Drehmoment dient, muss bei Getrieben mit elektrischer Leistungsverzweigung hier ein Strom fließen, um das statische Magnetfeld aufrechtzuerhalten und Drehmoment abstützen zu können. Das Verlustmodell der Inverter weist darüber hinaus einen konstanten Anteil auf, der auch in der Mitte der Fahrbereiche zum Tragen kommt, während das Verlustmodell der Hydrostaten keinen konstanten, sondern nur einen lastabhängigen Anteil aufweist. In der Praxis ist zu erwarten, dass die bei den hydrostatisch leistungsverzweigten Getrieben in der Mitte jedes Fahrbereiches zu sehenden Spitzen nicht so ausgeprägt auftreten wie in der Berechnung, da im Betriebspunkt, in dem die Leistung in den Hydrostaten 0 erreicht, einer der beiden Hydrostaten immer noch dreht. Er pumpt dabei kein Öl, verursacht aber drehzahlabhängige Verluste durch

Reibung, die in dem im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Verlustmodell für Hydrostaten nicht berücksichtigt wurden. Trägt man die berechneten Wirkungsgrade der betrachteten hydrostatischen Stufenlosgetriebe in einem Diagramm neben tatsächlich gemessenen Wirkungsgraden ebenjener Getriebe auf, so ergibt sich folgendes Bild:

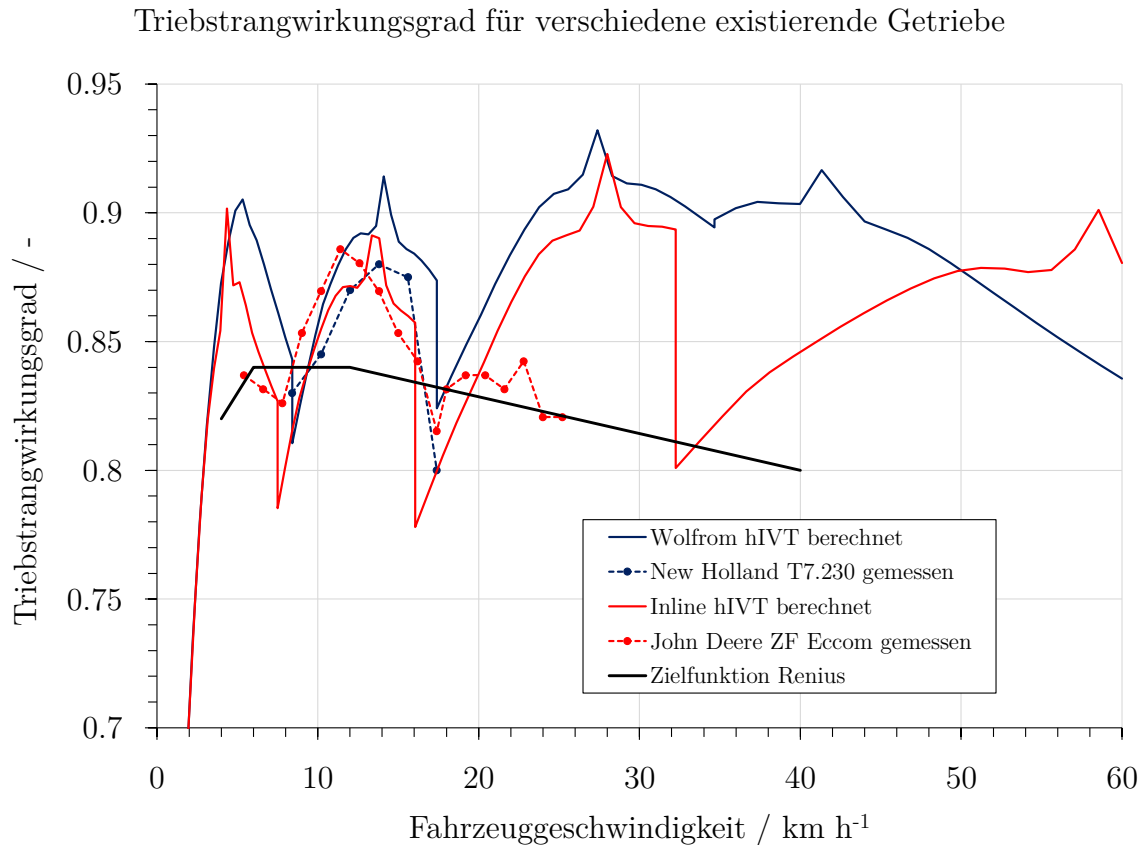


Abbildung 3.13: Berechnete und gemessene Triebstrangwirkungsgrade der hydrostatischen Stufenlosgetriebe

Abbildung 3.13 zeigt die berechneten Triebstrangwirkungsgrade der hydrostatischen Stufenlosgetriebe neben einzelnen, öffentlich verfügbaren Messdaten der entsprechenden Getriebe. Für das New-Holland-T7.230-AC-Getriebe wurden die gemessenen Wirkungsgrade bestimmt, indem zu jeder Nennfahrgeschwindigkeit zunächst die Zapfwellenleistung gemessen wurde und anschließend die Radnabenleistung. Die Radnabenleistung wurde daraufhin durch die gemessene Zapfwellenleistung dividiert, um den Triebstrangwirkungsgrad zu erhalten. Diese Messung entspricht damit der Definition nach Renius, nach der sich der Triebstrangwirkungsgrad als Quotient aus Radnabenleistung und Getriebeeingangsleistung ergibt. Die für das New-Holland-T7.230-AC-Getriebe gemessenen Wirkungsgrade wurden daraufhin für den Einsatz in obiger Grafik skaliert, so als würde das Getriebe eine Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h ermöglichen. Dies dient der Vergleichbarkeit der gemessenen mit den berechneten Wirkungsgraden. Für das ZF-TerraMatic-Getriebe stehen Messdaten von der DLG zur Verfügung [Len01]. Hierbei wurde ein ZF-Eccom-Getriebe vermessen, welches unmittelbar mit dem ZF-TerraMatic-Getriebe verglichen werden kann, da deren innere Struktur nahezu identisch ist. Diese Messungen können nicht ohne Weiteres mit den

Messdaten des New-Holland-T7.230-AC-Getriebe verglichen werden, da hier der Zugwirkungsgrad nicht als Quotient aus Radnabenleistung und Zapfwellenleistung, sondern als Quotient aus Radnabenleistung und Motorleistung definiert ist. Diese Definition entspricht eher dem tatsächlichen Triebstrangwirkungsgrad, da hierbei der gesamte Antriebsstrang inklusive Verluste für Hilfsaggregate wie Lüfter berücksichtigt wird. Da aus dem Testbericht der DLG hervorgeht, dass für den Antrieb von Nebenaggregaten ca. 12 % der Motorleistung benötigt werden, kann der Triebstrangwirkungsgrad als Quotient aus Radnabenleistung und Getriebeeingangsleistung in diesem Fall berechnet werden, indem der von der DLG ermittelte Wirkungsgrad durch 0,88 geteilt wird. Da es sich bei dem vermessenen Getriebe um ein Getriebe mit 50 km/h Höchstgeschwindigkeit handelt, werden die Geschwindigkeiten wiederum linear für 60 km/h skaliert. Generell fällt beim Vergleich der gemessenen mit den berechneten Wirkungsgraden auf, dass die Kurven eine gute Übereinstimmung aufweisen. Die horizontale Lage ist durch Skalierung für die unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten angepasst, der vertikale Verlauf der gemessenen Wirkungsgrade bestätigt, dass die Bestimmung der Wirkungsgrade mit den getroffenen Modellen und Vereinfachungen größenordnungsmäßig und qualitativ korrekt ist. Auf diese gute Übereinstimmung sei an dieser Stelle besonders hingewiesen, da hierdurch davon ausgegangen werden kann, dass die Güte der Prognose der Wirkungsgrade für das neuartige magnetisch-elektrische Stufenlosgetriebe ähnlich ist. Weiterhin fällt in dem Diagramm auf, dass wie prognostiziert die Spitzen der berechneten Wirkungsgrade der hydrostatischen Getriebe in der Praxis nicht so ausgeprägt sind, wie sie sich bei der Berechnung ergeben. Möchte man den Triebstrangwirkungsgrad als Quotient aus Radnabenleistung zu abgegebener Motorleistung – unter Berücksichtigung der Verluste für Nebenaggregate und Kühlung – definieren, so können die Wirkungsgrade aus Abbildung 3.11 und Abbildung 3.13 mit dem konstanten Faktor von 0,88 multipliziert werden, der sich aus den Messungen der DLG ergibt.

3.3.5 Analyse des Potenzials für elektrische Leistung auf Anbaugeräten

Fast alle Hersteller von Anbaugeräten untersuchen derzeit, welche Vorteile sich durch eine Elektrifizierung von Anbaugeräten ergeben können [JE16]. Um elektrifizierte Anbaugeräte im Feld oder während Transportarbeiten mit elektrischer Energie versorgen zu können, muss diese vom Traktor bzw. von der Zugmaschine erzeugt werden. Hierzu gibt es heute bereits die Möglichkeit, den Traktor mit einem Front- oder Heckzapfwellengenerator auszustatten, der die benötigte elektrische Leistung über die Zapfwelle erzeugen kann [Joh15]. In zukünftigen, möglicherweise elektrifizierten Getrieben bietet sich die Möglichkeit, die elektrische Leistung über die integrierten elektrischen Maschinen zu erzeugen und so nicht mehr auf die Verwendung eines Zapfwellengenerators angewiesen zu sein. Dies bringt Vorteile sowohl bei den Kosten als auch bei der Komplexität und Fehleranfälligkeit des Gesamtsystems mit sich. Aus diesem Grund ist es nötig, die betrachteten Getriebekonzepte hinsichtlich ihrer Möglichkeit, elektrische Leistung auf einem Anbaugerät oder auch im Bordnetz zur Verfügung stellen zu können, zu untersuchen. Die Bereitstellung elektrischer Leistung auf Anbaugeräten wird auch *Electric Offboard Power* oder einfach *Offboard Power* bzw. *Offboard-Leistung* genannt. Nimmt man an, dass heutige, über die Zapfwelle betriebene Anbaugeräte zukünftig elektrisch mit Leistung versorgt werden, so ergibt sich der Leistungsbedarf dieser Anbaugeräte im betrachteten Leistungssegment des Traktors zu mindestens

20 kW, während kurzzeitige Spitzenleistungen über 40 kW auftreten können [JE16] [DKG04]. Um die betrachteten Getriebe hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz mit zukünftigen, elektrifizierten Anbaugeräten beurteilen zu können, sei an dieser Stelle gefordert, dass die Getriebe in jedem Betriebspunkt eine elektrische Leistung von 45 kW an externe Verbraucher zur Verfügung stellen können. Um elektrische Leistung auf Anbaugeräten zur Verfügung stellen zu können, muss bei gegebenem Betriebspunkt der Verbrennungsmotor eine höhere Leistung abgeben, die dann von den im Getriebe integrierten elektrischen Maschinen in elektrische Leistung umgewandelt und am Anbaugerät zur Verfügung gestellt wird. Dies bedeutet zunächst, dass auf Anbaugeräten zur Verfügung gestellte elektrische Leistung immer im jeweiligen Betriebspunkt von der maximal möglichen Zugleistung subtrahiert werden muss, da der Verbrennungsmotor nur eine begrenzte Leistung zur Verfügung stellen kann. Im Betriebsbereich, in dem die Zugleistung des Traktors durch Traktion limitiert ist, muss die elektrische Leistung nicht von der maximal möglichen Zugleistung subtrahiert werden, sondern es kann zunächst die Leistung des Verbrennungsmotors bis an ihr Maximum erhöht werden. In den betrachteten elektrischen leistungsverzweigten Stufenlosgetrieben fällt auf, dass stets eine elektrische Maschine mit einem Planetensatz bzw. im speziellen Fall mit einer magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe verbunden ist, während die andere über eine oder mehrere Stirnradstufen direkt mit dem Verbrennungsmotor verbunden ist. Dies gilt unabhängig von der Art der Leistungsverzweigung. Um zusätzliche elektrische Leistung für Anbaugeräte zu erzeugen, muss primär die elektrische Maschine, die in direkter Verbindung mit dem Verbrennungsmotor steht, verwendet werden. Da die Drehzahlen beider elektrischer Maschinen zur Erzeugung zusätzlicher elektrischer Leistung in einem bestimmten Betriebspunkt nicht geändert werden können, muss diese zusätzliche elektrische Leistung über eine Veränderung des Drehmomentes erzeugt werden. Dies ist aufgrund der Gleichungen für Drehmomente an Umlaufgetriebestufen für die elektrische Maschine, die mit der Umlaufgetriebestufe verbunden ist, nicht möglich, da sich sonst auch alle anderen Drehmomente an der Umlaufgetriebestufe und damit auch das Drehmoment am Getriebeausgang ändern würden. Da das Drehmoment am Getriebeausgang vom Betriebspunkt vorgegeben wird, ist dessen Änderung nicht möglich, da es sonst entweder zu Schlupf an den Hinterreifen kommt oder die auf den Boden übertragene Zugleistung nicht mehr ausreicht, um der im jeweiligen Betriebspunkt benötigten Zugleistung zu begegnen. Die mit dem Verbrennungsmotor verbundene elektrische Maschine kann im jeweiligen Betriebspunkt immer so verstellt werden, dass sie bei aktueller Drehzahl – die meist direkt proportional zur eingestellten Motordrehzahl ist – das maximale generatorische Drehmoment und damit die maximale generatorische Leistung liefert. Wird diese elektrische Maschine im betrachteten Betriebspunkt bereits generatorisch betrieben, dann kann die generatorische Leistung bis zum Maximum erhöht werden. Wird sie motorisch betrieben, kann das Drehmoment ebenfalls bis auf den Betriebspunkt der maximalen generatorischen Leistung verstellt werden. Zusätzlich kann in einem solchen Betriebspunkt – in dem die andere elektrische Maschine zwangsläufig generatorisch betrieben wird – die generatorische Leistung der mit der Umlaufgetriebestufe verbundenen elektrischen Maschine zusätzlich am Anbaugerät zur Verfügung gestellt werden. Die in jedem Betriebspunkt maximal zur Verfügung stehende elektrische Leistung berechnet sich dann zu

$$P_{el} = P_{MG1,max,G} + P_{MG2,akt} \quad \text{wenn } P_{MG2} < 0 \quad (3.90)$$

$$P_{el} = P_{MG1,max,G} - P_{MG1,akt} \quad \text{wenn } P_{MG2} \geq 0 \quad (3.91)$$

3 Konzeption einer magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Umlaufgetriebestufe

wobei stets per Definition gilt

$$P_{MG1,max,G} < 0 \quad (3.92)$$

sowie

$$|P_{el}| \leq |P_{Engine}| \quad (3.93)$$

da die elektrische Leistung vom Dieselmotor erzeugt werden muss und – auch wenn die generatorische Kapazität der beiden elektrischen Maschinen im aktuellen Betriebspunkt ausreichend ist – die elektrische Leistung nicht größer sein kann als die vom Dieselmotor maximal erreichte Leistung. Hierbei soll *MG1* wie auch zuvor schon vereinbart stets die elektrische Maschine sein, die unmittelbar mit dem Verbrennungsmotor verbunden ist, während *MG2* die elektrische Maschine ist, die mit der Umlaufgetriebestufe verbunden ist. Das Betriebsverhalten der beiden elektrischen Maschinen ändert sich in den betrachteten elektrisch leistungsverzweigten Getrieben analog zu den hydraulisch leistungsverzweigten Getrieben in jedem Schaltpunkt von generatorisch zu motorisch bzw. für die andere Maschine von motorisch zu generatorisch. Daher kann es in bestimmten Betriebspunkten vorteilhaft sein, die Drehzahl des Verbrennungsmotors zu verändern, um die Schaltpunkte zu verschieben und damit ein anderes Betriebsverhalten an den elektrischen Maschinen zu erzeugen. Diese Möglichkeit entfällt, wenn der Betrieb eines Anbaugerätes mit einer konstanten Zapfwellendrehzahl und damit einer konstanten Motordrehzahl erfolgt. Da einer der Vorteile von elektrifizierten Anbaugeräten die Möglichkeit zum Betrieb ohne Zapfwelle ist, sei diese Situation im Rahmen dieser Arbeit ausgeschlossen. Um die Möglichkeit der Verstellung der Drehzahl des Verbrennungsmotors zu berücksichtigen, wird für das im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Getriebe die für jede Fahrgeschwindigkeit maximal auf dem Anbaugerät zur Verfügung stehende elektrische Leistung bei den Motordrehzahlen 1600 min^{-1} , 1900 min^{-1} und 2200 min^{-1} ermittelt und in einem Diagramm aufgetragen. Hierbei findet die benötigte Zugleistung keine Beachtung. Es ergibt sich folgendes Bild:

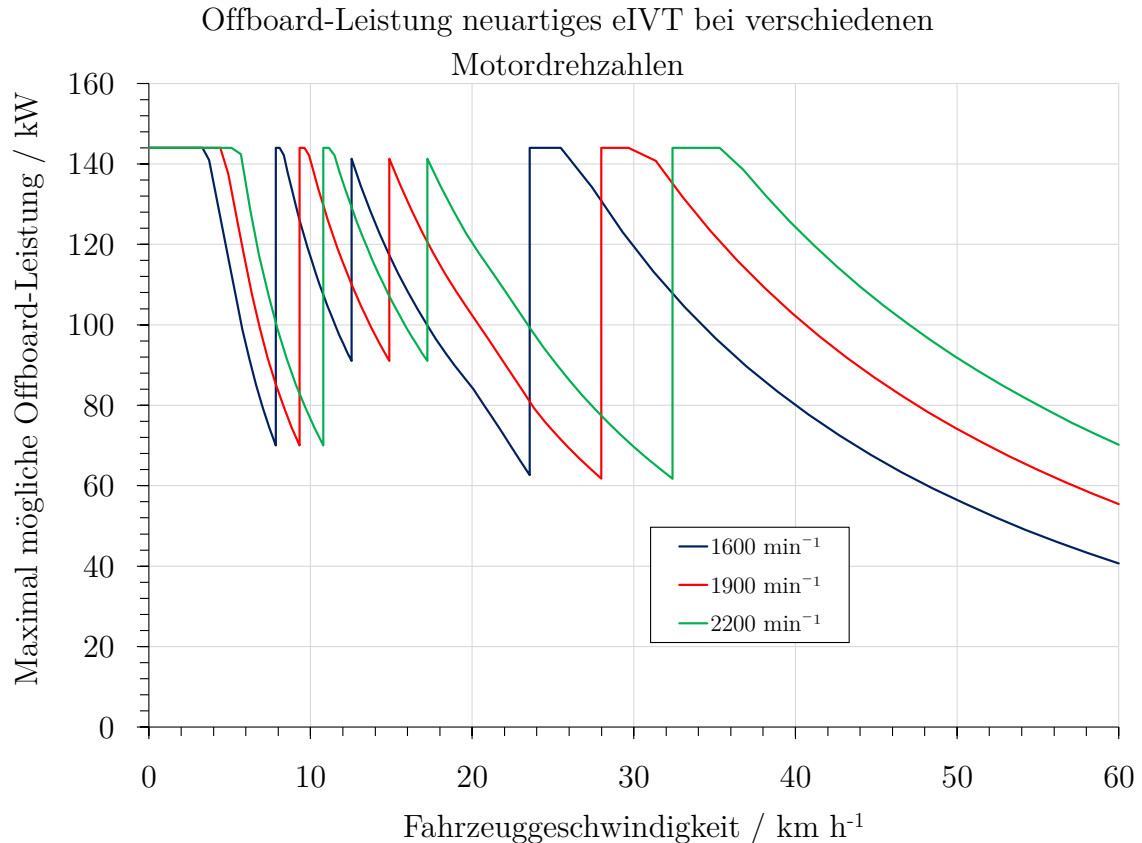


Abbildung 3.14: Maximal zur Verfügung stehende elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei verschiedenen Drehzahlen des Verbrennungsmotors

Abbildung 3.14 zeigt die maximal zur Verfügung stehende elektrische Leistung für das im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Getriebe über der Fahrgeschwindigkeit des Traktors bei Drehzahlen des Verbrennungsmotors von 1600 min^{-1} , 1900 min^{-1} und 2200 min^{-1} . Aus dem Diagramm lässt sich ablesen, dass die Anpassung der Motordrehzahl vielfältige Möglichkeiten bietet, die zur Verfügung stehende elektrische Leistung an die benötigte elektrische Leistung anzupassen. Wird beispielsweise bei einer Fahrgeschwindigkeit von 28 km/h und einer Drehzahl des Verbrennungsmotors von 2200 min^{-1} mehr elektrische Leistung benötigt als zur Verfügung steht, so kann die Drehzahl des Verbrennungsmotors auf beispielsweise 1900 min^{-1} gesenkt werden. Hierdurch wird das Fahrzeug in einem anderen Gang mit anderem Betriebsverhalten betrieben und es steht bei gleicher Fahrgeschwindigkeit eine höhere elektrische Leistung zur Verfügung. Die elektrische Leistung von 45 kW kann mit dem im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Getriebe in jedem Betriebspunkt erreicht werden. Trägt man zum Vergleich die maximal zur Verfügung stehende elektrische Leistung über der Fahrgeschwindigkeit des Traktors bei einer Drehzahl des Verbrennungsmotors von 1900 min^{-1} für die verschiedenen Getriebe auf, so ergibt sich folgendes Diagramm:

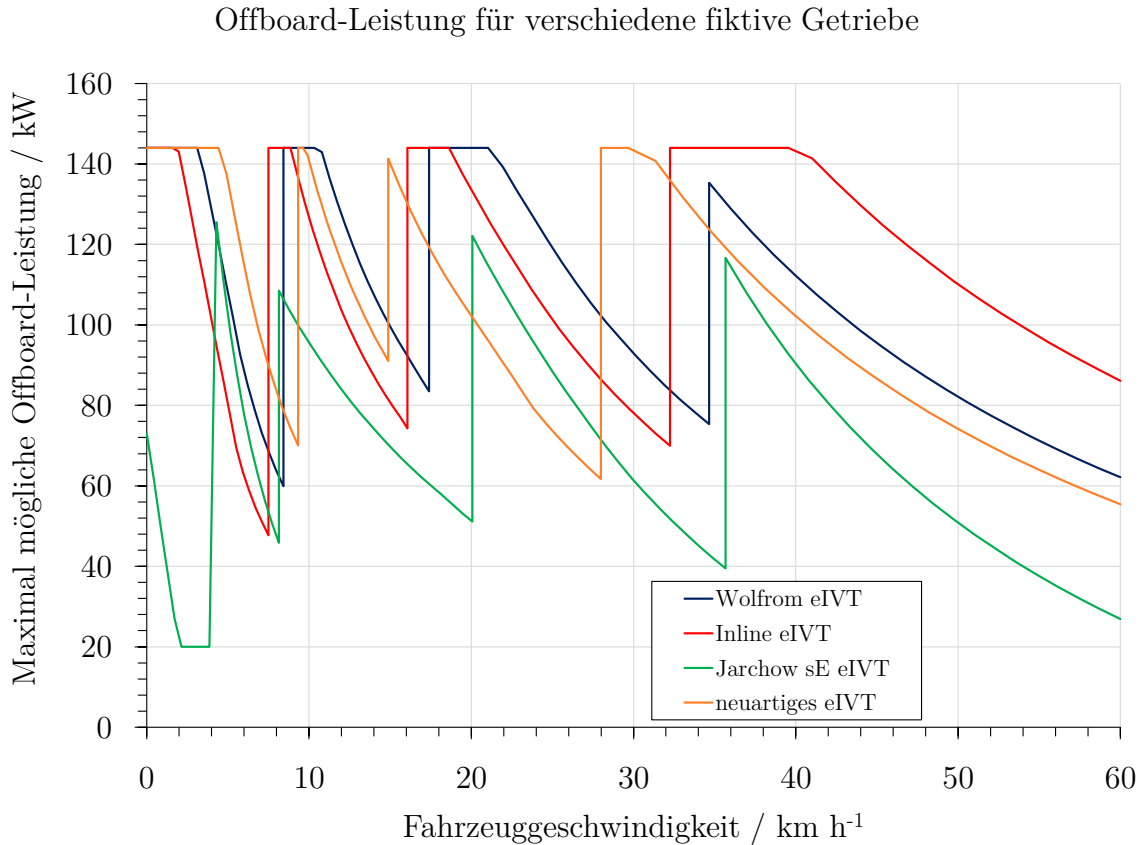


Abbildung 3.15: Vergleich der Offboard-Leistung der verschiedenen Getriebetopologien

Für das Jarchow-Getriebe mit Kriechgang wird deutlich, dass die bei niedrigen Geschwindigkeiten zur Verfügung stehende elektrische Leistung für Anbaugeräte linear mit der Zugleistung abnimmt. Hier wird die gesamte Zugleistung über den variablen Pfad übertragen und als elektrische Leistung steht nur die Differenz zwischen der maximalen generatorischen Leistung der eingangsseitigen elektrischen Maschine des variablen Pfades und deren aktueller generatorischer Leistung – die zum motorischen Betrieb der ausgangsseitigen elektrischen Maschine des variablen Pfades benötigt wird – zur Verfügung. Durch die Möglichkeit des Einsatzes von elektrischen Maschinen mit niedriger Leistung, die maßgeblich für den hohen Triebstrangwirkungsgrad des Systems verantwortlich sind, ergeben sich weiterhin niedrige Offboard-Leistungen am oberen Ende der jeweiligen Gänge. Diese können teilweise kompensiert werden, indem die elektrische Maschine *MG1* im Jarchow-Getriebe mit einer höheren Leistung installiert wird als die elektrische Maschine *MG2*. Diese Leistung ist dann nur dafür da, zusätzliche Offboard-Leistung zu erzeugen und die Höhe der Leistung wird so gewählt, dass die Anforderungen hinsichtlich der Offboard-Leistung erfüllt werden können. Die hierfür benötigte zusätzlich zu installierende elektrische Leistung ergibt sich zu ca. 20 kW. Der Wirkungsgrad wird hiervon nur geringfügig beeinflusst, da lediglich die elektrische Maschine *MG1* größer dimensioniert wird und hierdurch auch nur dort erhöhte Verluste entstehen. Mit einer Lastpunktverschiebung, wie in Abbildung 3.14 gezeigt, kann die geforderte Leistung von 45 kW auch mit einem Jarchow-Getriebe erreicht werden. Dies ist ab dem ersten leistungsverzweigten Gang, der ca. ab einer Geschwindigkeit von 4,5 km/h benutzt werden kann, möglich. Darunter steht eingeschränkt elektrische Leistung zur Ver-

fügung. Da auch bei niedrigen Geschwindigkeiten elektrische Leistung auf Anbaugeräten benötigt wird, ist dies als Nachteil des Jarchow-Getriebes zu werten.

3.4 Ausführung der Konstruktion

Zum Nachweis der grundsätzlichen technologischen Machbarkeit und für weitere Untersuchungen wird aus dem möglichen Traktorgetriebe ein Prüfstand abgeleitet. Er entsteht, indem der neuartige Kern des Getriebes isoliert als Prüfstand umgesetzt wird:

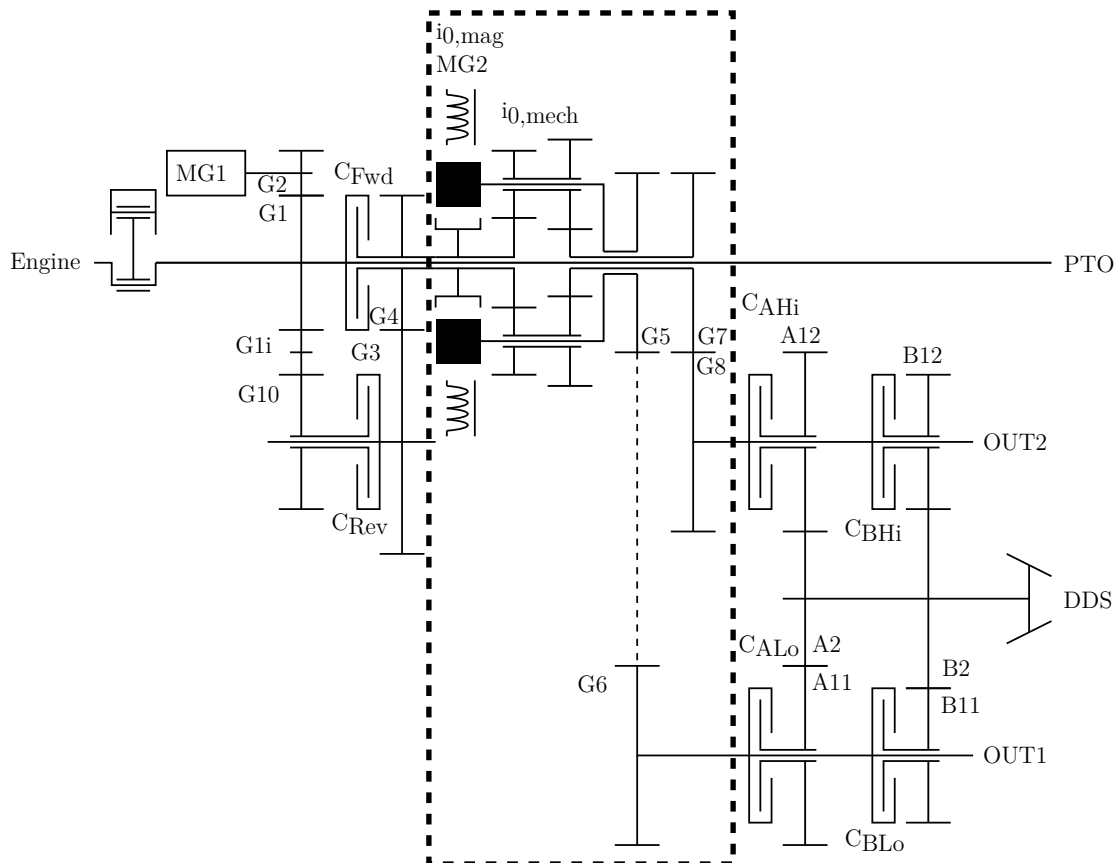


Abbildung 3.16: Strichdiagramm Prüfstand

Abbildung 3.16 zeigt den Ausschnitt aus dem möglichen Gesamtgetriebe, der im Rahmen des Prüfstandes untersucht werden soll. Hierfür wird die Variatorsektion, die den Kern des neuartigen Getriebes bildet, isoliert als Prüfstandsgetriebe umgesetzt. Die beiden Ausgangswellen werden über Stirnradstufen realisiert. Die beiden Seitenwellen stellen eine Erweiterung des in Abbildung 3.10d gezeigten Getriebes dar um eine vereinfachte Prüfstandskonstruktion zu realisieren. Der Kern – die Variatoreinheit – kann in jedem der Getriebe aus Abbildung 3.9 gefunden werden. Gemäß der Benennungen in Abbildung 3.9 sind die Zahnradnummern $G1$ bis $G4$ für die Drehrichtungsumkehr vorgesehen, so dass das erste nach dem Variator verwendete Zahnrad, welches nicht Teil eines Planetensatzes ist damit die Nummer $G5$ erhält. Ab dann wird fortlaufend weiter nummeriert, die Zahnräder der Gänge werden mit dem Buchstaben der Gänge und dann in fortlaufender Nummerierung bezeichnet, wobei bei doppelter Verwendung eines Abtriebszahnrades die beiden zugehörigen

Antriebszahnäder eine weitere Ziffer hinten angestellt bekommen, die deren Reihenfolge in der Schaltstrategie angibt. Die Reversiereinheit wird im Rahmen des Prüfstandes nicht umgesetzt. Diese Änderung gegenüber dem Traktorgetriebe vereinfacht das Lager- und Dichtungskonzept deutlich, ohne dass die Qualität der durchführbaren Messungen und Ergebnisse spürbar darunter leidet. An die beiden Ausgangswellen werden ebenfalls elektrische Maschinen angeschlossen. Mit diesen kann das Verhalten des Abtriebs simuliert werden. Gang *A1* ergibt sich über das Zahnradpaar *A11/A2* mit einem rechnerischen Übersetzungsverhältnis von $i_A = -1$, was auch das Übersetzungsverhältnis des Ganges *A2* ist. Dieser ergibt sich über das Zahnradpaar *A12/A2*. Analog ergibt sich Gang *B1* über das Zahnradpaar *B11/B2* mit einem rechnerischen Übersetzungsverhältnis von $i_B = -3$ was auch das Übersetzungsverhältnis des Ganges *B2* ist, welcher sich über das Zahnradpaar *B12/B2* ergibt. Durch die Isolierung der Variatorsektion aus dem kompletten Getriebe entfällt weiterhin die elektrische Maschine *MG1*. Da diese über eine feste Stirnradstufe mit dem Dieselmotor verbunden ist, kann sie das Drehmoment am Eingang der Variatorsektion verringern oder erhöhen. Dies ist im Prüfstandsbetrieb durch die den Dieselmotor abbildende elektrische Maschine ohnehin möglich. Da die benötigte Leistung im Prüfstandsbetrieb extern bezogen wird, wird auch die Wandlungsfunktion der elektrischen Maschine *MG1* nicht benötigt.

3.4.1 Schema des Prüfstandes

Die schematische Konstruktion des Prüfstandsgetriebes ist in Abbildung 3.17 dargestellt.

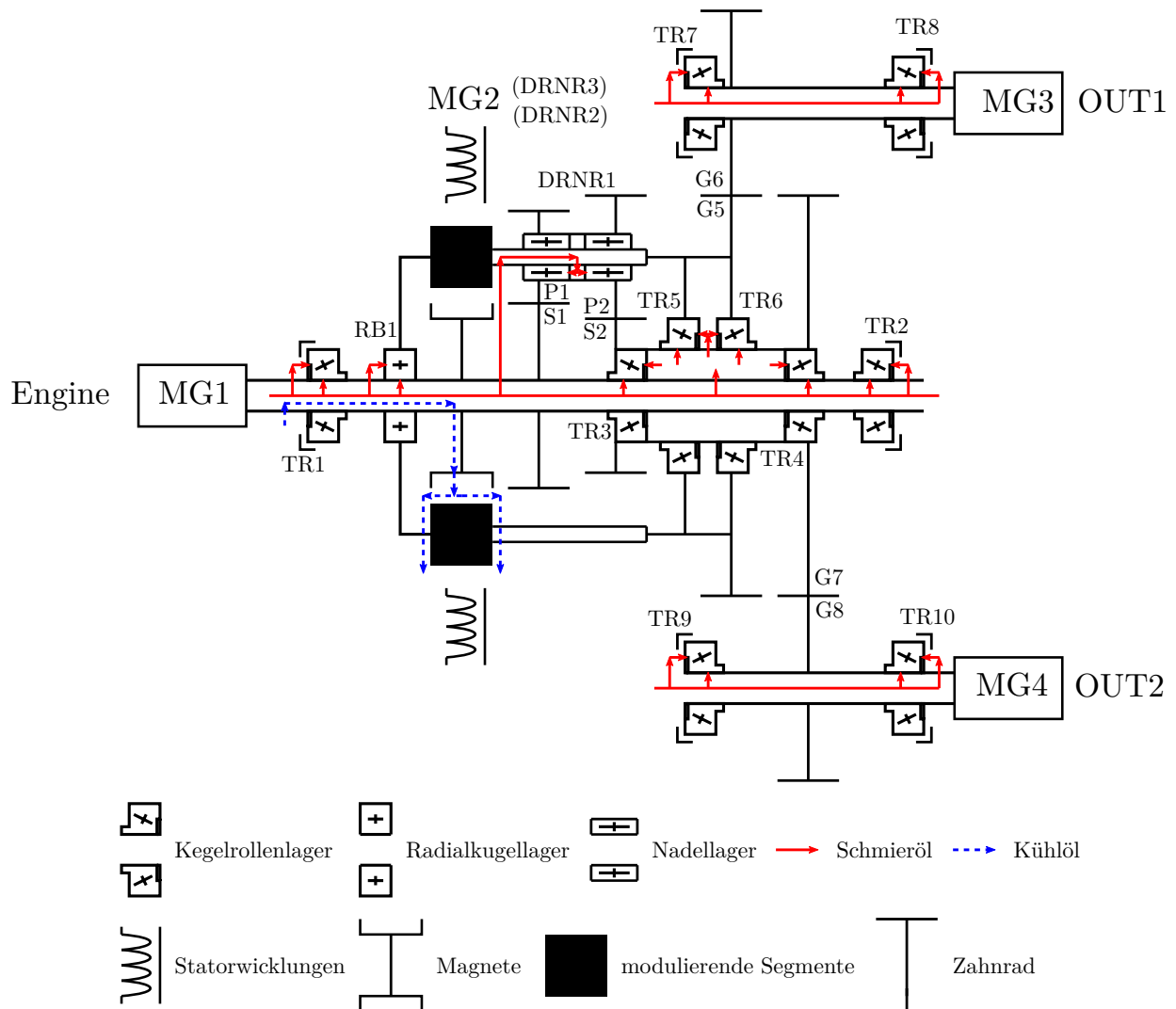


Abbildung 3.17: Schematische Darstellung des Prüfstandsgetriebes

Abbildung 3.17 zeigt einen schematischen Längsschnitt mit hohem Abstraktionsgrad durch die zu untersuchende Prüfstandsgetriebestufe inklusive der prüfstandsseitig angeschlossenen elektrischen Maschinen. Die Lager sind schematisch dargestellt und die Ölversorgung ist gezeigt. Auf weitere Details wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Die Eingangswelle, die im späteren Einsatz im Traktor vom Dieselmotor angetrieben wird, ragt links aus dem Getriebe heraus und ist gemäß des in Abbildung 3.16 dargestellten Strichdiagramms fest mit dem mit Permanentmagneten bestückten Rotor der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe und mit der größeren Sonne im Planetensatz verbunden. Die beiden Ausgangswellen der Variatorsektion werden über Stirnradstufen mit den in Fahrtrichtung des Traktors rechts und links symmetrisch liegenden Seitenwellen verbunden. Die Motoreingangswelle wird analog zur späteren Einbausituation im Traktor durch das komplette Getriebe durchgeführt. Sie verfügt über keine Möglichkeiten zur Belastung im Rahmen von Zapfwellenuntersuchungen, sondern dient hier im Getriebe lediglich zur

Realisierung einer Lagersituation, wie sie einem späteren Serieneinsatz entsprechen würde. Zur Lagerung aller sich drehenden Teile werden vorzugsweise Kegelrollenlager (*TR1* bis *TR10*) in angestellter Lagerung (X- oder O-Anordnung) verwendet. Diese Art von Lagerung ermöglicht einen spielfreien Einbau unter leichter Vorspannung und entspricht einer vorteilhaften Situation im späteren Serieneinsatz. Sie spiegelt den Stand der Technik bei den Traktorgetrieben der aktuellen Generation wider. Der Modulationsring wird auf der Eingangsseite zusätzlich mit einem Radialkugellager (*RB1*) abgestützt. Die Doppelplaneten werden mit je zwei Nadellagern gelagert (im Modell aus Berechnungsgründen realisiert als doppelreihige Nadellager *DRNR1*; weil außerhalb der Schnittebene liegend nicht dargestellt analog *DRNR2* und *DRNR3*). Die Schmierung und Kühlung der Teile erfolgt mit Öl aus der zentralen Welle, im oberen Teil des Schemas ist die Schmierölversorgung für die Lager und die Ölversorgung gegen Passungsrost an den Lagersitzen dargestellt. Nicht dargestellt ist der Ölfluss für die Versorgung von Steckverzahnungen, da im Schema keine Einzelteile, sondern nur Wellen mit allen montierten Teilen als Ganzes dargestellt werden. Im unteren Teil des Schemas ist gestrichelt die Kühlölversorgung für die integrierte elektrische Maschine zu sehen. Die Stirnradstufen werden zusätzlich an der Eingriffsstelle zwangsgeschmiert, auf die Darstellung dieser Schmierung wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Da manche Teile des Getriebes bereits in dieser oder leicht veränderter Form in anderen Traktorgetrieben der aktuellen Generation der John Deere GmbH & Co. KG Verwendung finden, wird teilweise auf diese Teile zurückgegriffen, um einerseits die Entwicklungskosten zu senken und andererseits auch Rückschlüsse auf den Einsatz dieser Teile in anderen Getrieben ziehen zu können. So ergibt sich die Auswahl einer von mehreren konstruktiven Lösungen bei manchen Teilen alleine aus der Ähnlichkeit zu bereits bestehenden Teilen. Die Kühlung der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe wird von der Kühlung und Schmierung der übrigen Bauteile getrennt. Sie wird realisiert, indem Öl zunächst von innen durch den Rotor axial mittig in den Luftspalt zwischen Rotor und Modulationsring geleitet wird, welches dann durch kleine Bohrungen im Modulationsring auf die Wickelköpfe des Stators geschleudert wird und so entstehende Wärme abtransportiert. Die Kühlung des Stators wird zusätzlich als Mantelkühlung mit Öl realisiert, aus Gründen der Übersichtlichkeit ist diese Kühlung im Schema ebenfalls nicht gezeigt. Hinsichtlich des Prüfstandes werden für die Vorzeichen von Drehzahl und Drehmoment sowie für die Benennung der Komponenten folgende Vereinbarungen getroffen:

- Die elektrische Maschine, welche den Schnittpunkt der in festem Drehzahlverhältnis zum Verbrennungsmotor stehenden elektrischen Maschine des Gesamtgetriebes mit dem Verbrennungsmotor simuliert (Eingangsseite), soll *MG1* genannt werden.
- Die in das Getriebe integrierte elektrische Maschine soll *MG2* genannt werden.
- Die mit der Ausgangswelle *OUT1* verbundene elektrische Maschine, die den Abtrieb simuliert, soll *MG3* genannt werden.
- Die mit der Ausgangswelle *OUT2* verbundene elektrische Maschine, die den Abtrieb simuliert, soll *MG4* genannt werden.

3.4.2 Lagerlebensdauerberechnung mit ROMAX

Der Nachweis der Lagertragfähigkeit erfolgt mit dem Tool Romax Designer R14.7.0. Das Programm verwendet für den Tragfähigkeitsnachweis die Berechnungsmethoden aus ISO 281 und deren Erweiterung bzw. Anpassung für die Berücksichtigung von Verkipfung der Wellen im Lager sowie den Einfluss des Schmierstoffs und dessen Verunreinigung. Der Prüfstand wird als vereinfachtes Modell in Romax Designer R14.7.0 modelliert, wobei das Gehäuse unberücksichtigt bleibt und die Betrachtung auf die rotierenden Teile beschränkt wird. Die Stirnradstufen werden als Konzept-Zahnradpaare mit Schrägverzahnung modelliert, Modifikationen wie Balligkeiten auf den Zahnflanken bleiben unberücksichtigt. Die mechanische Planetenstufe wird als detaillierte Planetenstufe modelliert, um Einflüsse wie Verkippen der Wellen und ungleiche Lastverteilung auf den Planeten und damit ungleiche Schädigung der Nadellager berücksichtigen zu können. Da in Romax Designer R14.7.0 kein Modell für die magnetische Planetenstufe zur Verfügung steht, wird diese als mechanische Planetenstufe in idealisierter Ausführung modelliert. Romax Designer R14.7.0 führt keine Plausibilitätsprüfung auf konstruktive Realisierbarkeit durch, sodass die magnetische Umlaufgetriebestufe als mechanische Planetenstufe modelliert werden kann, wobei das Hohlräder fest mit der inneren Welle verbunden wird und die Sonne im Inneren der Umlaufgetriebestufe mit idealen Konzeptlagern montiert wird. Die Drehzahl der Sonne entspricht dann der Drehzahl des elektrischen Feldes und die mechanische Planetenstufe bildet die Kinetik der magnetischen Umlaufgetriebestufe exakt nach. Durch den Einsatz einer idealen mechanischen Planetenstufe anstelle der magnetischen Umlaufgetriebestufe wird ebenfalls sichergestellt, dass keine Kräfte an Stellen in das Modell eingeleitet werden, an denen durch die magnetische Umlaufgetriebestufe auch keine Kräfte zu erwarten sind. Alle Lager werden gemäß der Konstruktion des Prüfstandes in Romax Designer R14.7.0 modelliert, d. h. auch deren Einbaubedingungen im Prüfstand wie Spiel am Innen- oder Außenring durch Einsatz von Sicherungsringen für Bohrungen werden berücksichtigt. Als Schmierstoff wird generisches Getriebeöl nach Spezifikation SAE 80W mit einer Verunreinigung von 17/14 nach ISO 4406 verwendet, was den Ansprüchen allgemeiner Maschinen sowie im Speziellen Getriebeölpumpen entspricht [Par11]. Die Lager werden mit einem Lastkollektiv beaufschlagt, welches sich wie folgt ergibt: Die Anforderung für die Gesamtarbeitsstunden eines Traktorgetriebes in dem betrachteten Leistungsbereich beträgt 10.000 h – 20.000 h [Fis+12]. Für eine konservative Auslegung werden 20.000 h gewählt. Diese 20.000 h werden auf die Fahrgeschwindigkeiten des Traktors gemäß der Geschwindigkeitsverteilungen von Resch [Res04] verteilt.

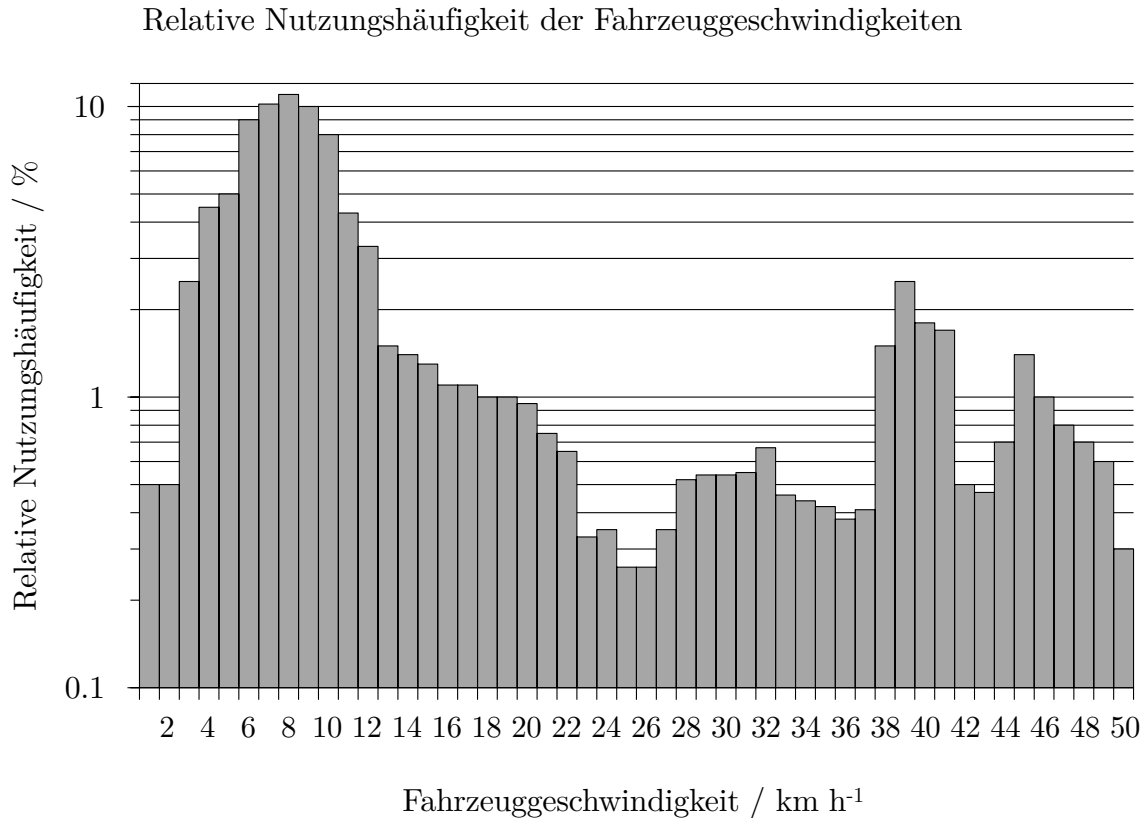


Abbildung 3.18: Geschwindigkeitsverteilung nach [Res04]

Abbildung 3.18 zeigt die relative Nutzungsdauer eines Traktors bezogen auf Fahrgeschwindigkeiten zwischen 1 km/h und 50 km/h nach Resch, die eine Erweiterung der ursprünglichen Annahmen von Renius [Ren87] darstellt. Für alle Geschwindigkeiten bis 20 km/h, die den Bereich der Feldarbeit darstellen [Len01], werden die Eingangsleistungen des Getriebes festgelegt, indem die von der DLG verwendeten Zyklen [DLG16a] [DLG16b] gleichmäßig gewichtet und die Eingangsleistungen dann nach ihrem relativen Zeitanteil aufgeteilt werden. Für den DLG-Zyklus *Pflügen 100 %* wird beispielsweise eine Eingangsleistung von 100 % des Verbrennungsmotors angenommen, während für *Pflügen 60 %* eine Eingangsleistung von 60 % der Maximalleistung des Verbrennungsmotors angenommen wird. Wenn in den DLG-Zyklen Zapfwellenleistung benötigt wird oder Hydraulik zum Einsatz kommt, dann wird an dieser Stelle angenommen, dass jede der beiden Varianten die am Motor zur Verfügung stehende Leistung um jeweils 20 kW reduziert [JE16] [DKG04]. Hierbei handelt es sich um eine konservative Annahme, da die benötigten Leistungen für Zapfwellenbetrieb und Hydraulik 20 kW durchaus übersteigen können. Durch die Annahme von 20 kW wird dadurch tendenziell eine höhere Getriebeeingangsleistung angenommen. Welche Leistung dann am Getriebeeingang anliegt, richtet sich danach, ob der Motor im aktuellen Betriebspunkt an der durch IPM möglichen Leistungsgrenze betrieben wird oder nicht (sog. Zapfwellenboost). Wird der Motor an der Leistungsgrenze betrieben, z. B. im Zyklus *Transport 100 %* bei Geschwindigkeiten von 24 km/h und mehr, dann wird die Leistung am Getriebeeingang entsprechend reduziert. Steht noch genug Motorleistung zur Verfügung, um Zapfwelle und/oder Hydraulik zu versorgen, dann verändert sich die am Getriebeeingang

anliegende Leistung nicht. Das bedeutet, dass für Zyklen, die im Geschwindigkeitsbereich unterhalb der niedrigsten für IPM infrage kommenden Geschwindigkeit (20 km/h) liegen, nur dann eine Reduktion der Getriebeeingangsleistung erfolgt, wenn ein Volllastbetriebspunkt außerhalb des traktionslimitierten Bereichs vorliegt und Hydraulik sowie Zapfwelle gleichzeitig aktiv sind. Für Geschwindigkeiten größer 20 km/h werden die Getriebeeingangsleistungen gleichmäßig gemäß der beiden DLG-Zyklen für Transport aufgeteilt. Für den Hauptarbeitsbereich des Traktors ergeben sich je Geschwindigkeit sechs Lastpunkte, die aus je zwei DLG-Zyklen bestehen, deren Nutzungshäufigkeit gleichmäßig verteilt ist. Für den Transportbereich beträgt die relative Nutzungsdauer je 50 % für die relativen Getriebeeingangsleistungen von 100 % und 20 %. Der vergleichsweise hohe Anteil von 50 % Volllast im Transportbereich wird durch den Umstand gemildert, dass der Transport nur einen vergleichsweise geringen Anteil an der Gesamtnutzungsdauer des Traktors bei einer angenommenen Geschwindigkeitsverteilung nach Resch (Abbildung 3.18) aufweist. Aus der Geschwindigkeitsverteilung in Abbildung 3.18 und der Leistungsverteilung aus den DLG-Zyklen ergeben sich insgesamt 176 Lastpunkte, die zusammen eine Betriebsdauer von 20.000 h aufweisen. Das im Prüfstand realisierte Getriebe wird mit Romax Designer 14.7.0 mit diesem Lastkollektiv beaufschlagt, um nachzuweisen, dass das entwickelte Modul für den Einsatz in einem Traktorgetriebe geeignet ist. Hierfür wird die Schädigungssumme aller Lager betrachtet, die nach den 20.000 h für jedes einzelne Lager den Wert von 100 % nicht übersteigen darf. Ein weiteres Lastkollektiv, welches für das entwickelte Getriebe analysiert werden kann, ergibt sich durch Verwendung des Standardkollektivs nach [Ren04], zit. nach [Res04]. Das dort skizzierte Standardkollektiv kann durch die Gleichung

$$\frac{F_Z}{F_G} = 0,75 \cdot \sqrt{\log \left(\frac{1}{\Sigma t} \right)} \quad (3.94)$$

in guter Näherung beschrieben werden, wobei F_Z für die Zugkraft an allen vier Rädern, F_G für die mit dem Traktorleergewicht bestimmte Gewichtskraft und Σt für die Summenhäufigkeit der Zeitanteile steht. Abbildung 3.19 zeigt die grafische Darstellung der Gleichung 3.94:

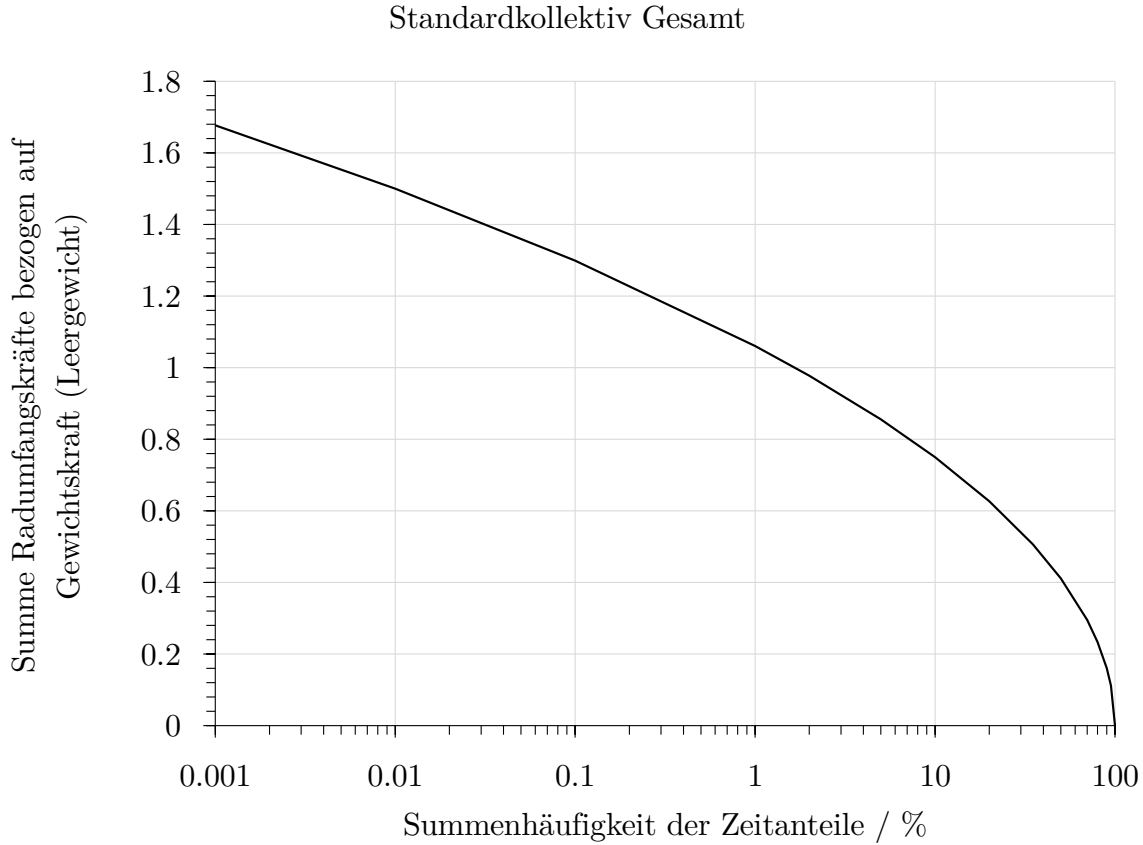


Abbildung 3.19: Standardkollektiv nach [Ren04], zit. nach [Res04]

Aufgetragen in Abbildung 3.19 ist auf der horizontalen Achse die Summenhäufigkeit der Zeitanteile in % und auf der vertikalen Achse die Summe der Radumfangskräfte bezogen auf die durch das Traktorleergewicht entstehende Gewichtskraft. Dieser Wert kann über 1 liegen, da der Traktor auch in Situationen genutzt wird, in denen das Gesamtgewicht deutlich über dem Leergewicht liegt. Weiterhin werden dadurch verschiedene Bodenbeschaffenheiten und die Schwankung des Reibbeiwertes zwischen Reifen und Boden berücksichtigt. Das Standardkollektiv kann analog zu den aus den DLG-Zyklen entstandenen sechs Lastpunkten in sechs Bereiche zerlegt werden, wobei für jeden Bereich der Durchschnitt der Summe der Radumfangskräfte bezogen auf die durch das Traktorleergewicht entstehende Gewichtskraft nach folgender Formel berechnet werden kann:

$$\left(\frac{F_Z}{F_G}\right)_i = \frac{1}{\Sigma t_i - \Sigma t_{i-1}} \cdot 0,75 \cdot \int_{\Sigma t_{i-1}}^{\Sigma t_i} \sqrt{\log\left(\frac{1}{\Sigma t}\right)} \quad (3.95)$$

Aufgrund der Komplexität des Integrals bieten sich hier numerische Lösungen an. Auf eine analytische Herleitung des unbestimmten Integrals wird verzichtet. Die Abstufung der sechs Bereiche wird exponentiell gewählt, um dem logarithmischen Verlauf der Funktion Rechnung zu tragen. Jeder Bereich ist genau doppelt so groß wie der vorhergehende, wobei die Gesamtdauer in sechs Teilbereiche zerlegt wird. Analog zu den DLG-Zyklen ergeben sich folgende sechs Betriebsbereiche:

Lastfall	rel. Zeitanteil	Faktor F_Z/F_G
LC1	0,508	0,258
LC2	0,254	0,499
LC3	0,127	0,656
LC4	0,0635	0,790
LC5	0,03125	0,922
LC6	0,01625	1,114

Tabelle 3.3: Zeitanteile Standardkollektiv

Aus den Radumfangskräften kann für jede Geschwindigkeit die Leistung des Traktors berechnet werden, die unterhalb der zur Verfügung stehenden Leistung am Getriebeeingang liegen muss. Damit kann bestimmt werden, bei welchen Fahrgeschwindigkeiten die Lastpunkte erreicht werden können. Ein hohes Verhältnis der Radumfangskräfte bezogen auf die durch das Traktorleergewicht entstehende Gewichtskraft kann nur bei niedrigen Geschwindigkeiten erreicht werden. Der Lastpunkt 1 kann im betrachteten Fahrzeug bis zu einer Geschwindigkeit von 25 km/h erreicht werden, sodass die Lastpunkte für die Betrachtung des Standardlastkollektivs entsprechend der relativen Geschwindigkeitsverteilung nach Resch bis 25 km/h gewählt werden. Geschwindigkeiten größer 25 km/h werden nicht betrachtet. Wenn bekannt ist, welche Lastpunkte bis zu welcher Geschwindigkeit erreicht werden können, wird die Festlegung getroffen, dass die Gesamtverteilung der Lastpunkte nach Tabelle 3.3 erfolgen soll, während die Verteilung auf die jeweiligen Geschwindigkeiten gemäß deren Verhältnis der relativen Benutzungsdauer nach Resch erfolgen soll. Damit können 54 Lastpunkte bestimmt werden, die wiederum eine Gesamtbetriebsdauer von 20.000 Stunden aufweisen. Abbildung 3.20 zeigt die berechnete Schädigungssumme für jedes einzelne Lager nach Durchlauf aller 176 bzw. 54 Lastpunkte für beide Lastkollektive:

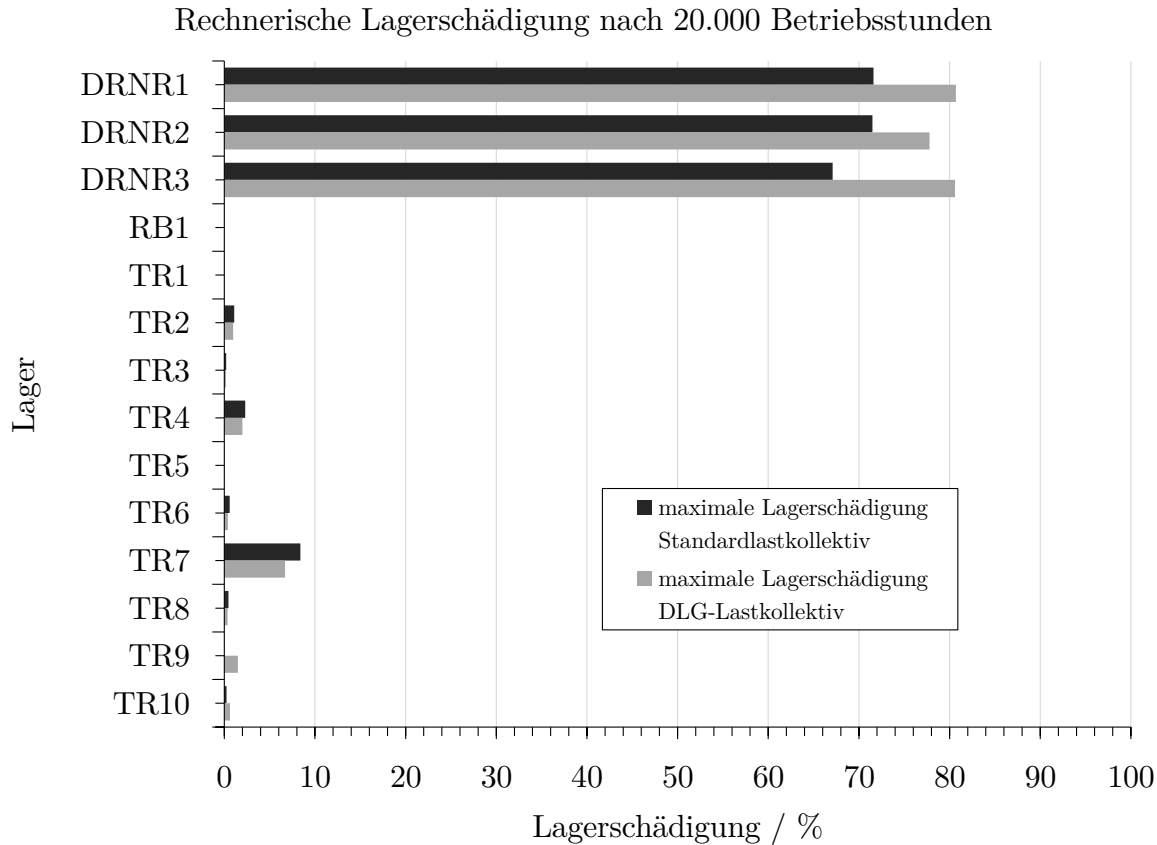


Abbildung 3.20: Schädigungssumme für die einzelnen Lager

Wie aus Abbildung 3.20 ersichtlich wird, überstehen alle Lager beide Lastkollektive, die höchsten Schädigungssummen ergeben sich für die Lager der mechanischen Planetenstufe und liegen knapp über 80 %. Für jedes Lager dargestellt ist die höchste Schädigungssumme aus den Berechnungsmethoden aus ISO 281 und deren Erweiterung bzw. Anpassung für die Berücksichtigung von Verkippung der Wellen im Lager sowie den Einfluss des Schmierstoffs und dessen Verunreinigung. Für die Planetenlager ist zu beachten, dass bei der Berechnung mit Romax Designer R14.7.0. der Planetenträger nicht dreht. Aus diesem Grund ergeben sich unterschiedliche Schädigungssummen für die einzelnen Planetenlager, während sie eigentlich mathematisch und analytisch gleich hoch sein sollten. Aus diesem Grund wird hierfür meist vereinfachend angenommen, dass jedes einzelne Planetenlager Schaden in Höhe der höchsten Schädigungssumme für alle drei Planetenlager erleidet. Zu beachten ist weiterhin, dass die Lagerkonfiguration des Prüfstandes von der Konfiguration im kompletten Getriebe abweicht: Zapfwelle und Eingangswelle sind mechanisch fest miteinander verbunden. Diese Entscheidung wurde getroffen, um die Konstruktion und den Betrieb des Prüfstandes zu vereinfachen und damit dessen Kosten zu senken. Eine solche mechanische Verbindung ist in der Konfiguration im kompletten Traktorgetriebe nicht möglich, da der Dieselmotor nur in eine Drehrichtung betrieben werden kann und zusätzlich die Zapfwelle eine feste Drehrichtung aufweisen muss. Rückwärtsfahrt wird im kompletten Traktorgetriebe entsprechend über eine Vorgelegewelle realisiert, was die Lagersituation für die Eingangswelle der Variatorsektion entsprechend verändert. Weiterhin weisen die Ausgangswellen des Variatormoduls des Prüfstands Stirnradstufen auf, die in einer Konfi-

guration als komplettes Getriebe nicht unbedingt zum Einsatz kommen würden, da der Abtrieb auch koaxial erfolgen könnte und die Zahnräder für die einzelnen Gänge auf den koaxial weiterführenden Ausgangswellen realisiert werden könnten. Weiterhin denkbar ist auch eine Realisierung der Gänge über Planetensätze wie in Abbildung 3.9f gezeigt. Für die Betrachtung im kompletten Getriebe bedeutet das, dass die Ausgangswellen an ihrem hinteren Ende Axialkräfte erfahren können, denen durch eine entsprechend angepasste Lagerung begegnet werden muss, bzw. keine Axialkräfte erfahren, wenn nur geradzahnte Planetensätze zum Einsatz kommen. Die Tatsache, dass die Schädigungssumme der Lager 85 % nicht überschreitet, trägt diesen Punkten Rechnung. Für die Erweiterung des Variatormoduls zum kompletten Traktorgetriebe und den sich daraus ergebenden gegenüber dem Prüfling veränderten Belastungssituationen für die Lager kann davon ausgegangen werden, dass ausreichend Reserven vorhanden sind und dass ein tragfähiges Lagerkonzept auch im gesamten späteren Traktorgetriebe realisiert werden kann.

3.4.3 Auslegung des magnetisch-elektrischen Teils

Eine detaillierte Auslegung des magnetisch-elektrischen Teils des Getriebes kann im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen werden. Die magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe wird extern entwickelt. Als Hauptabmessungen werden die in Abschnitt 3.3.4 genannten Maße verwendet. Mit den Wickelköpfen und Kabelabgängen ergibt sich für die letztendlich gefertigte elektrische Maschine eine axiale Länge von ca. 380 mm und mit dem Kühlmantel ein Außendurchmesser von ca. 425 mm. Es kann angenommen werden, dass für zukünftige Neuentwicklungen einer solchen magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe diese Maße in sinnvollen Grenzen variiert werden können, wenn das durch sie beschriebene Volumen konstant bleibt. Der Stator wird mit 48 Nuten in verteilter Wicklung realisiert und der Rotor mit 36 vergrabenen Permanentmagneten in V-Anordnung, die zusammen 9 Polpaare bilden. Der Modulationsring mit 13 modulierenden Segmenten wird aus zwei Edelstahlscheiben aufgebaut, zwischen denen laminierte GFK-Stäbe verbaut werden. In die Lücken zwischen den GFK-Stäben werden Blechpakete geschichtet, die die modulierenden Segmente des Modulationsrings bilden. Der so zusammengesetzte Modulationsring wird mit einer Glasfaserbandage überzogen, um den im Betrieb wirkenden Zentripetalkräften zu begegnen.

3.4.4 Ergebnisse der Auslegung und Bedeutung für das weitere Vorgehen

Die Nenndrehzahl für Dieselmotoren zukünftiger Traktorgenerationen ist noch nicht bekannt. Daher wurde eine Nenndrehzahl von 2100 min^{-1} gewählt, was der Nenndrehzahl von Traktoren der aktuellen Generation entspricht [Dee19c]. Die Auslegung auf diesem Drehzahlniveau ist konservativ sicher, da sie die Anforderung an den Missbrauchsfall – eine maximale Motordrehzahl von 3000 min^{-1} bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h – verschärft. Wird der Traktor bei einer Fahrgeschwindigkeit von 60 km/h bereits mit einer Motordrehzahl von 2100 min^{-1} betrieben, so ist die noch zur Verfügung stehende Drehzahldifferenz kleiner, als wenn 60 km/h schon mit einer Motordrehzahl von 1900 min^{-1} erreicht werden. Ebenso wird die integrierte elektrische Maschine durch die Wahl dieser leicht erhöhten Motornenndrehzahl einer erhöhten Belastung ausgesetzt, da die Motordrehzahl dort direkt die auftretenden Relativedrehzahlen bestimmt, die ihrerseits wiederum maßgeblich für die

auftretenden Verluste sind. Es kann daher angenommen werden, dass das Getriebe und auch insbesondere die magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe noch auf einem geringfügig höheren Wirkungsgradniveau betrieben werden kann, wenn sich für zukünftige Traktor-generationen eine Dieselmotorenndrehzahl einstellt, die unterhalb von 2100 min^{-1} liegt. Die Festlegung, ein Getriebe für eine Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h zu entwickeln, ist insofern von Bedeutung, als dass dadurch in gewissen Maßen die Drehzahlen und damit auch die Relativdrehzahlen in der integrierten elektrischen Maschine bestimmt werden. Der Anteil an Traktoren, der eine Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h aufweist, ist gering, die Anforderung, dass diese Geschwindigkeit mit dem Getriebe erreicht werden kann, lässt sich alternativ auf zwei andere Arten verstehen: Zum einen wird durch diese Anforderung das Verhalten des Getriebes im Missbrauchsfall – der Traktor fährt im Schubbetrieb bergab mit bis zu 80 km/h – verbessert, da die dann im Verbrennungsmotor auftretende Drehzahl geringer ausfällt als bei einem Getriebe mit einer Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h . Zum anderen kann diese Anforderung auch so verstanden werden, dass eine Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h bei einer reduzierten Drehzahl des Dieselmotors von entsprechend 1750 min^{-1} erreicht werden soll. Dies entspricht genau 60 km/h bei 2100 min^{-1} und ist eine gängige Anforderung für moderne Traktorgetriebe, um treibstoffsparende Transportarbeiten zu ermöglichen.

3.5 Messungen am Prüfgetriebe

Mit dem Prüfstand sollen folgende Fragestellungen untersucht werden: Es ist zu betrachten, ob die konzipierte magnetisch-elektrisch leistungsverzweigte Umlaufgetriebestufe hinsichtlich der auftretenden Drehmomente und Leistungen grundsätzlich technisch realisierbar ist. Diese Untersuchung steht in Relation zu den Forschungsfragen 2 und 4, die in Abschnitt 2.3 beschrieben wurden. Weiterhin ist zu untersuchen, ob die Kühlung im Betriebspunkt des aktiven Stillstandes dauerhaft realisierbar ist. Diese Untersuchung bringt Erkenntnisse für die zukünftige Auslegung von weiteren magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Umlaufgetriebestufen, da hiermit der Betriebspunkt der maximal auftretenden (virtuellen) Drehzahl bestimmt werden kann. Als Nächstes soll herausgearbeitet werden, wie der Wirkungsgrad des Gesamtgetriebes vom Betriebspunkt abhängt. Diese Untersuchung geht den Forschungsfragen 4 und 5 nach und liefert darüber hinaus Erkenntnisse, inwieweit die realen Ergebnisse mit den Annahmen aus den Abschätzungen zum Gesamtwirkungsgrad übereinstimmen. Der Wirkungsgrad des Gesamtgetriebes liefert wichtige Erkenntnisse zur Beantwortung der Forschungsfrage 3. Die schematische Darstellung des Prüfstandes ist in Abbildung 3.21 gezeigt:

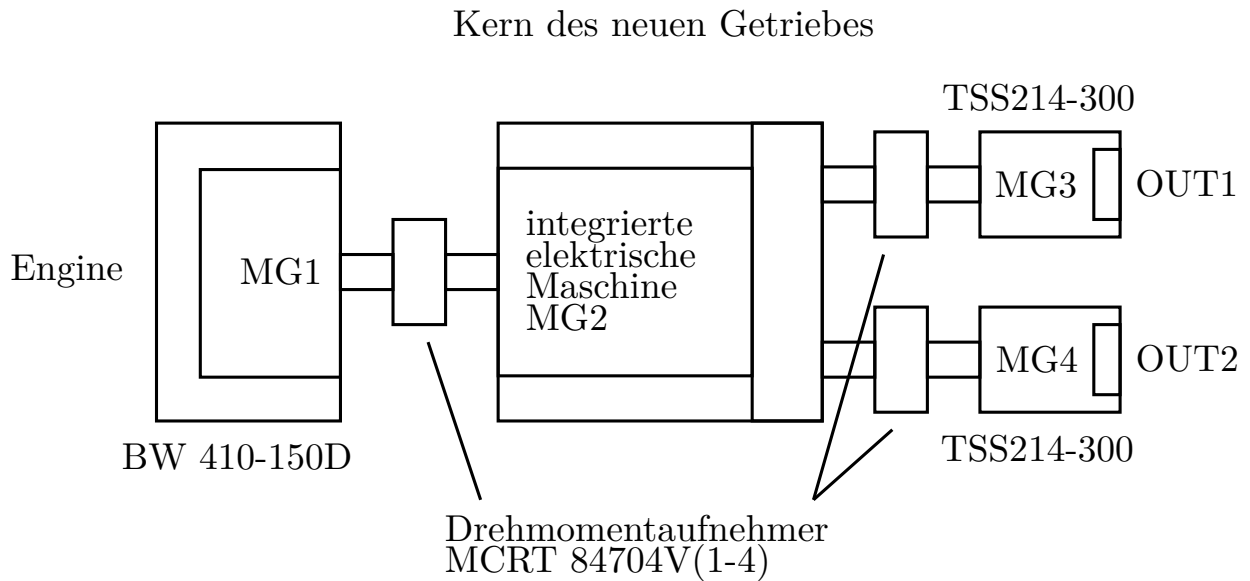


Abbildung 3.21: Schematische Darstellung des Prüfstandes

Abbildung 3.21 zeigt in Analogie zu Abbildung 3.17 den grundsätzlichen Aufbau des Prüfstandes. Die Getriebeeingangsseite (*Engine*, *MG1*) wird durch eine elektrische Maschine der Firma BorgWarner Inc., Typ BW 410-150D abgebildet. Die beiden Ausgangswellen (*OUT1* und *OUT2*) werden mit elektrischen Maschinen (*MG3* und *MG4*) der Firma Schabmüller GmbH, Typ TSS214-300 verbunden. Zwischen äußeren Wellen und elektrischen Maschinen wird je ein Drehmomentaufnehmer der Firma S. Himmelstein and Company, Typ MCRT 84704V(1-4) gesetzt. Nicht dargestellt ist die Ölversorgung, die über flexible Schläuche mit einer externen Einheit zur Ölkühlung und Ölaufbereitung realisiert wird. Damit stehen am Prüfstand die folgenden Mess- und Regelgrößen zur Verfügung:

- Drehzahl und Drehmoment am Getriebeeingang und an beiden Ausgangswellen *OUT1* und *OUT2*, aufgenommen über Drehmomentaufnehmer MCRT 84704V(1-4) und zusätzlich abgleichbar mit den Drehzahlgebern der externen elektrischen Maschinen und deren Umsetzungstabellen für die Ableitung des Drehmomentes aus der Stromaufnahme.
- Frequenz, Spannung, Stromstärke und Leistung der integrierten elektrischen Maschine, eingestellt am Inverter und gemessen zwischen Inverter und elektrischer Maschine.
- Öltemperatur im Ölreservoir (Sumpf), gemessen über die Anlage zur Ölkühlung und Ölaufbereitung des Prüfstandes.
- Temperatur in der Mitte der Nuten der Statorspulenwicklung und in der Mitte des Wickelkopfes der integrierten elektrischen Maschine, gemessen über dort eingebrachte temperaturabhängige Widerstände (PT100).

Die Größen lassen sich zu verschiedenen weiteren Größen kombinieren, allen voran die mechanische Leistung als Kombination aus Drehmoment und Drehzahl. Die integrierte elektrische Maschine kann durch Berechnung einer fiktiven Drehfeldposition aus den Positionen der Positionsgeber der externen elektrischen Maschine am Eingang und der mit dem Modulationsring in direkter Verbindung stehenden externen elektrischen Maschine am

Ausgang *OUT1* über eine eigene Umsetzungstabelle in den Betriebsmodi Gleichstromregelung, Wechselstromregelung, Drehzahlregelung und Drehmomentregelung betrieben werden. Die Drehzahlregelung stellt hierbei den wichtigsten Anwendungsfall für den Einsatz in einem Traktorgetriebe dar. Durch die begrenzte Leistungsfähigkeit hinsichtlich Drehmoment der verwendeten Schabmüller-TSS214-300-Elektromotoren als Lastmaschinen konnte das Gesamtgetriebe bei maximal 41,3 % der Auslegungsmotorleistung betrieben werden. Ein zusätzlicher Messdurchlauf des Lastwirkungsgrades wurde bei 20,8 % der Auslegungsmotorleistung durchgeführt. Für die Messungen des Lastwirkungsgrades wurden über der sich ergebenden Fahrgeschwindigkeit je 80 Punkte aufgenommen, an denen die Messwerte über eine Mittelwertbildung aus 10 im Abstand von mindestens 1 s aufgenommenen Einzelmessungen gebildet wurden. Die Datenaufnahme erfolgte elektronisch, um Ablesefehler auszuschließen. Die Messungen wurden bei einer Öltemperatur von 70 °C und einem Schmier- und Kühllöldruck von 0,2 bar (über Atmosphäre) durchgeführt, wobei der Ölvolumenstrom durch eingebrachte Drosselbohrungen limitiert wurde. Wie aus Abbildung 3.17 ersichtlich und bereits zuvor erwähnt gibt im Prüfstandsbetrieb immer eine der beiden abtriebsseitigen Maschinen *MG3* und *MG4* das Lastmoment vor, während die andere Maschine lastfrei mitdreht.

3.5.1 Auswertung der Messergebnisse

Trägt man den am Prüfstand gemessenen Wirkungsgrad im Stator der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe bei der erreichten maximalen Last (41,3 % der Auslegungsmotorleistung) bei konstanter Rotordrehzahl von 2100 min^{-1} über der resultierenden (fiktiven) Drehzahl des Statorfeldes auf, so ergibt sich folgendes Diagramm:

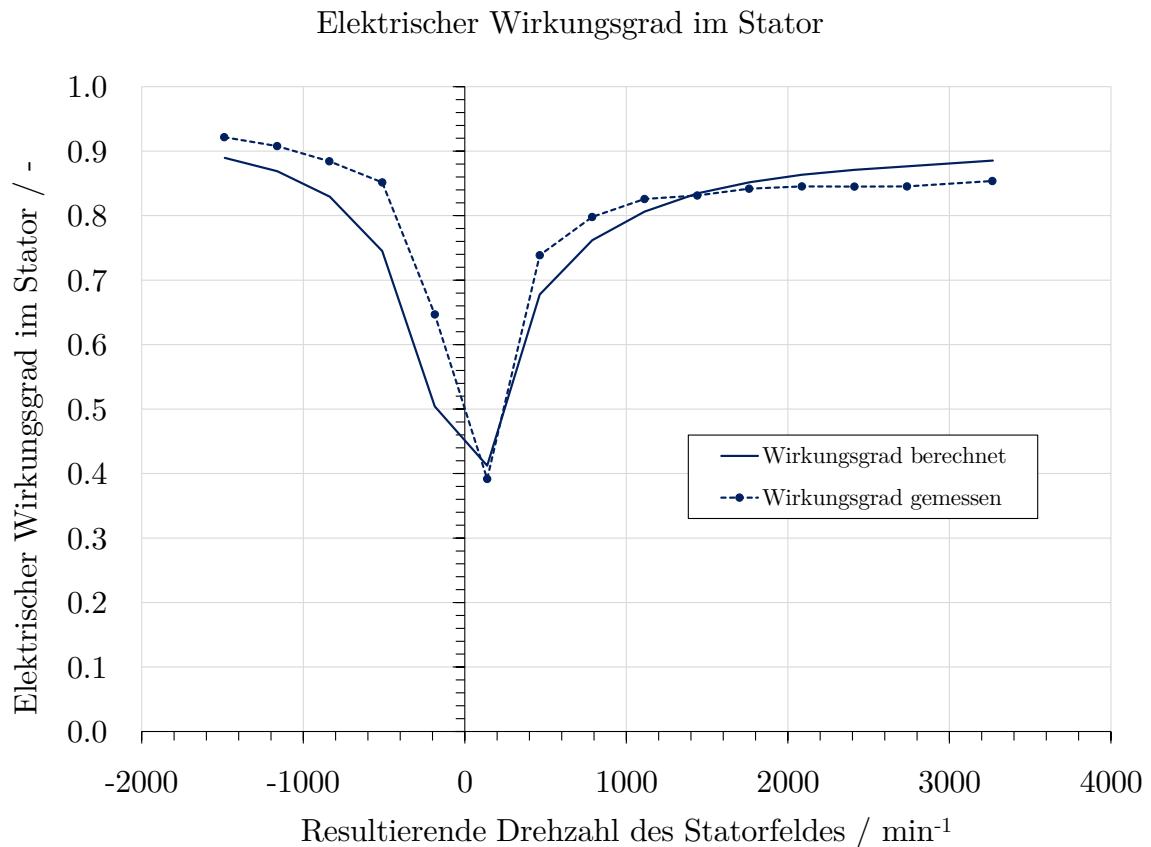


Abbildung 3.22: Statorwirkungsgrad der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe bei konstanter Rotordrehzahl

Die über den Stator zugeführte oder abgegebene Leistung ist eine direkte Messgröße am Prüfstand. Das mechanische Drehmoment am Stator lässt sich aus den an den beiden anderen Komponenten der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe anliegenden Drehmomenten abzüglich der abgeschätzten Schleppmomente ermitteln. Dieses wird mit der fiktiven Stator-drehzahl multipliziert, um so eine mechanische Leistung zu errechnen. Dividiert man diese Leistung durch die gemessene zugeführte oder abgegebene elektrische Leistung ergibt sich der Wirkungsgrad im Stator. Dieser Wirkungsgrad ist somit ein Maß für die Umsetzung von elektrischer Leistung in mechanische Leistung im Motorbetrieb sowie von mechanischer Leistung in elektrische Leistung im Generatorbetrieb. Für den Bereich niedriger Frequenzen des Stators (resultierende Drehzahl im Bereich $\pm 500 \text{ min}^{-1}$) ist die elektrische Leistungsmessung mit hohen Unsicherheiten verbunden, da die Messung bei den dann auftretenden niedrigen Frequenzen durch die Pulsbreitenmodulation bei diesen Frequenzen technisch schwierig ist. Die Werte in diesem Frequenzbereich sind daher besonders kritisch zu betrachten. Da das Diagramm bei konstanter Rotordrehzahl von

2100 min⁻¹ aufgenommen wurde, kann die Drehzahl des Modulationsrings mit den in Unterabschnitt 2.1.5 angegebenen Gleichungen aus den Drehzahlen von Rotor und Statorfeld berechnet werden. Vergleicht man den aus den Messdaten errechneten Statorwirkungsgrad mit den theoretischen Prognosen, die sich aus Abschnitt 3.3.4 herleiten lassen, so zeigt sich, dass die Abschätzung qualitativ richtig ist. Damit ist auch naheliegend, dass die in Abschnitt 3.3.4 vorgenommene Abschätzung der Eisenverluste und Magnetverluste qualitativ richtig ist. Eine unabhängige Messung von Eisenverlusten und Magnetverlusten ist mit dieser Konstruktion bzw. dem verwendeten Versuchsaufbau nicht möglich. Der sich aus den addierten Verlusten ergebende Wirkungsgrad und dessen qualitative Übereinstimmung mit dem prognostizierten Wirkungsgrad lässt schlussfolgern, dass das verwendete Modell grundsätzlich als valide angesehen werden kann. Um die quantitative Übereinstimmung zu verbessern, können die verwendeten Kennzahlen und Kennwerte entsprechend angepasst werden. Im Punkt der Drehzahl des Statorfeldes von 0 min⁻¹ ändert sich die Betriebsart der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe von motorisch in generatorisch und umgekehrt. Auffällig ist, dass die Abweichung im linken der beiden Betriebsbereiche (motorischer Betrieb) systematisch nur in eine Richtung von den Berechnungen vorliegt während die Abweichung im generatorischen Betrieb in beide Richtungen gegenüber der Berechnung verschoben ist. Dies legt die Vermutung nahe, dass das Rechenmodell für die Verluste in der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe, insbesondere die getroffenen Annahmen zur Verteilung von Wirbelstrom- und Hystereseverlusten sowie die Vereinfachung der durch die Geometrie der Bauteile (Statornutung, Gestaltung der modulierenden Segmente, Anschlussgeometrie) hervorgerufenen Zusatzeffekte, wie in Abschnitt 3.3.4 beschrieben, noch Verbesserungspotenzial bietet. Weiterhin nicht experimentell erfasst und daher mit den gleichen Annahmen wie für die Abschätzung des Wirkungsgrades in die Ergebnisse mit einbezogen sind die Verluste des Inverters, da die Messung der elektrischen Leistung am Prüfstand am Punkt zwischen Inverter und elektrischer Maschine stattfand. Da die analytische Erfassung dieser Effekte mit dem verwendeten Versuchsaufbau nicht möglich ist, sei dies hier als Potenzial für eine weitere Verbesserung erwähnt. Trägt man das an Rotor, Modulationsring und Stator der integrierten elektrischen Maschine maximal gemessene Drehmoment über der Stromstärke auf, so ergibt sich folgendes Bild:

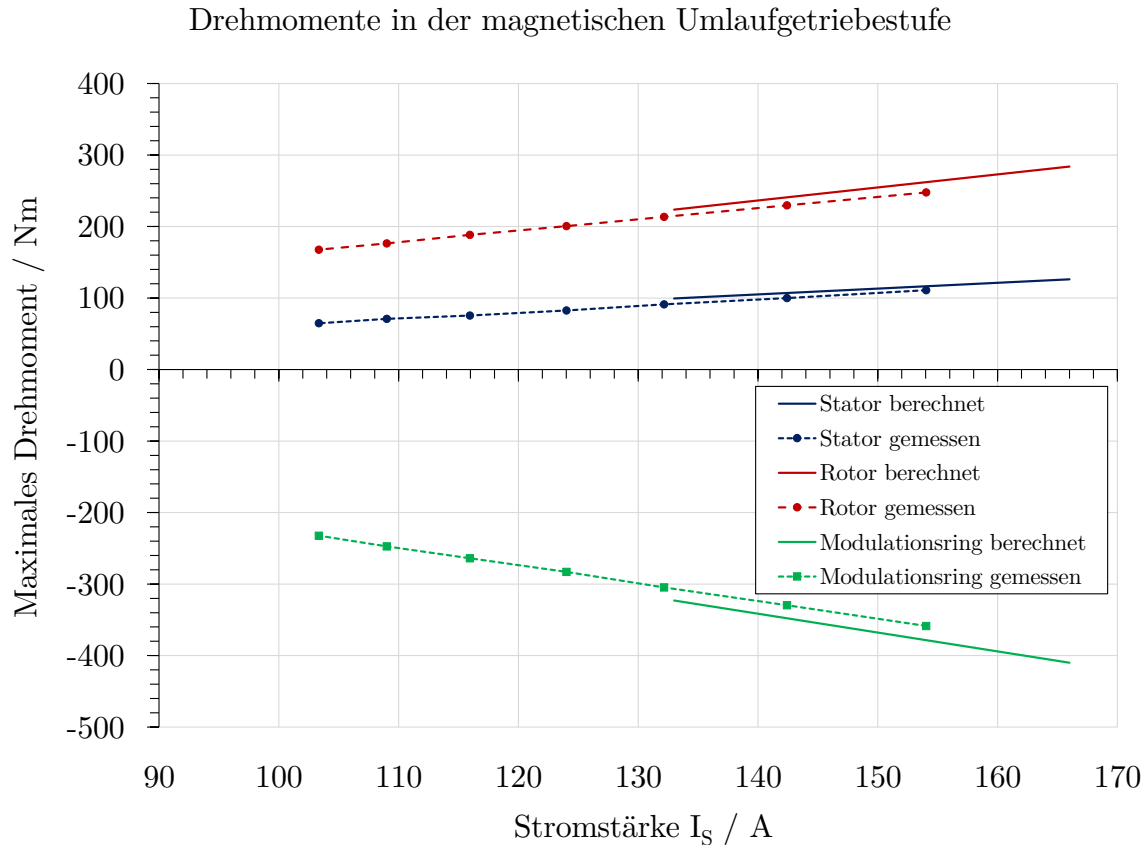


Abbildung 3.23: Drehmoment an Rotor, Modulationsring und Stator in Abhängigkeit von der Statorstromstärke

Die Ergebnisse wurden gewonnen, indem das Getriebe an der Kurve der maximalen übertragbaren Leistung (41,3 % der Auslegungsmotorleistung) betrieben wurde. Hierfür wurde die Motordrehzahl und die Statorzahl bzw. dessen Frequenz vorgegeben, da dies die Ansteuerung im Gesamtfahrzeug widerspiegelt. Weiterhin wurde das Drehmoment an einem Ausgang vorgegeben, da die auf den Boden übertragbare Zugkraft bzw. die maximale Motorleistung diesen Punkt bestimmt. Die andere Lastmaschine wurde lastfrei betrieben, was ebenfalls eine Drehmomentvorgabe darstellt. Alle anderen Drehmomente und Drehzahlen ergeben sich dann mechanisch oder durch die Regelung am Prüfstand, die das Statormoment und das Drehmoment an der Eingangsseite entsprechend so lange erhöht, bis das vorgegebene Ausgangsdrehmoment erreicht ist. Das am Modulationsring anliegende Drehmoment kann in den Gängen *A1* und *B1* über die Übersetzung der Stirnradstufe aus dem Drehmoment der Ausgangsseite *OUT1* berechnet werden. Das Drehmoment am Rotor kann analog in den Gängen *A1* und *B1* direkt als Drehmoment an der Eingangsseite abgelesen werden. Das Drehmoment am Stator ist nicht messbar, da es über das Gehäuse in das Fundament abgeleitet wird. Das Drehmoment des Stators kann aber über die Gleichgewichtsbedingung (Summe aller Momente an der Umlaufgetriebestufe ist null) berechnet werden. Wie im Diagramm zu sehen steigt das maximal übertragbare Drehmoment an den drei Komponenten im betrachteten Stromstärkebereich nahezu linear mit der Stromstärke an. Bei genauerer Betrachtung kann beobachtet werden, dass der Anstieg degressiv ist. Dieses Verhalten ist auf erhöhte Stromwärmeverluste bei höherer Stromstärke

zurückzuführen. So führt eine höhere Stromstärke zu mehr Erwärmung, damit zu einem höheren Widerstand der Kupferwicklungen und damit wiederum zu höheren Verlusten. Das maximal übertragbare Drehmoment ist damit auch abhängig von der Kühlleistung und Kühlstrategie der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe, der besondere Beachtung zukommen sollte. Weiterhin in das Diagramm eingetragen sind einzelne errechnete Punkte aus der Auslegung der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe, die von einem externen Dienstleister vorgenommen wurde. Die Übereinstimmung mit den Berechnungen ist von hoher Güte. Die leichte Abweichung wird darauf zurückgeführt, dass die Berechnung zwei-dimensional vorgenommen wurde und sich in der Realität Randeffekte in den Wickelköpfen ergeben, die das praktisch nutzbare Drehmoment geringfügig reduzieren.

Aus den Messungen der Drehmomente, Drehzahlen und Leistungen lässt sich der Volllastwirkungsgrad der Prüfstandsgetriebestufe ableiten. Hierzu wurden ebenfalls die Daten verwendet, die sich ergeben, wenn das Getriebe bei konstanten 41,3% bzw 20,8% der Auslegungsmotorleistung betrieben wird bzw. diese Leistung reduziert wird, wenn die Schlupfgrenze dies gebietet. Teilt man die gemessene Leistung an der jeweils aktiven Ausgangswelle durch die jeweilige Eingangsleistung – entweder nur die Leistung der Prüfstandsmaschine *MG1* bei generatorischem Betrieb der integrierten elektrischen Maschine *MG2* oder die Summe der Leistungen von *MG1* und *MG2* bei motorischem Betrieb der integrierten elektrischen Maschine *MG2* – so ergibt sich folgendes Diagramm:

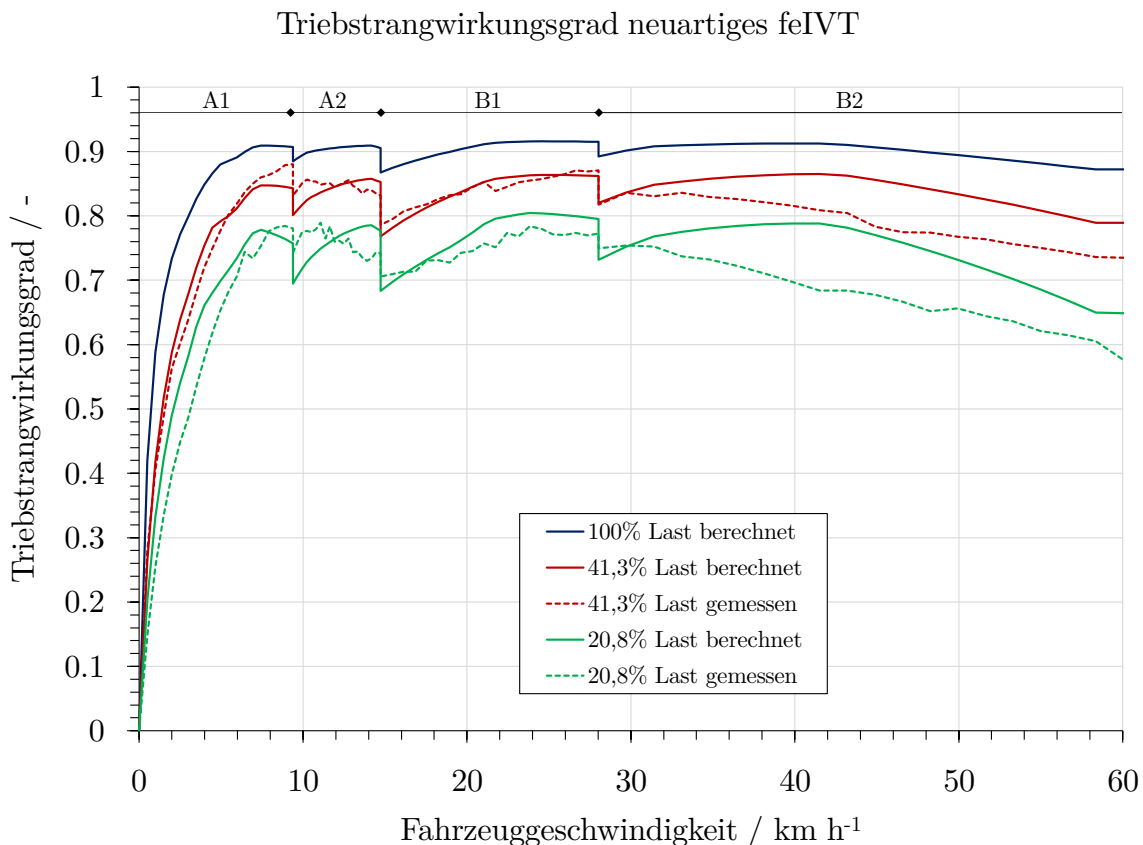


Abbildung 3.24: Volllastwirkungsgrad der Prüfstandsgetriebestufe über der sich ergebenden Fahrgeschwindigkeit

In Abbildung 3.24 ist der aus den an den konkreten Messpunkten gemessenen Daten abgeleitete Wirkungsgrad über der Geschwindigkeit des Fahrzeuges dargestellt, der bzw. die sich ergeben würde, wenn die Prüfstandsgetriebestufe mit den in Unterabschnitt 3.1.1 und Unterabschnitt 3.3.3 spezifizierten Gangstufen, Hinterachsdifferenzial, Endübersetzung und Reifen betrieben werden würde. Der gemessene Wirkungsgrad der Prüfstandsgetriebestufe wurde hierzu mit den festen Wirkungsgraden für die Stirn- und Kegelradstufen und die Endübersetzung aus Unterabschnitt 3.3.4 multipliziert. Weiterhin wurden die theoretischen Verluste der im Prüfgetriebe nicht vorhandenen elektrischen Maschine *MG1* sowie der Kupplungen berücksichtigt. Die Verluste der lastfrei mitgedrehten elektrischen Maschine wurden mit Gleichung 3.45 berechnet und von den tatsächlich gemessenen Verlusten subtrahiert. Um Aussagen zum erwarteten Wirkungsgrad bei 100 % Last treffen zu können, der auch in das Diagramm eingezeichnet ist, sind neben den aus den Messwerten abgeleiteten Wirkungsgraden die sich aus Unterabschnitt 3.3.4 ergebenden theoretischen Wirkungsgrade bei 41,3 % bzw. 20,8 % der Auslegungsmotorleistung aufgetragen. Die qualitative Übereinstimmung der gemessenen Wirkungsgrade mit den berechneten Wirkungsgraden ist von ähnlicher Güte wie die Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Wirkungsgrade für die existierenden hydrostatischen Stufenlosgetriebe in Unterabschnitt 3.3.4. Systematische Abweichungen ergeben sich dadurch, dass der Kern des neuartigen Getriebes in der Prüfstandsgetriebestufe aus Gründen von Kosten und Komplexität nicht vollständig abgebildet ist. So wurde wie oben bereits geschrieben auf den Einsatz einer zusätzlichen elektrischen Maschine zur vollständigen Abbildung des variablen Pfades verzichtet, wodurch sich dessen Charakteristik nicht exakt in den Messungen wiederfindet. Auffallend ist, dass der Grad der Übereinstimmung mit höherer Last steigt, was schlussfolgern lässt, dass die lastunabhängigen Verluste im Modell als zu gering angenommen wurden und so bei geringeren Lasten einen höheren Einfluss haben. Dies passt auch zu der Beobachtung, dass die Abweichung der berechneten von den aus den Messergebnissen hervorgehenden Wirkungsgraden bei höheren Geschwindigkeiten zunimmt. Die geschwindigkeitsabhängigen Lagerverluste, die in der Prüfstandsgetriebestufe auftreten, sind in der Berechnung der Verluste in Unterabschnitt 3.3.4 aus den dort dargelegten Gründen nicht berücksichtigt, wohingegen die lastabhängigen Verzahnungsverluste im Modell durch die nichtiterative Berechnung als zu groß erwartet werden können. So ergibt sich im Mittel eine gute qualitative Übereinstimmung, die an den Rändern des Betriebsbereiches, insbesondere hin zu hohen Geschwindigkeiten, Unschärfen aufweist. Besonders gut ist die Übereinstimmung in den Gängen *A1* und *B1*, während sie in den Gängen *A2* und *B2* etwas ungenauer ist. Vor allem im Gang *A2* wird dies auf die hohen zirkulierenden Blindleistungen in der mechanischen Planetenstufe und die durch deren nichtiterative Berechnung hervorgerufenen Ungenauigkeiten zurückgeführt. Die Übereinstimmung mit dem Modell kann durch Gewichtung der lastabhängigen und lastunabhängigen Verluste verbessert werden, ggf. ist an dieser Stelle durch die grundsätzlich gute qualitative Übereinstimmung auch schon der Schritt zu einem detaillierten, simulationsbasierten und iterativen Verlustmodell anzustreben. Die grundsätzlich gute qualitative Übereinstimmung erlaubt die Schlussfolgerung, dass die in Unterabschnitt 3.3.4 vorgestellten einfachen Verlustmodelle praktikabel sind, um den sich aus Überlagerung vieler einzelner, im Detail sehr aufwendig zu erfassenden Verluste ergebenden Gesamtwirkungsgrad eines komplexen Getriebes qualitativ zu erfassen und mit anderen Getrieben zu vergleichen. Für das konkrete Getriebe kann außerdem der durch die reduzierte Belastbarkeit der Prüfstandsmaschinen nicht durch Messungen ableitbare

Wirkungsgrad bei 100 % der Auslegungsmotorleistung prognostiziert werden, indem die Abweichung der Wirkungsgrade zur Berechnung bei 41,3 % bzw. 20,8 % der Auslegungsmotorleistung auf 100 % der Auslegungsmotorleistung extrapoliert und die berechneten Wirkungsgrade um diesen Prozentsatz korrigiert werden.

3.5.2 Betrachtung der Messunsicherheiten

Für die Hauptmessung (41,3 % der Auslegungsmotorleistung als konstante Last) wurden 80 stationäre Betriebspunkte angefahren, an denen jeweils 10 Messungen im Abstand von jeweils mindestens 1 s vorgenommen wurden. Aus diesen Messwerten wurde anschließend das arithmetische Mittel gebildet, um zufällige Fehler zu minimieren. Die Messwerte der Drehmomentgeber wurden mit den Werten verglichen, die die Motoren durch ihre Umsetzungstabellen im jeweiligen Betriebspunkt anzeigten. Die Abweichung dieser beiden Werte betrug maximal 3 %. Die Messwerte der Drehmomentgeber können damit als verlässlich und nahezu frei von systematischen Fehlern angesehen werden. Für die Messung der Drehzahlen gilt, dass diese prinzipbedingt leicht schwanken, so ist die Drehzahl zum Beispiel häufig über eine Umdrehung nicht konstant, da das Drehmoment winkelabhängig schwankt und so eine Bremswirkung ausübt, die eine Reduzierung der Drehgeschwindigkeit und damit der Drehzahl zur Folge hat. Auch die Übertragung der Drehgeschwindigkeit durch Zahnräder ist über eine Umdrehung nicht völlig konstant. Für die Drehzahlen gilt, dass bei Kenntnis von zwei Drehzahlen innerhalb des Getriebes alle anderen exakt berechnet werden können, da über die mechanischen Verbindungen die anderen Drehzahlen erzwungen sind und hier keine Veränderungen auftreten können. Eine gut bestimmbare Drehzahl ist die Drehzahl des Drehfeldes im Stator, da sie aus der zugrunde gelegten Frequenz exakt bestimmt werden kann. Da die zweite Drehzahlvorgabe in allen im Traktorbetrieb auftretenden Betriebspunkten die Drehzahl des Verbrennungsmotors ist, ist auch die zweite Drehzahl mit hoher Sicherheit bekannt. Vergleiche von rechnerischen Soll-Drehzahlen mit dem arithmetischen Mittelwert der Ist-Drehzahlen aus den jeweiligen 10 Messpunkten im Hauptmessgang lieferten Abweichungen von maximal 0,31 %. Das Schleppmoment spielt in manchen Messungen und den daraus abgeleiteten Berechnungen eine wichtige Rolle. In den Messungen zum Wirkungsgrad ist es als tatsächlich auftretendes Verlustmoment enthalten und abgebildet. In den Messungen zum elektrischen Wirkungsgrad des Stators muss das Schleppmoment korrekterweise subtrahiert werden, da hier nur die magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe betrachtet werden soll und diese Messungen nicht mit Schleppverlusten mechanisch lastlos mitgedrehter Wellen überlagert werden sollen. Das Schleppmoment ist drehzahlabhängig und seine exakte Bestimmung kaum möglich. Für die drei nach außen geführten Wellen wurde bei einer Drehzahl von 1000 min^{-1} das Drehmoment bestimmt, um den gesamten Prüfstand bei gleichzeitiger Lastfreiheit aller anderen Wellen am Drehen zu halten. Es ergab sich für alle Wellen ein Drehmoment von ca. 0,01 kNm, was für die Durchführung aller um das Schleppmoment korrigierten Rechnungen als konstanter Wert angesetzt wurde.

3.6 Weitere Beobachtungen im Prüfbetrieb

Im mehrere Stunden umfassenden Dauerbetrieb bei 41,3 % Last erwärmte sich der Stator bzw. dessen Wicklungen nicht über 105 °C. In einem nicht im realen Traktoreinsatz vorkommenden Betriebsmodus und Betriebspunkt wurde die magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe bei bis zu 100 kW Statorleistung betrieben, um deren grundsätzliche Eignung für diesen Leistungsbereich zu demonstrieren. Der Test bei diesem Betriebspunkt, der keiner realen Anwendung entspricht, wurde durchgeführt, da durch die begrenzte Leistungsfähigkeit hinsichtlich Drehmoment der verwendeten Schabmüller-TSS214-300-Elektromotoren als Lastmaschinen die Leistung der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe ansonsten ebenfalls bei 41,3 % der Auslegungsleistung begrenzt gewesen wäre. Der Betriebspunkt wurde erzeugt, indem die elektrische Maschine am Getriebeeingang als Lastmaschine verwendet wurde. Auch hierbei erwärmte sich der Stator bzw. dessen Wicklungen nicht über 105 °C. Hieraus kann auch geschlussfolgert werden, dass der Betriebspunkt des aktiven Stillstandes, in welchem die hohe Frequenz des Statorstroms Erwärmung verursacht, dauerhaft gehalten werden kann und die Kühlung dort dauerhaft möglich ist, wenn dem dort auftretenden Drehmoment begegnet werden kann. Dieses ist wiederum abhängig vom konkreten Einsatzpunkt. Kann das Drehmoment zum Beispiel beim Anfahren an einem steilen Hang nicht alleine durch die magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe abgestützt werden, dann kann über die Fahrzeugsteuerung zusätzlich die Betriebs- oder Feststellbremse betätigt werden.

4 Bewertung hinsichtlich Eignung zum Einsatz in einem landwirtschaftlichen Fahrzeug

Als Basis für den Vergleich werden die fiktiven, stufenlosen elektrisch leistungsverzweigten Getriebe ohne magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe herangezogen, die in Unterabschnitt 3.3.3 beschrieben wurden. Von diesen fiktiven Getrieben kann erwartet werden, dass eine oder mehrere Ausprägungen davon in naher Zukunft den Weg in die Serienfertigung von Traktoren finden werden, da sie die naheliegende Weiterentwicklung der derzeit verwendeten hydraulischen Stufenlosgetriebe darstellen. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Getriebe mit magnetisch-elektrischer Umlaufgetriebestufe stellt einen weiteren, zusätzlichen Entwicklungsschritt dar. Sein möglicher Serieneinsatz ist daher nach dem der vorgestellten fiktiven elektrischen Stufenlosgetriebe zu erwarten. Für diese Getriebe können jeweils Konfigurationen gefunden werden, die über zwei elektrische Maschinen verfügen, die parallel zur Getriebeeingangswelle angeordnet sind und die den variablen Pfad des leistungsverzweigten Getriebes bilden. Von den beiden elektrischen Maschinen ist eine über eine feste Übersetzung mit dem Dieselmotor verbunden, während die andere mit beiden Sonnen des Variatorteils verbunden ist. Von den beiden Planetensätzen in der Variatorstufe führt immer nur einer die Leistung. Anfahren und niedrige Geschwindigkeiten werden in diesen Getrieben über einen seriell elektrischen Anfahrang realisiert. Beide elektrische Maschinen können parallel vor oder hinter dem Getriebe angeordnet werden und können montiert und entfernt werden, ohne das Getriebe aus dem Traktor entfernen zu müssen. Alternativ ist auch eine axial versetzte Montage analog zu den im ZF Eccom verwendeten Hydrostaten denkbar. Die mit dem Dieselmotor über die Stirnradstufe verbundene elektrische Maschine kann darüber hinaus nach Kundenwunsch bzw. Konfiguration mit einer höheren Leistung gewählt werden als für den Betrieb des Getriebes notwendig, um zusätzliche elektrische Leistung im Bordnetz und auf Anbaugeräten zur Verfügung stellen zu können.

4.1 Vorteile gegenüber den betrachteten elektrischen Stufenlosgetrieben

Die Neuentwicklung eines Getriebes oder einer Einheit innerhalb eines Getriebes – wie im Rahmen dieser Arbeit die Variatorsektion – ist mit besonderen Herausforderungen verbunden. Grund für eine Neuentwicklung sind stets Vorteile, die durch die Entwicklung erwartet werden. Im nachfolgenden Abschnitt wird überprüft, ob und inwiefern sich durch den Einsatz einer solchen neuartigen Variatorsektion Vorteile gegenüber aktuellen Getrieben bzw. deren zu erwartenden Weiterentwicklungen zu elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetrieben ergeben.

4.1.1 Wirkungsgrad

In Abbildung 3.11 wurde gezeigt, dass sich mit diesem neuartigen Getriebekonzept grundsätzliche Wirkungsgradvorteile gegenüber fiktiven Getrieben, die entstehen, indem existierende hydraulisch leistungsverzweigte Getriebe in elektrisch leistungsverzweigte Getriebe überführt werden, ergeben. Der Wirkungsgrad von eigens für elektrische Leistungsverzweigung entwickelten Getrieben kann in Teilbereichen höher liegen als mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Getriebekonzept erreichbar. Dies wird beispielsweise mit der Jarchow-Struktur erreicht. Die grundsätzlich hohen Wirkungsgrade konnten im Prüfbetrieb bestätigt werden. Es ist zu erwarten, dass die Wirkungsgrade durch Optimierungen bei der konstruktiven Realisierung noch höher ausfallen können und sich insgesamt auf konkurrenzfähigem Niveau zu denen dezidiert elektrischer Stufenlosgetriebe ohne magnetisch-elektrische Dreiwellenumlaufgetriebebewegungen bewegen. Der Triebstrangwirkungsgrad des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Getriebekonzeptes ist daher als konkurrenzfähig hoch – verglichen mit zukünftig zu erwartenden elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetrieben – zu beurteilen. Es bleibt die Aufgabe, die aus dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzept hervorgehenden zusätzlichen Freiheiten gegenüber den zu erwartenden elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetrieben im Rahmen der GesamtAbstimmung des Fahrzeuges in zusätzliche Energieeinsparung zu wandeln.

4.1.2 Kosten

Die Integration der den Variatorteil kontrollierenden elektrischen Maschine in das Getriebe bringt eine Reduktion der Teileanzahl mit sich. Es entfallen die für die ursprüngliche Flanschmontage dieser Maschine benötigten Teile sowie deren Ausgangswelle, Lagerung, Stirnradstufe und die Lagerung dieser Stirnradstufe. Dies führt zu direkter Kostenreduktion durch eine Einsparung von Teilen und zu einer sekundären Kostenreduktion unter anderem durch geringere Justierarbeiten aufgrund einer geringeren Anzahl an Fügefunktionen, hoher Funktionssicherheit durch Funktionsintegration sowie geringeren Transport- und Liegekosten. Es kann davon ausgegangen werden, dass das volle Potenzial der Integration der elektrischen Maschine bezogen auf die Produktionskosten bei Erreichen von hohen Stückzahlen gehoben werden kann. Weiterhin bringt die Architektur dieses neuen Getriebes Potenzial zur Kostenreduktion mit sich, da sie ohne einen dezidierten seriell elektrischen Anfahrang auskommt. Alle Teile, die damit in Verbindung stehen, können eingespart werden. Eine abschließende Beurteilung und ein Vergleich der Kosten gegenüber den betrachteten fiktiven elektrischen Stufenlosgetrieben ist nur innerhalb der Systemgrenzen des gesamten Antriebsstrangs sinnvoll.

4.1.3 Bauraum

Durch die Integration der einen elektrischen Maschine in das Getriebe und den Wegfall des seriell elektrischen Anfahrang ist der Bauraumbedarf dieses Getriebes tendenziell niedriger als der Bauraumbedarf eines vergleichbaren elektrisch leistungsverzweigten Getriebes mit zwei elektrischen Maschinen, die parallel zueinander vor dem Getriebe montiert werden. Dieser eingesparte Bauraum verteilt sich asymmetrisch über das Getriebe, da zum einen eine seitlich montierte elektrische Maschine entfällt und durch eine konzentrisch zur Eingangswelle positionierte magnetische Umlaufgetriebebestufe mit integrierter elektrischer Maschine

ersetzt wird und zum anderen der seriell elektrische Anfahrgang entfällt, der üblicherweise auch über eine Seitenwelle realisiert wird. Der frei werdende Bauraum kann daher in der aktuellen Konfiguration kaum in eingesparte Baulänge umgewandelt werden, was im Zuge der Forderungen nach einer höheren Wendigkeit und Manövrierfähigkeit des Traktors und daraus resultierenden kleineren Achsabständen wünschenswert wäre. Eine Möglichkeit zur Umwandlung des frei gewordenen Bauraums in eingesparte Länge des Getriebes ergibt sich, wenn die direkt mit dem Dieselmotor verbundene, seitlich montierte elektrische Maschine entfällt und an anderer Stelle realisiert wird. Es stehen hierfür innerhalb des Traktors verschiedene Punkte zur Verfügung, an welchen eine direkte Verbindung zum Dieselmotor realisiert werden kann. Denkbar ist eine Realisierung dieser ersten elektrischen Maschine konzentrisch zur Motorwelle und mit einem größeren Durchmesser, was zu einer Reduktion der Länge führt. Abschließend kann noch überlegt werden, die elektrische Maschine an einer anderen Stelle innerhalb des Getriebes oder des Traktors unterzubringen, an der eine permanente mechanische Verbindung mit dem Dieselmotor gegeben ist. Dies ist zum Beispiel im hinteren Teil des Getriebes im Bereich der Zapfwelle oder auch vor dem Dieselmotor im Bereich der Frontzapfwelle der Fall. Diese Möglichkeit ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Elektrifizierung von Anbaugeräten in Zukunft zunimmt. Es ist dann denkbar, dass Traktoren ohnehin standardmäßig mit einem entsprechenden integrierten Generator ausgestattet sind, um die benötigte Leistung für den Betrieb elektrifizierter Anbaugeräte zur Verfügung stellen zu können. Gleichzeitig ist ein Entfall der Zapfwelle denkbar. Eine solche Entwicklung würde über eine gute Abstimmung des Betriebsverhaltens des im Rahmen dieser Arbeit gezeigten Getriebes und auch aller anderen denkbaren elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetriebe die in diesen Getrieben immer vorhandene, mit dem Dieselmotor in festem Drehzahlverhältnis stehende elektrische Maschine gegebenenfalls überflüssig machen. Dies birgt großes Potenzial zur Einsparung von Bauraum und auch zur Einsparung von Kosten, was dem vorher diskutierten Punkt zuzuordnen wäre. Insgesamt bietet dieses neue Getriebekonzept grundsätzlich Vorteile in Bezug auf den Bauraumbedarf, die im Rahmen einer Betrachtung der sich hieraus ergebenden Möglichkeiten in einen direkten Nutzen für den Kunden gewandelt werden können.

4.1.4 Modularität und Skalierbarkeit

Wegen der hohen Entwicklungskosten für Getriebe in landwirtschaftlichen Fahrzeugen und der hohen Investitionen werden zum einen lange Laufzeiten für Getriebe angestrebt, zum anderen auch eine skalierbare Getriebearchitektur. Ein Getriebe soll konzeptionell identisch mit möglichst geringen Zusatzinvestitionen in Fahrzeugen anderer Leistungsklassen eingesetzt werden. Für Fahrzeuge mit höherer Leistung als diejenigen, für die das Getriebe entwickelt wurde, bedeutet dies, dass der Entwicklungsaufwand deutlich geringer ausfällt und lediglich das Innenleben an die höheren Belastungen angepasst werden muss. Für Fahrzeuge niedrigerer Leistungsklassen bedeutet das, dass die Architektur des ursprünglich entwickelten Getriebes beibehalten wird und das Innenleben für die auftretenden, niedrigeren Belastungen optimiert wird, was zum Wegfall von Teilen (z. B. Kupplungsscheiben oder -lamellen), zur Reduktion der Teilekosten durch weniger aufwendige Fertigungsverfahren (z. B. Entfall der Härtung) oder zur Verkürzung der Baulänge durch die Dimensionierung der Bauteile für niedrigere Leistungen führen kann. Für die zukünftig zu erwartenden elektrisch leistungsverzweigten Getriebe ergibt sich hier eine gute Skalierbarkeit der elektrischen Maschinen, da

die Maschinen je nach benötigter Leistung ausgewählt und montiert werden können. Durch einheitliche Montageflansche unterscheiden sich die verschiedenen elektrischen Maschinen dann meist nur in ihrer Länge. Die magnetische Umlaufgetriebestufe in dem im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Getriebe kann ebenfalls über die Länge in Bezug auf die Leistung skaliert werden. Die Länge des elektromagnetischen Teils steht hier in direkter Relation zum übertragbaren Drehmoment. Sie bestimmt weiterhin maßgeblich die Menge des benötigten Materials für Permanentmagnete, die einen hohen Anteil der Materialkosten ausmachen. Zusätzlich bietet das Getriebe die Möglichkeit, das in der magnetischen Umlaufgetriebestufe übertragene Drehmoment und damit auch die Leistung über den Strom zu limitieren. Es besteht deshalb die Möglichkeit, bei einem Transfer in niedrigere Leistungsklassen den magnetisch-elektrischen Teil nicht zu modifizieren, was eine Nutzung von Volumeneffekten bei der Produktion ermöglicht und darüber hinaus niedrigere Kosten bei Lagerhaltung, Transport und Arbeitsvorbereitung nach sich zieht, und die Leistung über den Inverter bzw. über die Software zu begrenzen. Voraussetzung hierfür ist, dass beim Transfer in niedrigere Leistungsklassen ausreichend Baulänge für das Getriebe zur Verfügung steht, da innerhalb der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe keine Reduktion der Länge erfolgt. Werden die radialen Abmessungen und die Achsabstände innerhalb des Getriebes beim Transfer in andere Leistungsklassen beibehalten, dann unterstützt das betrachtete Getriebe mit seinen Anpassungsmöglichkeiten den Wunsch nach einer skalierbaren Architektur.

4.1.5 Überlastsicherheit

Die Verwendung einer magnetischen Umlaufgetriebestufe bringt eine zusätzliche Sicherheitsbarriere in das Getriebe ein. Das Drehmoment in der magnetischen Umlaufgetriebestufe kann das maximal übertragbare Drehmoment für diese Stufe nicht überschreiten, da ansonsten die Magnetpole oder die modulierenden Segmente in ihre nächste Rastposition weiterspringen und kein Drehmoment mehr übertragen. Im konzipierten Getriebe kann dieser Sicherheitsaspekt in der jeweils höheren Stufe der beiden Gänge direkt genutzt werden. Besonders für den Gang A ist dies interessant, da dieser Gang den Bereich der schweren Bodenarbeit abbildet. Die Überlastsicherheit hilft hier, das Getriebe zu schonen, wenn das Drehmoment den erlaubten Wert überschreitet. Das übertragbare Drehmoment ist in engen Grenzen bekannt und so kann diese Sicherheitsfunktion besser ausgenutzt werden als zum Beispiel die Sicherheitsfunktion der Kupplungen, die bei Überschreiten eines maximalen Drehmomentes durchrutschen und kein Drehmoment mehr übertragen. Bei Kupplungen ist diese Dimensionierung durch die großen Unterschiede bei den Reibwerten, durch Toleranzen und Reserven bei Verschleiß ungleich schwieriger. Die Überlastsicherheit des Getriebes in den Gängen, die allein über die magnetische Umlaufgetriebestufe betrieben werden, kann dafür genutzt werden, niedrigere Sicherheitsfaktoren bei der Berechnung der Zahnräder dieser Gänge zu verwenden, da ausgeschlossen ist, dass ein Drehmoment über dem Auslegungsdrehmoment überhaupt auftreten kann. Hierdurch sind auch die an allen anderen Stellen im Getriebe auftretenden Drehmomente in engen Grenzen limitiert. Hierbei wird im Gegensatz zu der Überlastung einer elektrischen Maschine im generatorischen Betrieb mit einem zu hohen Drehmoment kein hoher Strom induziert, der zur Beschädigung der angeschlossenen Umrichter führen kann, sondern Ummagnetisierungsverluste in den ferromagnetischen Segmenten erzeugt. Wenn diesen mit entsprechender Kühlung begegnet werden kann, ist diese Sicherheitsfunktion der limitierenden Funktion elektrischer Maschinen

in einem fiktiven elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetriebe nach Abbildung 3.10a, Abbildung 3.10b und Abbildung 3.10c überlegen.

4.2 Nachteile gegenüber aktuellen Getrieben

Diesen Vorteilen gegenüber aktuellen Getrieben müssen eine Reihe von Nachteilen gegenüber aktuellen Getrieben entgegengestellt werden, die im Folgenden für einen systematischen Vergleich und eine abschließende Empfehlung diskutiert werden.

4.2.1 Drehmoment, Kapazität und Leistungsdichte

Um eine Aussage bezüglich der Leistungsdichte treffen zu können, bietet es sich an, den Bauraumbedarf der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten integrierten elektrischen Maschine mit dem Bauraumbedarf einer in Unterabschnitt 3.3.4 erwähnten elektrischen Maschine kombiniert mit einer zusätzlichen mechanischen Planetenstufe und einer mechanischen Stirnradstufe zu vergleichen, wobei jeweils angenommen wird dass diese Stufen im Außendurchmesser dem Modulationsring der erwähnten elektrischen Maschine gleichen. Hierbei fällt auf, dass der Bauraumbedarf der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten elektrischen Maschine in etwa doppelt so hoch ausfällt wie der Bauraumbedarf letzterer Kombination. Diese Aussage wird durch Untersuchungen zur Drehmomentdichte magnetischer Getriebestufen und deren Vergleich zur Drehmomentdichte mechanischer Stirnradstufen unterstützt [Jør10]. Die generelle Leistungsdichte einer magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Umlaufgetriebestufe in einem isoliert betrachteten Leistungspfad ist daher zunächst als in etwa halb so groß wie die einer isoliert betrachteten elektrisch leistungsverzweigten Umlaufgetriebestufe mit mechanischer Überlagerung anzusehen. Zu beachten ist, dass durch den Einsatz einer magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe gegebenenfalls andere Bauteile im Gesamtgetriebe wie der Anfahrang entfallen können, sodass die Leistungsdichte des Gesamtgetriebes wieder vergleichbar wird. Im Allgemeinen ist zunächst konservativ davon auszugehen, dass die Leistungsdichte eines Gesamtgetriebes mit magnetisch-elektrischer Leistungsverzweigung geringfügig niedriger ausfällt als die eines Getriebes mit elektrischer Leistungsverzweigung und mechanischer Überlagerung. Das übertragbare Drehmoment ist wesentlicher Treiber für den Bauraumbedarf einer magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe, da bei als konstant angenommenem Schub im Luftspalt Drehmoment nur über Verlängerung der Maschine oder Realisierung des Luftspalts auf einem größeren Durchmesser und damit Vergrößerung des Durchmessers der Maschine erreicht werden kann. Da die magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe direkt in den Leistungsfluss des Getriebes eingebunden ist und eine der rotierenden Komponenten mit dem Verbrennungsmotor in direkter Verbindung steht, ist auch das generelle Drehzahlniveau der Umlaufgetriebestufe festgelegt. Eine Leistungserhöhung, wie sie bei über Stirnradstufen angeschlossenen elektrischen Maschinen durch Erhöhung der Drehzahl selbiger realisiert werden kann, ist hierbei nicht möglich.

4.2.2 Reparatur und Wartung

Kommt es zu einem Defekt oder einer Fehlfunktion in der elektrischen Maschine, die Teil der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe ist, so ist dieser Defekt schwieriger zu

beheben als bei einem elektrisch leistungsverzweigten Getriebe, bei welchem die elektrischen Maschinen in Flanschmontage vor dem Getriebe montiert sind. Für zukünftig zu erwartende elektrisch leistungsverzweigte Getriebe gilt die Forderung, dass die elektrischen Maschinen ausgetauscht werden können müssen, ohne dass hierfür das Getriebe aus dem Traktor entfernt werden muss oder Achsen vom Traktor demontiert werden müssen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass zur Lebensdauer und Zuverlässigkeit der verwendeten elektrischen Maschinen derzeit noch keine ausreichenden Daten vorliegen, die eine Abschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit ermöglichen. Daher sollten die elektrischen Maschinen zunächst so in das Getriebe integriert werden, dass sie bei einem Defekt schnell und einfach getauscht werden können, eine Reparatur der elektrischen Maschine also nicht unmittelbar vorgenommen wird. Sobald über diese Getriebe Daten zur Ausfallrate der elektrischen Maschinen vorliegen, kann überlegt werden, ob diese Forderung nach der schnellen und einfachen Austauschbarkeit berechtigt ist, oder ob die Ausfallrate so niedrig ist, dass für die wenigen auftretenden Defekte ein Austausch des gesamten Getriebes in Kauf genommen werden kann. Zum jetzigen Zeitpunkt kann davon ausgegangen werden, dass ein Getriebe mit einem Variator mit einer magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe Nachteile gegenüber anderen Getrieben der aktuellen Generation in Bezug auf Wartung und Reparatur aufweist. Da die Elektrifizierung und Hybridisierung landwirtschaftlicher Fahrzeuge noch am Beginn ihrer Entwicklung steht, müssen diese Nachteile zu einem späteren Zeitpunkt erneut bewertet werden. So kann es zum Beispiel sein, dass aus Platzgründen in Zukunft die elektrischen Maschinen in elektrisch leistungsverzweigten Getrieben ebenfalls tiefer in das Getriebe integriert werden und dieser Nachteil der Getriebe mit magnetisch-elektrischer Umlaufgetriebestufe damit verschwindet.

4.2.3 Komplexität

Die Integration der elektrischen Maschine in das Getriebe erhöht die Komplexität des Gesamtgetriebes. Speziell durch die Notwendigkeit der konstruktiven Anordnung der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe derart, dass sie in beiden Fahrmodi an der Leistungsübertragung beteiligt ist, erhöht sich die Komplexität weiter. Dies führt zu einem zu Nachteilen bei der Wartung und Reparatur des Getriebes, wie bereits oben beschrieben, weil die Fehlerdiagnose komplexer ausfällt und die elektrischen Maschinen nicht länger unabhängig vom restlichen Getriebe montiert und ausgetauscht werden können. Bei Fehlerdiagnose und -behebung muss in einem solchen Getriebe immer das komplexe Gesamtsystem aus magnetisch-elektrischer Umlaufgetriebestufe mit angeschlossener Elektronik und den direkt benachbarten mechanischen Elementen betrachtet werden. Die komplexe Funktionsweise des Getriebes mit seinen Betriebspunkten zirkulierender Leistung und Betriebspunkten, in denen die Variatorsektion sich wie ein elementares Koppelgetriebe mit zwei Umlaufgetriebestufen verhält, erschwert darüber hinaus das Verständnis für die Funktionsweise des Getriebes. Dies ist insofern als Nachteil zu betrachten, als dass es dadurch schwieriger wird, der potenziellen Kundschaft die Funktionsweise dieses stufenlosen Getriebes zu erklären, wodurch möglicherweise die Akzeptanz sinken kann. Die Funktionsweise des Getriebes wird auch für technische Fachkräfte, die mit der Wartung und Reparatur des Getriebes betraut sind, schwieriger zu verstehen, was aufwendigere Schulungsmaßnahmen nach sich ziehen kann. Insgesamt ist festzuhalten, dass mit steigender Komplexität in der Funktionsweise des Getriebes die Akzeptanz dafür bei Mitarbeitenden, beim Kundstamms und innerhalb

des Vertriebsnetzwerks generell sinkt und eine höhere Komplexität daher als Nachteil zu sehen ist. Komplexität im weiteren Sinne wird durch das Getriebe zusätzlich erzeugt, wenn es als Alternativgetriebe für bestehende Getriebe verwendet wird. Durch die höhere Anzahl an Auswahlmöglichkeiten für die Kundschaft steigt die Komplexität am Montageband, was sich in höheren Ausgaben für Logistik niederschlägt. Kommt das Getriebe beispielsweise nur in Traktoren niedriger Leistungsklassen zum Einsatz und kann zusätzlich in diesen Traktoren auch alternativ ein rein elektrisch leistungsverzweigtes stufenloses Getriebe bei der Konfiguration bzw. Bestellung des Fahrzeugs ausgewählt werden, so erhöht sich durch das dann neu angebotene magnetisch-elektrisch leistungsverzweigte Getriebe die Komplexität in der Montage. Es ist daher wünschenswert, mit einem solchen neuen Getriebe ein bestehendes Getriebe zu einem festgelegten Zeitpunkt komplett zu ersetzen und das ersetzte Getriebe dann nicht länger als Option anzubieten. Diese Erhöhung der Komplexität gilt generell für alle Arten von neu entwickelten Getrieben, sie ist daher dann ebenfalls als Nachteil zu berücksichtigen, wenn sich aus der abschließenden Betrachtung der Vor- und Nachteile ein Einsatz lediglich als Alternativgetriebe anbietet.

4.2.4 Zusammenbau

Es wird erwartet, dass sich beim Zusammenbau Nachteile gegenüber den aktuellen Getriebegenerationen ergeben. Betrachtet man nur die Montage des Getriebes an sich, so fällt auf, dass bei einem magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Getriebe eine elektrische Maschine direkt in das Getriebe integriert ist. Bei den zukünftig zu erwartenden elektrisch leistungsverzweigten Getrieben hingegen können die elektrischen Maschinen über eine Flanschverschraubung mit dem Getriebe verbunden werden. Durch die Integration der elektrischen Maschine in das Getriebe muss der Stator vor der Getriebemontage mit dem Gehäuse verpresst werden. Dies ist ohne größeren Aufwand an der Montagelinie möglich. In der Montagelinie muss der Modulationsring und der Rotor einzeln oder als vormontierte Einheit innerhalb des Getriebes montiert werden. Dies zieht zusätzlichen Aufwand nach sich, da der Rotor mit starken Permanentmagneten bestückt ist. Diese können, wenn der Rotor nicht exakt zentrisch in das Getriebe eingeführt wird, einen starken Radialzug verursachen und die Magnete in Kontakt mit ferromagnetischem Material bringen, sodass diese oder andere Teile innerhalb des Getriebes beschädigt werden. Es ist daher davon auszugehen, dass für die Montage des Rotors oder der aus Rotor und Modulationsring bestehenden Einheit zusätzliche Montagevorrichtungen in Form von Montagehilfen oder Führungsmaschinen benötigt werden. Diese werden üblicherweise neben dem Hauptmontageband als Montageinseln realisiert. Zusätzlich ist bei der Montage zu beachten, dass dem Rotor benachbarte Teile ebenfalls von den Permanentmagneten angezogen werden können. Hier ist darauf zu achten, dass diese Teile bei der Montage nicht beschädigt werden können und dass keine Verletzungen in Form von Quetschungen o. Ä. auftreten können. Insgesamt ist der Montageaufwand für die Getriebeendmontage höher zu bewerten als für die zukünftig zu erwartenden elektrisch leistungsverzweigten Getriebe, wobei berücksichtigt werden muss, dass die elektrische Maschine in diesen Getrieben ebenfalls vormontiert werden muss. Dieser Vorgang kann zeitlich und örtlich unabhängig von der Getriebeendmontage realisiert werden. Die Montage der Permanentmagnete des Rotors gestaltet sich nicht schwieriger als bei der Montage eines Rotors für eine permanenterregte Synchronmaschine, daher wird an diesem Punkt hierauf nicht näher eingegangen. Es kann davon ausgegangen werden, dass

diese Montage mit den heute gängigen Verfahren realisiert wird, mit denen auch die Permanentmagnete der Rotoren elektrischer Maschinen montiert werden und dass der Aufwand daher mit dem bei den zukünftig zu erwartenden elektrisch leistungsverzweigten Getrieben identisch ist, unabhängig davon wo die Montage dieser Permanentmagnete vorgenommen wird.

4.3 Vergleich der Vor- und Nachteile und abschließende Empfehlung

Aus dem Vergleich der Vor- und Nachteile ergibt sich, dass keine unmittelbar direkte und eindeutige Empfehlung daraus abgeleitet werden kann. Diese Situation entspricht den Erwartungen im Bereich von Forschungsvorhaben und insbesondere Grundlagenforschung, da technische Entwicklungen üblicherweise in kleinen Schritten vollzogen werden. Es ergeht daher an dieser Stelle die Empfehlung, die aus dem WOLF-Schema hervorgegangene Möglichkeit 1.1 noch detaillierter zu untersuchen und aus den Erkenntnissen ein Getriebe abzuleiten, welches dann das favorisierte Variatorkonzept in einem magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetriebe für Traktoren niedriger bis mittlerer Leistungsklassen zwischen 80 kW und 140 kW umsetzt. Für dieses Getriebe bietet sich durch die Integration der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebebestufe hohes Potenzial zur Energieeinsparung durch eine mögliche Abstimmung des Gesamtfahrzeugsystems. Weiterhin bieten die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Konzepte die Möglichkeit, durch Schließen zweier Kupplungen im Gruppengetriebe bzw. Einlegen von zwei Synchronisierungen gleichzeitig einen seriell elektrischen Fahrbereich zu erzeugen, ohne hierfür zusätzliche Komponenten zu benötigen. Diese Möglichkeit ist unbedingt zu nutzen, zu untersuchen und in weitere Entwicklungen und Entscheidungen einzubeziehen. Für große Unternehmen im Landwirtschaftsbereich wie die John Deere GmbH & Co. KG bietet sich hier ebenfalls die Möglichkeit, mit den im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen die zukünftigen Entwicklungen im Bereich der Magnettechnik und elektrischen Maschinen sowie der leistungsverzweigten Stufenlosgetriebe und Elektrifizierung von Anbaugeräten abzuwarten und zu einem geeigneten Zeitpunkt wieder in die Entwicklung einzusteigen.

5 Zusammenfassung und Fazit

Magnetische Umlaufgetriebestufen sind durch neue technische Entwicklungen bekannt geworden und in den Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen gerückt. Sie haben grundsätzlich das technische Potenzial, mechanische Umlaufgetriebestufen in leistungsverzweigten Getrieben zu ersetzen. Weiterhin kann bei geschickter Auslegung eine elektrische Maschine eines elektrisch leistungsverzweigten Getriebes in diese Umlaufgetriebestufe integriert werden. Die Potenziale dieser Integrationsmöglichkeit wiederum bilden die Motivation der vorliegenden Arbeit.

Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit war es, Empfehlungen zum Einsatz einer solchen Kombination in zukünftigen Traktorgenerationen geben zu können. Hierfür konnte frühzeitig eine methodische Vorgehensweise identifiziert werden, die das WOLF-Schema zur systematischen und umfassenden Synthese und daraus hervorgehend für die benötigte Lage von Summen- und Differenzwellen in einem neuartigen Getriebe beinhaltet. Die anschließend notwendige systematische Berechnung wurde mit dem modernen Matrix-Rechenverfahren nach Stangl realisiert. Bei der Ausarbeitung von Definitionen und Abgrenzungen konnte festgestellt werden, dass für die sich derzeit im Einsatz befindlichen hydraulisch leistungsverzweigten Stufenlosgetriebe eine Entwicklung zu elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetrieben naheliegend ist. Gleichzeitig gewinnt die Möglichkeit, große elektrische Leistungen auf Anbaugeräten zur Verfügung stellen zu können zunehmend an Bedeutung. Elektrisch leistungsverzweigte Stufenlosgetriebe und insbesondere das in hohem Maße integrative Getriebe, das im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wurde, bieten hier die Möglichkeit, bei entsprechender Dimensionierung und Steuerung eine elektrische Maschine einzusparen.

Als geeignete Methode, um diesen Möglichkeiten systematisch nachzugehen, wurde die methodische Konstruktion nach VDI 2221 identifiziert. Aufgrund der hohen Anforderungen und starken Limitierungen und der Tatsache, dass mit den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit in gewissem Maße Grundlagenforschung betrieben wird, wurde eine technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225 abgelehnt. Eine wirtschaftliche Bewertung fand ohne Verflechtung mit einer technischen Bewertung statt. Im Fokus der Forschung stand die Frage, ob ein Getriebekonzept, welches eine elektrische Maschine in eine magnetische Umlaufgetriebestufe innerhalb eines elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetriebes integriert, überhaupt grundsätzlich technisch machbar ist und ob diese in dem zur Verfügung stehenden Bauraum aktueller und auch fiktiver zukünftiger Traktorgenerationen realisiert werden kann. Der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit eines solchen Konzeptes floss ein untergeordneter Stellenwert zu.

Aus den Anforderungen an ein Traktorgetriebe, insbesondere dem Punkt, dass für das betrachtete Stufenlosgetriebe alle Schaltpunkte bei absoluter Drehzahlsynchronität stattfinden müssen, ergaben sich eine Reihe von Synthesebedingungen. Die zusätzliche Anforderung, dass die elektrische Maschine nur in eine Umlaufgetriebestufe kontrollierend eingreifen darf, führte weiterhin zur Eliminierung von einigen Alternativkonzepten. Unter Anwendung des WOLF-Schemas wurden anschließend drei prinzipiell realisierbare Lösungskonzepte

entwickelt, von denen das auf den ersten Blick vielversprechendste Konzept weiterverfolgt wurde. Die aus diesem Konzept hervorgehenden zwei konstruktiv möglichen Realisierungen wurden hinsichtlich der auftretenden Drehmomente und Blindleistungen miteinander verglichen, indem das Matrix-Rechenverfahren eingesetzt wurde, und auf eine konstruktive Lösung reduziert. Diese konstruktive Lösung wurde mit existierenden hydraulisch leistungsverzweigten Stufenlosgetrieben verglichen, wobei große Ähnlichkeiten auf Ebene des WOLF-Schemas und daher auch im grundsätzlichen Betriebsverhalten auffielen, was auf eine starke Determinierung des Syntheseprozesses und auf eine grundsätzlich richtige Synthese hindeutet. Für die existierenden hydraulischen Stufenlosgetriebe und deren fiktive elektrische Pendanten sowie für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Getriebe wurden anschließend Verlustmodelle aufgestellt, um qualitative Aussagen über die zu erwartenden Wirkungsgrade treffen zu können. Ferner wurde das Betriebsverhalten bei der Bereitstellung elektrischer Leistung auf Anbaugeräten beleuchtet.

Für das gewählte Getriebekonzept wurde anschließend das Kernelement, welches auch für andere Konzepte Verwendung findet, identifiziert und in eine mechanische Konstruktion überführt. Das Schema für einen Prüfstandsbetrieb wurde so gewählt, dass damit die Randbedingungen sowie der Teil des Getriebes, der nicht dem Forschungsschwerpunkt entspricht und bekannte Technologie darstellt, simuliert werden konnten. Für das Kernelement wurde gezeigt, dass die dort verwendeten Lager für den Einsatz im Traktor geeignet sind, indem sie rechnerisch mit verschiedenen Standardlastkollektiven für europäische Traktoren beaufschlagt wurden. Ferner wurde die integrierte elektrische Maschine ausgelegt und die Bedeutung der Auslegungen für das weitere Vorgehen gezeigt. Das Prüfgetriebe wurde auf einem Prüfstand aufgebaut und die zur Untermauerung bzw. Widerlegung der aufgestellten Thesen, Forschungsfragen und Erwartungen nötigen Messungen wurden durchgeführt.

Basierend auf den theoretischen Grundlagen, den rechnerischen Modellen und den Beobachtungen im Prüfstandsbetrieb wurden die Vorteile eines solchen neuartigen Getriebes gegenüber zukünftig zu erwartenden elektrischen Stufenlosgetrieben herausgearbeitet. Diese bestehen hauptsächlich in der Möglichkeit zur Optimierung des Kraftstoffverbrauchs und im Potenzial zur Kosten- und Bauraumeinsparung durch Wegfall des Anfahrganges. Das Potenzial zur Kosteneinsparung konnte hierbei nicht abschließend beleuchtet werden, da es von zukünftigen Entwicklungen im Bereich von Elektromotoren und Magnettechnologie abhängig ist.

Den Vorteilen gegenübergestellt wurden die Nachteile gegenüber fiktiven elektrischen Stufenlosgetrieben. Diese bestehen hauptsächlich in erhöhter Komplexität, auch bei Reparatur, Wartung und Zusammenbau, und in einer geringeren Kapazität für Leistung und Drehmoment. Letzterem Nachteil kann eventuell durch weitere Forschung und Verfolgung des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Alternativkonzeptes, welches sich aus dem WOLF-Schema 1.1 ergibt, begegnet werden.

Die gezeigten Vor- und Nachteile wurden gegenübergestellt und eine abschließende Empfehlung abgegeben. Diese besteht darin, das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Getriebekonzept grundsätzlich weiterzuverfolgen. Hierbei wurde deutlich gemacht, dass großer weiterer Forschungsbedarf besteht.

5.1 Reflexion der Vorgehensweise

Im Rahmen der methodischen Vorgehensweise wurde zunächst angelehnt an die Konstruktionsmethodik, die in der VDI 2221 beschrieben ist, eine Anforderungsliste aufgestellt. Diese wurde konsequent beibehalten. Aus der Anforderungsliste wurden Syntheserandbedingungen abgeleitet und mit diesen eine Getriebesynthese mit dem WOLF-Schema durchgeführt. Von den sich hieraus ergebenden drei Lösungsmöglichkeiten wurde mittels Ausschlussverfahren eine Möglichkeit ausgewählt und zunächst rechnerisch, dann konstruktiv ausdetailliert. Um die grundsätzliche Korrektheit und Machbarkeit dieses Konzeptes zu verifizieren, wurden Vergleiche mit existierenden Getrieben aufgestellt, die ein ähnliches Betriebsverhalten aufweisen. Parallel wurden einfache Verlustmodelle, die auf nichtiterativen stetigen Gleichungen beruhen, aufgestellt. Mittels dieser Gleichungen wurde die zu erwartende Verlustcharakteristik des neu entwickelten Getriebes berechnet. Für das als Computermodell existierende Getriebe wurde dann der Nachweis erbracht, dass die verwendeten Lager für einen Einsatz in einem landwirtschaftlichen Fahrzeug geeignet sind und allgemein bekannte Lastkollektive überstehen können. Die Bestimmung der Wirkungsgrade im Prüfstandsbetrieb war zentrales Ziel der anschließenden Messungen am realen Getriebe. Die Ergebnisse wurden dokumentiert und interpretiert, um daraus Erkenntnisse für Empfehlungen hinsichtlich des Einsatzes in einem landwirtschaftlichen Fahrzeug abgeben zu können. Mittels der gewonnenen Erkenntnisse wurde das im Rahmen der Arbeit entwickelte Getriebe bezüglich seiner Vor- und Nachteile relativ zu Getrieben der aktuellen Generation und zu zukünftig zu erwartenden elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetrieben bewertet. Ein Vergleich der Vor- und Nachteile bildete die Grundlage für eine abschließende Empfehlung.

Grundsatz bei der Auswahl der Methoden war, dass die gewählten Methoden das Lösungsfeld in einem frühen Stadium möglichst wenig einschränken sollten und zunächst zu einem hohen Grad abstrakt bleiben sollten. Im Verlauf der Ausdetaillierung der Konzepte wurde dann auf zunehmend deterministische Methoden zurückgegriffen, um das bis dahin gefundene Lösungsfeld einzuschränken, zu reduzieren und zu konsolidieren. Ebenfalls bei der Auswahl der Methoden berücksichtigt wurde deren allgemeine Gültigkeit und damit die Übertragbarkeit auf andere Getriebesysteme und Getriebearchitekturen sowie eine einfache, wenig fehleranfällige und potenziell rechnergeeignete und damit zukünftig automatisierbare Durchführbarkeit.

Eine technisch-wirtschaftliche Bewertung, wie sie in der VDI 2225 dokumentiert ist, wurde abgelehnt, da das Forschungsfeld in weitem Maße Grundlagenforschung ist und der wirtschaftlichen Wertigkeit in diesem frühen Entwicklungsstadium keine überaus große Bedeutung zufallen sollte. Wichtiger sind hier die Erkenntnisse aus den Messungen, die insbesondere durch eine hochwertigere und damit finanziell potenziell unattraktivere Konstruktion verbessert werden können. Die Wirtschaftlichkeit des Getriebekonzeptes wurde daher in einem kurzen Ausblick beleuchtet, ohne dass dieser Punkt bei der Konstruktion des Prüfstandsgetriebes berücksichtigt wurde. Eine iterative Berechnung der Verluste und des Wirkungsgrades, die wahrscheinlich genauere Ergebnisse liefern würde als die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte vereinfachte Berechnung, wurde ebenfalls abgelehnt, um den während der Entwicklung und Konstruktion erzeugten Vortrieb aufrechtzuerhalten und nicht unverhältnismäßigen Aufwand für geringfügige Verbesserungen zu betreiben. Auf die detaillierte Berechnung sämtlicher sich in einem frühen Stadium der Synthese ergebenden Lösungsmöglichkeiten wurde aus gleichen Gründen verzichtet. Diese wurden per Ausschluss-

verfahren reduziert und die detaillierte Berechnung nur für das übrig gebliebene Konzept vorgenommen.

Die Anforderungsliste wurde anhand bestehender Produktveröffentlichungen und Marketingprospekten sowie Benchmarks in Fachzeitschriften aufgestellt. Ebenfalls eine Rolle bei der Aufstellung spielten Expertenmeinungen aus Artikeln in Fachzeitschriften sowie Vorträge auf Konferenzen, die einen Einblick in zukünftig zu erwartende Entwicklungen, zum Beispiel hinsichtlich des Betriebs von Anbaugeräten über die Zapfwelle, die Bereitstellung elektrischer Leistung, die sich ergebende Dieselmotordrehzahl durch weiter zu erwartendes Downsizing und die Reduzierung ebendieser zur Kraftstoffeinsparung bei Transportarbeiten, geben. Das WOLF-Schema wurde manuell durch schrittweises Befüllen, oft in Kombination mit einem Ausschlussverfahren durchgeführt, die detaillierten Schritte sind im Anhang dargestellt. Die Berechnung des ausgewählten Konzeptes wurde mit Tabellenkalkulationssoftware mittels Matrix-Rechenverfahren nach Stangl vorgenommen. Für die Lagerlebensdauerberechnung kam die Software Romax Designer 14.7.0 zum Einsatz, die Detailkonstruktion wurde von einem externen Dienstleister durchgeführt. Ebenso wurde die über den Umfang dieser Arbeit hinausgehende detaillierte Berechnung der integrierten elektrischen Maschine von einem externen Dienstleister vorgenommen. Verschiedene Lieferanten fertigten die elektrische Maschine, deren Kühlmantel, die Getriebebauteile und Montagehilfsmittel, die rotations-symmetrischen Teile und das Schweißgehäuse. Die Montage des Gesamtgetriebes wurde zentral von einem externen Dienstleister koordiniert. Die Software zum Betrieb der neuartigen elektrischen Maschine wurde innerhalb der Gruppe der John Deere GmbH & Co. KG entwickelt, ebenso fanden auch die Prüfstandsuntersuchungen innerhalb der Gruppe der John Deere GmbH & Co. KG statt.

Durch die Neuartigkeit und Unbekanntheit dieser Getriebearchitektur kam es mehrfach während der Fertigung der Komponenten zu Verzögerungen, da Rückfragen mit Lieferanten geklärt werden mussten. Für viele der beteiligten Lieferanten war dieses Projekt das erste auf diesem Gebiet, sodass deren Beteiligung auch teilweise durch Interesse oder durch eine herausfordernde und anspruchsvolle Tätigkeit motiviert war, deren volle Komplexität nicht von Beginn an erkannt wurde. So kam es mehrfach zu Zeitverzug im Projektverlauf. Insgesamt konnte das Projekt in einem akzeptablen Zeitrahmen umgesetzt werden und viele Erfahrungen für weitere Umsetzungen gesammelt werden.

5.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Im Folgenden werden die in Abschnitt 2.3 aufgestellten Forschungsfragen sukzessiv beantwortet, wobei jeweils kurz reflektiert wird, wie die Frage beantwortet werden konnte und was die konkrete Antwort auf die Frage war.

1. Existiert ein Variatorkonzept für ein stufenloses, elektrisch leistungsverzweigtes Getriebe, welches eine elektrische Maschine direkt in das Getriebe integriert?

Diese Frage kann eindeutig positiv beantwortet werden. Die Analyse von bereits existierenden hydraulisch leistungsverzweigten Stufenlosgetrieben macht deutlich, dass das Prinzip, nur ein Element in zwei Zweigen eines nahtlos schaltbaren Stufenlosgetriebes zu kontrollieren, bereits bekannt und erfolgreich kommerziell verfolgt wird. Die Transformation in ein elektrisch leistungsverzweigtes, nahtlos schaltbares Stufenlosgetriebe ist damit naheliegend und seine kommerzielle Umsetzbarkeit ebenfalls wahrscheinlich.

2. Kann ein solches Variatorkonzept innerhalb des zur Verfügung stehenden Bauraumes in Getrieben der aktuellen und zukünftiger Traktorgenerationen realisiert werden?

Diese Frage lässt sich ebenfalls bejahen, da durch die verschiedenen aufgezeigten Methoden zur Reduktion der Komplexität und durch die verschiedenen möglichen Konfigurationen für eine Drehrichtungsumkehr und für die Integration der Gangstufen davon ausgegangen werden kann, dass die Realisierung in verschiedenen Bauräumen, die sich hinsichtlich ihrer Geometrie unterscheiden – z. B. langer und schmaler Bauraum für Traktoren mit Vollrahmen oder kurzer und breiter Bauraum für Traktoren in Blockbauweise – grundsätzlich möglich ist. Mit den Messergebnissen konnte weiterhin gezeigt werden, dass die Übertragung und Wandlung von Leistung und Drehmoment innerhalb des in zukünftigen Traktoren zur Verfügung stehenden Bauraums grundsätzlich möglich ist.

3. Ist der Einsatz eines solchen Variatorkonzeptes in Getrieben der aktuellen und zukünftiger Traktorgenerationen wirtschaftlich sinnvoll?

Insbesondere beim Vergleich der Vor- und Nachteile gegenüber den betrachteten elektrischen Stufenlosgetrieben wurde herausgearbeitet, dass viele verschiedene Möglichkeiten bestehen, mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Getriebe Kosten einzusparen, während an anderer Stelle zusätzliche Kosten entstehen. Die Kostentreiber sind maßgeblich die Herstellung des Modulationsrings, dessen Konstruktion im Rahmen dieser Arbeit optimiert für die Forschung und Messungen vorgenommen wurde. Weiterer Kostentreiber ist die Forderung nach dem höchsten übertragbaren Drehmoment und die Anforderungen an den Wirkungsgrad des Traktors. Der Modulationsring wurde im Rahmen dieser Arbeit keiner detaillierten Kostenbetrachtung unterzogen, hier wird noch deutliches Einsparpotenzial vermutet. Im Rahmen des Vergleiches der Vor- und Nachteile und der dort folgenden Empfehlung für den Einsatz in einem Traktor im Standardsegment bei ggf. gleichzeitiger Verwendung des alternativen WOLF-Schemas kann zum jetzigen Zeitpunkt davon ausgegangen werden, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Getriebe unter Berücksichtigung der zukünftig zu erwartenden Kostenentwicklung im Bereich der Fertigung elektrischer Maschinen in bestimmten Traktorkonfigurationen kostenneutral oder zu Mehrkosten bei damit einhergehender höherer Energieeffizienz und damit wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt werden kann.

4. In welchen Leistungssegmenten und in welchen Traktorkonfigurationen bietet sich der Einsatz eines solchen Variatorkonzeptes besonders an?

Aus der Betrachtung der Drehzahl-Drehmoment-Diagramme, der zirkulierenden Blindleistung sowie der Messergebnisse ergibt sich, wie oben teilweise schon beschrieben, dass sich der Einsatz eines Variatorkonzeptes, wie es im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, besonders im Standardsegment leichter bis mittelschwerer Traktoren für den europäischen Markt anbietet, da dieses Marktsegment große Überschneidungen mit den potenziell infrage kommenden Leistungsklassen hat. Als besonders geeignet sieht der Autor an dieser Stelle den Leistungsbereich zwischen 80 kW und 140 kW an.

5. Welche Vor- und Nachteile ergeben sich durch den Einsatz eines solchen Variatorkonzeptes gegenüber stufenlosen, leistungsverzweigten Traktorgetrieben der aktuellen Generation und gegenüber zu erwartenden elektrisch leistungsverzweigten Getrieben?

Die wichtigsten Vorteile im empfohlenen Leistungsbereich sind zunächst der Wegfall des Anfahranges gegenüber den zu erwartenden elektrisch leistungsverzweigten Getrieben. Hinzu kommen konkurrenzfähig hohe Gesamtwirkungsgrade, die experimentell durch die Messungen bestätigt werden konnten. Weiterhin zu nennen wäre die verbesserte Befähigung zur Bereitstellung elektrischer Leistung auf Anbaugeräten bei niedriger Fahrgeschwindigkeit, die über die Messung der Leistung der integrierten elektrischen Maschine am Prüfstand ebenfalls nachgewiesen werden konnte. Diesen Vorteilen gegenüber stehen als bedeutendste Nachteile die Unabwägbarkeiten bezüglich Reparatur, Wartung und Zuverlässigkeit der integrierten elektrischen Maschine sowie die hohe Komplexität bei Fertigung und Zusammenbau ebendieser. Diese Nachteile können gegebenenfalls durch weitere Forschung näher beleuchtet und eventuell ausgeräumt werden. Für die detaillierte Betrachtung der Vor- und Nachteile sei an dieser Stelle auf Kapitel 4 verwiesen.

5.3 Kritische Betrachtung

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dieser Arbeit sind, dass sich Verlustmodelle für Gesamtgetriebe aus einer Vielzahl an öffentlich verfügbaren Verlustmodellen für einzelne Komponenten wie zum Beispiel Planetenstufen, elektrische Maschinen, Inverter und Kupplungen erstellen lassen. Diese werden zusätzlich mit eigenen, mit Veröffentlichung dieser Arbeit wiederum ebenfalls öffentlich verfügbaren Verlustmodellen für neue Komponenten verbunden. Dies führt zu qualitativ belastbaren Modellen für das gesamte Wirkungsgradverhalten des Getriebes. Für fast alle der im Rahmen der Verlustbetrachtungen untersuchten Komponenten liegen detailliertere Verlustmodelle vor als die, welche im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung kommen. Bei der Betrachtung von Verlusten eines ganzen Systems bzw. eines ganzen Getriebes sind diese detaillierten Verlustmodelle meist kaum umsetzbar. Die gesamte Verlustcharakteristik eines Getriebes setzt sich aus vielen Komponenten zusammen, die einzelne quantitativ kleine Unterschiede von detaillierten Verlustmodellen gegenüber den hier zum Einsatz kommenden vereinfachten Verlustmodellen in der Gesamtcharakteristik nahezu verschwinden lassen. Es scheint hier besser, alle Verlustmodelle auf dem gleichen (vereinfachten) Niveau anzuwenden als einige wenige detailliert und dafür möglicherweise andere Verluste zu grob. Die Arbeit liefert eine Anleitung, wie die Verlustcharakteristik nahezu jedes Fahrzeuggetriebes in einem ersten Schritt auf einfache Art und Weise berechnet werden kann und ermöglicht so einen Vergleich verschiedener Getriebe wie auch einen Vergleich verschiedener Verlustmodelle. Die verwendeten Verlustmodelle sind qualitativ und quantitativ erklärt und für jeden Leser damit überprüfbar, alle Berechnungen können bis ins Detail nachvollzogen und für andere Konzepte angewandt werden. Die Verlustmodelle umfassen sämtliche für den Gesamtwirkungsgradverlauf charakteristische Komponenten in zukünftig zu erwartenden elektrisch leistungsverzweigten, nahtlos schaltbaren Stufenlosgetrieben und auch für aktuell schon existierende Getriebe.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich die Konsolidierung und Reduzierung der Konzepte nach Ausarbeitung der verschiedenen Möglichkeiten durch das WOLF-Schema nachteilig auf die weitere Entwicklung auswirkte. An dieser Stelle wäre es sinnvoller gewesen, die verschiedenen Möglichkeiten parallel auf gleichem Detailgrad weiterzuverfolgen und die Reduzierung und Auswahl erst zu einem späteren Zeitpunkt vorzunehmen. Der Zeitpunkt für diese Auswahl per Ausschlussverfahren wurde akzidentiell gewählt, da es im Sinne der methodischen Entwicklung von Systemen nötig ist, zu einem gewissen Zeitpunkt eine

Reduzierung der Lösungsvielfalt vorzunehmen. Um den Zeit- und Arbeitsaufwand in einem kontrollierbaren Rahmen zu halten und die Konstruktion, Fertigung und Montage des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Getriebes zeitnah vornehmen zu können, wurde die Reduktion der Lösungsmöglichkeiten bereits an dieser Stelle vorgenommen. Rückblickend zeigt sich, dass es an dieser Stelle sinnvoller gewesen wäre, mehrere Konzepte parallel zu verfolgen. Diese Erkenntnis ist für weitere Forschungsvorhaben auf dem behandelten Fachgebiet zu berücksichtigen.

Nicht vorhergesehen wurde, dass der Nachteil, aufgrund dessen das im WOLF-Schema nach Möglichkeit 1.1 vorgestellte Konzept nicht weiterverfolgt wurde, auch bei dem gewählten Konzept nach Möglichkeit 2.2 in abgeschwächter Form auftritt. Die Notwendigkeit der Reduzierung der Drehzahl des Verbrennungsmotors ergibt sich hier aus der Auslegung der elektrischen Maschine und dem Wegfall des Anfahrangs aus platztechnischen und wirtschaftlichen Gründen. Die Reduzierung der Motordrehzahl beim Anfahren fällt nicht so ausgeprägt aus wie bei einem Konzept nach Möglichkeit 1.1. Ebenfalls nicht vorhergesehen wurde die nötige Ausführung des Modulationsrings aus elektrisch nicht leitfähigen Segmenten aus Glasfaser. Diese Entscheidung war nötig, um in dem eher nach Grundlagenforschung anmutenden Forschungsvorhaben nicht zu viele Randeffekte durch elektromagnetische Verluste zu erzeugen. Die Entscheidung erschwert eine wirtschaftliche Beurteilung des Gesamtgetriebes, da somit kaum übertragbare Erfahrungen zu Fertigungsaufwand und Kosten gesammelt werden konnten. Es ist zu erwarten, dass in beiden Bereichen eine Verbesserung erzielt werden kann, wenn auf eine aufwendige Ausführung, wie im Rahmen dieser Arbeit realisiert, unter Billigung etwas höherer elektromagnetischer Verluste verzichtet wird.

Für die Synthese ist anzuführen, dass das dort entwickelte Konzept nach Möglichkeit 1.1 noch detaillierter untersucht werden könnte. Eventuell ergibt sich hier durch geschickte Auslegung, zum Beispiel durch die im Rahmen dieser Arbeit erwähnte Möglichkeit der Realisierung von vier voneinander unabhängigen Übersetzungsverhältnissen, eine Einsatzmöglichkeit. Um während der Synthese und der anschließenden Konstruktion die entstandene Dynamik beizubehalten, wurde hier das auf den ersten Blick vielversprechendste Konzept ausgewählt und weiterverfolgt. Im Rahmen der Ergebnisse dieser Arbeit kann jetzt noch das Alternativkonzept detaillierter, z. B. im Rahmen einer Studien- oder Abschlussarbeit, untersucht werden. Gegebenenfalls können die für das Prüfstandsgetriebe gefertigten Bauteile hier für Untersuchungen verwendet werden, sodass für einen erneuten Prüfstandsbetrieb nur geringfügige Umbaumaßnahmen mit wenigen Neuteilen nötig sind. Bei der Berechnung der Verluste fällt als Verbesserungsmöglichkeit auf, dass diese durch vergleichsweise einfache Modelle abgebildet wurden, die die Charakteristiken nicht vollständig abbilden und schrittweise durch komplexere Modelle ersetzt werden könnten. Weiterhin könnten die Verluste iterativ oder mit einem geeigneten Simulationsprogramm berechnet werden, einerseits um mehr Sicherheit zu erhalten, da Ergebnisse dann zwischen verschiedenen Programmen verglichen werden könnten, andererseits um eine höhere Genauigkeit durch iterative Rechenmodelle zu erhalten. Bei der Lagerlebensdauerberechnung lässt sich festhalten, dass das Standardlastkollektiv noch in mehr als die spezifizierten maximal sechs Lastpunkte pro Fahrgeschwindigkeit aufgeteilt werden könnte. Durch die Festlegung auf maximal sechs Lastpunkte analog zu den DLG-Zyklen werden hohe Geschwindigkeiten kaum berücksichtigt, außerdem wird wie von Resch bereits festgestellt der Langzeiteinsatz mit hoher Drehmomentbelastung nicht betrachtet. Neben der im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen exponentiellen Aufteilung zur Basis 2 könnte auch noch eine exponentielle

Aufteilung zur Basis 10 verwendet werden. Diese Aufteilung würde den Fokus eher auf kurzzeitigen Einsatz bei hohen Drehmomenten legen und den Langzeiteinsatz bei hohen Fahrgeschwindigkeiten und niedrigeren Drehmomenten weiter vereinfacht abbilden. Im Prüfstandsbetrieb wurde die Verlustleistung der lastfrei mitgedrehten elektrischen Maschine über eine im Rahmen dieser Arbeit aufgestellte Gleichung berechnet und im jeweiligen Betriebspunkt von der tatsächlich gemessenen Verlustleistung subtrahiert. An dieser Stelle besteht Verbesserungspotenzial. Die jeweils lastlose elektrische Maschine könnte über eine mechanische Kupplung abgetrennt werden, so dass dort keine Verlustleistung entstehen würde die dann rechnerisch abgeschätzt und in den Messungen berücksichtigt werden muss.

5.4 Ausblick

Mit dem Prüfstandsgetriebe können weitere Untersuchungen durchgeführt werden. So kann unter anderem untersucht werden, welche Torsionsschwingungen am Ausgang bei konstantem Eingangsdrehmoment auftreten, um damit ein besseres Verständnis von der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe zu bekommen. Weiterhin kann untersucht werden, ob sich die magnetisch-elektrische Umlaufgetriebestufe und insbesondere deren Stator dazu eignet, Drehmomentschwankungen des Verbrennungsmotors zu kompensieren. Der Stator erzeugt ein elektromagnetisches Drehfeld frei von jeder mechanischen Trägheit und kann damit theoretisch in Sekundenbruchteilen eventuell auftretende Unregelmäßigkeiten kompensieren. Diese Untersuchungen ziehen einen hohen Aufwand nach sich und es werden dafür spezialisierte Messeinrichtungen wie zum Beispiel Rotationsvibrometer benötigt [Tra07]. Diese Untersuchungen sind nicht in einem sinnvollen Rahmen innerhalb dieser Arbeit unterzubringen. Sie könnten wahrscheinlich eine eigene Arbeit füllen, daher sei an dieser Stelle auf diese Möglichkeit hingewiesen. Das Getriebe kann entsprechend umgebaut werden, um derartige Untersuchungen zu ermöglichen.

Hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung von Traktorgetrieben und Traktoranbaugeräten ist besonders die Entwicklung von elektrisch betriebenen Anbaugeräten interessant. Kann zukünftig die Zapfwelle, die mechanische Leistung auf das Anbaugerät transferiert, entfallen weil alle oder ein Großteil der Anbaugeräte nur noch elektrisch angetrieben werden und sich dadurch Marktsegmente für Traktoren ohne mechanische Zapfwelle ergeben, gewinnen einzelne Getriebekonzepte zusätzlich an Bedeutung, da die Konstruktion und Lagerung bedeutend einfacher wird. Es muss in diesem Fall keine in direkter Verbindung mit dem Verbrennungsmotor stehende Welle mehr komplett durch das Getriebe durchgeführt werden. Dies macht andere Lagerkonzepte überhaupt erst möglich und ermöglicht zum Beispiel auch die koaxiale Anordnung einer zweiten elektrischen Maschine im hinteren Teil des Getriebes. Diese müsste dann nicht mehr länger parallel verbaut werden. Diese Vorteile gelten auch für andere im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Konzepte wie z. B. nach dem System Jarchow. Neue Erkenntnisse sind noch im Bereich der alternativen, sich aus dem WOLF-Schema ergebenden Möglichkeiten und deren Verhalten im Gesamtantriebsstrang zu erwarten. Zusätzlich ist bei der konstruktiven Realisierung der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe anzuführen, dass die Konstruktion des Modulationsrings, wie sie im Rahmen des Prüfstandsgetriebes vorgenommen wurde, einen hohen Aufwand bei Fertigung und Montage bedeutet. Die Ausführung der nicht magnetischen Segmente aus laminierten Glasfaserstäben ist teuer und aufwendig. Im Rahmen dieser Arbeit ist dieses Vorgehen notwendig, um auftretende Randeffekte durch induzierte Wirbelströme zu minimieren und

damit bessere Rückschlüsse aus den Messergebnissen ziehen zu können, da eine eventuelle Ausführung aus nicht magnetischem, aber schwach elektrisch leitfähigem Material wie z. B. Aluminium oder Edelstahl zusätzliche parasitäre Verluste durch Wirbelströme nach sich ziehen würde. Für zukünftige Einsätze bliebe daher zu untersuchen, welchen Einfluss das Trägermaterial des Modulationsrings auf das Betriebsverhalten hat. Eine Ausführung aus beispielsweise Aluminium oder Edelstahl könnte zu einer deutlichen fertigungstechnischen Vereinfachung führen, so sind unter anderem konstruktive Ausführungen denkbar, die aus einem zweiteiligen Trägerring mit dazwischen eingelegten ferromagnetischen Blechpaketen bestehen und dann auch ohne Bandagierung auskommen können. Analog ist für den Rotor zu untersuchen, welchen Einfluss hier die Verwendung von Oberflächenmagneten gegenüber vergrabenen Magneten hat, wie sie auch von dem Unternehmen Magnomatics Limited dargestellt wird. Für den Stator bleibt offen, welchen Einfluss die Ausführung der Wicklung, hier im Speziellen die verteilte Wicklung gegenüber der konzentrierten Wicklung, hat. Ebenfalls neue Erkenntnisse sind aus Betrachtungen zur Temperaturbelastbarkeit der integrierten elektrischen Maschine, insbesondere der auftretenden Magnettemperaturen im Rotor, zu erwarten. Hierfür müsste der Rotor in einer geeigneten Art und Weise modifiziert werden, die eine Ermittlung der auftretenden Magnettemperaturen ermöglichen würde. Dies steht auch im Zusammenhang mit der Ermittlung der Auswirkungen des Kühlölvolumenstroms. Hierfür könnten Arbeitspunkte mit stationärem Verhalten festgelegt und in diesen der Kühlölvolumenstrom durch den Rotor der elektrischen Maschine variiert werden. Die Messungen lassen erwarten, dass die Verlustleistung in der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe von der Kühlstrategie abhängig ist. Eine Erhöhung des Kühlölvolumenstroms führt hierbei zunächst zu einer Verringerung der auftretenden Verluste, da der Betrieb bei einer niedrigeren Temperatur stattfindet und so die Strom- und Stromwärmeverluste geringer ausfallen. Ab einem bestimmten, für jeden Arbeitspunkt spezifischen Ölvolumenstrom ist zu erwarten, dass sich die auftretenden Verluste wieder erhöhen, da dann zusätzliche Reibung durch Ölscherung in den elektrischen Luftspalten der Maschine auftritt. Der Kühlölvolumenstrom ist damit ein weiterer wichtiger Parameter für den Betrieb der magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe, der für den jeweiligen konkreten Anwendungsfall optimiert werden kann. Weitere Erkenntnisse sind schließlich noch bei der Komplettintegration eines solchen Getriebes in einen Traktor zu erwarten, da erst dann dessen Fahrverhalten subjektiv beurteilt werden kann. Bis zu diesem Punkt besteht noch ein großer Forschungsbedarf.

Herausforderungen treten hierbei insbesondere in der konstruktiven Realisierung des Modulationsrings, der Magnetanordnung des Innenrotors sowie der Wicklung des Stators auf. Hier besteht ein sehr großes Lösungsfeld unzähliger konstruktiver Möglichkeiten, deren Einfluss auf die Gesamtkonstruktion noch zu untersuchen ist. Das Unternehmen Magnomatics Limited hält derzeit Patente für den Einsatz einer magnetisch-elektrischen Umlaufgetriebestufe in Fahrzeuggetrieben. Davon unberührt bleibt das Forschungs- bzw. Versuchsprivileg (§ 11 Abs. 2 PatG), welches die Untersuchungen im Rahmen dieser Forschungsarbeit abdeckt.

Aus allen zukünftig zu erwartenden Erkenntnissen im behandelten Fachgebiet ergibt sich die Chance, ein innovatives und hoch integratives Getriebekonzept für den Einsatz in einem landwirtschaftlichen Fahrzeug zu entwickeln, welches im Rahmen der immer strenger werdenden Abgasvorschriften Möglichkeiten zur Kraftstoffeinsparung und Potenzial für einen niedrigeren Gesamtenergiebedarf bei der industriellen Erzeugung von Nahrungsmitteln bietet. Im Hinblick auf den steigenden Nahrungsmittelbedarf einer steigenden Weltbevölkerung

mit sich verändernden Ernährungsgewohnheiten und einer aufstrebenden Biomasseproduktion zur Energiegewinnung [Paw08] ergibt sich damit die Chance, einen signifikanten Beitrag zur Nachhaltigkeit bei der Deckung dieser Bedarfe zu leisten. Aus den erwähnten weiteren Forschungsfragen und Forschungsschwerpunkten sollte der Fokus auf die Betrachtung zusätzlicher alternativer Konzepte sowie deren softwaremäßige Integration gelegt werden. In der Abstimmung innerhalb des Gesamtfahrzeuges wird das größte Potenzial für Energieeinsparung erwartet. Mit dem im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Konzept ergibt sich eine hohe Flexibilität. Es ist die Aufgabe zukünftiger Forschungsvorhaben, diese Flexibilität durch eine detaillierte und intelligente Abstimmung innerhalb des Energiemanagements des Gesamtfahrzeugs derart zu nutzen, dass deren volles Potenzial ausgeschöpft werden kann. Auf diese Art können die oben beschriebenen Chancen Realität werden.

Literatur

- [Aiz12] AIZETMÜLLER, H., 2012. Die Zukunft liegt in hybriden Systemen. *In: ATZ offhighway*. Nr. April 2012 (siehe S. 28).
- [Arm01] ARMSTRONG, C. G., 1901. *Power transmitting device*. US687292. (Siehe S. 30).
- [Ash17] ASHCROFT, G., 2017. *Buyer's guide: Buying a second-hand John Deere 6150R* [online]. Hrsg. von AGRIBRIEFING LTD. London [Zugriff am 13.05.2019]. Verfügbar unter: <https://www.fginsight.com/vip/vip/buyers-guide-buying-a-second-hand-john-deere-6150r-22527> (siehe S. 61).
- [AH01] ATALLAH, K.; HOWE, D., 2001. A novel high-performance magnetic gear. *In: IEEE Transactions on Magnetics*. Jg. 37, Nr. 4, S. 2844–2846. ISSN 00189464. (siehe S. 30, 32, 33).
- [Bin16] BINDER, A., 2016. *Systemauslegung elektrifizierter Triebstränge* [online]. Darmstadt [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: https://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/vortrge/triebstraenge/Kurs_Systemauslegung_Triebstraenge.pdf (siehe S. 78).
- [Bla14] BLACK, D., 2014. *MAGSPLIT® Magnetic Power Split Device* [online]. Hrsg. von MAGNOMATICS LIMITED. Sheffield [Zugriff am 11.06.2019]. Verfügbar unter: <http://www.magnomatics.com/?file=MAGSPLIT%20Data%20Sheet.pdf> (siehe S. 79).
- [BSP14] BREU, W.; SZAJEK, A.; PICHLMAIER, B., 2014. Elektrifizierung bei Traktoren. *In: ATZ offhighway*. Nr. April 2014 (siehe S. 27).
- [Bro18] BROMBERG, D., 2018. *Inverter Efficiency Curves* [online]. San Francisco [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: <https://help.aurorasolar.com/hc/en-us/articles/115001389928-Inverter-Efficiency-Curves> (siehe S. 78).
- [CCC14] CHMELICEK, P.; CALVERLEY, S. D.; CLARK, R. E., 2014. *Design Optimisation of MAGSPLIT® – a Magnetic Power Split e-CVT* [online]. Unter Mitarb. von OPERA. Sheffield [Zugriff am 13.05.2019]. OPERA EUGM 2014. Verfügbar unter: <https://de.scribd.com/document/364041422/4-Clark-Magnomatics-OperaEUGM2014-pdf> (siehe S. 34).
- [Dee13] DEERE & COMPANY (Hrsg.), 2013. *Calculate Tire Combinations – (on 6140R and 6150R Tractors)* [online]. Moline [Zugriff am 13.05.2019]. Verfügbar unter: http://manuals.deere.com/omview/OMETN78900_19/0ULXA64,0002BF3_19_20130430.html (siehe S. 61).

- [Dee19a] DEERE & COMPANY (Hrsg.), 2019. *Ersatzteil-Information: Ändern Sie die Zapfwellendrehzahl der Heckzapfwelle von 540E/1000/1000E in 540/540E/1000 für 7030 Premium & 7030 E Premium Traktoren – mit dem Nachrüstsatz AL202184!* [online]. Walldorf [Zugriff am 14.05.2019]. Verfügbar unter: http://www.deere.de/de_DE/docs/parts_services/parts/parts_info/rear_pto_de.pdf?locale=de_DE (siehe S. 54).
- [Dee19b] DEERE & COMPANY (Hrsg.), 2019. *Intelligent Power Management (IPM)* [online]. Moline [Zugriff am 13.05.2019]. Verfügbar unter: http://salesmanual1.deere.com/sales/salesmanual/en_NA/tractors/attachments/engine/waterloo_common_intelligent_power_management.html (siehe S. 60).
- [Dee19c] DEERE & COMPANY (Hrsg.), 2019. *Serie 6R* [online]. o. O. [Zugriff am 13.05.2019]. Verfügbar unter: <https://www.deere.de/de/magazines/publication.html?id=130dc26c#8> (siehe S. 60, 61, 109).
- [DKG04] DEMMEL, M.; KIRCHMEIER, H.; GEISCHEDE, R., 2004. *Untersuchung des Leistungsbedarfes und der Zerkleinerungswirkung von Kreiseleggen mit unterschiedlichen Kreiseldurchmessern* [online]. Hrsg. von BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT INSTITUT FÜR LANDTECHNIK, BAUWESEN UND UMWELTTECHNIK. Freising [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ilt/dateien/ilt1a_endbericht_kreiseleggen_klein.pdf (siehe S. 95, 104).
- [DIN13] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (Hrsg.), 2013. *DIN ISO 8855:2013-11, Straßenfahrzeuge – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten – Begriffe (ISO 8855:2011)*. Berlin (siehe S. 54, 89).
- [DLG16a] DLG E.V. (Hrsg.), 2016. *DLG-Prüfbericht 6305* [online]. Groß-Umstadt [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: <https://pruefberichte.dlg.org/filestore/orage/6305.pdf> (siehe S. 104).
- [DLG16b] DLG E.V. (Hrsg.), 2016. *DLG-Prüfbericht 6416* [online]. Groß-Umstadt [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: <https://pruefberichte.dlg.org/filestore/orage/6416.pdf> (siehe S. 104).
- [EMT07] EMT INGENIEURBUERO GMBH (Hrsg.), 2007. *Allgemeine Informationen zu Elektroblechen* [online]. Remshalden [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: <https://www.emt-net.de/elektrobleche/Allgemeine-Informationen-zu-Elektroblechen.pdf> (siehe S. 82).
- [Exx16] EXXON MOBIL CORPORATION (Hrsg.), 2016. *Hydraulischer Wirkungsgrad* [online]. Hamburg [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwid8cbZh53iAhWOKVAKHcU_DDwQFjAAegQIBhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.mobil.com.de%2Findustrial%2F-%2Fmedia%2Ffiles%2Fglobal%2Fde%2Ftt_hydraulischer-wirkungsgrad.pdf&usg=AOvVaw0YuDcI6g8cp5JE1GTjA9sL (siehe S. 85).
- [FD19] FEDKIN, M.; DUTTON, J. A., 2019. *6.5. Efficiency of Inverters* [online]. State College [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/738> (siehe S. 78).

- [Fis+12] FISCHER, R. u. a., 2012. *Das Getriebebuch*. Vienna: Springer. Der Fahrzeugantrieb. ISBN 978-3-7091-0877-2 (siehe S. 27, 103).
- [FG16] FULLER, J. W. E.; GASKELL, C. J., 2016. High efficiency 'full-toroidal' traction drive CVT: technology improvements and application to front wheel drive cars. In: VDI WISSENSFORUM GMBH (Hrsg.). *VDI-Berichte 2267*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH. ISBN 978-3-18-092276-8 (siehe S. 27).
- [Geb11] GEBRÜDER WAASNER ELEKTROTECHNISCHE FABRIK GMBH (Hrsg.), 2011. *Magnetische und technologische Eigenschaften* [online]. Forchheim [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: http://www.waasner.de/fileadmin/Assets/PDFs/MagTechnEigenschaften_112011.pdf (siehe S. 82).
- [GR10] GEIMER, M.; RENIUS, K. T., 2010. Motoren und Getriebe bei Traktoren. In: HARMS, H.-H.; MEIER, F.; METZNER, R. (Hrsg.). *Yearbook agricultural engineering*. Darmstadt: Max-Eyth-Stiftung. Nr. 22. ISBN 978-3-7690-0761-9 (siehe S. 30, 37).
- [Ges88] GESELLSCHAFT ENTWICKLUNG, KONSTRUKTION, VERTRIEB, 1988. *Planetengetriebe: E. leistungsfähige Komponente d. Antriebstechnik; Tagung Bad Soden, 16. u. 17. März 1988*. Düsseldorf: VDI-Verl. VDI-Berichte. ISBN 978-3-18-090672-0 (siehe S. 22, 41).
- [Ges12] GESELLSCHAFT FÜR INNOVATIVE AUTOMATIONSTECHNIK MBH (Hrsg.), 2012. *Kegelradgetriebe* [online]. Köln [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: <http://giambh.com/broschueren/Kegelradgetriebe.pdf> (siehe S. 86).
- [GHV98] GIERSCH, H.-U.; HARTHUS, H.; VOGELSANG, N., 1998. *Elektrotechnik für Fachschulen: Elektrische Maschinen*. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN 978-3-322-92706-4 (siehe S. 77).
- [GHV03] GIERSCH, H.-U.; HARTHUS, H.; VOGELSANG, N., 2003. *Elektrische Maschinen: Prüfen, Normung, Leistungselektronik*. 5., korr. Aufl. Stuttgart: Teubner. Elektrotechnik für Fachschulen. ISBN 978-3-519-46821-9 (siehe S. 34).
- [Gou+11] GOUDA, E. u. a., 2011. Comparative Study Between Mechanical and Magnetic Planetary Gears. In: *IEEE Transactions on Magnetics*. Jg. 47, Nr. 2, S. 439–450. ISSN 00189464. (siehe S. 33).
- [Gra+11] GRAD, K. u. a., 2011. Neue Generation stufenloser Traktorgetriebe. In: *ATZ offhighway*. Nr. November 2011 (siehe S. 46).
- [HAW19] HAWE HYDRAULIK SE (Hrsg.), 2019. *Hydraulischer Wirkungsgrad* [online]. Aschheim [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: <https://www.hawe.com/de-de/fluidlexikon/hydraulischer-wirkungsgrad/> (siehe S. 85).
- [Hei90] HEIL, J., 1990. *Auslegung und Betriebsverhalten von permanenterregten Synchronmaschinen mit maschinenkommutiertem Frequenzumrichter*. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. Fortschrittberichte / VDI Reihe 21, Elektrotechnik. ISBN 978-3-18-145921-8 (siehe S. 82).
- [Hen06] HENSCHHEL, M., 2006. *Berechnung und Optimierung permanenterregter Maschinen am Beispiel von Generatoren für Windkraftanlagen*. Darmstadt. Dissertation. Technische Universität Darmstadt (siehe S. 82, 83).

- [Her08] HERCHENHAN, M., 2008. *Modellierung, Mehrfachregelung und optimale Steuerung eines leistungsverzweigten hybriden Antriebs*. 1. Aufl. Göttingen: Sierke. Reihe Elektrotechnik. ISBN 978-3-86844-078-2 (siehe S. 27).
- [Her14] HERSCHEL, D., 2014. Druckflüssigkeiten für Hydraulikanlagen. In: WILL, D.; GEBHARDT, N. (Hrsg.). *Hydraulik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 15–49. ISBN 978-3-662-44401-6 (siehe S. 73).
- [Hyd16] HYDRO LEDUC (Hrsg.), 2016. *Schrägachsen Hydraulikmotore [sic!]* [online]. Azerailles [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: http://www.hydroleduc.com/images/links/catalogues/hydro%20leduc%20documentation_de/hydraulik%20motoren/hydroleduc_motors_de.pdf (siehe S. 84).
- [Ion+08] IONEL, D. u. a., 2008. A General Model of the Laminated Steel Losses in Electric Motors with PWM Voltage Supply. In: *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. IEEE, S. 1–7. ISBN 978-1-4244-2278-4 (siehe S. 80, 81).
- [Jac10] JACOBS, G., 2010. Energieeffiziente Antriebe für Bau- und Landmaschinen. In: *ATZ offhighway*. Nr. März 2010 (siehe S. 21).
- [JHB83] JARCHOW, F.; HAENSEL, D.; BERGER, G., 1983. *Hydrostatischmechanisches Stellkoppelgetriebe mit eingangsseitiger Leistungsverzweigung*. (Siehe S. 37, 38, 75).
- [Joh15] JOHN DEERE GMBH & CO. KG (Hrsg.), 2015. *Weitere John Deere Neuheiten* [online]. Bruchsal [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: https://www.deere.de/de_DE/our_company/news_and_media/press_releases/2015/corporate/weitere_jd_neuheiten.page (siehe S. 94).
- [Jør10] JØRGENSEN, F. T., 2010. *Design and construction of permanent magnetic gears*. Aalborg. ISBN 978-87-89179-86-5. Dissertation. Aalborg University, Institute of Energy Technology (siehe S. 125).
- [JE16] JÜNEMANN, D.; EGHTESSAD, M., 2016. Evaluation of electric working drives in agricultural machines. In: VDI WISSENSFORUM GMBH (Hrsg.). *VDI-Berichte 2267*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH. ISBN 978-3-18-092276-8 (siehe S. 94, 95, 104).
- [Jun16] JUNGINGER, C., 2016. *Untersuchung der Stromverdrängung im Ständer hoch ausgenutzter elektrischer Maschinen*. Dissertation. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (siehe S. 76, 82).
- [Kir13] KIRBY, C., 2013. *From University to Universal – Applications for MagsplitTM* [online]. Hrsg. von MAGNOMATICS LIMITED. Sheffield [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: https://slideblast.com/from-university-to-universal-a-applications-for-magsplitm-cenex-lcv_596982581723dd92a0007bef.html (siehe S. 79).
- [Kle05] KLEMENT, W., 2005. *Fahrzeuggetriebe*. München: Hanser. Reihe Fahrzeugtechnik. ISBN 978-3-446-22746-0 (siehe S. 27).
- [Kön19] KÖNIGER, W., 2019. *Lamellenkupplungen für ein Schiffsgetriebe* [online]. o. O. [Zugriff am 13.05.2019]. Verfügbar unter: www.auf-grosser-reise.de/mb4/konstru/Lamellenkupplungen.ppt (siehe S. 74).

- [Kun13] KUNZE, G., 2013. Mobile Baumaschinen – Entwicklungen und Forschungsschwerpunkte. In: *ATZ offhighway*. Nr. März 2013 (siehe S. 27).
- [Lan19] LANDWIRT.COM GMBH (Hrsg.), 2019. *John Deere PowerTech Plus-Motor mit IPM* [online]. Graz [Zugriff am 13.05.2019]. Verfügbar unter: https://www.landwirt.com/berichtdiashow/FB_JohnDeere_8345R_3_John-Deere-PowerTech-Plus-Motor-mit-IPM.html (siehe S. 60).
- [Lat13] LATIMER, D., 2013. *Magnomatics* [online]. Hrsg. von MAGNOMATICS LIMITED. Sheffield [Zugriff am 13.05.2019]. Verfügbar unter: <http://www.magnomatics.com/?file=Magnomatics%20Intro.pdf> (siehe S. 21, 31).
- [LN94] LECHNER, G.; NAUNHEIMER, H., 1994. *Fahrzeuggetriebe: Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*. Berlin und Heidelberg: Springer. VDI-Buch. ISBN 978-3-662-07179-3 (siehe S. 71).
- [LDL10] LEHRMANN, C.; DREGER, U.; LIENESCH, F., 2010. Wirkungsgradbestimmung an elektrischen Maschinen. In: *Bulletin SEV/VSE* [online]. Jg. 101, Nr. 11 [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_3/explosionsschutz/Veroeffentlichungen/372/Lehrmann_1011.pdf (siehe S. 77).
- [Len01] LENGE, R., 2001. Was leistet das AutoPowr-Getriebe? In: *top agrar*. Nr. 7 (siehe S. 93, 104).
- [Loo09] LOOMAN, J., 2009. *Zahnradgetriebe: Grundlagen, Konstruktionen, Anwendungen in Fahrzeugen*. 3. neubearb. u. erw. Aufl. 1996, Nachdr. in veränderter Ausstattung. Berlin und Heidelberg: Springer. Klassiker der Technik. ISBN 978-3-540-89459-9 (siehe S. 26).
- [MPS04] MICKNASS, W.; POPIOL, R.; SPRENGER, A., 2004. *Kupplung, Getriebe, Antriebswellen*. 1. Aufl. Würzburg: Vogel. Der sichere Weg zur Meisterprüfung im Kfz-Techniker-Handwerk. ISBN 978-3-8023-1910-5 (siehe S. 27).
- [MVP12] MÜLLER, G.; VOGT, K.; PONICK, B., 2012. *Berechnung elektrischer Maschinen*. Somerset: Wiley. ISBN 978-3-527-66019-3 (siehe S. 77).
- [Mül98] MÜLLER, H. W., 1998. *Die Umlaufgetriebe: Auslegung und vielseitige Anwendungen*. Zweite neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer. Konstruktionsbücher. ISBN 978-3-642-58725-2 (siehe S. 25, 26, 33, 40, 51, 85–88).
- [Ort19a] ORTLINGHAUS-WERKE GMBH (Hrsg.), 2019. *Hydraulisch betätigte Kupplungen und Bremsen* [online]. o. O. [Zugriff am 13.05.2019]. Verfügbar unter: <http://www.troma-mach.cz/wp-content/uploads/2015/07/hydraulicky-ovladane-spojky-a-brzdy-2.pdf> (siehe S. 74).
- [Ort19b] ORTLINGHAUS-WERKE GMBH (Hrsg.), 2019. *Lamellen* [online]. o. O. [Zugriff am 13.05.2019]. Verfügbar unter: http://www.troma-mach.cz/Downloads/lamely_de.pdf (siehe S. 74).
- [Ort19c] ORTLINGHAUS-WERKE GMBH (Hrsg.), 2019. *Technische Grundlagen* [online]. o. O. [Zugriff am 13.05.2019]. Verfügbar unter: http://ortlinghaus.at/pdf/prod_neu/de_techn_grundlagen.pdf (siehe S. 74).

- [Par11] PARKER HANNIFIN CORPORATION (Hrsg.), 2011. *Übersicht über Verschmutzungsstandards* [online]. Norfolk [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: http://www.parkerhfde.com/pdf/common/dd015/DD0000015_DE.pdf (siehe S. 103).
- [Paw08] PAWELZIK, B., 2008. Megatrends begründen Konzernstrategie. In: *Eilbote*. Nr. 29 (siehe S. 138).
- [PL11] PONN, J.; LINDEMANN, U., 2011. *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungs-lösungen*. 2. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-20580-4 (siehe S. 40).
- [Rao10] RAO, G., 2010. *Modellierung und Simulation des Systemverhaltens nasslaufender Lamellenkupplungen*. Dresden. Dissertation. Technische Universität Dresden (siehe S. 73).
- [Rei18] REICK, B., 2018. *Methode zur Analyse und Bewertung von stufenlosen Traktorgetrieben mit mehreren Schnittstellen*. Karlsruhe. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (siehe S. 27, 54).
- [Ren94] RENIUS, K., 1994. Trends in Tractor Design with Particular Reference to Europe. In: *Journal of Agricultural Engineering Research*. Jg. 57, Nr. 1, S. 3–22. ISSN 00218634. (siehe S. 70, 90).
- [Ren04] RENIUS, K., 2004. *Vorlesung Getriebe für mobile Arbeitsmaschinen* (siehe S. 105, 106).
- [Ren87] RENIUS, K. T., 1987. *Traktoren: Technik und ihre Anwendung*. 2., durchges. Aufl. München: BLV-Verl.-Ges. Wissen für die Praxis. ISBN 978-3-405-13146-3 (siehe S. 104).
- [Ren14] RENIUS, K. T., 2014. Globale Getriebekonzepte für Traktoren. In: *ATZ off-highway*. Nr. August 2014 (siehe S. 21, 25, 35, 88).
- [RGS15] RENIUS, K. T.; GEIMER, M.; STIRNIMANN, R., 2015. Motoren und Getriebe bei Traktoren. In: FRERICHS, L. (Hrsg.). *Jahrbuch Agrartechnik 2014* [online]. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge [Zugriff am 29.05.2019]. Nr. 26. Verfügbar unter: <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00055049> (siehe S. 36).
- [RK11] RENIUS, K. T.; KNECHTGES, H. J., 2011. Traktoren 2010/2011. In: *ATZ off-highway*. Nr. November 2011 (siehe S. 26).
- [RR05] RENIUS, K. T.; RESCH, R., 2005. Continuously Variable Tractor Transmissions. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (Hrsg.). *ASAE Distinguished Lecture No. 29* (siehe S. 28).
- [Res04] RESCH, R., 2004. *Leistungsverzweigte Mehrbereichsfahrantriebe mit Kettenwandlern*. München. Dissertation. Technische Universität München (siehe S. 103–106).

- [RA10] RISK & POLICY ANALYSTS LIMITED; ARCADIS BELGIUM NV, 2010. *Study in View of the Revision of Directive 97/68/EC on Non-Road Mobile Machinery (NRMM) (Module I – An Emissions Inventory)* [online]. Hrsg. von EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE GENERAL ENTERPRISE AND INDUSTRY. Norfolk und Leuven [Zugriff am 24.05.2019]. Verfügbar unter: http://publications.europa.eu/resource/celellar/60e67ef3-f68f-42d0-ba3f-afb053704359.0001.02/D0C_1 (siehe S. 21).
- [Sch19] SCHABMÜLLER GMBH (Hrsg.), 2019. *Electric Drives Implement* [online]. Berching [Zugriff am 14.05.2019]. Verfügbar unter: <https://dokumen.tips/documents/electricdriv-e-s-implement-schabmiller-gmbh-industries-trasse-8-92334-berching.html> (siehe S. 76).
- [SR16] SCHNEIDER, H.-D.; ROMPELBERG, R., 2016. The cone-ring-transmission will go into production! In: VDI WISSENSFORUM GMBH (Hrsg.). *VDI-Berichte 2267*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH. ISBN 978-3-18-092276-8 (siehe S. 27).
- [See12] SEEGER, J., 2012. Neues Doppelkupplungsgetriebe für Traktoren. In: *ATZ offhighway*. Nr. Oktober 2012 (siehe S. 26).
- [Sta06] STANGL, M., 2006. *Methodik zur kinematischen und kinetischen Berechnung [sic!] mehrwelliger Planeten-Koppelgetriebe*. München. Dissertation. Technische Universität München (siehe S. 22, 41).
- [Ste08] STEINBERG, P., 2008. *Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs VI*. Renningen: expert-Verl. Haus der Technik Fachbuch. ISBN 978-3-8169-2820-1 (siehe S. 74).
- [Ste77] STEINKAMPF, H., 1977. Problematik der Leistungsumwandlung über die Triebräder bei leistungsstarken Schleppern. In: SCHOEDDER, F. (Hrsg.). *Grundl. Landtechnik Bd. 27 (1977) Nr. 5* [online]. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH [Zugriff am 29.05.2019]. Verfügbar unter: <http://440ejournals.uni-hohenheim.de/index.php/Grundlagen/article/view/559> (siehe S. 61).
- [Sti13] STIRNIMANN, R., 2013. Stufenlos ist nicht gleich stufenlos. In: *Lohnunternehmen*. Jg. 68, Nr. 10 (siehe S. 21).
- [Tra07] TRAUTVETTER, J., 2007. *Theoretische und experimentelle Analyse des Torsionsschwingungssystems Dieselmotor auf einem Motorenprüfstand*. Zwickau. Masterarbeit. Westsächsische Hochschule Zwickau (siehe S. 136).
- [UK11] UPPENKAMP, N.; KÜPER, J.-M., 2011. 40 50 oder 60 km/h fahren? In: *top agrar*. Nr. 5 (siehe S. 61).
- [Vah+09] VAHLENSIECK, B. u. a., 2009. Elektrische Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen — Ein methodischer Ansatz zur Übertragung existierender Lösungen. In: GEIMER, M.; HUBER, A. (Hrsg.). *Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 2. Fachtagung des VDMA und der Universität Karlsruhe (TH)*. Karlsruhe: WVMA (siehe S. 80).
- [VDI93] VDI-GESELLSCHAFT PRODUKT- UND PROZESSGESTALTUNG (Hrsg.), 1993. *VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Nr. 2221 (siehe S. 23, 40, 46).

- [VDI12a] VDI-GESELLSCHAFT PRODUKT- UND PROZESSGESTALTUNG (Hrsg.), 2012. *VDI-Richtlinie 2157: Planetengetriebe – Begriffe, Symbole, Berechnungsgrundlagen*. Nr. 2157 (siehe S. 26).
- [VDI12b] VDI-GESELLSCHAFT PRODUKT- UND PROZESSGESTALTUNG (Hrsg.), 2012. *VDI-Richtlinie 2225 Blatt 3: Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch-wirtschaftliche Bewertung*. Nr. 2225 (siehe S. 40).
- [VMK08] VIGNOLA, F.; MAVROMATAKIS, F.; KRUMSICK, J., 2008. *Performance of PV Inverters* [online]. Eugene und Heraklion [Zugriff am 15.05.2019]. Verfügbar unter: <http://solardat.uoregon.edu/download/Papers/PerformanceofPVInverters.pdf> (siehe S. 78).
- [Wil19] WILLIG, H.-P. (Hrsg.), 2019. *Eisenverluste* [online]. München [Zugriff am 14.05.2019]. Verfügbar unter: <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Eisenverluste> (siehe S. 77).
- [Wil75] WILLIS, R., 1875. *Principles of Mechanism: Designed for the Use of Students in the Universities and for Engineering Students Generally*. 2. Aufl. J. Wiley (siehe S. 26, 33).
- [Wil16] WILMER, H., 2016. So unterschiedlich ist der Wirkungsgrad. In: *profi Magazin für professionelle Agrartechnik*. Nr. 6 (siehe S. 70, 88).
- [Wir12] WIRTH, M., 2012. *Schleppmomente in Synchronisierungen von Fahrzeuggetrieben*. München. Dissertation. Technische Universität München (siehe S. 73).
- [Wol54] WOLF, A., 1954. *Die Grundgesetze der Umlaufgetriebe*. Braunschweig: Vieweg. Schriftenreihe Antriebstechnik (siehe S. 40, 41).
- [Zel19] ZELLER+GMELIN GMBH & CO. KG (Hrsg.), 2019. *Technische Information Divinol Spezialöl HGB* [online]. Eislingen/Fils [Zugriff am 13.05.2019]. Verfügbar unter: <https://www.oel-engel.de/TI-DE-51880.pdf> (siehe S. 73).

A Rückführung der Gleichung 2.5 auf die WILLIS-Gleichung

Gleichung 2.5, die für $i_0 < 0$ gültig ist, lautet:

$$\frac{-N_1}{N_3}\Omega_1 + \frac{N_2}{N_3}\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.1})$$

Hierin sind

- N_1 Polpaarzahl des inneren Rotors
- N_3 Polpaarzahl des äußeren Rotors
- N_2 Anzahl der ferromagnetischen Segmente des modulierenden Rings
- Ω_1 Drehzahl des inneren Rotors
- Ω_3 Drehzahl des äußeren Rotors
- Ω_2 Drehzahl des modulierenden Rings

1. Fall: $i_0 < 0$

Sei $i_0 < 0$, woraus wie in Unterabschnitt 2.1.5 beschrieben direkt folgt:

$$N_2 = N_1 + N_3 \quad (\text{A.2})$$

Eingesetzt in Gleichung A.1 ergibt sich damit:

$$\frac{-N_1}{N_3}\Omega_1 + \frac{N_1 + N_3}{N_3}\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.3})$$

Erweitert man nun den mittleren Bruch in Gleichung A.3 und setzt anschließend noch

$$i_0 = -\frac{N_3}{N_1} < 0 \quad (\text{A.4})$$

in Gleichung A.3 ein, so folgt:

$$\frac{-N_1}{N_3}\Omega_1 + \left(\frac{N_1}{N_3} + \frac{N_3}{N_3}\right)\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{-N_1}{N_3}\Omega_1 + \left(\frac{N_1}{N_3} + 1\right)\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{1}{i_0}\Omega_1 + \left(-\frac{1}{i_0} + 1\right)\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.7})$$

A Rückführung der Gleichung 2.5 auf die WILLIS-Gleichung

Multiplikation mit i_0 liefert:

$$\Omega_1 + (i_0 - 1)\Omega_2 - i_0\Omega_3 = 0 \quad (\text{A.8})$$

$$\Omega_1 - i_0\Omega_3 - (1 - i_0)\Omega_2 = 0 \quad (\text{A.9})$$

Ersetzt man jetzt noch die Variablen Ω_1 , Ω_3 und Ω_2 durch deren bei mechanischen Planetensätzen übliche Variablen n_1 , n_2 und n_s , so erhält man

$$n_1 - i_0 n_2 - (1 - i_0) n_s = 0 \quad \square \quad (\text{A.10})$$

2. Fall: $i_0 > 0, p_3 > p_1$

Gleichung 2.5 muss für Betrachtung von $i_0 > 0$ aus Überlegungen zur Überlagerung von Standübersetzung und Umlaufübersetzung modifiziert werden zu:

$$\frac{N_1}{N_3}\Omega_1 + \frac{N_2}{N_3}\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.11})$$

Aus $i_0 > 0$ folgt hier wiederum

$$N_2 = |N_1 - N_3| \quad (\text{A.12})$$

wovon im zweiten Fall $N_3 > N_1$ und damit

$$N_2 = |N_1 - N_3| = N_3 - N_1 \quad (\text{A.13})$$

betrachtet wird. Hierdurch ergibt sich:

$$\frac{N_1}{N_3}\Omega_1 + \frac{N_3 - N_1}{N_3}\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.14})$$

Erweitert man nun den mittleren Bruch in Gleichung A.14 und setzt anschließend noch

$$i_0 = \frac{N_3}{N_1} > 1 \quad (\text{A.15})$$

in Gleichung A.14 ein, so folgt:

$$\frac{N_1}{N_3}\Omega_1 + \left(\frac{N_3}{N_3} - \frac{N_1}{N_3}\right)\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.16})$$

$$\frac{N_1}{N_3}\Omega_1 + \left(1 - \frac{N_1}{N_3}\right)\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.17})$$

$$\frac{1}{i_0}\Omega_1 + \left(1 - \frac{1}{i_0}\right)\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.18})$$

Multiplikation mit i_0 liefert:

$$\Omega_1 + (i_0 - 1)\Omega_2 - i_0\Omega_3 = 0 \quad (\text{A.19})$$

$$\Omega_1 - i_0\Omega_3 - (1 - i_0)\Omega_2 = 0 \quad (\text{A.20})$$

Ersetzt man jetzt noch die Variablen Ω_1 , Ω_3 und Ω_2 durch deren bei mechanischen Planetensätzen übliche Variablen n_1 , n_2 und n_s , so erhält man

$$n_1 - i_0 n_2 - (1 - i_0) n_s = 0 \quad \square \quad (\text{A.21})$$

3.Fall: $i_0 > 0, p_3 < p_1$

Analog zum 2. Fall ergibt sich nach Modifikation von Gleichung 2.5 für die Betrachtung von $i_0 > 0$ aus Überlegungen zur Überlagerung von Standübersetzung und Umlaufübersetzung:

$$\frac{N_1}{N_3}\Omega_1 - \frac{N_2}{N_3}\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.22})$$

Mit dem aus $i_0 > 0$ folgenden

$$N_2 = |N_1 - N_3| \quad (\text{A.23})$$

folgt im dritten Fall $N_3 < N_1$ und damit

$$N_2 = |N_1 - N_3| = N_1 - N_3 \quad (\text{A.24})$$

Hierdurch ergibt sich:

$$\frac{N_1}{N_3}\Omega_1 - \frac{N_1 - N_3}{N_3}\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.25})$$

Um in Analogie zum 2. Fall arbeiten zu können, wird hier die Definition der Standübersetzung umgekehrt und

$$i_0 = \frac{N_3}{N_1} > 0 \quad (\text{A.26})$$

gesetzt. Nach Erweiterung des mittleren Bruchs in Gleichung A.25 folgt damit direkt:

$$\frac{N_1}{N_3}\Omega_1 - \left(\frac{N_1}{N_3} - \frac{N_3}{N_3}\right)\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.27})$$

$$\frac{N_1}{N_3}\Omega_1 - \left(\frac{N_1}{N_3} - 1\right)\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.28})$$

$$\frac{1}{i_0}\Omega_1 - \left(\frac{1}{i_0} - 1\right)\Omega_2 - \Omega_3 = 0 \quad (\text{A.29})$$

Multiplikation mit i_0 liefert:

$$\Omega_1 - (1 - i_0)\Omega_2 - i_0\Omega_3 = 0 \quad (\text{A.30})$$

$$\Omega_1 - i_0\Omega_3 - (1 - i_0)\Omega_2 = 0 \quad (\text{A.31})$$

Ersetzt man wie oben die Variablen Ω_1 , Ω_3 und Ω_2 durch deren bei mechanischen Planetensätzen übliche Variablen n_1 , n_2 und n_s , so erhält man

$$n_1 - i_0 n_2 - (1 - i_0) n_s = 0 \quad \square \quad (\text{A.32})$$

B Anforderungsliste

B Anforderungsliste

		Anforderungsliste		FF = Festforderung BF = Bereichsforderung ZF = Zielforderung MF = Mindestforderung HF = Höchstforderung W = Wunsch
		Projekt	Projektleiter	
		magnetisch-elektrisch leistungsverzweigtes Stufenlosgetriebe	M. Lang	
Anforderungen				
	Nr.	Bezeichnung	Werte, Daten, Erläuterungen	
	1	Funktion		
FF	1.1	Anfahren	mit aktivem Stillstand, nicht seriell	
FF	1.2	Drehrichtungsumkehr	unabhängig vorgeschaltet	
FF	1.3	Variator	2 Stufen	
FF	1.4	Schaltvorgänge	nur ohne Drehzahlanpassung von Zwischenwellen (echt nahtlos), zugkraftunterbrechungsfrei	
FF	1.5	Schaltstrategie	Wechsel der Gänge beliebig untereinander jederzeit möglich	
FF	1.6	Anzahl magnetisch-elektrischer Dreiwelenumlaufgetriebestufen	1	
	2	Leistung, Drehzahl, Drehmoment		
MF	2.1	Maximalleistung Verbrennungsmotor	114 kW	
MF	2.2	Maximaldrehmoment Verbrennungsmotor	724 Nm	
HF	2.3	Nenndrehzahl Verbrennungsmotor	2100 min ⁻¹	
HF	2.4	Maximaldrehzahl Verbrennungsmotor bei 80 km/h (Missbrauch)	3000 min ⁻¹	
MF	2.5	Zusatzleistung Verbrennungsmotor	30 kW	
MF	2.6	Fahrzeuggeschwindigkeit für proportionale Verfügbarkeit Zusatzleistung	20 bis 24 km/h	
MF	2.7	Mindestgeschwindigkeit volle Verfügbarkeit Zusatzleistung	24 km/h	
HF	2.8	Maximalleistung direkt verbundene elektrische Maschine	100 kW	
HF	2.9	Maximaldrehmoment direkt verbundene elektrische Maschine	185 Nm	
FF	2.10	Nenndrehzahl direkt verbundene elektrische Maschine	5500 min ⁻¹	
HF	2.11	Maximalleistung integrierte elektrische Maschine	100 kW	
HF	2.12	Maximaldrehmoment integrierte elektrische Maschine, beliebige Stelle	950 Nm	
HF	2.13	Maximalfrequenz elektromagnetisches Feld integrierte elektrische Maschine	83 Hz	
HF	2.14	Maximale Relativedrehzahl drehende Komponenten integrierte elektrische Maschine	1500 min ⁻¹	
	3	Traktordaten		
MF	3.1	Traktorgewicht	11.750 kg	
MF	3.2	Radius Hinterreifen	1,0 m	
	4	Traktion		
MF	4.1	Reibbeiwert zwischen Reifen und Untergrund	0,635	
FF	4.2	Übersetzungsverhältnis Endantrieb	6,4	
FF	4.3	Übersetzungsverhältnis Kegeltrieb	4,154	
	5	Öl		
MF	5.1	Öleintrittstemperatur	80 °C	
HF	5.2	Maximal zulässige Öltemperatur	120 °C	
FF	5.3	Schmierstoff	nach John Deere Werksnorm J20C	

C Herleitung der Drehrichtungen der WOLF-Schemata

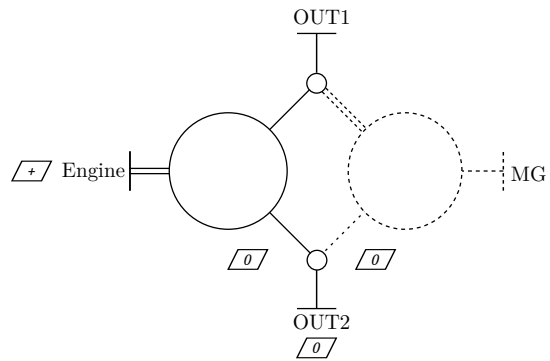
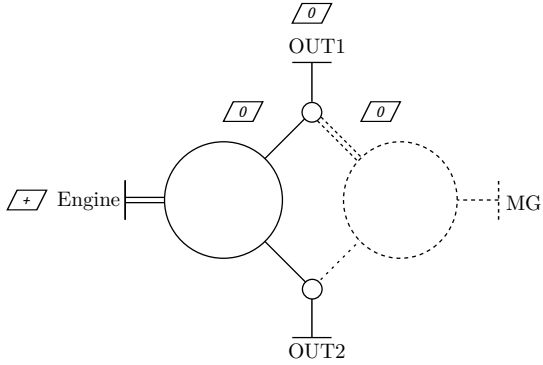
Auf den folgenden Seiten ist für jedes der drei WOLF-Schemata und für jedes Schema für beide Möglichkeiten der Wahl der Ausgangswelle für den Anfahrang die Ermittlung der Drehrichtungen gezeigt. Am Verbrennungsmotor (Engine) wird im ersten Schritt immer eine positive Drehrichtung angetragen, wie in Unterabschnitt 3.2.1 dargelegt ist. Gleichmaßen wird an der gewählten Ausgangswelle im ersten Schritt die Drehzahl 0 angetragen. Diese Drehzahlen werden über feste Verbindungen fortgeführt, da sie sich an diesen Stellen fester Verbindungen nicht ändern können. Im zweiten Schritt werden dann die Drehrichtungen an den Umlaufgetrieben festgelegt, an denen zwei Drehrichtungen bekannt sind. Sind an einer Umlaufgetriebestufe zwei Drehrichtungen bekannt, so kann die dritte in den meisten Fällen daraus bestimmt werden. Die so bestimmte Drehrichtung wird anschließend wieder über alle festen Verbindungen fortgeführt. Im dritten Schritt, der nicht für alle Konzepte nötig ist, wird dann nochmals analog Schritt 2 die Drehrichtung an der ggf. noch übrig gebliebenen Umlaufgetriebestufe bestimmt. Damit sind alle Drehrichtungen bestimmt.

WOLF-Schema 1.1:

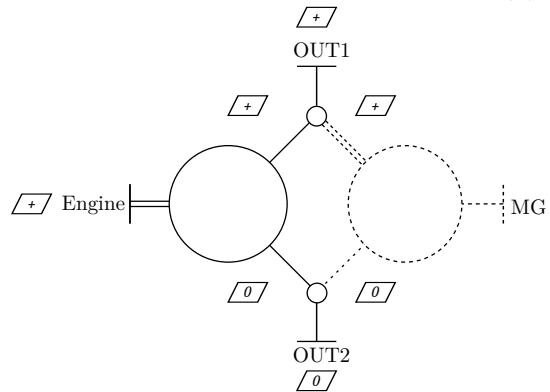
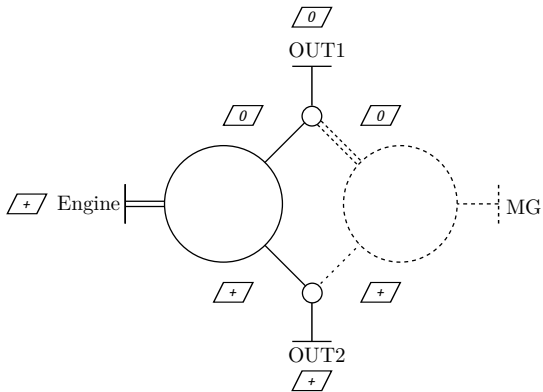
(a) Welle *OUT1* als Anfahrang

(b) Welle *OUT2* als Anfahrang

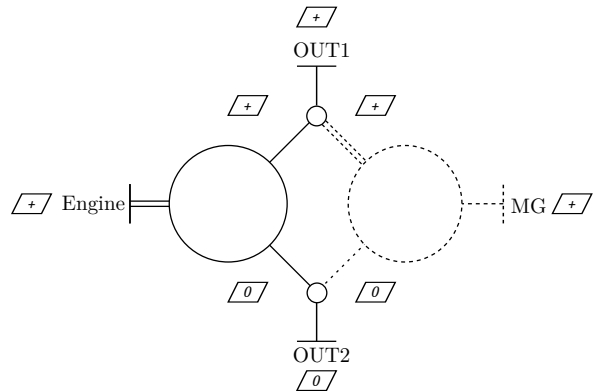
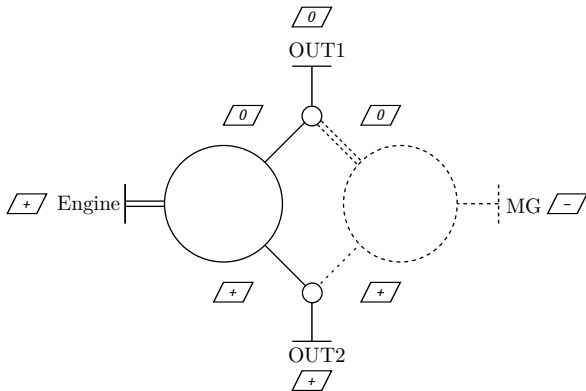
Schritt 1: Antragen der Drehrichtungen von Verbrennungsmotor und Ausgang



Schritt 2: Ermitteln der Drehrichtungen an Umlaufgetriebestufen und Fortführung (1)



Schritt 3: Ermitteln der Drehrichtungen an Umlaufgetriebestufen und Fortführung (2)

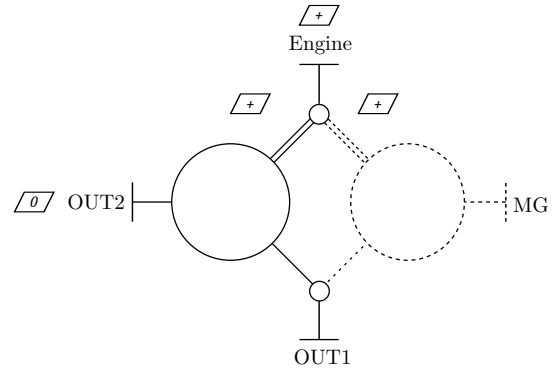
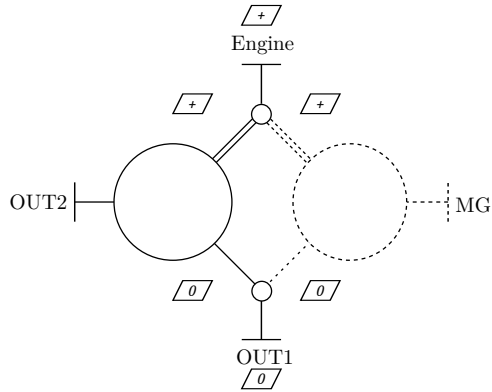


WOLF-Schema 2.1:

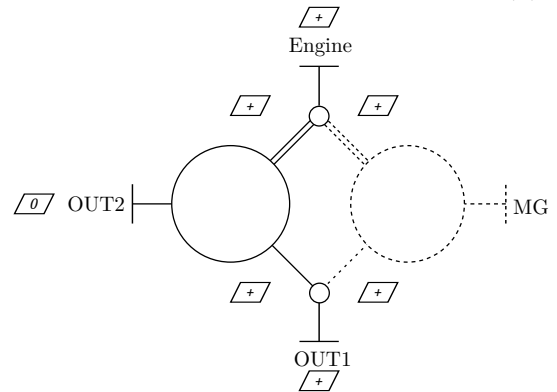
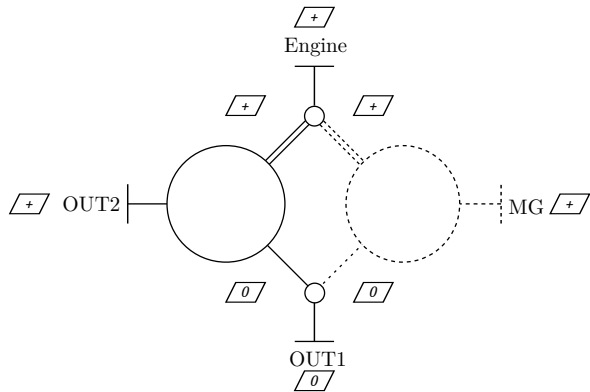
(a) Welle *OUT1* als Anfahrang

(b) Welle *OUT2* als Anfahrang

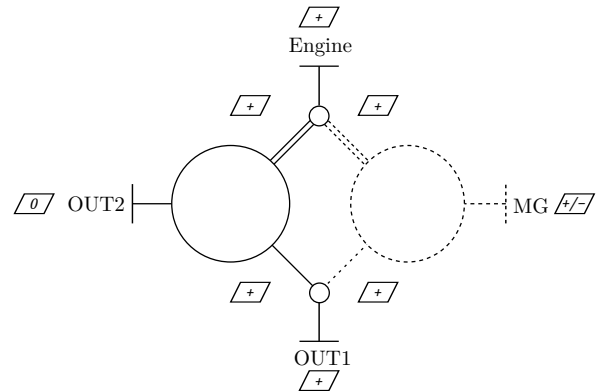
Schritt 1: Antragen der Drehrichtungen von Verbrennungsmotor und Ausgang



Schritt 2: Ermitteln der Drehrichtungen an Umlaufgetriebestufen und Fortführung (1)



Schritt 3: Ermitteln der Drehrichtungen an Umlaufgetriebestufen und Fortführung (2)

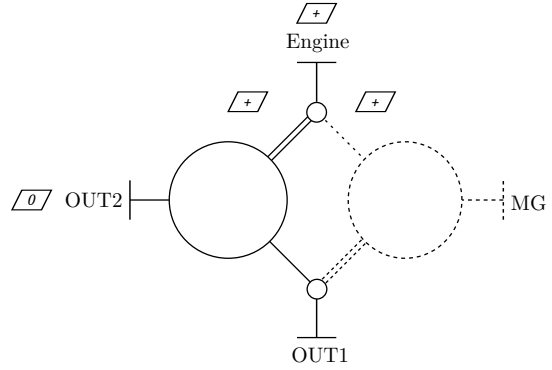
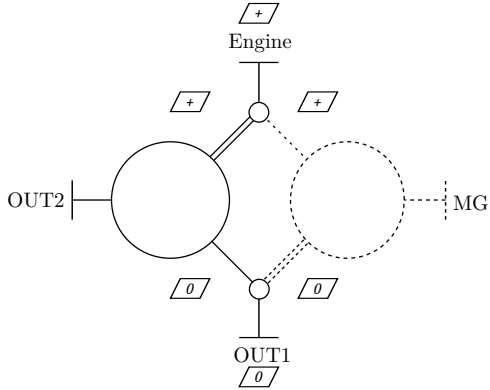


WOLF-Schema 2.2:

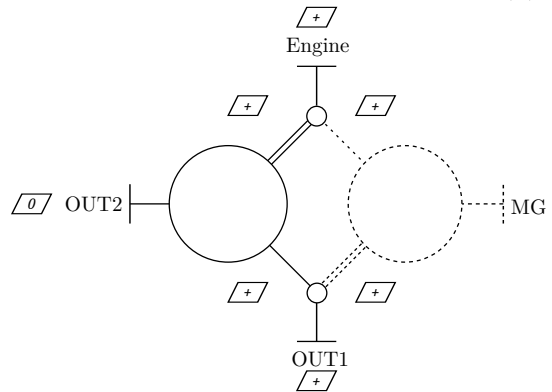
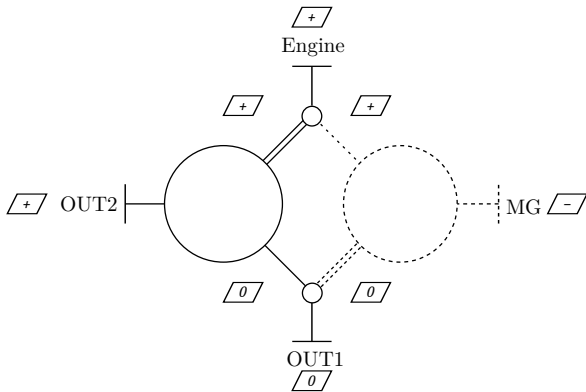
(a) Welle *OUT1* als Anfahrang

(b) Welle *OUT2* als Anfahrang

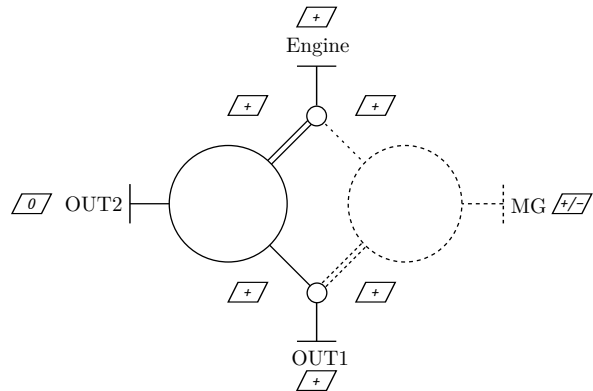
Schritt 1: Antragen der Drehrichtungen von Verbrennungsmotor und Ausgang



Schritt 2: Ermitteln der Drehrichtungen an Umlaufgetriebestufen und Fortführung (1)



Schritt 3: Ermitteln der Drehrichtungen an Umlaufgetriebestufen und Fortführung (2)



(Leerseite zur Druckproduktion)

(Leerseite zur Druckproduktion)