



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

## DISSERTATION

# Elektrische Antriebe in der Landtechnik

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktors der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Schrödl

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Dipl.-Ing. Florian Erich Hermann Kogler

Wien, im Juni 2013



für Lisi



## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt den Einsatz elektrischer Antriebe in Landtechnikmaschinen. Nach einer kurzen Einleitung wird in einem ersten Teil ein Überblick über die Geschichte gegeben, sowie aktuelle Anwendungsbeispiele aufgelistet. Weiters werden die Rahmenbedingungen für den Einsatz elektrischer Antriebe vorgestellt. Neben den gesetzlichen Vorgaben durch Richtlinien und Normen werden durch eine Umfrage mit Landtechnikherstellern die Bedingungen des Marktes und der Industrie hinterfragt. Als technische Rahmen werden die derzeitig verwendeten Antriebe in der Landtechnik mit den möglichen Varianten von Elektromotoren verglichen.

Nach dieser theoretischen Einführung werden in einem zweiten Teil konkrete Beispiele für elektrische Antriebe genannt. Konzept und Aufbau eines Generators zur Kopplung an die Zapfwelle werden beschrieben. Mit diesem ist eine mobile Stromversorgung an jedem konventionellen Traktor gegeben. Im Anschluss werden anhand von drei Motoren Beispiele für Einsätze auf diversen landwirtschaftlichen Geräten dargestellt. Diese Motoren sollen in Kombination mit einem Zapfwellengenerator ein möglichst effizientes Arbeiten in vielen landwirtschaftlichen Bereichen ermöglichen.

Im dritten Teil werden die zuvor behandelten Beispiele vermessen. Zuerst wird der zugehörige Prüfstandsaufbau inklusive Messinstrumente erklärt. Dann werden verschiedene Messergebnisse zum Zapfwellengenerator, zu den einzelnen Motoren, sowie eine Systembetrachtung präsentiert. Neben den Laborversuchen wurde auch ein Feldversuch durchgeführt, dessen Ergebnisse und Erkenntnisse ausführlich beschrieben werden. Ein zusätzliches Augenmerk liegt bei der lagegeberlosen Regelung von permanentmagneterregten Synchronmotoren ab dem Stillstand. In Versuchen und statistischen Vergleichen wurde das Potential einer Verwendung in der Landwirtschaft untersucht.



## Abstract

This dissertation deals with the usage of electrical drives in agricultural engineering. First a short overview introduces electric drives in agricultural history. Then a comparison shows the kind of drives used in a tractor nowadays and different electric drives, which could be used in agriculture in the future. This part presents also the basic conditions regarding standards, directives and interfaces between tractor and implement. Additionally, a survey conducted under producers of agricultural equipment gives an outlook about the market expectations nowadays and the needs in the future.

A second part summarises examples of electric drives in agricultural industry. A developed and constructed power take-off generator is used as a mobile electrical power supply. It is possible to operate asynchronous motors in open loop mode and permanent magnet synchronous motors in closed loop mode. Furthermore it is also possible to apply AC-Voltage, 3x400 V and 1x230 V, to use external electrical appliances. Besides the generator, three examples present properties of electric drives in agricultural industry.

A third part deals with the measurement of the described examples. Test bench results show data about the generator, the motors and a combined operation. Additionally, a field test was carried out. Sensorless drives in agriculture purpose is another topic. Results of measurements show the potential for operating such devices in that manner.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>I</b>	<b>Die Landwirtschaft wird elektrifiziert</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Die Idee</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Geschichte der elektrifizierten Landwirtschaft</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Antriebe in der Landwirtschaft</b>	<b>13</b>
4.1	Elektrische Antriebe . . . . .	13
4.1.1	Übersicht der Arten . . . . .	13
4.1.2	Funktionsweise . . . . .	15
4.1.3	Asynchronmaschine . . . . .	17
4.1.3.1	Aufbau . . . . .	17
4.1.3.2	Verluste . . . . .	18
4.1.3.3	Betriebsverhalten im drehzahlgeregelten Bereich . .	19
4.1.3.4	Feldorientierte Regelung . . . . .	22
4.1.4	Permanentmagneterregte Synchronmaschine . . . . .	24
4.1.4.1	Aufbau . . . . .	24
4.1.4.2	Verluste . . . . .	25
4.1.4.3	Betriebsverhalten im drehzahlgeregelten Bereich . .	26
4.1.5	Vor- und Nachteile PSM/ASM . . . . .	30
4.2	Dieselmotor . . . . .	30
4.2.1	Aufbau . . . . .	31
4.2.2	Funktionsweise . . . . .	32
4.2.3	Betriebsverhalten . . . . .	34
4.2.4	Verluste . . . . .	35
4.3	Hydraulische Systeme . . . . .	36
4.3.1	Aufbau . . . . .	36
4.3.2	Funktionsweise . . . . .	36
4.3.3	Betriebsverhalten . . . . .	39
4.3.4	Verluste . . . . .	40
4.4	Zusammenfassung . . . . .	41
4.4.1	Übersicht der Antriebe . . . . .	41

4.4.2	Vor- und Nachteile elektrischer Antriebe in der Landtechnik	45
4.4.2.1	Vorteile . . . . .	45
4.4.2.2	Nachteile . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Rechtlicher Rahmen</b>	<b>48</b>
5.1	Einleitung . . . . .	48
5.2	Begriffserklärung . . . . .	48
5.2.1	Normungsinstitutionen . . . . .	48
5.2.2	Normenstatus . . . . .	50
5.2.3	Sonstige Abkürzungen . . . . .	51
5.3	Liste relevanter Normen in der elektrifizierten Landtechnik . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Aus Sicht der Industrie – Umfrageergebnisse</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>Technische Aspekte – Systemschnittstellen</b>	<b>69</b>
7.1	Isobus . . . . .	69
7.2	AEF . . . . .	70
7.3	Leistungsschnittstelle . . . . .	72
<b>8</b>	<b>Aktuelle Beispiele</b>	<b>76</b>
 <b>II Beispiele elektrifizierter Komponenten in der Landwirtschaft</b>		 <b>83</b>
<b>9</b>	<b>Zapfwellengenerator</b>	<b>85</b>
9.1	Allgemeines . . . . .	85
9.2	Aufbau . . . . .	86
9.2.1	Generator . . . . .	87
9.2.2	Leistungselektronik . . . . .	88
9.3	Sicherheitsaspekte . . . . .	91
9.4	Elektrische Kenndaten . . . . .	93
9.4.1	Messdaten . . . . .	93
9.4.2	Bezugsgrößen . . . . .	94
9.5	Betriebsverhalten . . . . .	97
<b>10</b>	<b>Elektrischer Schwader</b>	<b>101</b>

<b>11 Elektrischer Mähaufbereiter</b>	<b>102</b>
11.1 Rohrmotor . . . . .	103
11.2 Riemenantrieb . . . . .	103
<b>12 Elektrische Grubberwalze</b>	<b>105</b>
<b>III Am Prüfstand und am Feld</b>	<b>107</b>
<b>13 Prüfstands Aufbau</b>	<b>109</b>
13.1 Aufbau am Maschinenbett . . . . .	109
13.1.1 Zapfwellengenerator . . . . .	109
13.1.2 Motoren . . . . .	110
13.2 Leistungsmessung . . . . .	112
13.3 Temperaturmessung . . . . .	112
<b>14 Zapfwellengenerator im Test</b>	<b>115</b>
14.1 Temperaturmessung . . . . .	115
14.1.1 Offener Generator . . . . .	115
14.1.2 Geschlossener Generator – ZWG Gesamtpaket . . . . .	116
14.2 Hochsetzbetrieb . . . . .	117
14.3 Hochsetzen/Feldschwächen unter Last . . . . .	120
14.4 Lastabwurf - Bremschopper . . . . .	121
14.5 Wirkungsgradmessung . . . . .	122
14.5.1 Wirkungsgrad Generator . . . . .	122
14.5.2 Wirkungsgrad Generator & Eingangsumrichter . . . . .	123
14.6 Ausgänge . . . . .	124
14.6.1 3x400 V . . . . .	124
14.6.2 1x230 V . . . . .	129
14.6.3 ASM gesteuert . . . . .	132
14.6.4 PSM geregelt . . . . .	132
14.7 Resonanzen . . . . .	133
14.8 Dynamischer Betrieb am Prüfstand . . . . .	135
<b>15 Antriebe im Test</b>	<b>136</b>
15.1 Rohrmotor . . . . .	136
15.1.1 Temperaturmessung . . . . .	136

15.1.2	Wirkungsgradkennfeld des Rohrmotors . . . . .	137
15.1.3	Leistungsanforderungen . . . . .	137
15.2	Getriebemotor . . . . .	139
15.2.1	Drehmoment . . . . .	139
15.2.2	Leistungsanforderungen . . . . .	140
15.2.3	Synchronisation auf einen laufenden Antrieb . . . . .	141
15.2.4	Wirkungsgradkennfeld des Getriebemotors . . . . .	142
15.3	Getriebeloser Motor . . . . .	143
15.3.1	Drehmoment . . . . .	143
15.3.2	Wirkungsgradkennfeld des getriebelosen Motors . . . . .	144
15.3.3	Feldtests . . . . .	144
<b>16</b>	<b>Sensorlose Regelung</b>	<b>146</b>
16.1	Einleitung . . . . .	146
16.2	Sensorlose Antriebe in der Landtechnik . . . . .	147
16.3	Getriebemotor (SEW) . . . . .	150
16.3.1	Hochlaufversuche . . . . .	150
16.3.2	Inform . . . . .	150
16.3.3	EMK-Modell . . . . .	154
16.4	Getriebeloser Motor (Schabmüller) . . . . .	158
16.4.1	Hochlaufversuche . . . . .	158
16.4.2	Inform . . . . .	158
16.4.3	EMK-Modell . . . . .	165
16.5	Zusammenfassung . . . . .	168
<b>17</b>	<b>Gesamtpaket im Feldeinsatz</b>	<b>169</b>
17.1	Feldversuch . . . . .	171
17.2	Nachstellen am Prüfstand . . . . .	173
17.3	Fazit . . . . .	174
<b>18</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>175</b>
	<b>Anhang</b>	<b>177</b>
	<b>A Normen</b>	<b>177</b>
A.1	Allgemeine Information . . . . .	177

A.2	Fahrzeug und Antriebe . . . . .	177
A.3	Messungen und Tests . . . . .	178
A.4	Elektrik . . . . .	180
A.5	Sicherheit und Schutz . . . . .	182
A.6	Batterien . . . . .	186
A.7	Kabel und Stecker . . . . .	187
A.8	Kommunikation . . . . .	188
A.9	Landwirtschaft . . . . .	188
<b>B</b>	<b>Umfrageformular</b>	<b>190</b>
<b>C</b>	<b>Maschinendaten</b>	<b>202</b>
C.1	Zapfwellengenerator . . . . .	202
C.2	Rohrmotor . . . . .	203
C.3	Getriebemotor SEW . . . . .	206
C.4	Getriebeloser Motor - Schabmüller . . . . .	209
<b>D</b>	<b>Messgeräte</b>	<b>212</b>
D.1	Momentmesswelle HBM T12 . . . . .	212
D.2	Gleichstrommaschine – Zapfwelle . . . . .	212
D.3	Gleichstrommaschine – Lastabnahme . . . . .	212
D.4	Umrichtereinheit Simoreg . . . . .	213
D.5	Umrichtereinheit Refu . . . . .	213
D.6	Kraftmessdose mit Auswerteeinheit . . . . .	214
D.7	Leistungsmessgerät Dewetron . . . . .	215
D.8	Rotortemperaturmessung . . . . .	216
D.8.1	Messung per Bluetooth . . . . .	216
D.8.2	Messung per Infrarot . . . . .	216
<b>E</b>	<b>Source Code</b>	<b>217</b>
E.1	RAM beschreiben und auslesen . . . . .	217
E.2	Statistikmessungen . . . . .	218
<b>F</b>	<b>Umrichterdaten</b>	<b>220</b>
F.1	Kenndaten . . . . .	220
F.2	Komponenten . . . . .	221
F.3	Schnittstellen . . . . .	221

<b>G Einstellungen Industrieumrichter</b>	<b>223</b>
G.1 Simoreg DC Master . . . . .	223
G.2 Refu RPCS600 . . . . .	226
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>237</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>243</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>245</b>



# 1 Einleitung

Der Einsatz von elektrischen Antrieben in der Landtechnik ist das Zusammenführen zweier alter Wissensgebiete. Die Elektrotechnik auf dem Gebiet der Antriebe ist seit mehr als einem Jahrhundert präsent, die Landwirtschaft noch länger. Trotz des fortgeschrittenen Wissensgebietes gibt es immer wieder Neuerungen, wie ein Kapitel über die Geschichte der elektrischen Landwirtschaft, sowie ein Kapitel über aktuelle Beispiele zeigt. Auch in der Elektrotechnik werden, inspiriert durch die Errungenschaften der Festkörperphysik, immer wieder Technologieschritte gesetzt. Motorsteuerung durch Transistoren und Motoroptimierung durch neue Magnetmaterialien sind zwei Beispiele, auf die u.a. auch in einem Kapitel über die Antriebe in der Landwirtschaft eingegangen wird. Hier findet sich auch eine zusammenfassende Darstellung der zurzeit dominierenden Antriebe – hydraulische und mechanische Antriebe in Kombination mit Verbrennungsmotoren.

Entwicklung durch Kooperation ist das Thema, und so werden die Vorteile der Elektrotechnik immer mehr in der Landtechnik eingesetzt. Rahmenbedingungen in Form von Normen, Marktumfragen und der technischen Systemschnittstellen sind bereits gegeben und werden in den folgenden Kapiteln genauer erläutert. Nach diesem theoretischen Teil folgt ein praktischer, wo beispielhaft eine Elektrifizierung von landwirtschaftlichen Geräten dargestellt wird.

Zur Energiebereitstellung wird in nächster Zeit noch der Dieselmotor verwendet werden, da Flüssigtreibstoffe vergleichsweise immer noch die höchsten Energiedichten aufweisen. In Zukunft wird vermutlich jeder Traktor mit einem elektrischen Generator versehen. Neben der Zapfwelle und den hydraulischen Anschlüssen steht dann eine Steckdose zur Verfügung. In der Übergangszeit werden die konventionellen Traktoren mit Zapfwellengeneratoren, eine externe Kopplung eines Generators an die Zapfwelle, den Strom erzeugen. Solch ein Zapfwellengenerator ist das Herzstück der folgenden Arbeit und wird ausführlich beschrieben.

Die bereitgestellte elektrische Energie wird für diverse elektrische Antriebe und Stellmotoren genutzt. Im Folgenden wird eine Auswahl von drei Anbaugeräten, und den Möglichkeiten diese mit Elektromotoren zu verbessern, präsentiert. Mit der Tatsache, elektrische Energie am Fahrzeug bereitstellen zu können, werden auch zusätzliche Möglichkeiten durch eine Stromversorgung für externe Geräte gegeben.

---

In einem nachfolgenden dritten Teil werden Messungen zu den erwähnten Motoren sowie zum Zapfwellengenerator aufgelistet. Nach einem ausführlichen Prüfstands-aufbau werden Punkt für Punkt die jeweilig interessanten Ergebnisse präsentiert. Leistungsverlauf, Wirkungsgrad und Temperaturläufe sind einige Eckpunkte. Zusätzlich zum Laborversuch wird auf einen durchgeführten Feldversuch näher eingegangen.

Ein Kernthema der Messversuche ist die Untersuchung der lagegeberlosen Steuerung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen in landwirtschaftlichen Anwendungen. Vor allem der raue Einsatz der Motoren und die nachteilige Entwicklung der Schnittstellennormierungen machen einen Lagegeberentfall attraktiv. So kann die Informationsübermittlung über eine Bus-Kommunikation umgangen werden.

Die Arbeit entstand im Zuge des COMET<sup>1</sup>-Projekts „Future Farm Technologie“ der Forschungsförderungsgesellschaft. Abbildung 1.1 zeigt das Logo. Finanziert wurde es durch die Bundesministerien für Verkehr, Innovation und Technologie sowie Wirtschaft, Familie und Jugend, dem Land Niederösterreich und dem Land Oberösterreich.



**Abb. 1.1:** Projektlogo

---

<sup>1</sup>COMET - Competence Centers for Excellent Technologies

Teil I

# Die Landwirtschaft wird elektrifiziert

Rahmenbedingungen für den Einsatz elektrischer Komponenten  
und Antrieben in der Landwirtschaft



## 2 Die Idee

Die Idee hinter der Elektrifizierung der Landwirtschaft ist aus mehreren Punkten entstanden:

- Strengere Abgasnormen
- Fossile Brennstoffe stehen zunehmend in der Kritik
- Grenzen der mechanischen und hydraulischen Energieübertragung erreicht
- Grenzen der Effizienz der Landwirtschaft erreicht
- Steigende Weltbevölkerung benötigt mehr Nahrungsmittel
- Automatisierung bietet neue Möglichkeiten
- Sicherheitsaspekte

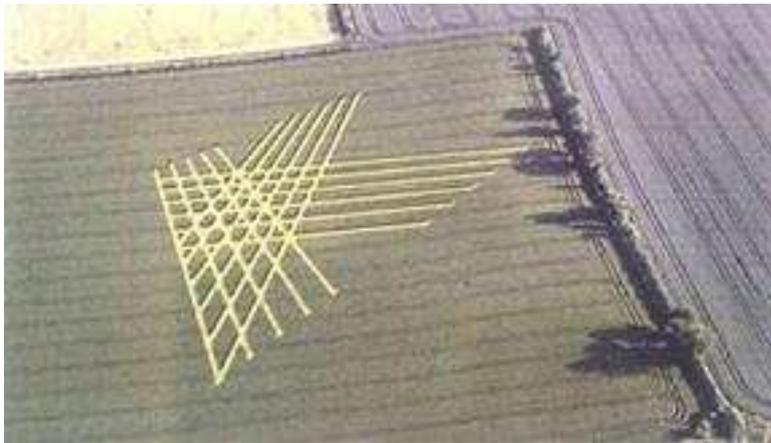
Die immer strenger werdenden Abgasnormen durch den Gesetzgeber und der Preisanstieg der fossilen Brennstoffe durch die erhöhte Nachfrage bei schwieriger Förderung zwingen nun auch die Landtechnikhersteller zu effizienteren Antrieben. Wie schon die Vorgänger in der Automobilbranche, versucht man nun auch hier den Ausweg über eine Hybridisierung. Da alternative Primärenergieträger, wie zum Beispiel Wasserstoff oder kapazitätsstarke Batterien, noch nicht verfügbar sind, wird der Diesel wohl noch längere Zeit im Einsatz bleiben, vor allem in der energieintensiven Landwirtschaft. Mit Lastpunktverschiebung oder Start-Stopp-Automatik, um einige Stichwörter zu nennen, wird versucht den Systemwirkungsgrad zu erhöhen.

Auch das Erreichen einer Technologiegrenze der mechanischen und hydraulischen Kraftübertragung ist für die Wissenschaft ein Grund, an anderen Antriebskonzepten zu forschen. Hier bietet sich die Elektrotechnik an. Der Elektromotor ist zwar schon Jahrhunderte alt, aber es gibt doch immer wieder Neuerungen – zum Beispiel neue Magnetwerkstoffe. Der Versuch, diese Technologie in die Agrartechnik zu integrieren, liegt nahe.

Auch eine Effizienzgrenze in der Landwirtschaft scheint erreicht. Der Ertrag an Biomasse pro Hektar Anbaufläche ist an einem Maximum angelangt. Durch die Elektronik könne neue Regelungsmethoden eingesetzt werden. Moment und Drehzahl eines Antriebs sind beliebig vorgebar und bieten Potential für Steigerungen. Möglicherweise können Düngemitteloptimierung und Dinge wie selbstschleifende Messer bei Erntemaschinen den Ertrag weiter erhöhen. Die Elektrotechnik stellt

dafür vom Antrieb bis zur Mikroelektroniksteuerung ihr Know-How zur Verfügung. Somit ist man für den erhöhten Ernährungsbedarf der steigenden Weltbevölkerung besser gerüstet.

Die Möglichkeiten der elektrischen Regelungstechnik können auch bei der Automatisierung gewisser Abläufe genutzt werden. Somit sind diese schneller und effizienter möglich. Auch die Sicherheitsaspekte tragen hier eine entscheidende Rolle. Notabschaltungen, Überwachungssysteme und selbstständiges Ausführen von gefährlichen Aktionen sind positive Nebenaspekte und mit elektrischen Maschinen einfach zu realisieren.



**Abb. 2.1:** Gepflanztes Logo mit GPS-Unterstützung [Kve10]

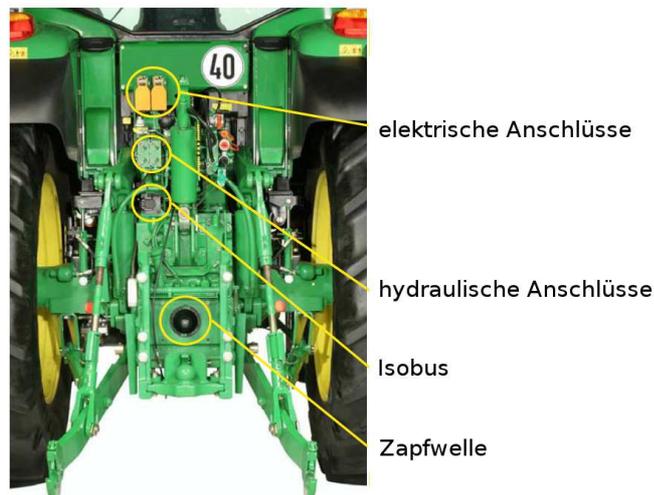
Ein Beispiel für das Zusammenspiel all dieser Möglichkeiten zeigt Abbildung 2.1. Hier wurde mit Unterstützung durch GPS eine Saatgutmaschine betrieben. Diese kann durch automatisierte Abläufe die genaue Anzahl an Körnern im optimalen Abstand zueinander, je nach Hangneigung und Lichteinfall, in die Erde einbringen. Das Ergebnis ist in Form eines Logos des Herstellers aus der Luft zu sehen.

Aber auch einfachere Ansätze sind durch Elektrifizierung möglich:

- Stecker am Traktor anstecken statt Zapfwelle montieren
- Entfall langer komplexen Getriebezweige durch direkten Antrieb und Stromkabel
- Abschalten einzelner Antriebe, die momentan nicht gebraucht werden

- Einfache Drehrichtungsumkehr
- Sofortige Information über Drehzahl und Drehmoment mit hoher Genauigkeit
- Leichte Regelung und Steuerung elektrischer Antriebe nach Drehzahl, Moment oder Leistung

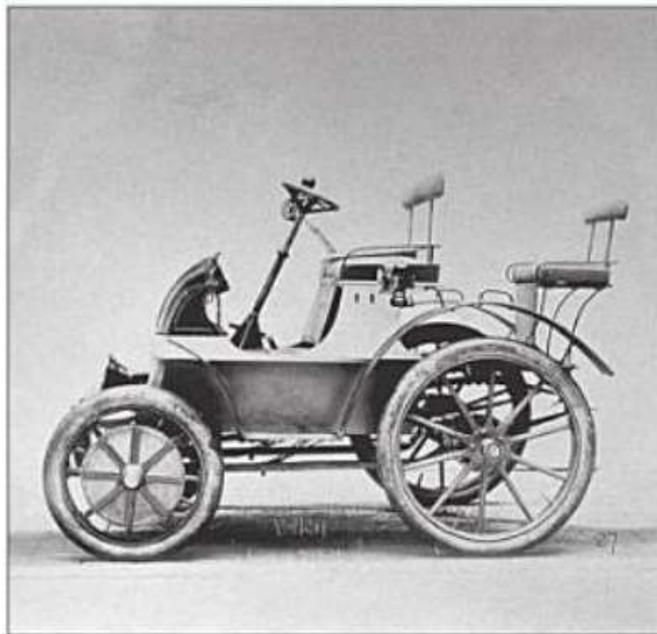
So wird sich in Zukunft wohl eine Dreier-Kombination aus den bisherigen Hydraulikanschlüssen, der Zapfwelle und der neuen elektrischen Steckdose am Traktor anbieten, siehe Abbildung 2.2. Zapfwelle und Hydraulik werden aufgrund vieler Vorteile nicht vom Traktor verschwinden. Ein Zusatzangebot durch die elektrischen Antriebe rundet das Bild ab.



**Abb. 2.2:** Schnittstelle eines modernen Traktors [Bun10]

### 3 Geschichte der elektrifizierten Landwirtschaft

Bereits im Jahre 1897 nutzten einflussreiche Landwirte die ersten Elektromotoren für die Bodenbearbeitung. Es handelte sich hierbei um den Umbau eines dampfbetriebenen Pfluges. Der Pflug war an einem Stahlseil befestigt und dieses über ein Feld gespannt. Auf beiden Seiten gab es je eine Dampfmaschine, die das Seil auf- und abwickelten. Der Antrieb des damals weit verbreiteten Dampfpfluges aus Großbritannien wurde von findigen Franzosen durch Elektromotoren ersetzt, und somit war der erste elektrische Pflug erfunden. [Spe62] S.143



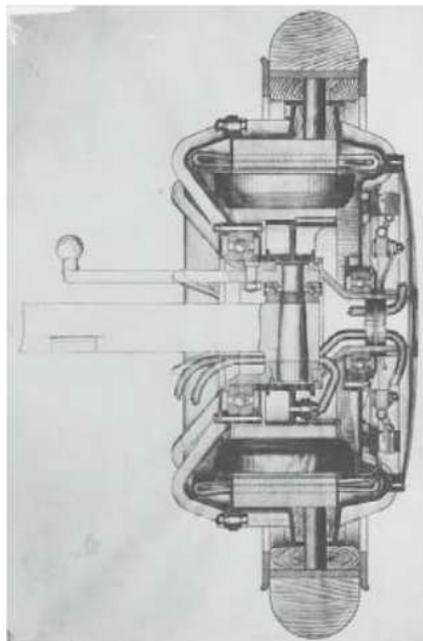
**Abb. 3.1:** Lohner-Porsche aus dem Jahre 1899 [Hei10] S.136

Die große Entwicklung der Elektrizität in der Landwirtschaft war im frühen 20. Jahrhundert. Im Jahre 1935 hatten 11 % der US-amerikanischen Landwirte Elektrizität, im Jahre 1960 waren es 97 %. Die Nutzung des Stroms geschah vor allem in Form von Licht, um die Sicherheit zu erhöhen und die Arbeitszeit der Winterabende verlängern zu können. Mit der Zeit kamen auch immer mehr elektrische Antriebe ins Spiel: [Gar02] S.15

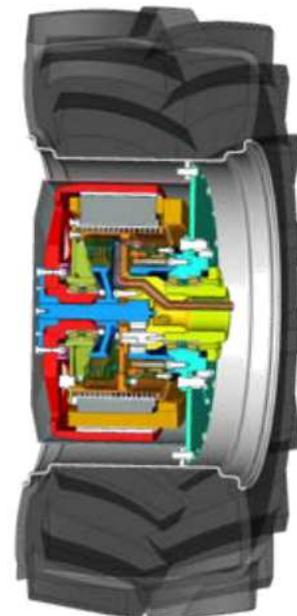
- Bewässerungspumpen - die ersten bereits 1898 in Kalifornien, USA
- Melkmaschinen
- Lüfter für Belüftung oder auch Heutrocknung

- Kühltanks für die Lagerung von Milch
- Automatischer Rechen für Stallmist
- diverse Kleingeräte (Sauger, ...)
- Elektrozäune

Die Geschichte der elektrischen Antriebe als Traktionsantriebe in der Landwirtschaft beginnt mit dem ersten Erscheinen der Elektrotraktion bei Automobilen. Schon 1899 fertigte Ferdinand Porsche in den Werkstätten von Ludwig Lohner ein Automobil mit zwei Radnabenmotoren in der lenkbaren Vorderachse und war damit seiner Zeit voraus, siehe Abbildung 3.1. In nur 10 Wochen wurde der 980 kg schwere Wagen für die damalige Weltausstellung in Paris hergestellt. 410 kg alleine wogen die Batterien, mit der der Wagen auf bis zu 60 km/h beschleunigt werden konnte. [Hei10]

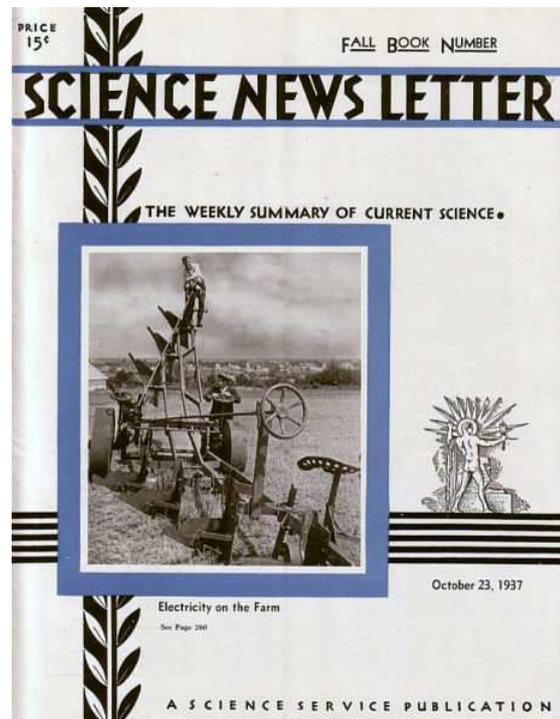


**Abb. 3.2:** Radnabenmotor nach Porsche, Patentschrift [Sei09]



**Abb. 3.3:** Moderner Radnabenmotor [Gei10]

Der Radnabenmotor von Porsche aus dem Jahre 1899, in Abbildung 3.2 eine Zeichnung aus der Patentschrift, unterscheidet sich nicht sehr stark von den heutigen Motoren. Abbildung 3.3 zeigt einen Radnabenmotor, der zurzeit bei Forschungsprojekten entwickelt wird. Hier handelt es sich um einen Einzelradantrieb bei einer landwirtschaftlichen Zugmaschine.



**Abb. 3.4:** Elektrischer selbstfahrender Pflug aus dem Jahre 1937 [Rus37]

Parallel zu den Traktionsantriebsentwicklungen in Zentraleuropa gab es auch in Russland eine interessante Idee in Form eines elektrischen Pfluges, wie auf der Titelseite der Science Newsletter aus dem Jahre 1937 zu erkennen ist, siehe Abbildung 3.4. Der Bau eines Wasserkraftwerks am Fluss Dnjepr machte es damals möglich, dass die ansässigen Bauern einen elektrischen, selbstfahrenden Pflug zur Bewirtschaftung ihrer ausgedehnten, flachen Felder benutzten. [Rus37]

Den ersten Schritt in Form einer Serienproduktion in der elektrischen Landwirtschaft machte die Firma IHC<sup>2</sup> in Kooperation mit der Firma General Electric im Jahre 1955 mit dem „Electrall“ als Zubehör für den „Farmall“. Ein Generator, der entweder am Traktorgehäuse seitlich befestigt und über einen Treibriemen mit der Motorwelle verbunden war (siehe Abb. 3.5) oder am Anbaugerät saß und über die Zapfwelle versorgt wurde. Die Ideen waren: [Fay00] S.31

- Notstromversorgung
- Stromkabel als sichere Alternative zur Zapfwelle
- Unkrautvernichtung durch UV-Licht

Auch auf einer Ballenpresse war dieser Generator im Einsatz. Er erzeugte eine

---

<sup>2</sup>International Harvester Company, seit 1984 Case IH, seit 2000 CNH - Case New Holland



**Abb. 3.5:** IHC Farmall mit seitlich montiertem Electrall Anschlussklemmen oberhalb des Generators [Kla09] S.136

60 Hz Wechselspannung mit 37.5 A ([Upd00] S.15), bei 3.600 U/min wurde eine Leistung von 12,5 kW erreicht ([Lef99] S.144). Ein 115 V Einphasen- sowie ein 208 V Dreiphasenanschluss standen zur Verfügung. Ein paar Jahre später wurde die Produktion jedoch eingestellt, da der Generator entweder zu klein war um damit Geräte betreiben zu können, zu ineffizient mit dem Riemen, oder zu groß und der dazugehörige Traktor zu teuer. In den ersten beiden Jahren wurden 103 Stück verkauft. Zwei Drittel der Käufer wollten die Milchproduktion während eines Stromausfalls aufrecht erhalten. Nach dem Farmall war die große Elektrifizierung erst einmal vorbei. [Lef99]

Mit dem Computerzeitalter und dem Aufkommen von Automatisierung und komplexen Steuerungsabläufen wurde auch wieder der elektrische Antrieb interessant, allerdings nicht zur Traktion. Mit dem 12 V-Netz wurden Stellantriebe bei diversen Prozessabläufen betrieben.

In den vergangenen Jahren setzte die Firma John Deere mit dem E-Premium einen Meilenstein, siehe Abbildung 3.6. Im Jahre 2007 stellte die Firma einen Traktor vor, der mit einem 20 kW Generator für die Versorgung der Anbaugeräte in Serienausstattung geliefert wurde [Bun10]. Weiters zu nennen ist auch die Schweizer Firma Rigitrac, die an einem Prototyp die Verwendung von Elektromotoren zur Traktion nützt. In den vier Rädern sind vier Radnabenmotoren mit je 33 kW untergebracht, siehe Abbildung 3.7. [Smi11]



Abb. 3.6: John Deere E-Premium [Sta11]



Abb. 3.7: Rigitrac EWD 120 [Smi11]

## 4 Antriebe in der Landwirtschaft

Wie schon in Kapitel 2 einleitend erwähnt, wird dem Elektromotor in der Zukunft ein immer höherer Stellenwert eingeräumt. Im folgenden findet sich eine Übersicht der existierenden Elektromotoren sowie eine genaue Beschreibung zweier möglicher Motoren für moderne Traktionssysteme. Weiters werden die bisherigen Antriebskonzepte des Traktors kurz erwähnt: Die Verbrennungskraftmaschine sowie die Hydraulik.

Im Anschluss findet sich eine Gegenüberstellung der Motorarten mit ihren Vor- und Nachteilen sowie ein zusammenfassender Vergleich.

### 4.1 Elektrische Antriebe

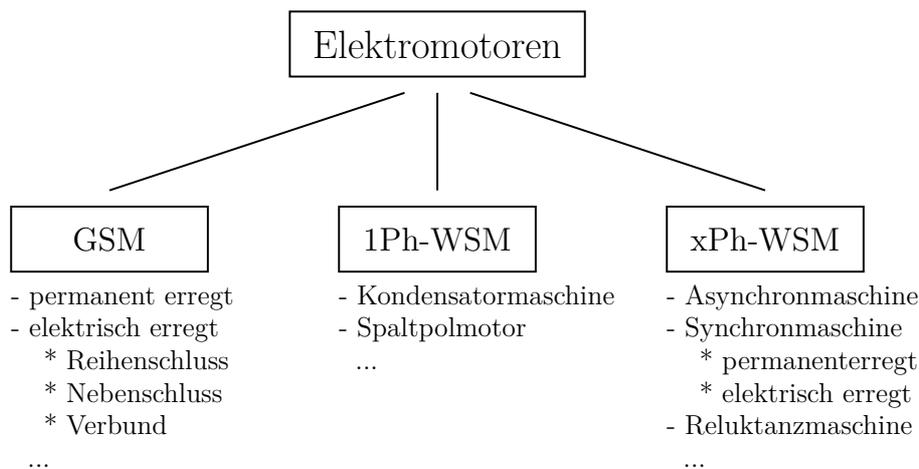
Im Vergleich zu allen existierenden Antriebsarten sind Elektromotoren der effizienteste Weg der Fortbewegung und haben einen weiten Leistungsbereich. Mit nahezu 99 % Wirkungsgrad bei Anlagen im Megawattbereich wie Kraftwerken geht das Leistungsspektrum über Traktionsantriebe im Kilowattbereich, Haushaltsartikeln im Wattbereich bis hin zu Kleinmotoren im Milliwattbereich, wie z.B. Uhrwerke. Auch in der Konstruktion sind durch die unterschiedlichen Arten der Motoren sowie deren unterschiedliche Bauweise kaum Grenzen gesetzt.

#### 4.1.1 Übersicht der Arten

Grundsätzlich unterscheidet man Elektromotoren mit rotatorischer sowie translatorischer Bewegung. Bei rotatorischer Bauweise wird weiters zwischen Innenläufern und Außenläufern unterschieden. Neben dieser Einteilung in Bewegungsarten können verschiedene weitere Einteilungen nach anderen Eigenschaften gemacht werden, zum Beispiel nach der Art der Erregung. Abbildung 4.1 zeigt eine in der Literatur übliche Einteilung nach der Spannungsanspeisung an den Anschlussklemmen. [MuP05][Dem04]

Hier unterscheidet man:

- Gleichstrommotoren (GSM)
- einphasige Wechselstrommotoren (WSM)
- mehrphasige Wechselstrommotoren



**Abb. 4.1:** Einteilung der Elektromotoren gemäß der Anspeisungsart

**Gleichstrommaschinen** werden, wie der Name schon sagt, mit Gleichstrom betrieben. Dabei wird der Gleichstrom mit einem Kommutator auf den Rotor geschaltet. Dieser Kommutator sorgt dafür, dass jeweils die richtige Stromrichtung am Pol (Ankerwicklung) anliegt, damit dieser mit der Wicklung des Stators (elektrisch erregt - Erregerwicklung) interagieren kann. Werden die Hauptpole des Stators statt mit einer Erregerwicklung mit Permanentmagneten bestückt, spricht man von einer permanentmagneterregten Maschine. Bei der elektrisch erregten Gleichstrommaschine gibt es drei wichtige Bauformen:

- Reihenschlussmaschine:  
Dabei wird die Erregerwicklung und die Ankerwicklung in Serie geschaltet. Ein Vorteil ist die automatische Feldschwächung bei geringer Last und hohen Drehzahlen. Ein Nachteil ist die Gefahr des Durchgehens bei Entlastung.
- Nebenschlussmaschine:  
Die Erregerwicklung ist parallel zum Ankerzweig verschaltet. Der Vorteil ist eine geringe Lastabhängigkeit der Drehzahl.
- Verbundmaschine:  
Diese ist eine Kombination aus einer Serien- und einer Parallelschaltung und nutzt dadurch beide Vorteile.

Bei **einphasigen Wechselstrommaschinen** entfällt der Kommutator. Bei einem reinen Wechselfeld ist ein einfaches Hochfahren nicht mehr möglich. Um

das Problem des Hochfahrens zu umgehen, braucht man ein Drehfeld, realisierbar auf mehrere Arten, zum Beispiel:

- Kondensatormaschine:  
Dabei wird eine Hilfsphase mit einem Kondensator in Serie geschaltet, was eine Phasenverschiebung in der Hilfsphase im Vergleich zur Hauptphase bewirkt.
- Spaltpolmotor:  
Hier wird der Stator aus Blechpaketen mit ausgeprägten Polen ausgeführt, Hauptpol und Spaltpol. Der Spaltpol ist dabei mit einer kurzgeschlossenen Wicklung ausgeführt, wodurch sich eine Phasenverschiebung des Spaltpolflusses im Vergleich zum Hauptpolfluss ergibt. Hauptpolfluss und phasenverschobener Spaltpolfluss beinhalten einen Drehfeldanteil.

Heutzutage sind **mehrphasige Wechselstrommotoren** am weit verbreitetsten. In der Regel werden drei Phasen verwendet, die zueinander um  $120^\circ$  phasenverschoben sind. Somit ergibt sich ein drehender Raumzeiger und man spricht auch von Drehstrom. Die wichtigsten Vertreter sind:

- Asynchronmaschinen (ASM)
- Synchronmaschinen (SM)
  - permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PSM, oft auch PMSM)
  - elektrisch erregte Synchronmaschinen
- Reluktanzmaschine

Auf die ASM und die PSM wird in den folgenden Kapitel noch genauer eingegangen.

#### 4.1.2 Funktionsweise

Bei der **Asynchronmaschine** wird im Ständer (oder Stator) über Spulen ein Drehfeld erzeugt. Dieses induziert im stillstehenden Rotor eine Spannung. In weiterer Folge entsteht ein Strom, der wiederum ein Feld hervorruft. Das Zusammenwirken dieser beiden Felder, führt zu einer tangentialen Kraft. Das daraus resultierende Drehmoment versetzt den Rotor (oder Läufer) in Drehung, und versucht ihn auf die Frequenz des angelegten Drehfeldes zu beschleunigen. Da es bei synchroner Drehzahl – das angelegte Drehfeld dreht gleich schnell wie der Rotor –

keine Feldänderung im Rotor gibt, wird auch keine Spannung mehr induziert. Ohne Spannung gibt es keinen Strom, kein daraus resultierendes Feld, kein Zusammenwirken des Feldes mit dem Drehfeld des Stators und somit keine beschleunigende Kraft. Es stellt sich eine Rotorfrequenz ein, die von der Drehfeldfrequenz um den sogenannten Schlupf geringer ist. Die Maschine läuft eben asynchron zum angelegten Drehfeld. Durch diese einfache Bauform des Rotors ist die ASM sehr robust und durch das Fehlen von Kommutator und Bürsten auch sehr wartungsarm.

Bei der **Synchronmaschine** ist ein ähnlicher Aufbau gegeben. Im Stator wird ebenfalls ein Drehfeld erzeugt. Jedoch werden am Rotor magnetische Nord- und Südpole ausgebildet, die bezüglich der Rotorlage unveränderlich sind. Dieses Magnetfeld wird entweder durch elektrische Erregung oder durch Dauermagnete (PSM) hervorgerufen. Das Drehfeld des Statorspulen interagiert direkt mit dem Feld der Erregerspulen bzw. der Magnete. Dadurch ist die Rotordrehzahl synchron zum angelegten Drehfeld. Der Vorteil der Dauermagnete ist der Entfall der Bürsten für die elektrische Erregung.

Das Hochfahren der ASM funktioniert ohne jede Regelung, da der Rotor durch das asynchrone Verhalten mit dem Anlegen des Drehfelds zu drehen beginnt und sich dann der Drehfeldfrequenz nähert. Somit ist ein Betrieb am starren Netz möglich. Es kann jedoch auch mit Frequenzumrichtern<sup>3</sup> eine Stellung bzw. Regelung der Drehzahl erfolgen. Dabei wird die Frequenz des Drehfeldes, und dadurch die Drehzahl des Motors, geändert. Typische Anwendungen finden sich in dreiphasig betriebenen Maschinen im Haushalt (Säge, Pumpen, ...) bis hin zu größeren Anlagen (Traktionsantriebe für Bahnen).

Bei der PSM ist das Hochfahren am Netz prinzipiell nicht möglich. Das Drehfeld muss mit Frequenz Null starten, was nur durch einen Umrichterbetrieb möglich ist. Die Drehzahl der Synchronmaschine ist bis zum Maximalmoment lastunabhängig. Fortschritte in der Umrichtertechnik und in den Materialwissenschaften, durch immer höhere Flussdichten und Temperaturstabilität der Magnete, machen die PSM zunehmend attraktiver. Der große Vorteil ist der hohe Wirkungsgrad dieses Motortyps. Anwendungsfälle sind z.B. in der Stromerzeugung: Vom Fahrraddynamo, eine einphasige PSM, bis hin zu Großkraftwerken. Auch im Bereich der

---

<sup>3</sup>Synonyme: Frequenzumrichter, Umrichter, Inverter

Traktionsantriebe werden Synchronmaschinen eingesetzt.

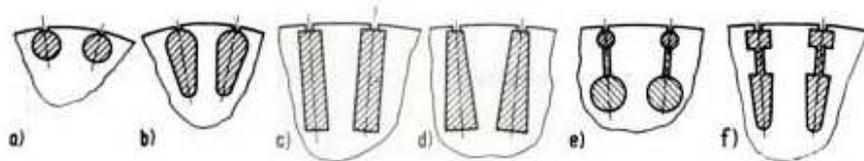
### 4.1.3 Asynchronmaschine

Die Asynchronmaschine ist durch ihren einfachen Aufbau und ihre Robustheit eine der weit verbreitetsten Antriebsmaschinen. Hierbei wird zwischen zwei Ausführungen unterschieden:

- Kurzschlussläufer
- Schleifringläufer

#### 4.1.3.1 Aufbau

Die Kurzschlussläufer ASM besteht aus einem geblechtem Ständer, der in Nuten unterteilt ist, in die die Statorwicklungen eingelegt sind. Je nach gewünschter Nenndrehzahl, wird die Maschine bei vorgegebener Netzfrequenz mit  $p$  Polpaaren ausgeführt.



**Abb. 4.2:** Stabformen von Kurzschlussläufern [MuP05] S.397  
a) Rundstabläufer, b) parallelfankige Zähne, c) Hochstabläufer rechteckig,  
d) Hochstabläufer mit Keilstäben, e) Doppelkäfigläufer mit Rundstab,  
f) Doppelkäfigläufer mit parallelfankigen Zähnen

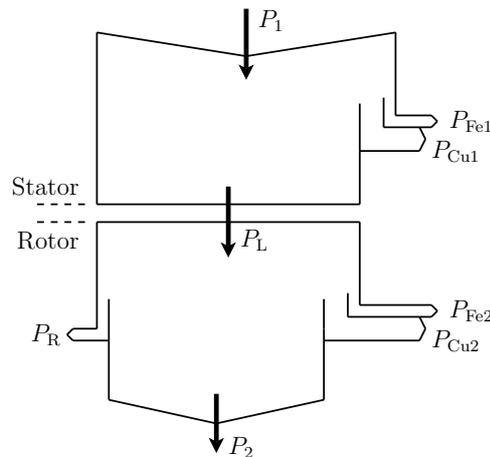
Der Rotor ist ebenfalls geblecht und meist geschrägt ausgeführt, letzteres um sogenannte Nutrastmomente zu verhindern. Zusätzlich hat er in Achsrichtung Stäbe eingebracht, die entweder aus Kupfer, Bronze oder Aluminium gefertigt sind und an den beiden Seiten über Ringe verbunden sind, daher der Name Kurzschlussläufer. Es gibt weitere Unterarten nach Ausführungen der Stabquerschnitte. Damit kann zum Beispiel der Anlaufstrom minimiert werden, sogenannte Stromverdrängungsläufer. Querschnitte dieser Läufer sind in Abbildung 4.2 zu sehen.

Wird die Rotorwicklung über Schleifringe mit Bürsten nach außen geführt (Schleifringläufer), kann man mittels zugeschalteter Widerstände eine Scherung

der Drehmoment-Drehzahlkurve erreicht werden. Durch den Einsatz von Stromrichtertechnik fallen die Argumente des kleinen Anzugsmoments sowie der hohen Anlaufströme weg, da die Maschine per Frequenzänderung hochgefahren wird. [MuP05][Sch98]

#### 4.1.3.2 Verluste

Die Verluste einer Asynchronmaschine sind im Sankey-Diagramm in Abbildung 4.3



**Abb. 4.3:** Leistungsverluste der ASM

dargestellt. Die zugeführte elektrische Leistung  $P_1$  vermindert sich im Stator um die Eisenverluste  $P_{Fe}$  (4.1a) und die Kupferverluste  $P_{Cu}$  (4.1b) in den Statorspulen. Die verbleibende Leistung geht über über den Luftspalt auf den Rotor, die sogenannte Luftspaltleistung  $P_L$ . Im Rotor selbst kommt es wieder zu Stromwärmeverlusten in den Kurzschlussstäben, Eisenverlusten und zusätzlich zu Reibungsverlusten aufgrund der Drehung bzw. auch einer möglicher Ventilation. Somit wird die Leistung  $P_2$  an der Welle abgegeben.

$$P_{Fe} = k_H \cdot f \cdot B^2 + k_W \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (4.1a)$$

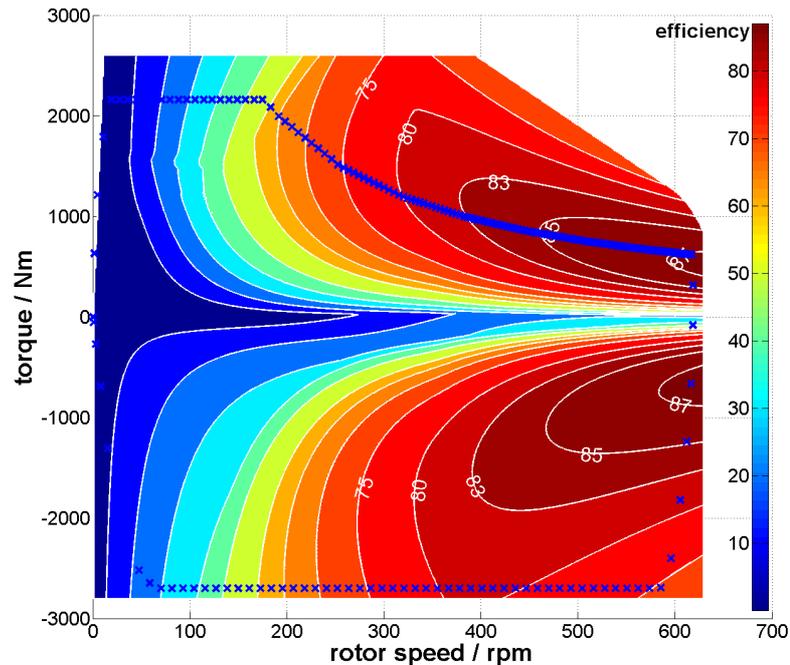
$$P_{Cu} = I^2 \cdot R \quad (4.1b)$$

Die Eisenverluste (4.1a) bestehen weiters aus:

- Hystereseverluste: Neuausrichtung der Weißschen Bezirke bei Ummagnetisierung mit dem Hysteresefaktor  $k_H$  linear mit der Frequenz  $f$
- Wirbelstromverluste: Strominduktion durch sich veränderndes Magnetfeld mit dem Wirbelstromfaktor  $k_W$  quadratisch mit der Frequenz  $f$

Die Wirbelstromverluste können durch Verwendung von dünnen Blechen sowie durch Beeinflussung der elektrischen Leitfähigkeit des Magnetmaterials vermindert werden. Ein Mehreinsatz von Magnetmaterial, somit Senkung der magnetischen Flussdichte  $B$ , bzw. eine Senkung des Widerstandes  $R$  durch größere Drahtquerschnitte, führen zu einer weiteren Reduktion der Verluste.

Eine wichtige Größe zum Vergleich unterschiedlicher Maschinen ist der Wirkungsgrad einer Antriebsmaschine. In Abbildung 4.4 ist der Verlauf des Wirkungsgrades einer ASM als Muschelkurve bei unterschiedlichen Drehzahlen und Drehmomenten dargestellt. Die blaue Linie gibt einen typischen Betriebsverlauf an, sowohl beim Beschleunigen als auch beim Bremsen.

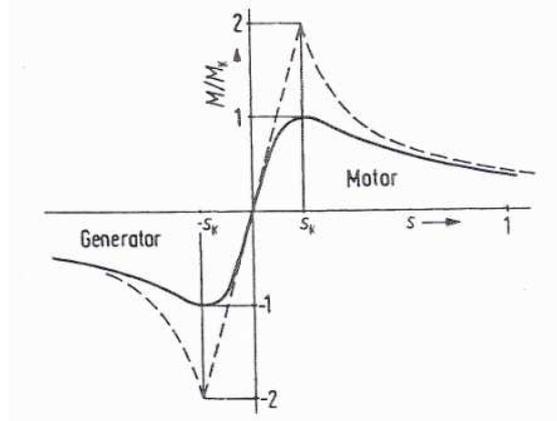


**Abb. 4.4:** Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl [Dem11b]

#### 4.1.3.3 Betriebsverhalten im drehzahlgeregelten Bereich

Die Abhängigkeit von Drehmoment zur Drehzahl für hinreichend kleine Statorwiderstände ist durch die Kloßsche Gleichung (4.2b) gegeben, siehe Abbildung 4.5. Dabei wird auf der x-Achse die Drehzahl oder der Schlupf  $s$  (4.2a) aufgetragen.

$$s = \frac{\omega_{\text{Feld}} - \omega_{\text{n}}}{\omega_{\text{Feld}}} \quad (4.2a)$$



**Abb. 4.5:** Drehmomentenkenlinie der ASM im Generator- und Motorbetrieb [Sch98]

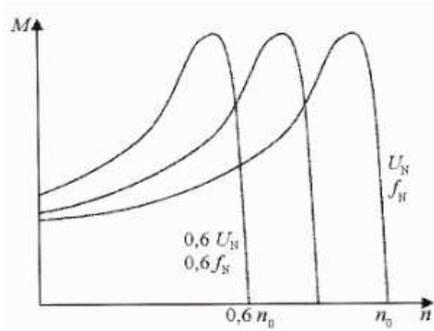
$$\frac{M}{M_K} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \quad (4.2b)$$

Ist die Winkelgeschwindigkeit des Drehfeldes  $\omega_{\text{Feld}}$  gleich der Winkelgeschwindigkeit des Rotors  $\omega_n$  ist der Schlupf  $s = 0$ , die Maschine läuft synchron. Der Bereich zwischen dem Kippschlupf  $s_K$  und dem Stillstand des Rotors ( $s = 1$ ) ist ein bei Betrieb mit konstantem Moment instabiler Bereich der Maschine. Unter dem Kippmoment  $M_K$  versteht man das maximal abgebbare Moment einer Maschine. Das Nennmoment des Antriebs ist meist etwa das halbe Kippmoment. Das Kippmoment weist eine Abhängigkeit von der Streureaktanz ( $X_K$ ) auf, d. h. je größer diese ist, desto geringer wird das Kippmoment. Für eine Variation der Drehzahl wird eine veränderte Frequenz benötigt, dies würde jedoch die Reaktanzen der Maschine verändern und daraus würde eine Veränderung des Kippmomentes folgen. Eine Veränderung ist hier jedoch nicht erwünscht und es muss daher, wie aus Gleichung 4.3 ersichtlich, die induzierte Strangspannung dementsprechend variiert werden, um gleiches Kippmoment zu gewährleisten.

$$M_K = \frac{3p}{\omega_N} \cdot \frac{U_{1StrN}^2}{2X_K} \quad (4.3)$$

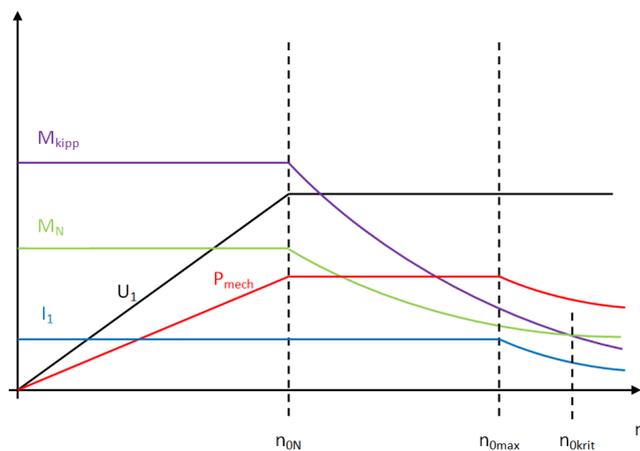
In Abbildung 4.6 ist der Verlauf von Drehmoment zu Drehzahl bei zueinander proportionalen Änderungen von Frequenz und induzierten Strangspannung bis zu einer Grenzfrequenz ( $f_g$ ) dargestellt.

Zusammenfassend kann man die Maxima der unterschiedlichen Frequenzen bis zur Grenzfrequenz  $f_0$  in Abbildung 4.7 betrachten. Der Arbeitsbereich der Induktionsmaschine kann in drei Teile unterteilt werden. Im ersten Bereich zwischen



**Abb. 4.6:** Momentenkenlinie bei Änderung von Frequenz und Strangspannung [MuP05]

Stillstand und der Nenndrehzahl  $n_{0N}$  liegt ein konstanter Fluss vor und induzierte Spannung und Frequenz des Umrichters werden proportional zueinander verändert. Zwischen  $n_{0N}$  und  $n_{0max}$  liegt der sogenannte Feldschwächbereich, da hier die Spannung den maximalen Wert erreicht hat und der Fluss daher abgesenkt werden muss. Es ist ersichtlich, dass das Drehmoment bei Nennstrom sowie das Kippmoment bei gleicher mechanischer abgegebener Leistung abnehmen. Hierbei nimmt das Kippmoment mit  $\frac{1}{\omega^2}$  ab, wie aus Formel 4.3 nach Einsetzen für  $X_K$  ersichtlich ist. Der Verlauf des Drehmoments sinkt etwa mit  $\frac{1}{\omega}$  ab, da das Drehmoment an den Fluss gekoppelt ist. Die Zusammenhänge ergeben sich auch aus der Leistungsbeziehung  $P = M \cdot \omega = I \cdot U$ . [MuP05]



**Abb. 4.7:** Kennlinien der ASM [Neu10]  
Statorstrom  $I_1$ , Statorspannung  $U_1$ , Nennmoment  $M_N$ ,  
Kippmoment  $M_{kipp}$ , Leistung  $P_{mech}$

## 4.1.3.4 Feldorientierte Regelung

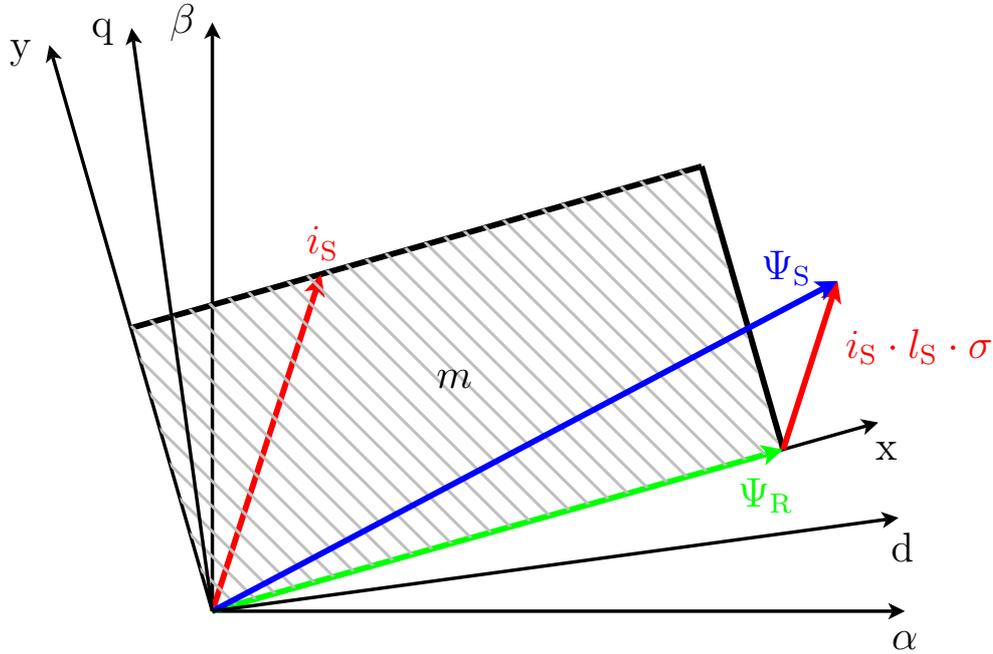
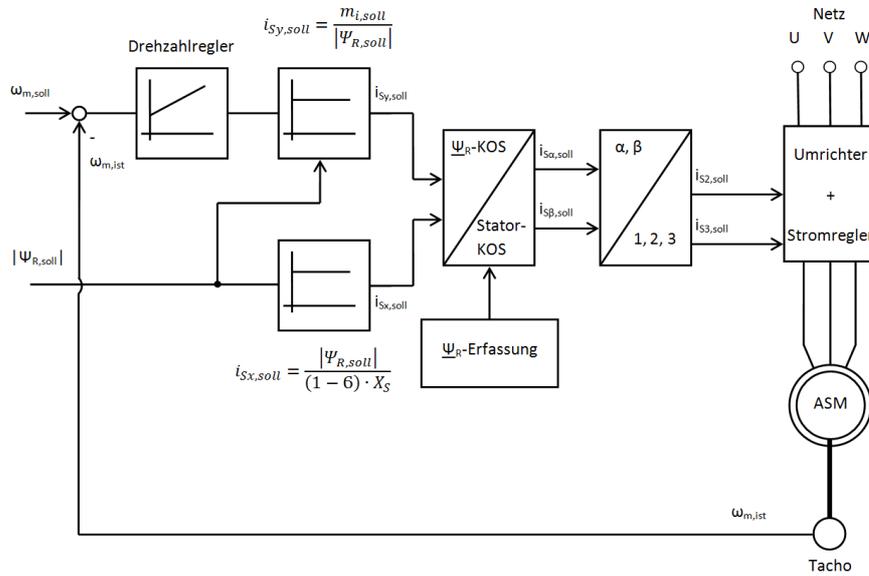


Abb. 4.8: Drehmomentenbildung bei der ASM [Sch00]

Für die Regelung eines Elektromotors ist es bedeutend, wie sich das Drehmoment beeinflussen lässt. In Abbildung 4.8 wird die Bildung des Drehmomentes bei der ASM mit den drei Koordinatensystemen dargestellt ( $\alpha\beta$  - Statorfest,  $dq$  - Rotorfest,  $xy$  - Flussfest). Der für die Bildung des Drehmomentes bedeutende Rotorfluss  $\Psi_R$  stimmt nicht mit dem rotorfesten Koordinatensystem überein, welches mittels eines Lagegebers erfasst werden kann. Dieser wird nach der Flussverkettungsgleichung 4.4 aus dem Statorfluss  $\Psi_S$  und dem Streufluss  $\Psi_\sigma$  gebildet (Statorstrom  $i_S$ , Statorinduktivität  $l_S$ , Streukoeffizient  $\sigma$ ). Die Fläche, die vom Rotorfluss  $\Psi_R$  und dem dazu rechtwinkligen Anteil des Statorstroms  $i_S$  aufgespannt wird, entspricht dem Moment  $m$ . [Sch00]

$$\Psi_S = \Psi_R + \Psi_\sigma = \Psi_R + (\sigma \cdot l_S) \cdot i_S \quad (4.4)$$

Die Regelung setzt also eine komplexe Rotorflusserfassung voraus, vorauf bei einer PSM durch den synchronen Betrieb verzichtet werden kann. Eine solche Regelung ist in Abbildung 4.9 dargestellt, die Rotorflussverkettung wird mit  $\Psi_R$  bezeichnet. Für die Erfassung des Rotorflusses wurden folgende Modelle entwickelt, die unterschiedliche Vorzüge aufweisen: [Sch00]



**Abb. 4.9:** Struktur einer feldorientierten ASM-Regelung [Sch00] S.91

- Spannungsmodell
- Stromloses Modell
- Strommodell
- Beobachter

Auf Grund der heutig verfügbaren Technik im Bereich der Mikrocontroller stellt die Regelung der ASM keine Schwierigkeit dar.

#### 4.1.4 Permanentmagneterregte Synchronmaschine

Permanentmagnete zur Erregung des magnetischen Kreises haben in letzter Zeit immer mehr an Bedeutung gewonnen. Wegen neuer magnetischer Materialien, wie z.B. Neodym-Eisen-Bor, ist es möglich, Flussdichten bis 1,6 Tesla mit einer Temperaturbeständigkeit von rund 150 °C zu erzeugen. Vorteile der Verwendung von Permanentmagneten im Vergleich zur elektrischen Erregung sind: [Vog96]

- Einsparung von Wicklungskupfer
- Verminderung der Verluste um die Stromwärmeverluste in der Erregerwicklung
- Wegfall einer Speisequelle für die Erregerwicklung

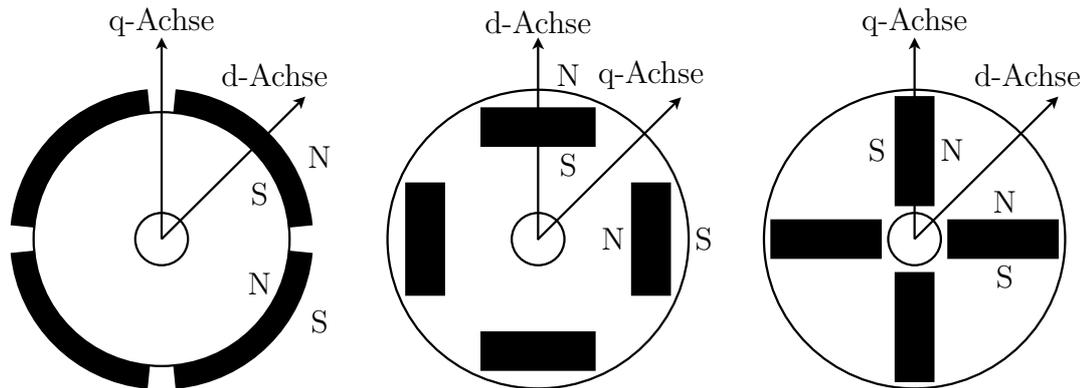
Wegen dieser Vorteile und des einfachen Aufbaus werden statt Erregerwicklungen in kleinen Maschinen praktisch nur noch Permanentmagnete verwendet. Der Einsatz in größeren Maschinen im MW-Bereich hängt von der Energiedichte der Magnete und der Fertigungsgröße ab. Mit Entwicklung und Herstellung immer höherwertiger Magnetwerkstoffe gewinnt jedoch die PSM auch in diesem Bereich immer mehr an Bedeutung.

##### 4.1.4.1 Aufbau

Der Aufbau des Stators ist gleich der ASM (Kap. 4.1.3.1). Der Rotor hat anstelle der Kurzschlussstäbe Permanentmagnete, die wie in Abbildung 4.10 dargestellt angeordnet sein können. Zur Vermeidung von Nutrastrmomenten kann der Rotor in Abschnitten gefertigt werden, die zueinander leicht versetzt sind, oder die Statorbleche werden geschrägt ausgeführt. Der Rotor der PSM besitzt ein geringeres Trägheitsmoment als der einer ASM, da für die Führung des magnetischen Flusses vergleichsweise weniger Material ausreicht und daher mögliche Aussparungen eine Gewichts- und Schwungmassenreduktion mit sich bringen.

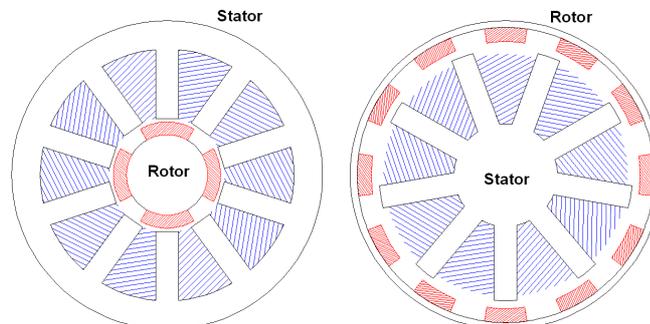
magnetanordnung.pstricks

Der Magnet besitzt eine relative Permeabilität von  $\mu_r \approx 1.0$  und wirkt daher wie Luft. Es zeigt sich, dass die Induktivität je nach Stellung des Rotors (dq-Koordinaten) zur Statorwicklung ( $\alpha\beta$ -Koordinaten) variiert. Diese Veränderung wird bei der sensorlosen Lagermittlung ausgenutzt (siehe unten).



**Abb. 4.10:** Permanentmagnetanordnung einer PSM [Nau]-S.25  
links: Oberflächenmagnete, mitte: eingebettete Magnete mit radialer Magnetisierung,  
rechts: eingebettete Magnete mit tangentialer Magnetisierung

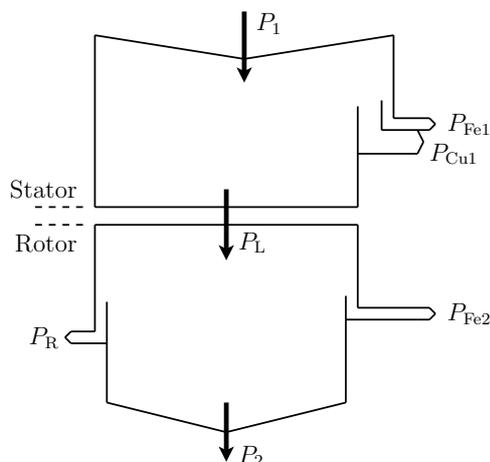
Die PSM kann gleich der ASM als Innenläufer oder Außenläufer konstruiert werden. Bei gleichem Bauvolumen hat der Innenläufer eine einfachere Kühlungssituation, beim Außenläufer ist der Luftspaltradius größer und es ergibt sich mehr Drehmoment. Ein direkter Vergleich ist in Abbildung 4.11 mit Oberflächenmagneten dargestellt.



**Abb. 4.11:** Vergleich eines Innenläufers und Außenläufers [Kog09]  
(rot: Magnete, blau: Spulen)

#### 4.1.4.2 Verluste

Die Verluste der PSM sind im Vergleich zur ASM um die ohmschen Rotorverluste verringert, ein Sankey-Diagramm ist Abbildung 4.12 zu entnehmen. Durch die nicht vorhandenen Leiter im Rotor entsteht so keine Wärme und es kann häufig auf eine aufwendige Kühlung verzichtet werden. Durch eine grobe Abschätzung ergeben sich um ca. ein Drittel bis zur Hälfte weniger Verluste im Vergleich zur ASM und dies führt zu einer Anhebung des Gesamtwirkungsgrades.



**Abb. 4.12:** Leistungsverluste der PSM

Der Wirkungsgrad einer PSM ist in Abbildung 4.13 im motorischen und generatorischen Betrieb als Muschelkurve dargestellt. Die blaue Linie stellt einen typischen Betriebszyklus dar.

#### 4.1.4.3 Betriebsverhalten im drehzahlgeregelten Bereich

Die PSM wird geregelt hochgefahren und betrieben und ist daher grundsätzlich mit einem Lagegeber oder Tacho ausgestattet. Eine sensorlose Regelung der PSM ist ebenfalls möglich durch Verwenden verschiedener Modelle, zum Beispiel: [Sch88]

- Mit der INFORM<sup>4</sup>-Methode ist eine Lageerfassung bei Stillstand und niedrigen Drehzahlen möglich,
- bei hohen Drehzahlen wird das EMK<sup>5</sup>-Modell verwendet, das die induzierte Spannung der Maschine nutzt.

Die Instabilität im gesteuerten Betrieb ist ein Nachteil gegenüber der ASM, die am starren Netz wie bei veränderlicher Frequenz ( $U/f$ -Kennlinie) lediglich frequenzgesteuert und daher ohne Regelung betrieben werden kann.

In Abbildung 4.14 sind die Kennlinien der PSM zusammengefasst dargestellt. Im Ankerstellbereich steigt die Statorspannung  $U_S$  proportional der Drehzahl. Die Leistung  $P$  ist ebenfalls proportional der Drehzahl, da der momentbildende Strom  $I_q$  sowie das resultierende Moment  $M$  konstant ist. Über der Nenndrehzahl, im Feldschwächbereich, wird ein negativer d-Strom  $I_d$  eingepreßt, der dem Rotorfluss

<sup>4</sup>Indirekte Flussermittlung durch Online Reaktanzmessung

<sup>5</sup>ElektroMotorische Kraft

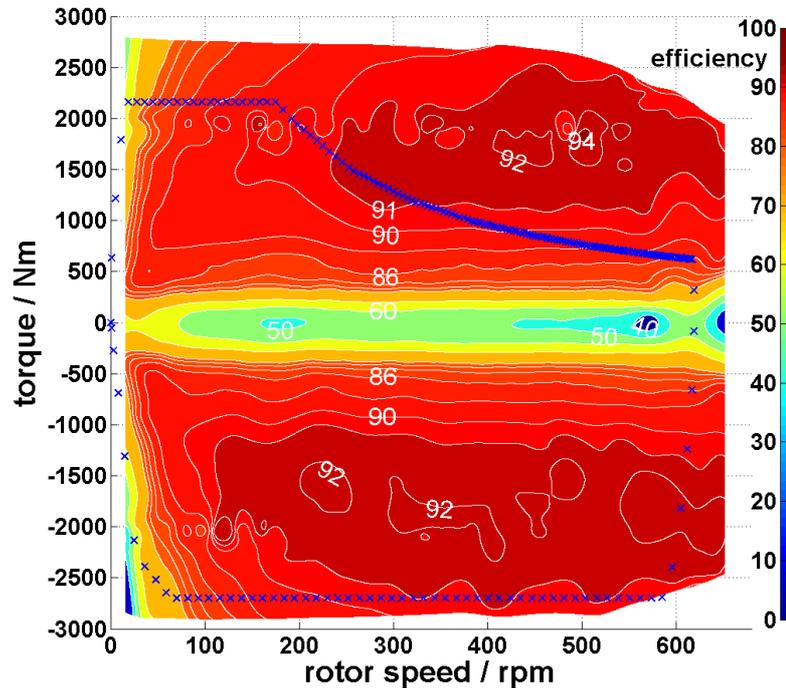
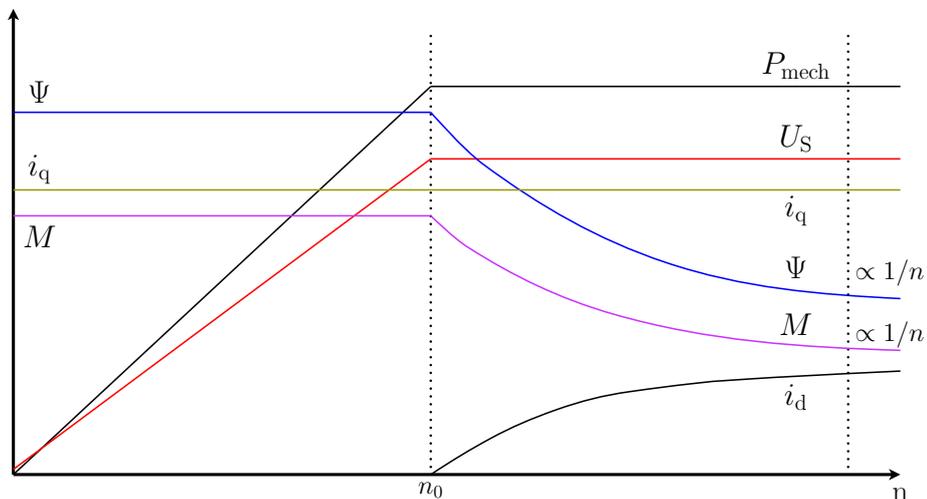


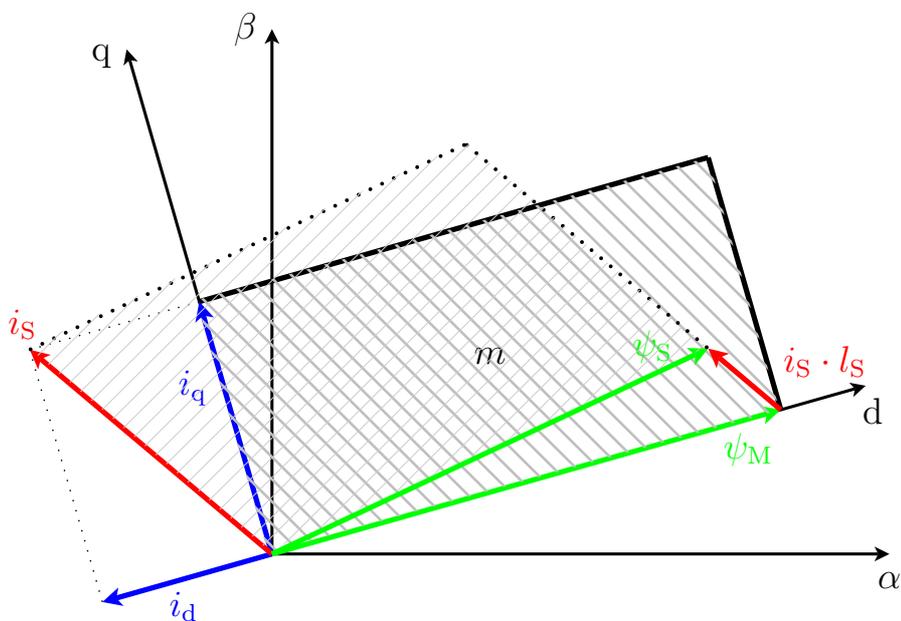
Abb. 4.13: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl [Dem11b]

$\Psi_M$  entgegenwirkt und somit den Fluss  $\Psi_S$  schwächt und die nötige Klemmenspannung konstant hält. Durch den d-Anteil wird der Gesamtstrom größer. Dies erfordert eine erhöhte Kühlung. Die mechanische Leistung bleibt konstant.

Die Regelung der PSM ist einfacher als die der ASM, da das rotorfeste und das flussfeste Koordinatensystem ident sind. Das Magnetfeld ist durch die eingesetzten Permanentmagnete synchron der Drehzahl. Mit Erhöhen der q-Strom-Komponente erhöht sich direkt das Drehmoment, der d-Strom führt zur Flussenkung und es können höhere Drehzahlen als die Nenndrehzahl erreicht werden. In Abbildung 4.15 sind die einzelnen Komponenten und deren Zusammenhang im statorfesten  $\alpha\beta$ - und im rotorfesten dq-Koordinatensystem zu erkennen. Die von den Zeigern des verketteten Statorflusses  $\psi_S$  und des Statorstroms  $i_S$  aufgespannte Fläche, gleichzusetzen der Fläche mit Rotorfluss  $\psi_M$  und dem Querstrom  $i_q$  (für etwa positionsunabhängige Statorinduktivität  $l_S$ ), entspricht dem Moment  $m$  [Sch00]. Eine Übersicht der Regelung einer PSM mit Lagegeber ist in Abbildung 4.16 gezeigt.



**Abb. 4.14:** Kennlinien der PSM [Neu10]  
 q-Strom  $I_q$ , d-Strom  $I_d$ , Statorspannung  $U_s$ ,  
 Moment  $M$ , Fluss  $\Psi$ , mechanische Leistung  $P_{\text{mech}}$



**Abb. 4.15:** Drehmomentenbildung bei der PSM [Sch00]

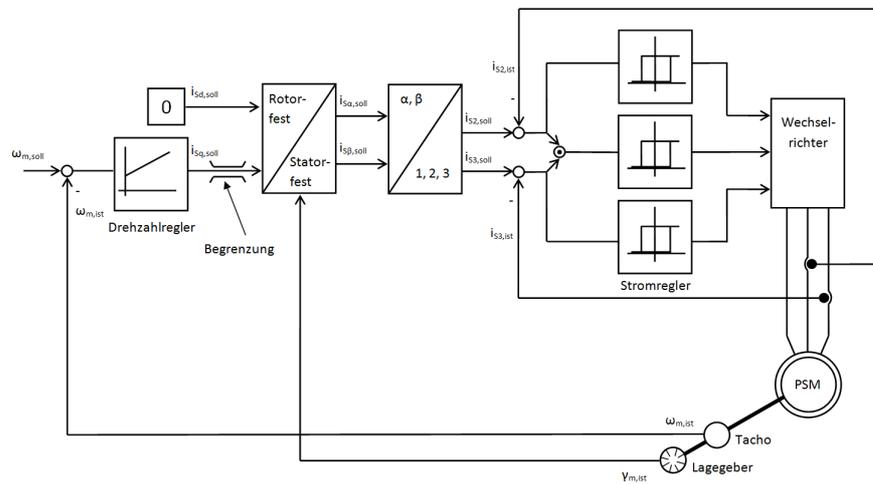


Abb. 4.16: Lagegeregelte PSM in kaskadierter Reglerstruktur [Sch00] S.72

#### 4.1.5 Vor- und Nachteile PSM/ASM

Eine Gegenüberstellung von Eigenschaften der PSM und ASM ist in Tabelle 4.1 angeführt.

Eigenschaften	ASM	PSM
Kosten	niedrig	hoch (Magnetmaterial)
Anwendungsgebiete	weit verbreitet	stark ansteigend
thermische Belastbarkeit	gut	gut
mechanische Belastbarkeit	hoch	geringer (Magnete) (ausg. vergraben)
Drehmoment/Volumen	gering	gut
Rotorverluste	vorhanden	geringer als bei ASM
Hochlauf ohne Umrichter	möglich	nicht möglich
Synchronlauf	nicht möglich	möglich
Maschinen je Umrichter	mehrere	eine
Feldschwächung	hoher Wirkungsgrad	wenig möglich
Blindleistungsbedarf für Magnetisierung	nötig	nicht nötig
Leistungsfaktor von 1	nicht möglich	möglich
Luftspalt	sehr klein	groß gegenüber ASM
Regelung	komplex	einfach
Lagegeber	nur bei Regelung	meistens nötig

**Tab. 4.1:** Gegenüberstellung der Eigenschaften von ASM und PSM

## 4.2 Dieselmotor

Einen völligen anderen Ansatz der Energieumwandlung bieten Verbrennungskraftmaschinen (VKM). Diese nutzen den Vorteil der extrem hohen Energiedichte diverser Kraftstoffe von Kerosin über Benzin zu Diesel. Sie unterliegen keinen elek-

rotechnischen Gesetzen, sondern denen der Thermodynamik, indem sie die Kraftstoffe kontrolliert verbrennen und damit die chemische Bindungsenergie in Bewegungsenergie umwandeln. Die wichtigsten Vertreter im Automobilbereich sind Hubkolbenmotoren, und da vor allem in der Landwirtschaft der Dieselmotor, da dieser im Vergleich zum Ottomotor einen besseren Wirkungsgrad aufweist.

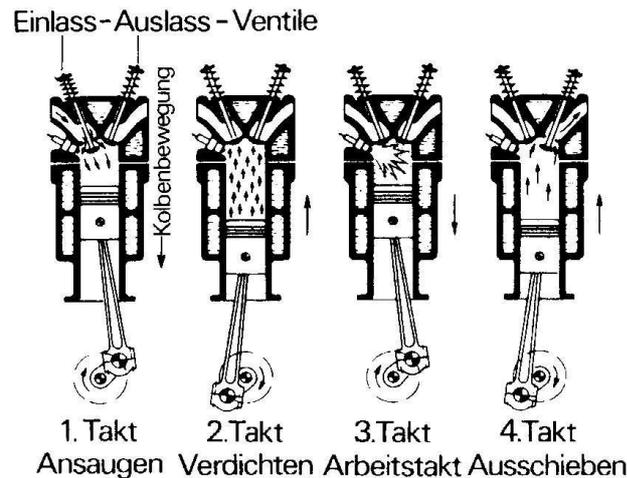


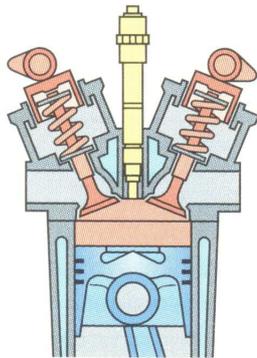
Abb. 4.17: Die vier Takte einer VKM [Gro07]

#### 4.2.1 Aufbau

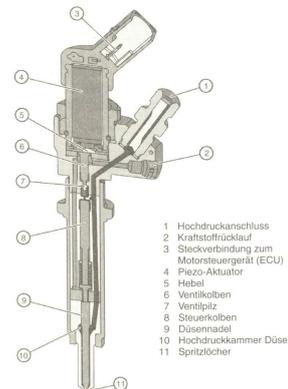
Die Bewegung eines Ottomotors wird grundsätzlich in vier Takte eingeteilt, wie in Abbildung 4.17 dargestellt. Ein Benzin-Luft-Gemisch wird eingesaugt (1. Takt) und verdichtet (2. Takt). Die Zündkerze startet die Verbrennung des Benzins und beschleunigt den Kolben nach unten (3. Takt). Beim letzten Takt (4.) werden die Abgase dann ausgeschieden. Beim Dieselmotor wird reine Luft eingesaugt, komprimiert und zum Zündzeitpunkt der Dieselmotor Kraftstoff eingespritzt. Durch die Zerstäubung in der heißen Luft kommt es zur Selbstzündung. In Abbildung 4.18 ist ein Kolben mit Ein- und Auslassventil sowie mittiger Einspritzdüse im Querschnitt dargestellt.

Wichtig für Leistung und Wirkungsgrad des Motors ist eine optimale Einspritzung. Dabei wird versucht, möglichst kleine Dieseltröpfchen zu erzeugen, die dann schnell verdampfen und der Treibstoff optimal verteilt wird. Dabei können folgende Unterteilungen getroffen werden: [Bas02]

- Ort der Einspritzung



**Abb. 4.18:** Querschnitt eines Zylinders [Gsc08]



**Abb. 4.19:** Piezoeinspritzdüse [Bas02]

- Direkte Einspritzung – direkt in den Verbrennungsraum
- Indirekte Einspritzung – in eine Vor- oder Wirbelkammer

- Art der Einspritzung

- Verteiler Einspritzpumpe – mit Drücken von rund 1300 bar
- Pumpe-Düse – direkt am Kolben mit rund 2000 bar
- Common Rail – regelbarer zentraler Druckspeicher mit rund 1500 bar

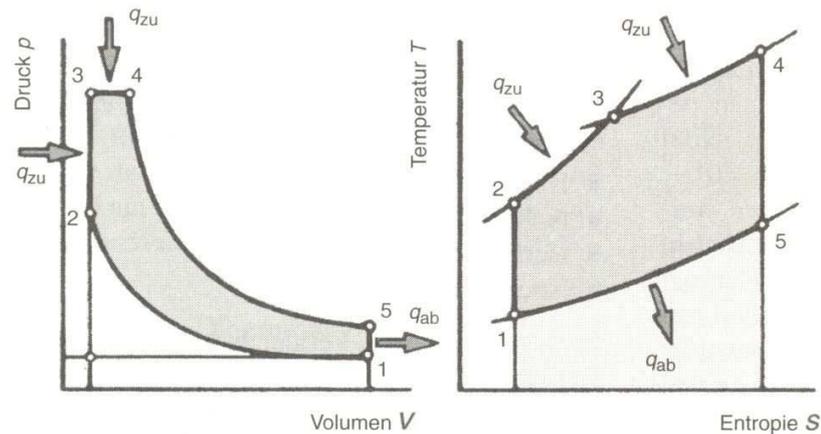
Ein Beispiel zeigt Abbildung 4.19 mit einem Schnitt eines Piezoinjektors des Common Rail-Einspritzsystems. Die modernen Einspritzsysteme sind so schnell, dass pro Verbrennungstakt mehrere kleine Einspritzungen vorgenommen werden können. Dadurch kann die Effizienz weiter gesteigert werden.

Ein großer Nachteil von Verbrennungskraftmaschinen, vor allem im Vergleich zum Elektromotor, sind die Verbrennungs- und Prozessprodukte, die während des Betriebs entstehen. So hat ein Ottomotor einen hohen Anteil an unverbrannten Kohlenwasserstoffen sowie Kohlenmonoxyd in seinen Abgasen. Beim Dieselmotor hingegen ist das Problem von Rußpartikeln sowie Stickoxyden gegeben. [Dah04]

#### 4.2.2 Funktionsweise

Die Energieumwandlung in einer Verbrennungskraftmaschine kann am besten durch thermodynamische Kreisprozesse beschrieben werden. Dabei wird der Motor als thermisch isoliertes System betrachtet. Verdichtung und Expansion durch die Bewegung des Kurbeltriebs sowie Einbringen von Luft und Treibstoff und das Aus-

lassen der Abgase sind Zustandsänderungen des Systems.



**Abb. 4.20:** Zustandsänderung im Seiliger-Prozess [Bas02]

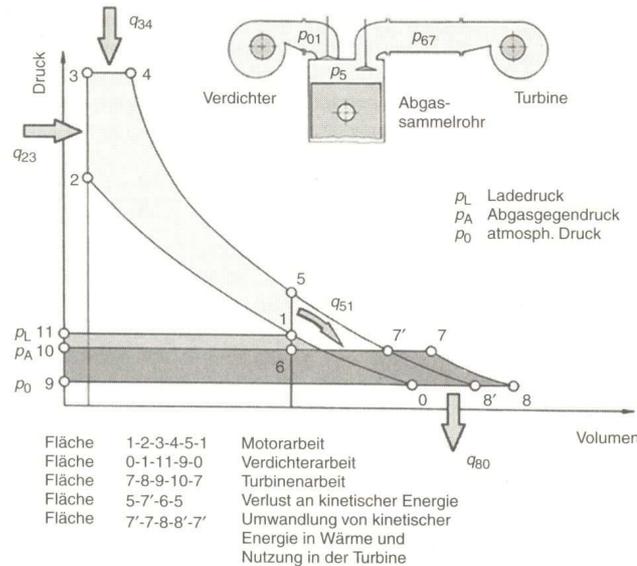
Der thermodynamisch theoretisch optimale Carnot Kreisprozess wird durch einen realistischeren Kreisprozess ersetzt: Den Seilinger Prozess. Dieser berücksichtigt sowohl eine Wärmezufuhr bei gleichem Volumen, als auch bei gleichem Druck, im Gegensatz zu den ebenfalls angewandten Gleichraumprozess (Otto-Kreisprozess) und Gleichdruckprozess (Diesel-Prozess). Die einzelnen Schritte lauten: [Bas02]

- 1-2 - Isentrope Verdichtung:  
der Kolben bewegt sich nach oben
- 2-3 - Isochore Wärmezufuhr:  
Diesel wird eingespritzt und verbrennt. Zunächst bleibt die Kolbenposition noch gleich, also steigt der Druck
- 3-4 - Isobare Wärmezufuhr:  
durch Verbrennung steigt der Druck soweit, dass der Kolben sich zurück nach unten bewegt und somit das Volumen des Arbeitsraums vergrößert wird
- 4-5 - Isentrope Expansion:  
Verbrennung ist abgeschlossen, der Kolben bewegt sich weiter nach unten und das Gas entspannt sich im größer werdenden Volumen
- 5-1 - Isochore Wärmeabfuhr:  
das heiße Gas wird über ein Ventil abgeführt

Der Prozess ist in Abbildung 4.20 in einem p-V-Diagramm (Druck/Volumen) und einem T-S-Diagramm (Temperatur/Entropie) dargestellt. Die Flächen stellen

dabei die Arbeit (p-V) und die Wärme (T-S) dar. Zentrale Aussage dabei ist der thermodynamische Wirkungsgrad, siehe Gleichung 4.5. [Dem06]

$$\eta_{th} = \frac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}} \quad (4.5)$$

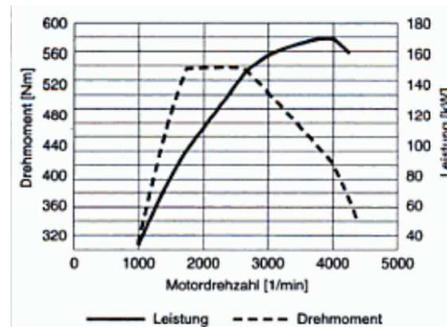


**Abb. 4.21:** Zustandsänderung im Seiliger-Prozess eines abgasturboaufgeladenen Motors [Bas02]

Hat der Dieselmotor zusätzlich einen Turbolader, so ändert sich der Prozess nicht, es werden lediglich die Druckniveaus angehoben. Neben der Verdichtung im Kolben erfolgt eine Komprimierung im Turboverdichter. Weiters erfolgt die Expansion der Verbrennungsgase nicht im Kolben und Abgasrohr alleine, sondern auch in der nachfolgenden Turbine des Turbos. Abbildung 4.21 soll dies kurz veranschaulichen.

### 4.2.3 Betriebsverhalten

Der Leistungs- und Drehmomentverlauf einer Verbrennungskraftmaschine unterscheidet sich sehr stark von dem eines Elektromotors. Bereits nach dem Einschalten ist eine Mindestdrehzahl für den Betrieb erforderlich. Deshalb beginnen die Kennlinien erst bei Drehzahlen um die 1000 Umdrehungen pro Minute, wie Abbildung 4.22 veranschaulicht. Hier sieht man Drehmoment und Leistung über der Drehzahl eines Dieselmotors.

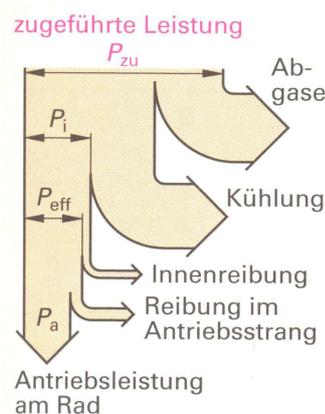


**Abb. 4.22:** Dieselmotor mit Aufladung, Leistung und Drehmoment über die Drehzahl [Bas02] S.20

Erst ab einer gewissen Drehzahl steht das volle Moment zur Verfügung, im Gegensatz zum Elektromotor. Die Regelung des Motors erfolgt über die Kraftstoffzufuhr. Ein Elektromotor kann jederzeit mit der gewünschten Drehzahl oder dem gewünschten Moment geregelt werden.

#### 4.2.4 Verluste

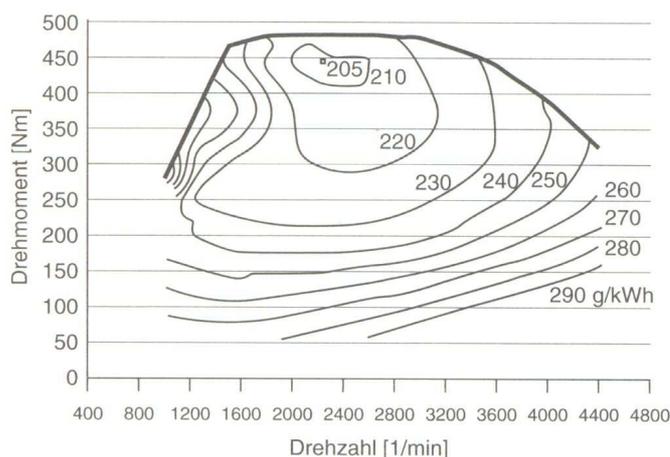
Bei einer Verbrennungskraftmaschine sind vor allem die thermischen Verluste sehr hoch. Einerseits sind die Abgastemperaturen, wenn sie den Motorraum oder etwaig nachgeschaltete Turbinenstufen verlassen, noch sehr hoch, und andererseits muss der Motor, in dem die Verbrennung stattfindet, gekühlt werden. Weitere Verluste wie zum Beispiel die Reibung der Kolben und des Antriebsstrangs sind im Vergleich dazu eher gering, wie dem Sankey-Diagramm in Abbildung 4.23 zu entnehmen ist.



**Abb. 4.23:** Leistungsverluste einer VKM [Gsc08]

Im Kennlinienfeld einer VKM erkennt man den Verlauf des maximalen Moments wieder. Statt eines prozentualen Wirkungsgrades werden hier Verbrauchs-

werte angegeben. Abbildung 4.24 zeigt eine Muschelkurve eines handelsüblichen Personenkraftwagens. Im optimalen Wirkungsgradbereich ergibt sich ein Verbrauch von 205 g/kWh also rund 4,88 kWh/kg. Laut Literatur hat Diesel einen Heizwert von 11,94 kWh/kg [Köh11]-S.42, somit ergibt sich ein Wirkungsgrad von 40,9 %.



**Abb. 4.24:** Verbrauchskennliniefeld PKW Dieselmotor, V8-TDI [Bas02] S.21

## 4.3 Hydraulische Systeme

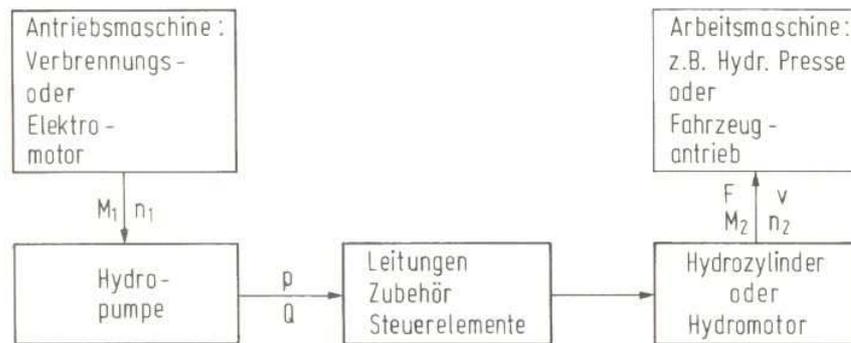
Eine weitere gebräuchliche Art der Antriebstechnik in der Landwirtschaft sind hydraulische Systeme. Durch die Verwendung von Mineralölen zur gleichzeitigen Schmierung und als Korrosionsschutz auch als Ölhydraulik bekannt.

### 4.3.1 Aufbau

Ein hydraulisches System besteht im Prinzip aus einer Hydropumpe, Leitungen bzw. Steuerelementen und einem Hydromotor oder Hydrozylinder, wie auch Abbildung 4.25 veranschaulicht. Ein Hydromotor führt stetige Bewegung als Rotation aus, ein Hydrozylinder führt lineare Bewegung in einem bestimmten Aktionsradius aus.

### 4.3.2 Funktionsweise

Als Antriebsmaschine wird in der Regel ein Elektromotor oder eine Verbrennungskraftmaschine verwendet. Die dadurch zugeführte mechanische Leistung  $P_{\text{mech}}$  wird mit einer Hydropumpe in hydraulische Leistung  $P_{\text{hydr}}$  umgewandelt. Nach der Ver-



**Abb. 4.25:** Blockschaubild zur Leistungsübertragung in hydraulischen Systemen [Mat08]

teilung setzt sein Hydromotor (rotatorisch) oder ein Hydrozylinder (translatorisch) diese wieder in mechanische Leistung um ( $P_{\text{rot}}$  oder  $P_{\text{trans}}$ ), siehe Gleichung 4.6.

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{hydr}} = \begin{cases} P_{\text{rot}} \\ P_{\text{trans}} \end{cases} \rightarrow 2\pi \cdot M_1 \cdot n_1 = p \cdot Q = \begin{cases} 2\pi \cdot M_2 \cdot n_2 \\ F \cdot v \end{cases} \quad (4.6)$$

Mit Moment  $M$  und Drehzahl  $n$  sowie  $p$  als Druckerhöhung und  $Q$  als Volumenstrom.

Eine schematische Darstellung sowie die Regelung liefert Abbildung 4.26 für einen Hydrozylinder, der je nach Ventilstellung ausfährt, einfährt oder konstant gehalten wird.

In Abbildung 4.27 wird ein Hydromotor angesteuert, der je nach Ventilstellung die Richtung ändert. In beiden Systemen ist noch ein Druckventil vorhanden, welches im Falle eines Überdruckes öffnet, wenn zB. der Kolben ganz ausgefahren ist, oder der Motor gegen ein zu hohes Moment dreht.

Benötigt man beim Elektromotor die Lorentzkraft, bei der Verbrennungskraftmaschine die Thermodynamik, reichen bei der Beschreibung der hydraulischen Antriebe einfache mechanische und geometrische Relationen. Abbildung 4.28 zeigt die Funktionsweise eines Zylindersystems. Bei Vernachlässigung von Leckölverlusten bewegt die Kraft  $F_1$  den Kolben der Fläche  $A_1$  um den Weg  $s_1$  und verdrängt somit das Volumen  $V_1$ . Die sich ergebenden Relationen sind in Gleichung 4.7 zusammengefasst. Daraus ergibt sich weiters die Arbeit und die Leistung (Gl. 4.8

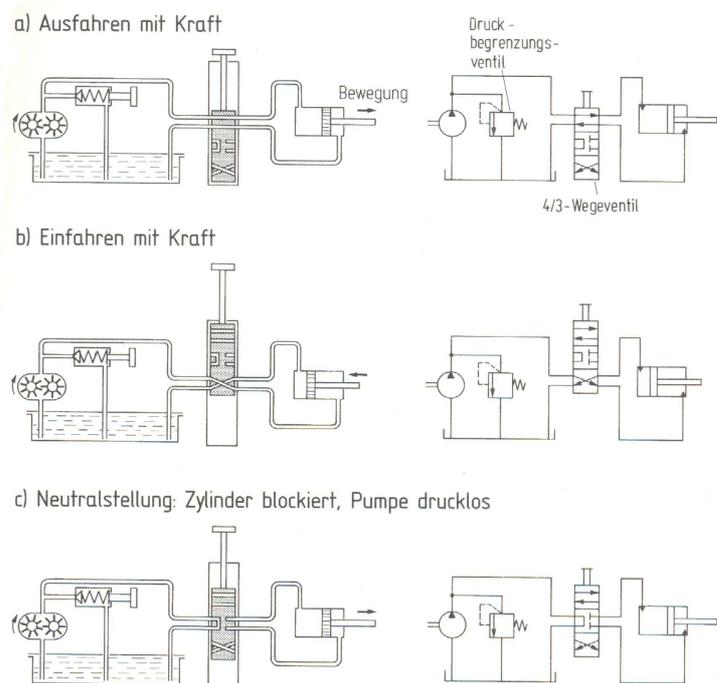


Abb. 4.26: Antrieb eines Hydrozylinders [Mat08]

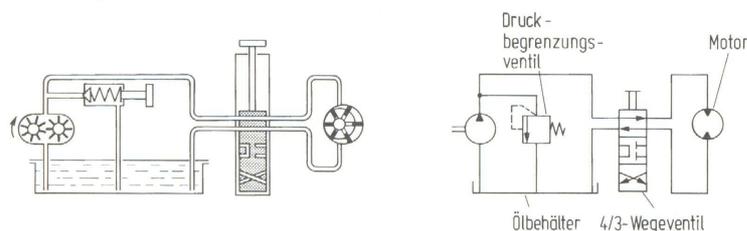


Abb. 4.27: Antrieb eines Hydromotors [Mat08]

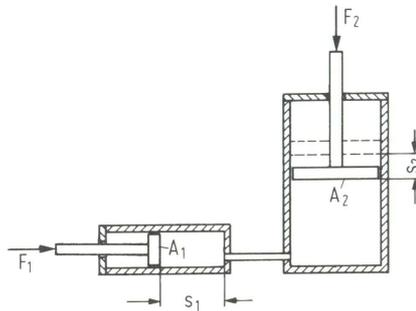
und 4.9).

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{F_2}{F_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (4.7)$$

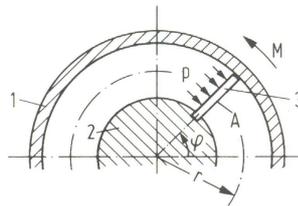
$$W = F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2 \quad (4.8)$$

$$P = F \cdot v = p \cdot Q \quad \text{mit } F = A \cdot p \text{ und } v = \frac{Q}{A} \quad (4.9)$$

In Abbildung 4.29 sieht man das Schema einer rotierenden Pumpe. Das verdrängte Volumen wird durch den resultierenden Weg  $s$  aus der Rotationsbewegung bestimmt. Es ergibt sich ein Moment  $M$ , dass mit Volumen mal Drehzahl, dem Volumenstrom  $Q = V \cdot n$ , bis zur Leistung  $P$  umgeformt werden kann (Gl. 4.10-4.12).



**Abb. 4.28:** Schema einer Hebevorrichtung mit Pump- und Hubzylinder [Mat08]



**Abb. 4.29:** Schema einer Pumpe mit rotierendem Verdränger [Mat08]  
1 - Gehäuse, 2 - Rotor, 3 - Flügel

$$V = s \cdot A = 2\pi \cdot r \cdot A \quad (4.10)$$

$$M = p \cdot A \cdot r = \frac{p \cdot V}{2\pi} = \frac{p \cdot Q}{2\pi \cdot n} \quad (4.11)$$

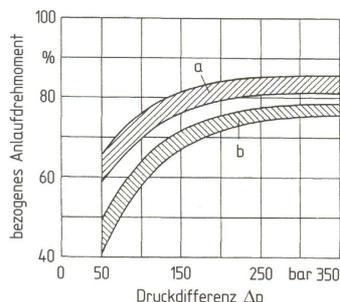
$$P = M \cdot \omega = M \cdot 2\pi \cdot n = p \cdot Q \quad (4.12)$$

Für die Beschreibung der Strömungsvorgänge des Öls werden weitere Gleichungen und Gesetze herangezogen. Kurz erwähnt wären dies unter anderem: [Mat08]

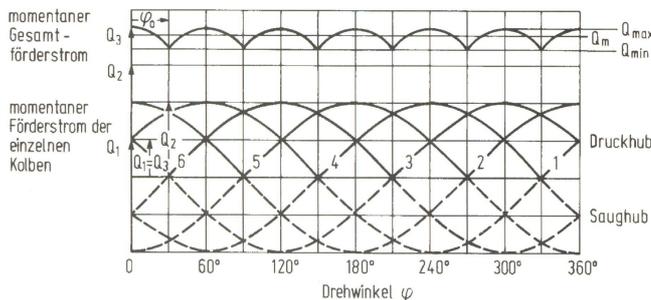
- Kontinuitätsgleichung: Erhaltung der Masse längs eines Stromfadens
- Bernoulli-Gleichung: Erhaltung der Energie längs eines Stromfadens
- Druckverluste: beim Fluidumlauf - Reibungsbehaftete Strömungen
- Impulssatz: Kraftwirkung strömender Flüssigkeiten

### 4.3.3 Betriebsverhalten

Ein Hydraulikmotor braucht im Betrieb ein gewisses Druckniveau, vergleichbar mit der Grunddrehzahl einer Verbrennungskraftmaschine. Abbildung 4.30 zeigt ein Beispiel eines Anlaufmomentes in Abhängigkeit des Druckes anhand zweier Arten eines Axialkolbenmotors.



**Abb. 4.30:**  
 a - Schrägachsen,  
 b - Schrägscheiben  
 Anlaufdrehmoment [Mat08]



**Abb. 4.31:** Förderstrom einer Kolbenpumpe mit 6 Kolben [Mat08]

Da eine Pumpe häufig keinen konstanten Förderstrom liefert, entsteht ein zeitlich schwankender Volumenstrom, der je nach Beschaffenheit der Anlage und auch der Kompressibilität des verwendeten Öls zu Druckpulsationen führen kann. Die Druckpulsation wiederum kann Schwingungen erzeugen, die dann ausschlaggebend für Geräusche und auch Beschädigungen ist. In Abbildung 4.31 wird die Förderstrompulsation anhand einer Kolbenpumpe mit 6 Kolben über eine volle Umdrehung dargestellt. Auch bei Zahnradpumpen sind solche Pulsationen nicht auszuschließen.

Ein weiterer Einflussfaktor auf das Betriebsverhalten ist das Hydrauliköl mit mehreren Aspekten: [Mat08]

- Viskositätsverhalten – temperatur- und druckabhängige Zähigkeit der Flüssigkeit
- Dichteverhalten – ebenfalls temperatur- und druckabhängig
- Temperaturverhalten – Temperaturveränderungen beim Verdichten oder Expandieren
- Luftaufnahmevermögen – abhängig vom Druck können Gase wie z.B. Luft gelöst sein bzw. ungelöst in Blasenform vorliegen

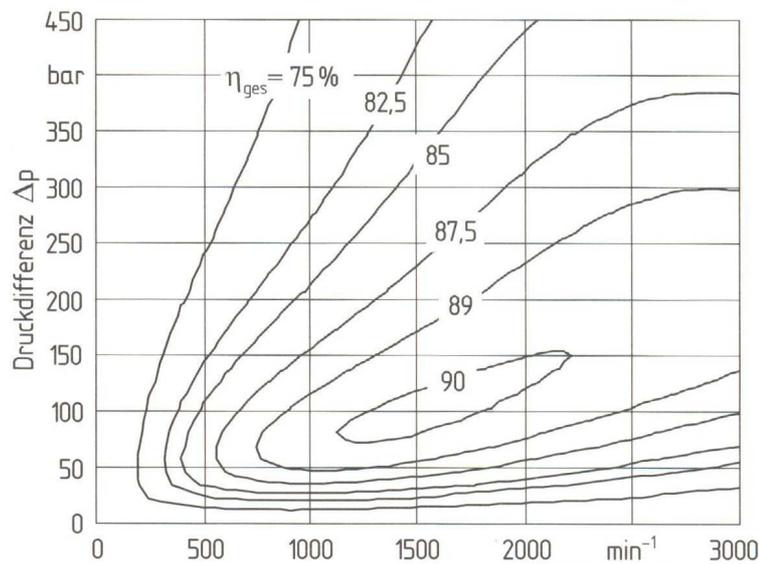
#### 4.3.4 Verluste

$$\eta_{ges} = \eta_{vol} \cdot \eta_{hm} \tag{4.13}$$

Der Wirkungsgrad teilt sich in einen volumetrischen und einen hydraulisch-mechanischen auf, siehe 4.13. Der volumetrische Wirkungsgrad  $\eta_{vol}$  berücksich-

tigt alle Leckölverluste (Ungenauigkeit der mechanischen Teile) und Kompressionsverluste (physikalische Eigenschaften des Öls, rund 1,2 % pro 200 Bar), der hydraulisch-mechanische Wirkungsgrad  $\eta_{hm}$  berücksichtigt jegliche Reibungsverluste und Strömungsverluste der Maschine und der Zuleitung. Diese Teilwirkungsgrade erlauben folgende Grundsätze: [Mat08]

- Drehzahlverluste beruhen auf Leckströmen ( $\eta_{vol}$ )
- Drehmomentverluste beruhen auf Reibung ( $\eta_{hm}$ )



**Abb. 4.32:** Muschelkurve einer Axialkolbenpumpe [Mat08]

Abbildung 4.32 zeigt das Kennlinienfeld einer Axialkolbenmaschine, die in sehr großer Stückzahl als Pumpe und Motor hergestellt wird.

## 4.4 Zusammenfassung

In diesem Punkt wird nun anhand der in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Antriebskonzepte eine Gegenüberstellung durchgeführt.

### 4.4.1 Übersicht der Antriebe

In der Tabelle 4.2 sind die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Antriebe, bzw die möglichen Antriebsarten in der Landtechnik, als Schnittstelle von der Zugmaschine, mit unterschiedlichen Bewertungskriterien angeführt.

Bewertungskriterium	Elektrisch	Mechanisch	Hydraulisch
Drehzahlbereich	sehr gut	gering	gut
Momentdichte	gut	gut	sehr gut
Leistungsgewicht bei hoher Drehzahl	sehr gut	gut	gering
Leistungsdichte bei hoher Drehzahl	sehr gut	gering	gut
Leistungsgewicht/-dichte bei kleiner Drehzahl	gering	gut	gut
Steuer- u. Regelbarkeit	sehr gut	gering	gut
Energieübertragung	sehr gut	gut	gut
Energiespeicherung	sehr gut	gut	gut
Konstruktive Gestaltung	sehr gut	gut	sehr gut
Wirkungsgrad	gut	sehr gut	gering
Kosten	teilweise hoch	hoch	gering

**Tab. 4.2:** Vergleich von elektrischen, mechanischen und hydraulischen Antrieben

Der **Drehzahlbereich** eines Elektromotors ist von Null bis über Zehntausend Touren als sehr gut zu bezeichnen. Die VKM benötigt eine Grunddrehzahl, das Maximum liegt aber auch relativ hoch. Die Zapfwelle eines Traktors, die hier mitunter verglichen werden muss, läuft quasi konstant. Bei der Hydraulik liegt das Maximum des Drehzahlbereichs niedriger, ist jedoch bis zum Stillstand regelbar.

Das **Moment** eines Elektromotors ist direkt proportional seiner Größe und im Vergleich zu hydraulische Antrieben, die ein sehr hohes Moment auf kleinem Raum haben, schlechter. [Mat08] Ein direkter Vergleich mit einer Zapfwelle würde auf den Durchmesser dieser deuten, der die maximale Momentübertragung gewährleistet. Vergleicht man die **Momentdichte** einer VKM mit rund 3 Nm/kg und eines Elektromotors mit rund 9 Nm/kg ergibt sich ein Faktor Drei. [Rem11] [Aut11]

Die Drehzahl eines Elektromotors ist in erster Näherung unabhängig dem Gewicht. Verwendete Getriebe bei hochdrehenden Maschinen sind bei Leistungsver-

gleichen zu berücksichtigen. Die **Leistungsgewichte** sind, bei den ausgewählten Beispielen [Aut11], [Poc11] und [Rem11], für die VKM bei knapp 1 kW/kg, für Elektromotoren bei 5,3 kW/kg und bei Hydraulikmotoren bei 0,3 kW/kg, wobei der erwähnte Elektromotor eine hohe Drehzahl hat.

Vergleicht man die **Leistungsdichte** der gewählten Beispiele, ändert sich das Bild etwas. Beim Hydraulikmotor sind es mit 4,5 kW/l [Poc11] etwas mehr als bei der VKM mit 1,5 kW/l [Aut11]. Der Elektromotor liegt drehzahlbedingt mit 16 kW/l an der Spitze, mit einer Überlastfähigkeit von kurzzeitig 27 kW/l [Rem11].

Bei **niedrigen Drehzahlen** sinkt das Leistungsgewicht bzw. die Leistungsdichte des Elektromotors unter jene von hydraulischen sowie mechanischen Antrieben, obwohl durch den Entfall des Getriebes Gewicht und Bauraum eingespart werden können. Beispielsweise hat ein langsamdrehender Radnabenmotor nur rund 0,4 kW/kg bzw. 1,2 kW/l [Dem11c].

Die **Regelung** einer VKM beziehungsweise einer Zapfwelle, unter Zuhilfenahme von Getrieben und Kupplungen, ist deutlich schwieriger als die Regelung elektrischer Maschinen. Mit modernen Umrichtern sind sowohl Moment als auch Drehzahl über den gesamten Betriebsbereich des Elektromotors beliebig zu regeln, von Null bis zum Maximalmoment/Maximaldrehzahl. Die Regelbarkeit von hydraulischen Maschinen ist mit Ventilen und Drosseln gut zu realisieren.

Die **Energieübertragung** ist beim Strom eindeutig besser, da hier keine Leckverluste im Vergleich zur Hydraulik auftreten können und das Gewicht sowie die Handhabung im Betrieb im Vergleich zu den beiden anderen leichter ist. Auch bei der Installation kann ein Elektrokabel leichter und schneller verlegt werden als Hydraulikkabel (Kupplungen, Biegeradius, ...) bzw. mechanische Wellen (Lager, Zahnräder, ...). Verluste in der Übertragung sind bei allen dreien in Form von Wärmeverlusten, Strömungsverlusten bzw. Reibungsverlusten vorhanden.

Die **Energiespeicherung** ist ein schwieriges Thema, da vor allem bei der Speicherung elektrischer Energie in Batterien oder Supercaps durch derzeitige Forschungen laufend Verbesserungen kommen. Um diese mit zB. Feder- oder Druckspeichern zu vergleichen, bedarf es umfangreicherer Untersuchungen. Es sei auf

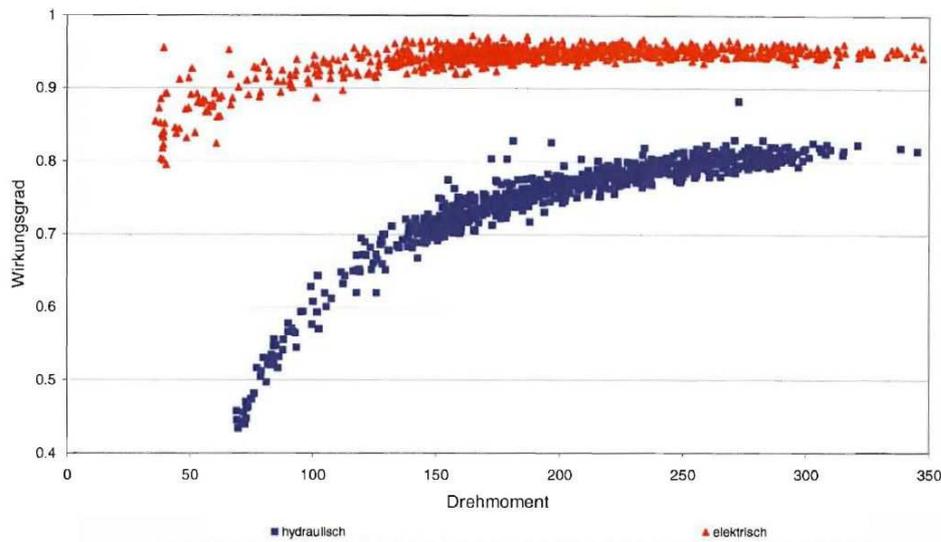
[Aum08] verwiesen.

Bei der **konstruktiven Gestaltungsmöglichkeit** sind bei einem Elektromotor und auch beim Hydraulikmotor sehr viele Ausführungen möglich. Hervorzuheben ist der Radnabenantrieb, wo der Motor direkt in der Felge sitzt. Bei der VKM sind die Möglichkeiten etwas eingeschränkt, eine Zapfwelle bietet durch Zahnräder und Kardanwellen doch einige Optionen, um Antriebsleistung zu Elementen in verwinkelten Ecken zu bringen - eine Stromleitung macht dies jedoch noch einfacher, wenn dann der Platz für einen Motor noch vorhanden ist.

Sehr schwierig ist die Beurteilung der Vor- und Nachteile bei den **Kosten** der Systeme. Einer teuren Anschaffung stehen effizientere Arbeitszeiten entgegen. Die Anschaffungskosten werden mit zunehmender Stückzahl sinken, vor allem, wenn die gleiche Elektromotor/Umrücker-Einheit für mehrere Geräte verbaut werden kann. Kosten für Zuleitungen der unterschiedlichen Systeme (Hydraulikkabel, Stromkabel, Kardanwellen, ...) sind weiters zu berücksichtigen. Es sei auf [Aum08] verwiesen.

Auch beim **Wirkungsgrad** sind Vergleiche sehr schwierig. Dass ein Elektromotor über größere Betriebsbereiche einen höheren Wirkungsgrad als eine VKM hat und die hydraulischen Antriebe dazwischen liegen, wurde in den vorherigen Kapiteln gezeigt. Betrachtet man zusätzlich die Energiespeicherung, ändert sich das Bild. Treibstoff zu tanken und zu entnehmen ist effizienter als das Speichern in einer Batterie, wo es zu erheblichen Verlusten beim Laden und Entladen kommt. Die VKM ist beim Traktor vorhanden, somit ist eine Vergleich zwischen Zapfwelle und der Übertragung mit einem elektrischen oder hydraulischen System aussagekräftiger. Abzweigungen und Getriebe mit Zahnrädern und Riemen sind der Nachteil der Zapfwelle und vermindern den Wirkungsgrad mit steigender Anzahl. Der Transport elektrischer Energie ist effizienter, jedoch muss diese erst mit Verlusten im Zapfwellengenerator erzeugt werden. Ein ähnliches Bild zeigt eine hydraulische Pumpe.

Für einen Wirkungsgradvergleich sei wiederum auf [Aum08] verwiesen. Einen Vergleich zwischen Elektro- und Hydraulikantrieb in der Landwirtschaft zeigt die Messung in Abbildung 4.33. Zu erkennen ist der Wirkungsgrad über das Drehmo-



**Abb. 4.33:** Vergleich der Wirkungsgrade von hydraulischen und elektrischen Antrieben [Hor07]

ment / Nm eines hydraulischem Antriebs (Pumpe und Hydraulikmotor) und eines elektrischem Antriebs (Generator und Elektromotor) von Vorsatz und Einzug eines Feldhäckslers. Dabei fällt vor allem im Teillastbereich durch die dynamischen Belastungen der Wirkungsgrad des hydraulischen Systems ab. [Hor07]

Aus der Tabelle 4.2 sind einige Vorteile des elektrischen Antriebes zu erkennen. Um jedoch eine objektive Betrachtung der Vorteile und auch der Nachteile zu erhalten, muss hier, wie bereits erwähnt, genauer auf den Verwendungszweck eingegangen werden. Nicht zu vergessen ist, dass die VKM bereits im Traktor vorhanden ist und mit der Zapfwelle eine bewährte Schnittstelle hat, auch wenn diese in den einzelnen Punkten schlechter abschneidet.

#### 4.4.2 Vor- und Nachteile elektrischer Antriebe in der Landtechnik

Der Einsatz von elektrischen Antrieben bei landwirtschaftlichen Geräten würde Vorteile, jedoch auch in einem gewissen Ausmaß Nachteile mit sich bringen.

##### 4.4.2.1 Vorteile

**variable Drehzahl-/Drehmomenteneinstellung:** Die Änderung der Drehzahl bzw. des Drehmoments kann bei elektrischen Antrieben sehr einfach und mit hoher Genauigkeit vorgenommen werden, da hier keine Kopplung mit der

Drehzahl des Verbrennungsmotors vorliegt. Diese Verstellmöglichkeit kann in weiterer Folge für eine bessere und effizientere Bearbeitung verwendet werden.

**einfache Systemintegration:** Durch die Verbindung der Arbeitsgeräte mit der Zugmaschine können die Parameter wie Drehzahl, Drehmoment und Lage der Antriebe in der Zugmaschine auf Displays dargestellt und auf einfache Weise verändert werden.

**besserer Wirkungsgrad:** Elektromotoren besitzen einen sehr guten Wirkungsgrad von über 90 %, der in einem weiten Drehzahl- und Lastbereich erreicht wird. Daraus resultiert ein reduzierter Kraftstoffverbrauch der Zugmaschine.

**keine Mindestdrehzahl:** Der Elektromotor stellt bereits bei Drehzahl Null das volle Moment zur Verfügung, im Vergleich zu den Dieselmotoren ist dort eine gewisse Mindestdrehzahl nötig.

**saubere Energieübertragung/Verteilung:** Die Versorgung der Antriebe mit elektrischer Energie erfolgt über Leitungen, die nicht gewartet werden müssen. Es ist kein Abschmieren der Zapfwelle oder Gelenke nötig. Lediglich die Steckverbindungen sind bei Bedarf zu reinigen.

**kurzzeitige Überlast des Antriebs:** Der Antrieb kann für eine kurze Zeit bis zum Vielfachen seines Nennstromes belastet werden.

**Energiesparen:** Durch leichtes Abschalten nicht benutzter Antriebe an einem Anbaugerät kann Energie eingespart werden.

**Diagnose:** Die Elektronik bietet ausgezeichnete systemintegrierte Diagnosemöglichkeiten im Betrieb so wie bei Störungen.

**Wartung:** Elektrische Antriebe sind für die Einsatzdauer als wartungsfrei konstruierbar. Übrige Wartung beinhaltet noch die Reinigung bestimmter Teile der Kühlung.

#### 4.4.2.2 Nachteile

**schlechteres Leistungsgewicht:** Bei der Verwendung von Antrieben für niedrige Drehzahlen müssen die Motoren größer ausgeführt werden oder ein Getriebe muss eingesetzt werden. Der Entfall der Komponenten einer mechanischen Kraftübertragung ist zu berücksichtigen.

**schlechtere Leistungsdichte:** Das Bauvolumen der elektrischen Antriebe ist im Vergleich zu hydraulischen Antrieben um den Faktor 3 – 4 schlechter. Dieser Nachteil kann jedoch mittels konstruktiven Maßnahmen, wie z. B. Einbau des Elektromotors als Radnabenantrieb, und dadurch direkte Kopplung ohne Getriebe, minimiert werden.

**Elektronik:** Die benötigte Elektronik führt zu einer erhöhten Fehleranfälligkeit durch mechanische Belastung. Bei der Behebung von Störungen ist man auf externe Hilfe angewiesen, bei mechanischen Antrieben kann der Fehler teilweise vom Landwirt selbst eruiert und zumindest provisorisch behoben werden.

**höhere Anschaffungskosten:** Vorerst ist der Einsatz von Elektromotoren in der Landwirtschaft mit höheren Kosten verbunden. Dieser Nachteil wird jedoch mit der steigenden Produktion und höheren Stückzahlen kompensiert. Dem gegenüber stehen Kosteneinsparungen durch effizienteres Arbeiten.

## 5 Rechtlicher Rahmen

### 5.1 Einleitung

Der rechtliche Rahmen wird durch Normen, Gesetze und Richtlinien festgelegt. Normen sind nicht verpflichtend zu erfüllen, Richtlinien jedoch sehr wohl. Die Richtlinien und Gesetzestexte beziehen sich wiederum auf Normen, die dadurch verpflichtend werden. Normen zu erfüllen, auch ohne Verpflichtung, bietet einige Vorteile: [HGH11]

- Effizienzsteigerung durch Kosteneinsparung
- Verbesserung der Produktsicherheit
- Senkung des Produkthaftungsrisikos
- Erleichterter Marktzugang
- Vertrauen gegenüber dem Kunden
- Vereinfachung von Auftragsverhandlungen

Es folgt eine Auflistung der Normen und Regeln, die für den Bau, Betrieb und die Wartung von elektrischen betriebenen landwirtschaftlichen Geräten bzw. deren Komponenten wichtig sind. Diese inkludiert einen Querverweis der einzelnen Normen zu den unterschiedlichen relevanten Fachgebieten in der Landtechnik. Zuvor eine kleine Übersicht über die erwähnten Normungsinstitutionen sowie allgemeine Informationen zu einer Norm. Grundlage dieser Auflistung sind:

- Gespräche mit Industriepartnern des FFT-Projekts
- Gespräche mit Normungsexperten von oe<sup>6</sup> sowie von SVB<sup>7</sup>
- Vergleiche zu Normen bezüglich elektrisch angetriebener Straßenfahrzeuge (ONR 225007)

### 5.2 Begriffserklärung

#### 5.2.1 Normungsinstitutionen

Normen und Standards werden in den jeweiligen Institutionen festgelegt. Die Institutionen sind für unterschiedliche Fachgebiete zuständig und haben nationalen sowie internationalen Einfluss. Eine Institution besteht wiederum aus mehreren

---

<sup>6</sup>oe - oesterreichs energie, Nachfolger vom Verband der Elektrizitätsunternehmen Österreichs (VEÖ)

<sup>7</sup>SVB - Sozialversicherungsanstalt der Bauern

Untergruppen und weiteren Einteilungen. Eine solche Gruppe, bestehend aus mehreren Personen, ist dann für eine Norm zuständig. Die einzelnen Personen sind aus verschiedenen Unternehmen und Organisationen zusammengestellt und arbeiten freiwillig mit. Dadurch entstehen einige Wettbewerbsvorteile: [HGH11]

- Einbringung eigener Interessen
- Wissensvorsprung
- Informationsaustausch mit anderen Interessenten
- Beobachtung der Wettbewerber

Eine Übersicht zu den Abkürzungen der Normungsinstitutionen:

#### International

ISO	International Organization for Standardization Internationale Organisation für Normung
IEC	International Electrotechnical Commission Internationale Elektrotechnische Kommission
ITU	International Telecommunication Union Internationale Fernmeldeunion

#### International - Europäische Ebene

RL	EU-Richtlinien und Direktiven Richtlinien für die innerstaatliche Rechtsumsetzung
EN	European Norm Europäische Norm
CEN	Comité Européen de Normalisation Europäisches Komitee für Normungen
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique Europäisches Komitee für elektrotechnische Normungen
ETSI	European Telecommunications Standards Institute Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen

#### National - deutschsprachig

ASI	Austrian Standards Institute (vormals ÖNORM) Österreichische Organisation für die Normung
OVE	Österreichischer Verband der Elektrotechnik Österr. Organisation für die elektrotechnische Normung

DIN	Deutsches Institut für Normung e. V. Deutsche Organisation für die Normung
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik Deutsche Organisation für die elektrotechnische Normung
SNV	Schweizer Normen-Vereinigung Schweizer Organisation für die Normung
SEV	Schweizerische Elektrotechnischer Verein – Electrosuisse Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
National	
AFNOR	Association Française de Normalisation Französisches Normungsinstitut
BSI	British Standards Institution Englisches Normungsinstitut
ANSI	American National Standards Institute US-amerikanisches Normungsinstitut
NFPA	National Fire Protection Association Gesellschaft für Feuer-, Elektro- und Gebäudesicherheit, US-amerikanischer Raum
Fachspezifisch	
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe Transport Division - Regulations Rxxx Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen
SAE	Society of Automotive Engineers Verband der Automobilingenieure
AEF	Agricultural Industry Electronics Foundation Internationale Branchenorganisation

### 5.2.2 Normenstatus

Der Normungsprozess beginnt mit einem Normungsantrag, der von jedem gestellt werden kann. Der Antrag wird der jeweiligen Untergruppe zugeordnet, die dann einen Entwurf erarbeitet. Zu diesem Entwurf kann jeder eine Stellungnahme abgeben. Nach einer Beratung der Normungsgruppe zu den Stellungnahmen wird der Entwurf bei Bedarf überarbeitet. Schlussendlich wird eine endgültige Fassung der Norm verabschiedet.

Je nach Status der Norm gibt es zugehörige Akronyme. Diese sind mitunter bei der Normenbezeichnung gelistet: [ISO12]

PWI	Preliminary Work Item
NP bzw. NWIP	New Proposal / New Work Item Proposal
AWI	Approved new Work Item
WD	Working Draft
CD	Committee Draft
FCD	Final Committee Draft
DIS	Draft International Standard
FDIS	Final Draft International Standard
PRF	Proof of a new International Standard
IS	International Standard

Neben diesen Status gibt es auch die „state codes“ der ISO, die einen genaueren Ablauf der Norm und deren derzeitigen Status angeben, siehe Abbildung 5.1.

### 5.2.3 Sonstige Abkürzungen

Es gibt noch einige andere Abkürzungen, mögliche relevante sind hier kurz erwähnt: [ISO11b]

TR	Technical Report
TC	Technical Committee
SC	Sub Committee
WG	Working Group
JTC	Joint ISO/IEC Technical Committee

Zum Beispiel „CEN/TC 144“, ist das Technische Komitee des Europäischen Komitees zur Normung Nummer 144 - „Tractors and machinery for agriculture and forestry“. Bei der Internationalen Normungsorganisation für Normen ist dies ISO/TC 23.

STAGE	SUBSTAGE						
	00 Registration	20 Start of main action	60 Completion of main action	90 Decision Substages			
				92 Repeat an earlier phase	93 Repeat current phase	98 Abandon	99 Proceed
00 Preliminary stage	00.00 Proposal for new project received	00.20 Proposal for new project under review	00.60 Close of review			00.98 Proposal for new project abandoned	00.99 Approval to ballot proposal for new project
10 Proposal stage	10.00 Proposal for new project registered	10.20 New project ballot initiated	10.60 Close of voting	10.92 Proposal returned to submitter for further definition		10.98 New project rejected	10.99 New project approved
20 Preparatory stage	20.00 New project registered in TC/SC work programme	20.20 Working draft (WD) study initiated	20.60 Close of comment period			20.98 Project deleted	20.99 WD approved for registration as CD
30 Committee stage	30.00 Committee draft (CD) registered	30.20 CD study/ballot initiated	30.60 Close of voting/ comment period	30.92 CD referred back to Working Group		30.98 Project deleted	30.99 CD approved for registration as DIS
40 Enquiry stage	40.00 DIS registered	40.20 DIS ballot initiated: 5 <i>months</i>	40.60 Close of voting	40.92 Full report circulated: DIS referred back to TC or SC	40.93 Full report circulated: decision for new DIS ballot	40.98 Project deleted	40.99 Full report circulated: DIS approved for registration as FDIS
50 Approval stage	50.00 FDIS registered for formal approval	50.20 FDIS ballot initiated: 2 <i>months</i> . Proof sent to secretariat	50.60 Close of voting. Proof returned by secretariat	50.92 FDIS referred back to TC or SC		50.98 Project deleted	50.99 FDIS approved for publication
60 Publication stage	60.00 International Standard under publication		60.60 International Standard published				
90 Review stage		90.20 International Standard under periodical review	90.60 Close of review	90.92 International Standard to be revised	90.93 International Standard confirmed		90.99 Withdrawal of International Standard proposed by TC or SC
95 Withdrawal stage		95.20 Withdrawal ballot initiated	95.60 Close of voting	95.92 Decision not to withdraw International Standard			95.99 Withdrawal of International Standard

Abb. 5.1: „International Harmonized Stage Codes“ laut ISO [ISO11a]

### 5.3 Liste relevanter Normen in der elektrifizierten Landtechnik

Es folgt eine Auflistung der Normen mit Querverweisen zu möglichen Arbeitsbereichen. Diese Querverweise sind in zwei Varianten ausgeführt:

- ... hohe Relevanz
- ... niedrige Relevanz

Die Einteilung erfolgt in *maschinenbauliche Aspekte*, wie Fahrzeug und Antriebseinheit, bzw. (elektrische) Maschine, in den Faktor *Sicherheit* (für Personen sowie die Maschine selbst), in drei Gebiete der *Elektrotechnik*, drei Gebiete verschiedener *Emissionen* und die Faktoren *Schnittstelle* mit Kommunikation sowie Kabel und Stecker als Hardwareschnittstelle.

Es ist darauf acht zu geben, dass es sich bei Normen mit den Titel „Niederspannung“ um Spannungen bis um die 1000 V handelt, und somit in den Bereich Leistungselektronik fallen. Die Relevanz der Querverweise bezüglich dem Punkt Batterie wurden mit Bedacht gewählt, da es in erster Linie keine reinen batteriebetriebenen elektrischen Landmaschinen geben wird, und dies deshalb nicht sehr wichtig ist.

Norm	Gebiete										Beschreibung		
	M.bau	Sicherh.	Elektrik			Emission			Schn.st.				
	Fahrzeug	Antrieb/Maschine	Personenschutz	Betriebssicherheit	Leistungselektronik	Steuerelektronik	Batterie	EMV	Abgase	Lärm	Kabel & Stecker	Kommunikation	
AEF											•	◦	HV-Kupplung
R 100	•		•										EV <sup>8</sup> Sicherheit
RL 32	◦	•											Öko-RL (alt)
RL 37	•		•										Traktorrichtlinie
RL 42		•											Maschinenrichtlinie
RL 83								•					EMV <sup>9</sup> im Fahrzeug

<sup>8</sup>EV ... Electric Vehicle, Elektrofahrzeuge

<sup>9</sup>EMV ... Elektromagnetische Verträglichkeit

Fortsetzung...

	Fahrzeug	Antrieb	Personenschutz	Betriebssicherheit	Leistungselektronik	Steuerelektronik	Batterie	EMV	Abgase	Lärm	Kabel & Stecker	Kommunikation
RL 95					•							Niederspannungsr.
RL 108								•				EMV Richtlinie
RL 125	◦	•										Öko-RL (neu)
SAE J551								◦				EV EMV
EN 953		◦	•	•	•	◦						Schutztrenner
EN 1037	◦	•	◦	◦								Anlaufschutz
EN 1088			◦	◦	◦							Verriegelung
SAE J1113								◦				EMV Messung
EN 1175	◦		•	•	◦		◦					Trucks
EN 1821	◦											Fahreigenschaften
EN 1986	◦											Energieausnutzung
EN 1987	◦		•	◦			◦					EV Sicherheit
SAE J2344	◦		◦	◦								EV Safety
ISO 4141											•	Mehrfachkabel
EN 4254	◦		•	•								LM <sup>10</sup> Sicherheit
ISO 6469	◦		•	◦			◦					EV Sicherheit
ISO 6722											•	Einzelkabel
ISO 7637	◦							◦				Versorgungsstörung
ÖN 8001			•									elektr. Anlage
ÖN 8385	◦		•									landw. Anlagen
ISO 8713	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	EV Begriffe
ISO 8714	◦	◦			◦							Energieausnutzung
ISO 8715	◦											Fahreigenschaften
ÖN 9801	•											LM und Anbaug.
ISO 10605			◦	◦								ESD <sup>11</sup> -Tests
ISO 10924	•		◦	◦								Bremsen
ISO 11451	◦	◦						•				Fahrzeug-EMV
ISO 11452		◦			◦	◦		•				Komponenten-EMV
ISO 11783												• Isobus
ISO 11955						◦	•					Batterie Balancer
EN 12100		◦	•	•								Maschinensicherheit
EN 12405			◦	◦	◦		•					LiIon-Batterie

<sup>10</sup>LM ... Landmaschinen

<sup>11</sup>ESD ... Electrostatic Discharge, elektrostatische Entladung

Fortsetzung...

	Fahrzeug	Antrieb	Personenschutz	Betriebssicherheit	Leistungselektronik	Steuerelektronik	Batterie	EMV	Abgase	Lärm	Kabel & Stecker	Kommunikation
EN 12736					◦	◦				•		Schallemission
EN 13444									◦			Hybrid-Abgase
EN 13447	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	Terminologie
EN 13849				•		◦						Maschinensicherheit
EN 14121		◦	•	•								Maschinensicherheit
ISO 14572	◦										•	Kabeltest
ISO 14982	◦							•				Traktor-EMV
ISO 15118												• Kommunikation
EN 15811	◦		•	•								LM-Sicherheit
ISO 16553												• Datenkabel
ISO 16750	◦					◦						Elektriktest
ISO 20653			◦	◦								IP-Code
ISO 23273			◦									Elektroschock
ISO 23274									◦			Verbrauch, Abgase
ISO 26262	◦		•	•	◦	◦						
DIN 40050	◦		•	•								IP-Code Fahrzeuge
EN 50065			◦	◦								◦ Kabelfunk
EN 50102			◦	◦								IK-Code
EN 50110	◦		•	◦								elektr. Anlagen
EN 50126	◦	◦	◦	◦								RAMS
EN 50160				•	◦	◦						Netzqualität
EN 50272							•					Batterie
EN 55011								◦				Funk-Entstörung
EN 55012								◦				Funkstöreigensch.
EN 55016								◦				Störfestigkeit
EN 55022								◦				◦ Funk-Entstörung
IEC 60034		•		◦	◦					◦		rotierende EM <sup>12</sup>
IEC 60085				◦							•	
EN 60204		•	•	•								Maschinensicherheit
EN 60309											•	Steckerfarben
EN 60331	◦		•									landw. Geräte
EN 60335	◦		•									Hausgebrauchsgeräte
IEC 60349	◦	•			◦							rot. EM für EV

<sup>12</sup>EM ... Elektrische Maschine

Fortsetzung...

	Fahrzeug	Antrieb	Personenschutz	Betriebssicherheit	Leistungselektronik	Steuerelektronik	Batterie	EMV	Abgase	Lärm	Kabel & Stecker	Kommunikation
IEC 60364			•		◦	◦						Installation
EN 60464				◦	•							Elektroisolierlacke
EN 60529			•	•								IP-Code
EN 60664				◦	•	◦					◦	Isolation
IEC 60783											•	EV Kabel & Stecker
IEC 60784												◦ EV Instrumente
IEC 60785	◦	◦										EV Maschinen
IEC 60786		◦			•	◦						EV Regler
IEC 60870								◦				◦ EMV Komm.
EN 60947		◦	•	•	•	◦						Schaltgeräte
EN 61000								•				EMV
EN 61140			•	◦	◦	◦					◦	Schutzklassen
IEC 61204								◦				DC EMV
IEC 61508			•	•	◦	•						funkt. Sicherheit
IEC 61511			◦	◦								funkt. Sicherheit
EN 61557			◦	◦								Testgeräte
EN 61851	◦				◦							◦ Ladesystem
EN 61982							•					Zweitbatterie
IEC 62040								◦				USV <sup>13</sup>
IEC 62061			◦	•	◦	•						Maschinensicherheit
EN 62196					◦						•	Ladestecker
IEC 62262			•	•								IK-Code
EN 62281			◦	◦			◦					LiIon-Sicherheit
EN 62485							•					Zweitbatterie
EN 62620							•					Batterie
EN 62660							•					Zweitbatterie
ONR 225007	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦	◦ Übersicht

Eine genauere Beschreibung der jeweiligen Norm und deren Teilen ist in Anhang A zu finden.

<sup>13</sup>USV ... Unterbrechungsfreie Stromversorgung

## 6 Aus Sicht der Industrie

### Umfrageergebnisse

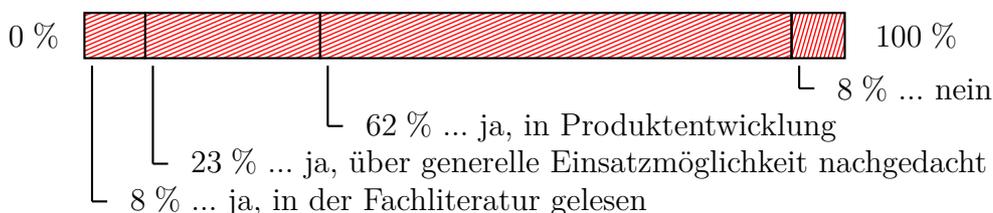
Um die derzeitige Situation der elektrischen Antriebe aus der Sicht der Landtechnikhersteller zu erfassen, wurde im Zuge des FFT-Projekts eine Umfrage gestartet, die an die österreichischen Klein- und Mittelbetriebe im Landtechniksektor gerichtet war und auf der AgEng2012 [Kar12a] sowie auf der Land.TECHNIK 2012 [Kar12b] präsentiert wurden. Der Fragebogen ist in Anhang B einzusehen, im Folgenden ist die Auswertung der wichtigsten elektrotechnischen Fragen angegeben. Die Umfrage wurde im Zeitraum von Jänner bis September 2011 mit 15 teilnehmenden Firmen aus Österreich durchgeführt. In Deutschland wurde zur gleichen Zeit ebenfalls eine vergleichbare Umfrage durchgeführt ([Moe11]), von März bis April 2011 mit 18 Teilnehmern. Vergleichbare Ergebnisse werden kurz, in Themenbereiche gegliedert, gelistet. Die Fragen sind mit der Nummer in der jeweiligen Quelle versehen und die Auswertung in zwei Farben (rot - Österreich, blau - Deutschland) ausgeführt.

#### Allgemeiner Teil

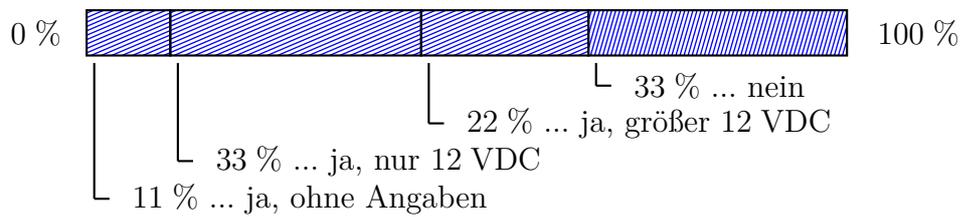
Von 24 kontaktierten Firmen wurden 15 Befragungen erfolgreich durchgeführt, davon drei durch reinen Schriftverkehr und 12 durch ein persönliches Treffen. Die berufliche Position der Interviewpartner war wie folgt verteilt (#3.1.1):



Zur Frage, ob man sich schon mit elektrischen Antrieben beschäftigt hat (#3.1.2a):

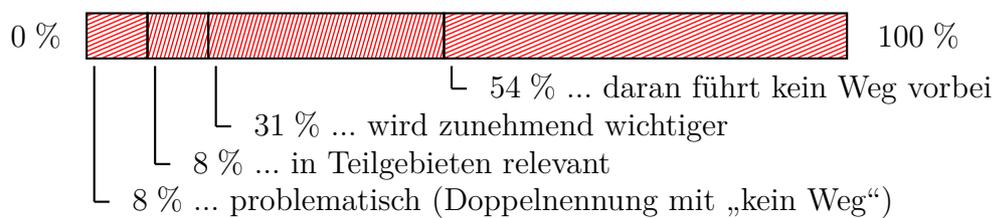


Im Vergleich zu Deutschland haben sich dort ca. dreimal so viele noch nicht mit elektrischen Antrieben auseinandergesetzt. Auf die vergleichbare Frage, ob man schon Erfahrung gesammelt hat ([Moe11]#1.1):

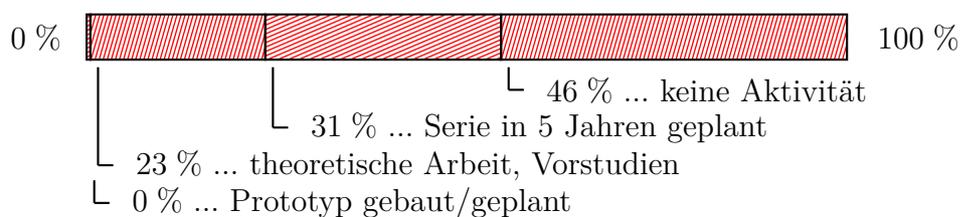


### Erwartungshaltung, Tendenz und Motivation

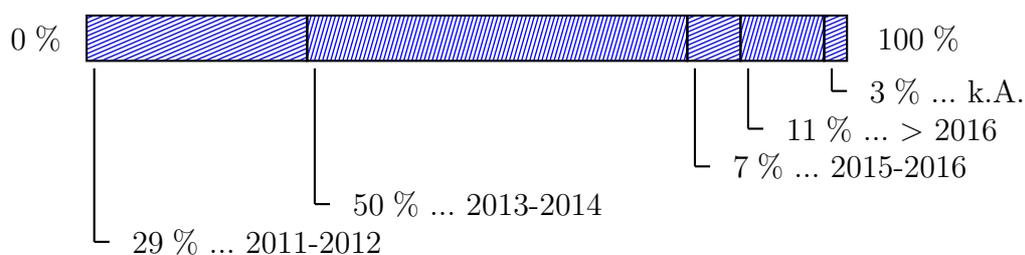
Die Hersteller aus ihrer Sicht zum grundsätzlichen Einsatz von Elektrotechnik in Landmaschinen (#3.1.2b):



Knapp ein Drittel der Befragten wolle bereits in fünf Jahren in Serie gehen, wenn auch noch kein Prototyp existiert (#3.1.2h):

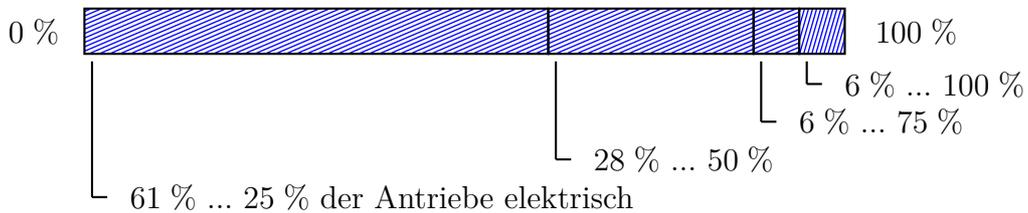


In Deutschland wurde nach dem Erscheinen des ersten Prototyps gefragt: ([Moe11]#2.19, Frühjahr 2011)



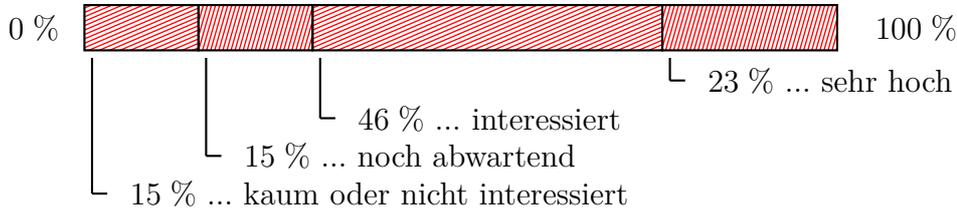
Davon, dass sich elektrische Antriebe nur bei manchen und nicht allen Maschi-

nen durchsetzen werden, sind alle Teilnehmer gleichermaßen überzeugt (#3.1.2c). In Deutschland ergibt sich ein ähnliches Bild auf die Frage nach dem geschätzten Anteil der Elektrifizierung der landwirtschaftlichen Geräte ([Moe11]#1.2):

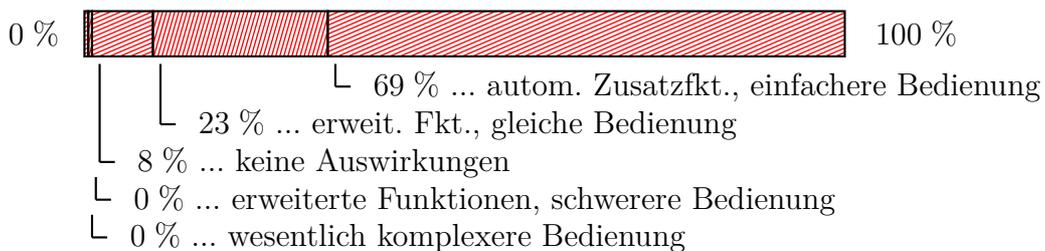


Vor allem das Potential, die derzeitigen hydraulischen und variablen mechanischen Antriebe durch elektrische ersetzen zu können, wird in Deutschland mit 90 % oder mehr angegeben ([Moe11]#2.2).

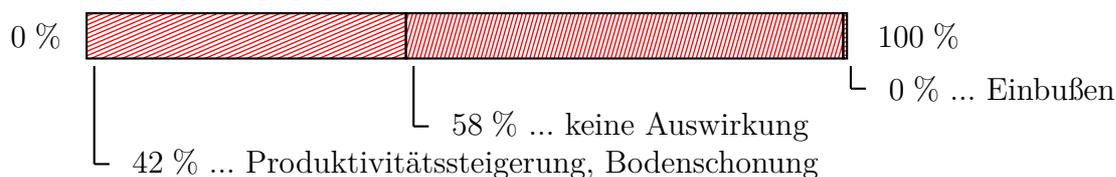
Das Eigeninteresse der österreichischen Firmen an zukünftigen Entwicklungen wird wie folgt eingestuft (#3.1.2d):



Mögliche Mehrkosten einer Elektrifizierung wird der Kunde nur dann tragen wenn der Mehrwert steigt, hier wird zum einen die Bedieneigenschaft beurteilt (#3.1.2f):



Zum anderen die Produktfunktionalität (#3.1.2.g):



Unter weiteren Gründen, die für eine Einführung sprechen, wurde unter anderem folgende Eigenschaften genannt (#3.1.2e): Regel-/Steuerbarkeit, Drehzahl/-Moment Messung, Diagnosemöglichkeit, leichtere Verteilung der Antriebe, Abgasnorm, Effizienz, Überlast, Bedienung, einfache Funktionserweiterung, kurze Zykluszeiten, geringe Lautstärke.

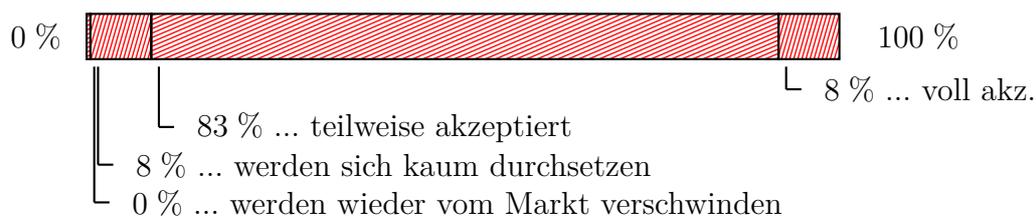
Bei den Nachteilen findet sich: Gewicht, Volumen, Kühlung, Kosten, keine Standards, Verschmutzung, Energiebereitstellung, Robustheit, Sicherheit, Schnittstellenprobleme, Entwicklungsaufwand (vor allem für kleine Unternehmen).

Vergleichsweise sagten in Deutschland rund 57 % der Umfrageteilnehmer, dass sich neue Funktionen ergeben beziehungsweise 71 %, dass sich auch Vorteile mehrerer voneinander drehzahlunabhängiger Antriebe ergeben, [Moe11] #2.14 und 2.15. Als Beispiele für neue Funktionen werden Automatisierung, Einsatz einer Triebachse, Satellitenunterstützung sowie gesteuerte variable Drehzahlen (z.B. abhängig vom Erntedurchsatz) genannt.

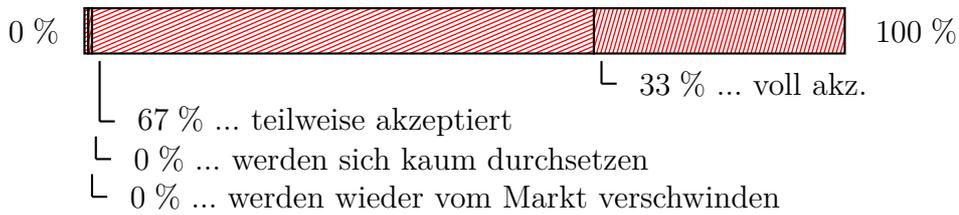
Welche neuen Funktionen sich ergeben und wohin der Trend in den nächsten 10 Jahren geht, wurde unter den österreichischen Herstellern gefragt und mit folgenden Stichworten beantwortet (#3.1.2e): Stufenlose Fahr- und Nebenantriebe, fortschreitende Automatisierung und Regelbarkeit, Generator für Geräte (Lüfter, Hydraulikpumpe, Klimaanlage, ...) bzw. für Steckdosen, Bodenschonung, weniger Zugkraftbedarf sowie auch eine einfachere Bedienung.

### Kundenakzeptanz

Es folgen Fragen an die Firmen über ihre Kunden, ob Elektroantriebe (>12V) bereits jetzt akzeptiert werden (#3.1.3.a):



Und ob Elektroantriebe (>12V) zukünftig akzeptiert werden (#3.1.3.b):



Dies lässt eine positive Entwicklung aus Sicht eines Elektrotechnikers erwarten, jedoch werden Elektroantriebe zu zwei Drittel nur teilweise akzeptiert, als Vorbehalte werden vor allem folgende Punkte genannt (#3.1.3c.): Nicht vertraut mit Elektrizität bzw. kein Fachwissen, eigene Reparatur/Wartung schwer, Sicherheitsbedenken, Zuverlässigkeit.

Dem entgegen folgt die Frage, was denn den Kunden erwartet (#3.1.3.d): Mehr Komfort durch automatische Abläufe, Fehlerdiagnose, Fernwartung und Selbstkonfigurationen, höhere Effizienz, leichte Bedienung, weniger Verschleiß, robuster und mehr Sicherheit.

Der Aspekt der Sicherheit wurde bei beiden Fragen erwähnt. Vermutlich denkt man, dass die Sicherheit gegenüber mechanischen Schäden steigt, jedoch Sicherheitsrisiken aufgrund von Elektrik hinzukommen.

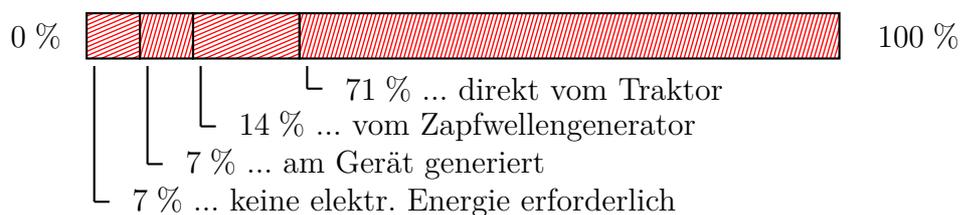
### Technische Voraussetzungen

Es folgten technisch bezogene Fragen wie der Wunsch nach der Drehzahlunabhängigkeit der Zapfwelle, mit einer recht eindeutigen Antwort (#3.2.a):

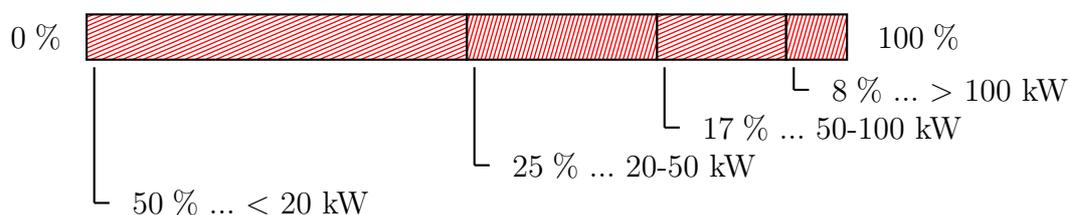


Auch in Deutschland sind auf 75 % der Geräte Antriebe mit unterschiedlicher Drehzahl bzw. Drehmoment verbaut ([Moe11]#2.3). Rund ein Viertel hat zwei Antriebe, ein weiteres Viertel drei oder vier Antriebe, ein weiteres Viertel mehr als fünf Antriebe. Knapp ein Fünftel hat keinen oder nur einen. ([Moe11]#2.4).

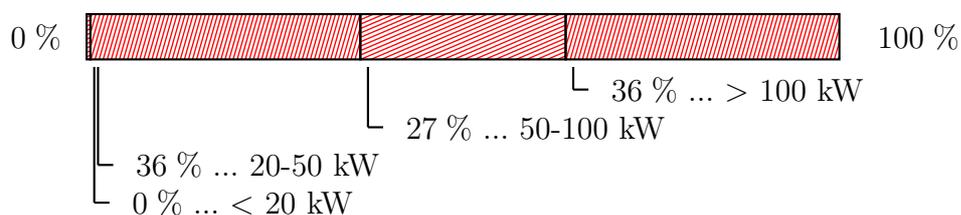
Auf die Frage woher die elektrische Leistung kommen soll, ist die Mehrheit für die Erzeugung am Traktor (#3.2.b):



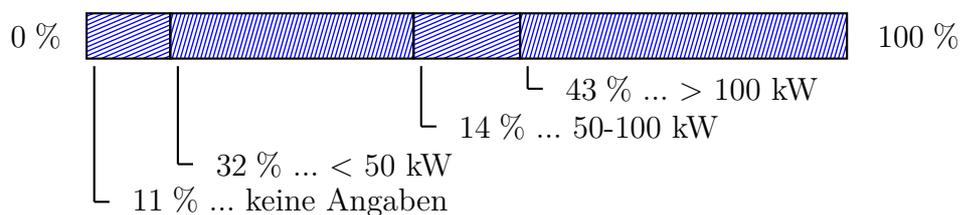
Auf die Frage wie hoch diese sein soll, erwarten sich die österreichischen Landmaschinenhersteller demnächst folgende Leistung (#3.2.c1):



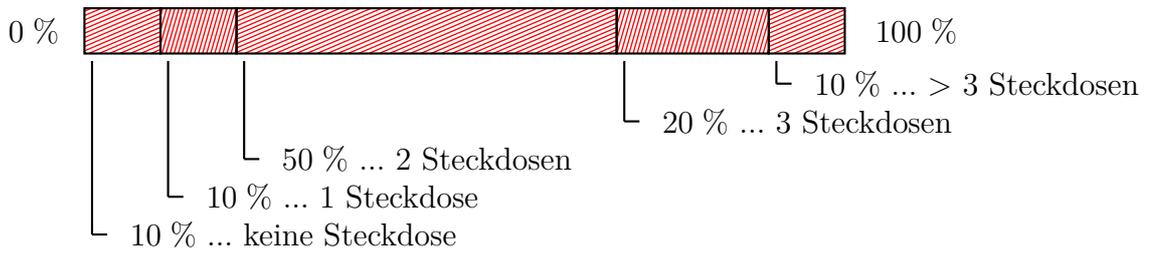
Mittelfristig ändert sich das Bild zugunsten höherer Leistungen (#3.2.c2):



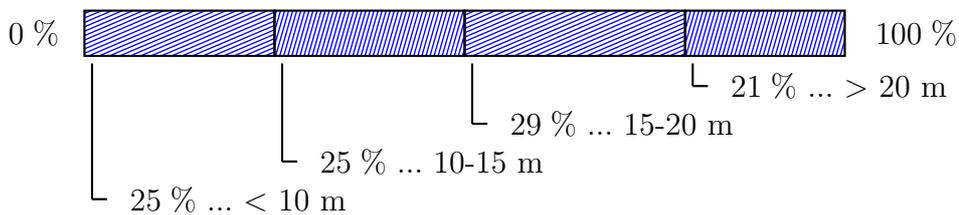
In Deutschland zeigt sich ein sehr ähnliches Bild, mit einem leichten Hang zu noch höherer Leistung ([Moe11]#2.10):



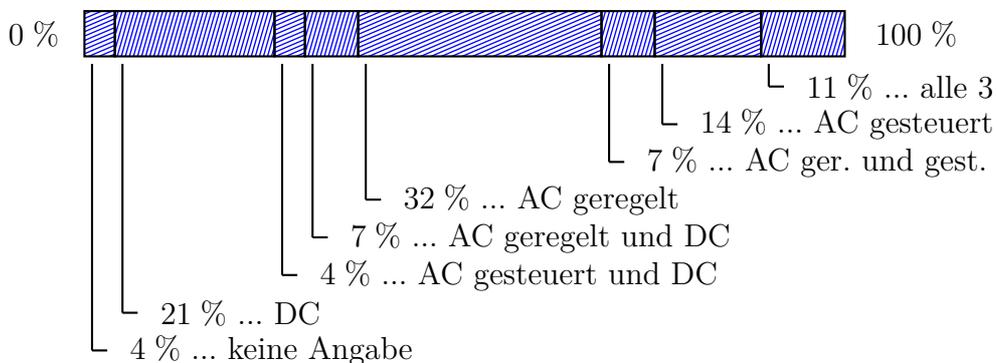
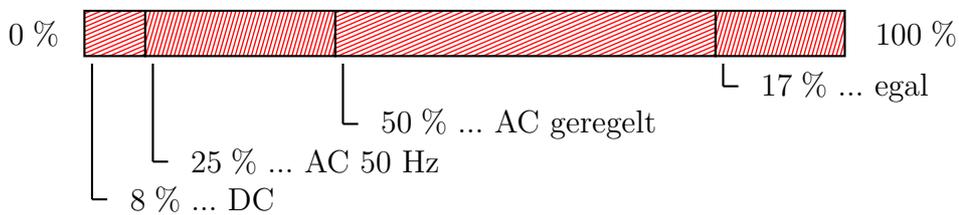
Die Österreicher wurden nach der gewünschten Anzahl der Steckdosen befragt (#3.2.d):



Die Deutschen wurden nach der gewünschten Kabellänge befragt ([Moe11]#2.9):

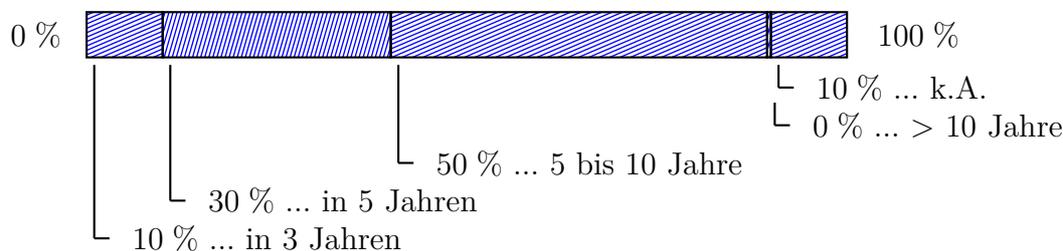


Sowohl bei der österreichischen als auch bei der deutschen Umfrage, wurde die Frage nach der Art der bereitgestellten elektrischen Leistung gefragt (#3.2.e bzw. [Moe11]#2.11), die Aussagen sind nicht zuletzt wegen der Antwortmöglichkeiten etwas unterschiedlich:



Eine Schlussfolgerung aus diesem direkten Vergleich: Die deutschen Hersteller legen mehr Wert auf Gleichspannung, im Vergleich zu den österreichischen Kollegen.

Gefragt wurde auch, wann diese Leistung von den Traktorherstellern zur Verfügung steht? (#3.2.f)



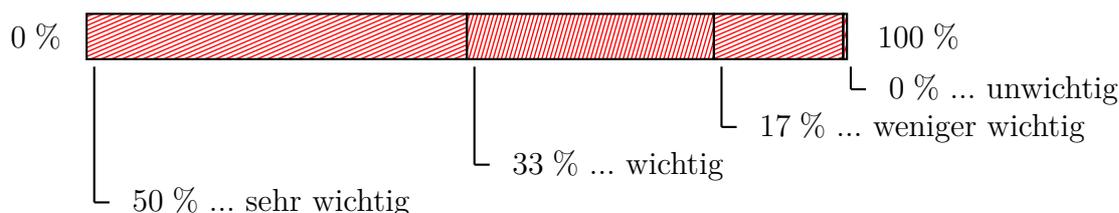
In spätestens 10 Jahren also sollten alle Voraussetzungen für die Einführung von E-Antrieben erfüllt werden, diese sind (#3.2.g): Schnittstellen wie Kühlung, Stecker und Kommunikation (Isobus), Spannungsart, Systemarchitektur, Sicherheit und Normung.

Als weitere Rahmenbedingungen werden genannt (#3.2.h): Werkstattinfrastruktur, Mitarbeiterqualifikation, Ausbildung, Erfahrung mit Elektrizität, Montage, Kunden- und Händlerschulung.

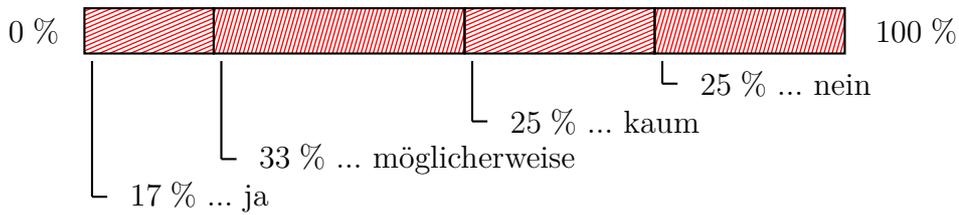
Der Isobus wird für die Kommunikation zwischen Traktor und Anbaugerät bzw. dessen elektrische Antriebe genutzt werden, beziehungsweise ist bereits in Verwendung. Hier antworteten die deutschen Hersteller auf die Frage, ob sie bereits Erfahrung mit dieser Technologie haben, zu 89 % mit ja ([Moe11]#1.4).

## Wirtschaftliche Auswirkungen

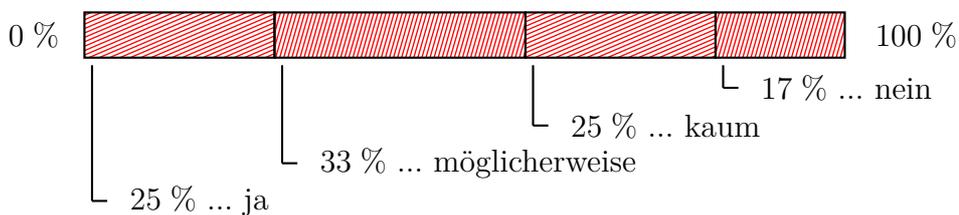
Die Fragen zur wirtschaftlichen Auswirkung seien hier kurz aufgelistet: Ist die Technologieführerschaft wirtschaftlich wichtig? (#3.3.a)



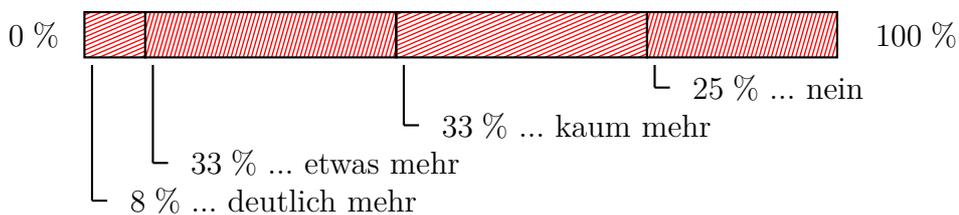
Können durch Elektroantriebe die Produktionskosten gesenkt werden? (#3.3.b)



Gibt es Potential zur Steigerung der Umsätze durch Einsatz von Elektroantrieben? (#3.3.d)



Werden mehr Reklamationen erwartet? (#3.3.e)



Man erwartet sich also eine Umsatzsteigerung und eine Steigerung der Produktionskosten. Auch die Reklamationen werden etwas ansteigen. Die Technologieführerschaft ist jedoch für fast allen Firmen wichtig, somit wird das wohl in Kauf genommen. Argumente für den Verkauf von Elektroantrieben gibt es unterschiedliche (#3.3.f), sind aber ähnlich zu den vermuteten Erwartungen der Kunden (siehe #3.1.3.d): Automatisierung, Effizienz, Funktionsverbesserung, Sicherheit, Bedienung und Leistungssteigerung durch selektives Abschalten.

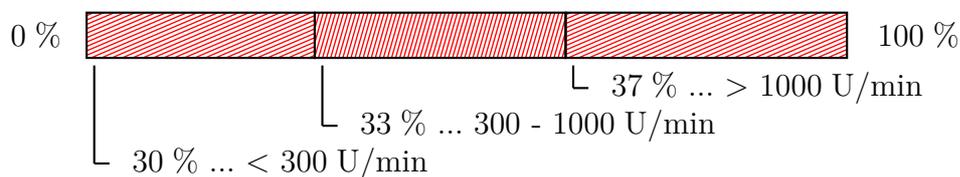
Jeweils Dreiviertel der Befragten gehen davon aus, dass sie sowohl neues Personal aufnehmen müssen als auch das Markenimage beeinflusst wird (#3.3.g-h).

### Produktbezogene Fragen

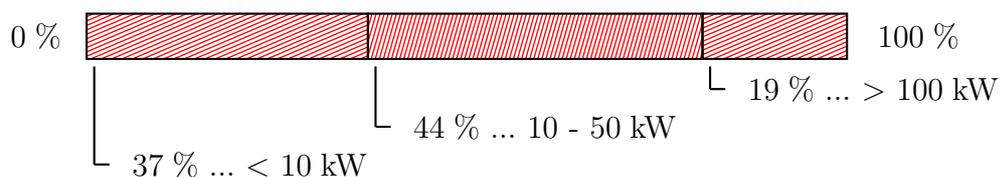
Bei den Umfrageteilnehmern wurde im letzten Teil der Befragung konkret auf jeweilige Produkte eingegangen, so zum Beispiel ob ihre Maschinen auf Elektroantriebe umgerüstet werden können (#3.4.a):



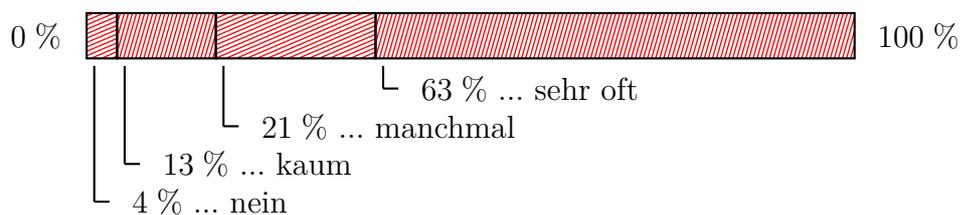
Festzuhalten ist, dass 55 % der Antriebe zurzeit mechanisch arbeiten, der Rest hydraulisch (#3.4.c). Die Einsatztemperatur geht dabei von -30 °C bis zu 50 °C, stellenweise bis 100 °C (#3.4.d) und die Drehzahlen der Antriebe liegen in folgenden Bereichen (#3.4.f):



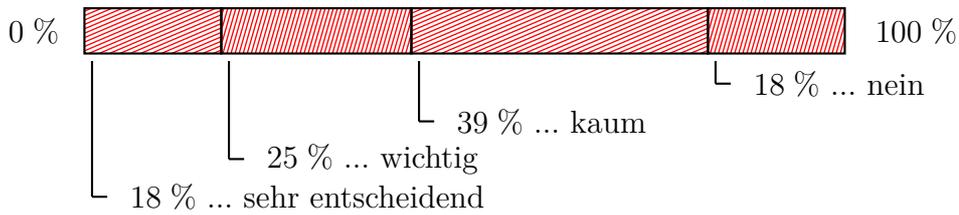
Der mittlere Leistungsbedarf wird folgend angegeben (#3.4.i):



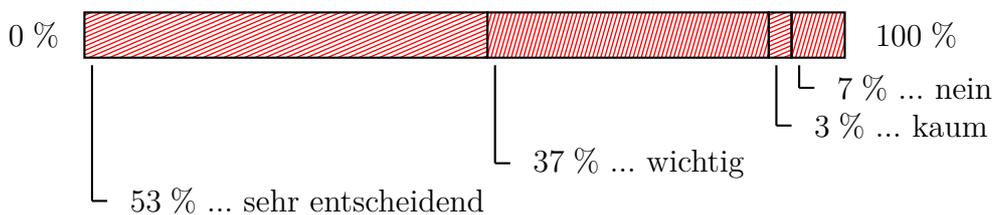
Kurzzeitige Lastspitzen wurden mit dem 1,5 bis 2-fachen Wert beschrieben. Deren Auftreten wird folgendermaßen erwartet (#3.4.j-k):



Bei rund der Hälfte ist auch die Dynamik des Systems (rasch ändernde Drehzahlen) wichtig (#3.4.m):



Viel wichtiger ist die Masse und das Volumen als ausschlaggebendes Kriterium (#3.4.1):



Bei speziellen Anforderungen für den jeweils konkreten Anwendungsfall werden Punkte genannt wie (#3.4.n): Schutzklasse (Hochdruckreiniger), Schwingungsfestigkeit, Belastbarkeit, Elektromagnetische Verträglichkeit und neue Regelalgorithmen.

Der Kundennutzen wird bei der Beschreibung zum bestimmten Anwendungsfall ebenfalls etwas konkreter (#3.4.o, Vergleich zu #3.1.3.d): Optimale Drehzahl für den jeweiligen Prozess, bodenabhängige Bearbeitung, Lebensdauererhöhung durch Optimierung und Treibstoffersparnis.

Zu guter Letzt wird noch nach den Möglichkeiten gefragt, die sich durch elektrische Antriebe auftun, bzw. auch, wo ein Elektroantrieb keinen Sinn macht. Neben einer elektrischen Zapfwelle sprechen der elektrische Fahrtrieb, dynamische Verstellung der Arbeitsgeräte sowie automatisierte Abläufe und Sicherheitsstopps für einen elektrischen Antrieb.

Keinen Sinn hingegen machen laut den Herstellern Antriebe bei hohen Leistungen und hohen Kräften, bei wenig verteilten Antrieben, bei Hubwerken und bei Antrieben mit kurzer Einsatzzeit.

## Zusammenfassung

Elektrische Antriebe werden an Bedeutung gewinnen. Es muss jedoch genau der Einsatzzweck überlegt werden, um Vorteile wie Regel-/Steuerbarkeit, Drehzahl-

/Drehmomentmessung, leichtere Realisierung verteilter Antriebe, günstigeres Geräuschverhalten, Effizienz sowie Überlastfähigkeit zu nutzen und Nachteile wie Masse, Kühlung, Sicherheitsaspekte und ähnliches zu umgehen. Für den Großteil der Unternehmen würde bereits eine (teil-)variable Zapfwelle reichen. Rund die Hälfte hat sich schon selbst mit elektrischen Antrieben beschäftigt. Dies jedoch nur mit kleineren Leistungen, in naher Zukunft geht die Leistung gegen 20 kW, mittelfristig ist mit 50 kW zu rechnen, bis hin zu 100 kW werden in fernerer Zukunft erwartet.

Die Umfrage aus Deutschland [Moe11] kommt zum gleichen Schluss. Sowohl Leistungsklassen, Anzahl der Stecker als Schnittstelle als auch die grundsätzliche Einstellung, dass viele Antriebe durch elektrische ersetzt werden können und deren Bedeutung zunimmt, sind ident. Zusätzlich wird hier noch die Kühlproblematik genauer behandelt, die überwiegend von der Traktorseite bereitgestellt werden soll.

Bei genauer Betrachtung der Fragen #3.1.2.b und d – allgemeiner Trend und Eigeninteresse – ergeben sich drei Gruppen, siehe Abbildung 6.1. Ein Drittel gibt die Richtung am Markt vor („first mover“), ein Drittel springt sozusagen auf den fahrenden Zug auf („followers“) und ein weiteres Drittel beobachtet erst einmal, wo der Zug hinfährt („observers“).

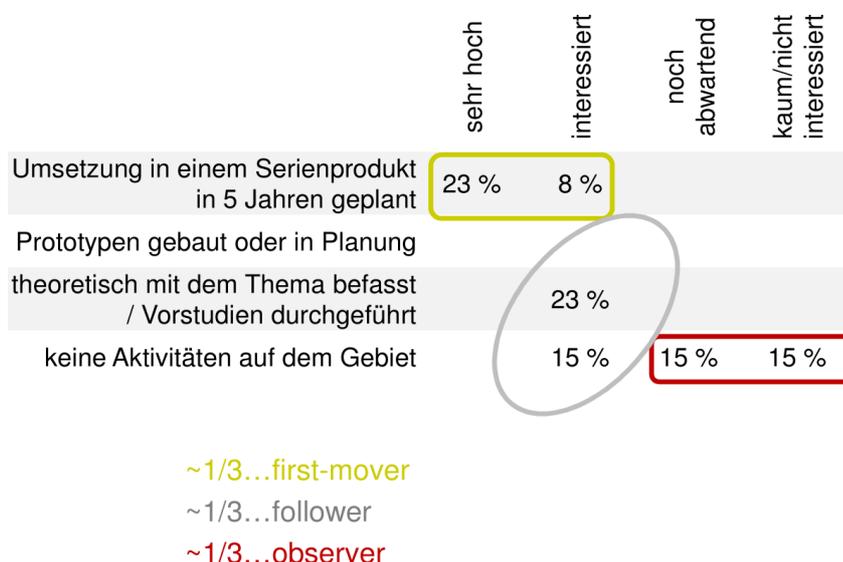


Abb. 6.1: Gruppeneinteilung der Hersteller [Kar12b]

## 7 Technische Aspekte – Systemschnittstellen

Nach dem rechtlichen Rahmen durch die Normierung, sowie möglichen wirtschaftlichen Grenzen aufgrund von Informationen aus der Umfrage werden nun einige technische Rahmenbedingungen gelistet, die vor allem für die Schnittstelle Traktor-Anbaugerät interessant sind.

### 7.1 Isobus

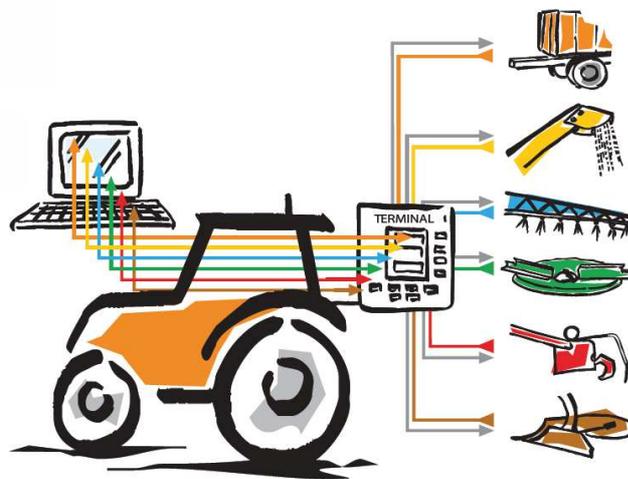
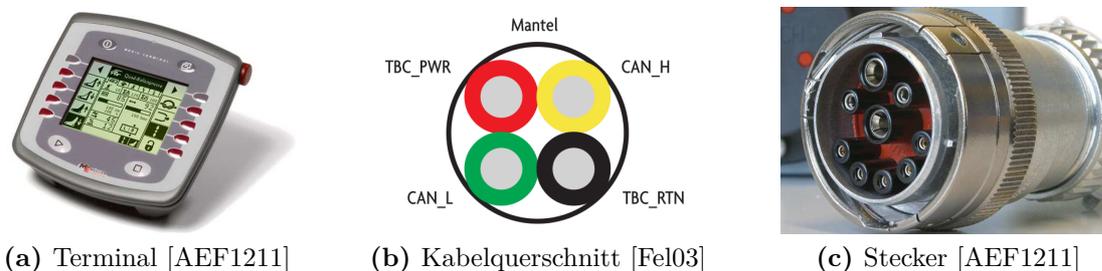


Abb. 7.1: Skizze einer Isobus Kommunikation [AEF1211]

Die wohl wichtigste Schnittstelle in der Landtechnik ist das Bussystem Isobus (nach ISO 11783) als Kommunikationsprotokoll für landwirtschaftliche Geräte (Abb. 7.1). In der 13 teiligen Norm werden alle relevanten Dinge, vom Stecker über den Datentransport und das Netzwerkmanagement bis hin zur Prozessdatenauswertung und Diagnose, definiert. Bereits 1991 begann die Entwicklung mit dem Einsetzen des Komitees SC19 - Agricultural Electronics. [Fel03][AEF1211]

Als Übertragungsmedium kommt ein verdrehtes, vieradriges Kabel ohne Schirmung zum Einsatz, siehe auch Abbildung 7.2 (b). Als Bitrate wurde 250 kbit/s festgelegt, ein Optimum aus Störanfälligkeit sowie Bandbreite und auch kompatibel zur ISO 11898 – Signalpegeldefinition in der Automobilbranche – somit kostengünstiger bei der Integration der Netzwerktechnologie in die einzelnen Steuergeräte. Die Datenübertragung findet auf den zwei Leitungen CAN\_L und CAN\_H statt. TBC\_PWR und TBC\_RTN dienen der Spannungsversorgung der Abschluss-Schaltung um Reflexionen am Busende zu vermeiden. Ein fester Abschlusswiderstand zur Reflexionsunterdrückung ist wegen der Modularität des Busses nicht geeignet. Jederzeit können neue Anbaugeräte angekoppelt oder abgekoppelt wer-

den. [Fel03]



**Abb. 7.2:** Isobus Komponenten

Um möglichst modular zu sein, können als Steckverbindung je nach Anwendung mehrere Arten verwendet werden. Der „Bus Extension Connector“ ist die einfachste Steckverbindung. Dieser wird für die einfache Erweiterung des Busses um ein Steuergerät benutzt. Er hat den Nachteil, dass keine Stromversorgung mitgeführt wird, außer der Abschlusschaltung. Der „Bus Breakaway Connector“ hat neben dieser gleich zwei zusätzliche Versorgungsleitungen integriert, siehe Abbildung 7.2 (c). Eine Versorgung für das Anbaugerät (PWR und GND, bis 60 A) und eine extra Versorgung für die Steuergeräte (ECU\_PWR und ECU\_GND, bis 25 A). [Fel03]

Die Datenübertragung erfolgt mit dem CAN<sup>14</sup>-Protokoll und ist kompatibel zum Automobilstandard SAE J1939. Somit können auch andere CAN-Steuerungen mit dem Isobus kooperieren und es muss bei Bedarf kein zweites Netzwerk im Fahrzeug aufgebaut werden. Gibt es mehrere Steuergeräte an einem Anbaugerät, so können diese zu einem Satz zusammengefasst werden, einem sogenannten Working Set. Dieses hat einen Master und ein oder mehrere Members. Mehrere gleiche Geräte können mit diesen Workings Sets zu einer großen Einheit kombiniert werden. So kann beispielsweise die Arbeitsbreite eines Anbaugeräts leicht vergrößert werden. Die Schnittstelle zwischen dem Working Set Master und dem Benutzer ist das sogenannte Virtual Terminal. Dies ist eine grafische Benutzeroberfläche, wo gewünschte Daten der Geräte angezeigt werden, sowie Steuerbefehle und Parameteränderungen eingegeben werden können, siehe Abbildung 7.2 (a). [Fel03]

## 7.2 AEF

Mit der Gründung der Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF) im Jahre 2008 durch 7 Industriepartner sowie der beiden Verbände VDMA<sup>15</sup> und

<sup>14</sup>Controller Area Network

<sup>15</sup>Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.

AEM<sup>16</sup>, hat diese die Aufgabe übernommen, den Isobus nach 7-jähriger Erfahrung seit der Einführung 2001 weiter zu entwickeln. Inzwischen gibt es über 120 Mitglieder, die in sieben Projektgruppen an unterschiedlichen Bereichen arbeiten: [AEF1211]

**PG1 - Konformitätsprüfung/-test:** Prüf- und Zertifizierungsverfahren für unabhängige Prüfanstalten

**PG2 - Funktionssicherheit:** Erstellen von Sicherheitsrichtlinien

**PG3 - Technische Umsetzung:** Koordination für Markteinführung

**PG4 - Service und Fehlerdiagnose:** Wartung kombinierter Isobus-Systeme unterschiedlicher Hersteller

**PG5 - Automatische Ablaufsteuerung:** Traktor und Gerät arbeiten nahtlos als Gesamtsystem zusammen

**PG6 - Kommunikation und Marketing:** Cooperate Design, Zertifizierungslogo etablieren, Teilnehmen auf Messen

**PG7 - Hochvolt-Bordnetze:** Elektrische Antriebe mit hoher Leistung

Ziel der Projektgruppe 7 ist neben der Arbeit am Isobus die Normung einer Hochleistungs-Traktorschnittstelle zur Stromversorgung von leistungsintensiven Anbaugeräten und anderen externen elektrischen Komponenten. Jedes Gerät soll mit jedem Traktor kompatibel, rein die Leistung des Motors der einzig begrenzende Faktor sein. In fünf Untergruppen werden die genauen Einzelheiten geklärt, um dann einen branchenübergreifenden Vorschlag an die Normungsinstitute einzubringen: [AEF0611]

- Schnittstellen-Verbindung (physikalisches Interface)
- Anforderungen der Anbaugeräte
- Sicherheits- und Risikoanalyse
- Spezifikation der Schnittstelle (Kommunikation und Leistung)
- Lösungsansätze für die Kühlung

Für die elektrische Schnittstelle gibt es schon konkrete Vorschläge. Unabhängig von der Leistungsklasse (20 kW, 50 kW, 100 kW und 150 kW) gibt es eine physikalische Größe der Steckverbindung. Diese hat drei berührungssichere Leistungsklemmen für wahlweise dreiphasige Wechselspannung (480 V) oder Gleichspannung (750 V) mit 250 A RMS, siehe Abbildung 7.3. Weiters ist der 4-Pin Isobus und 5 Kontakte für eine 12 V bzw. 24 V Versorgung mit maximal 35 A vorhanden. Zum Potentialausgleich gibt es einen EPBC<sup>17</sup>-Pin, welcher beim Steckvorgang als erster den Kontakt herstellt.

Die Steckdose, in Abbildung 7.4 links mit Staubkappe zu sehen, hat noch eine mechanische Verriegelung. Diese fixiert den Stecker für raue Einsätze am Feld. Wird das Kabel mit mehr als 500 N belastet, und zwar in alle Richtungen bis

---

<sup>16</sup>Association of Equipment Manufacturers

<sup>17</sup>Equipotential Bonding Conductor

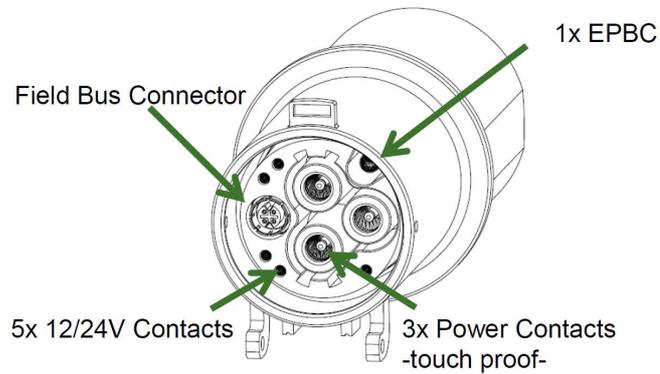


Abb. 7.3: Pinbelegung [Sta11]

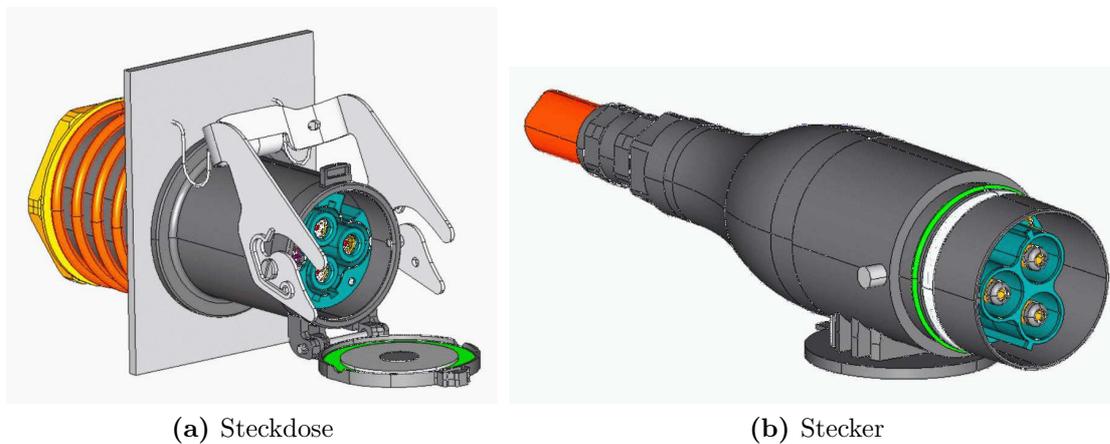


Abb. 7.4: Schnittstellenvorschlag der AEF [Sta11]

22,5 °, so wird diese Arretierung entfernt und der Stecker geht ohne Schaden aus der Dose, siehe Abbildung 7.5. Dieser Fall tritt zum Beispiel ein, wenn der Anwender das Anbaugerät abhängt und vergisst, den Stecker zu lösen. Beim Abziehen werden zuerst die vier Pins der Bus-Schnittstelle getrennt. So kann das Gerät im schlimmsten Fall die Leistung noch drosseln, ehe sich die Leistungskontakte trennen und möglicherweise ein Lichtbogen gebildet wird.

### 7.3 Leistungsschnittstelle

Es gibt mehrere Arten, die elektrische Energie vom Traktor als Erzeuger zum Verbraucher zu bringen: als Gleichstrom oder als Wechselstrom. Auch der AEF-Stecker, der wohl Standard werden wird, ist für beides ausgelegt. Verwendet man Wechselstrom, muss zwischen gesteuertem und geregelterm Betrieb unterschieden werden. Je nach der Art wird dann auch die Schnittstelle, die Regelstrecke und der Umrichter angepasst.

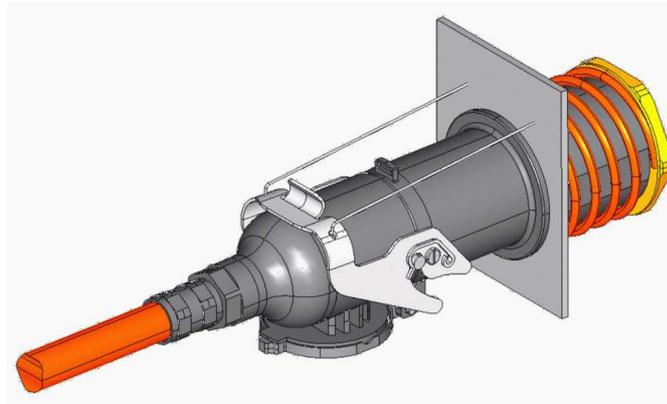


Abb. 7.5: Gesteckte Verbindung [Sta11]

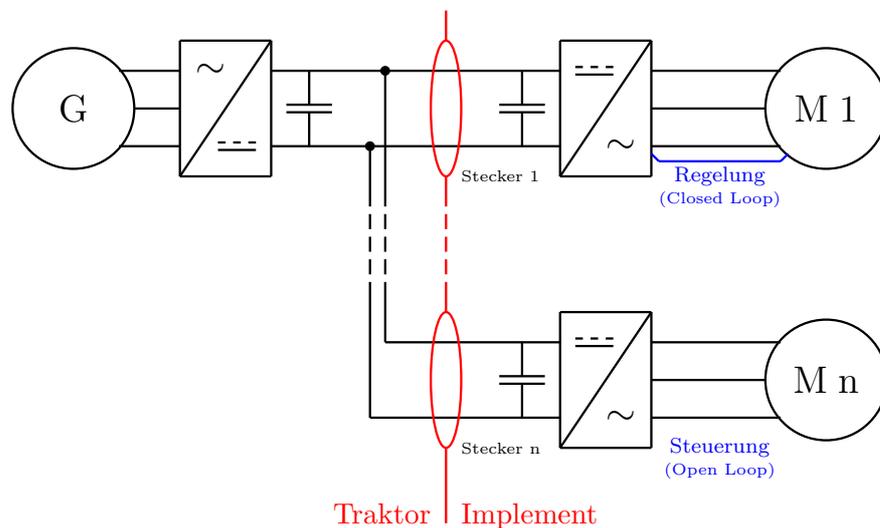


Abb. 7.6: Gleichspannungsschnittstelle

In Abbildung 7.6 ist eine Variante der Schnittstelle an der Gleichspannungsseite zu erkennen. Das heißt, der Traktor hat nach einem Generator, der ein Dreiphasensystem mit drehzahlabhängiger Spannung und Frequenz liefert, einen Gleichrichter, der im Idealfall eine konstante Gleichspannung liefert. Die Spannung liegt an einer oder mehreren Steckdosen am Traktor an, in rot skizziert, je nachdem ob die Verteilung zu mehreren Abnehmern vor oder nach der Steckdose geschieht. Jeder Antrieb hat dann seinen eigenen Umrichter, der die Gleichspannung wieder in ein Drehfeld gewünschter Spannung und Frequenz umwandelt. Es ist ein geregelter Betrieb mit einer Lage- oder Drehzahlrückführung, oder eine Steuerung ohne Informationsrückkopplung denkbar, im Beispiel Motor M 1 und Motor M n.

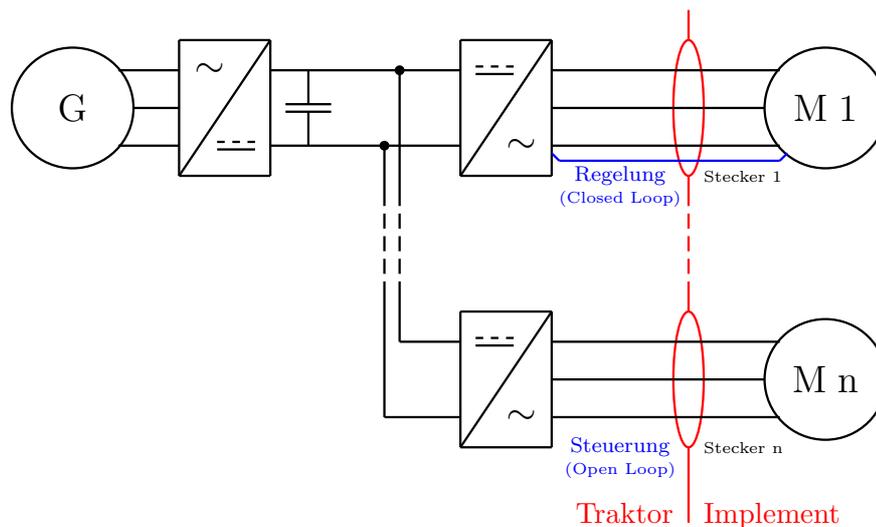
Vorteile der Gleichspannungsschnittstelle:

- Klare Trennung der Systemverantwortung zwischen Traktorhersteller und Gerätehersteller

- Freie Wahl der Antriebstechnologie
- Keine Beschränkung in der Anzahl der Antriebe
- Leistung des Umrichters passt zum Antrieb

Nachteile:

- Schwierige Sicherheitsabschaltung beim Trennen von Gleichstrom



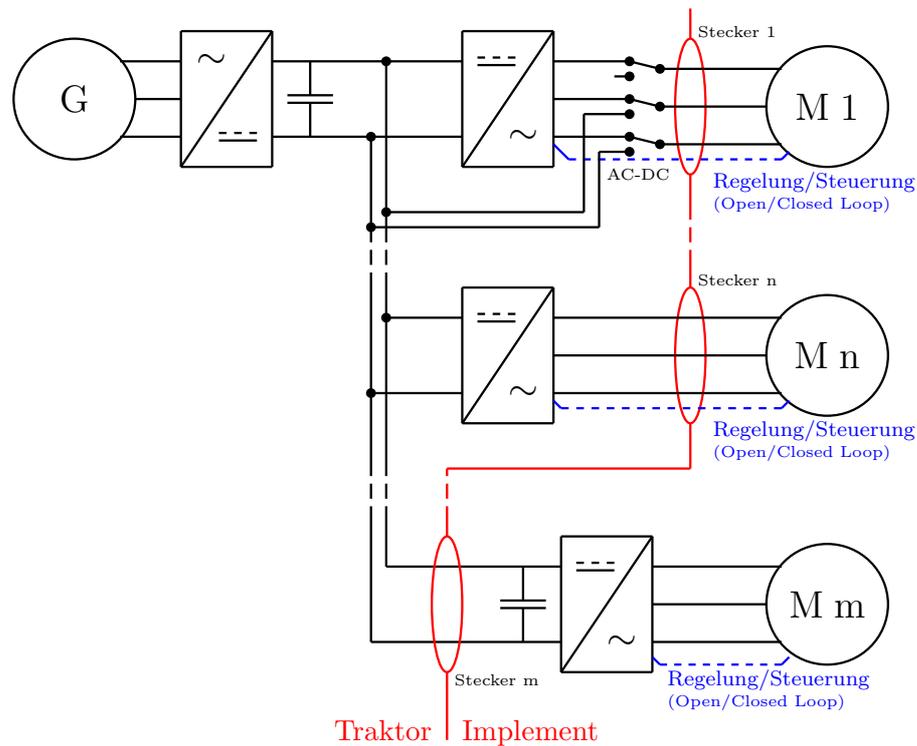
**Abb. 7.7:** Wechselspannungsschnittstelle

Eine weitere Möglichkeit ist es, die Umrichter für die Antriebe auch am Traktor zu installieren. An der Schnittstelle wird dann eine Wechselspannung übergeben, siehe Abbildung 7.7. Wird nur ein gesteuerter Betrieb gewünscht kann die Drehzahl des Antriebs einfach durch die Drehfeldfrequenz vorgegeben werden. Eine Rückkopplung von Sensoren ist hier schwieriger, da diese Information auch über die Schnittstelle transportiert werden muss, siehe Motor M 1. Hier ist laut Vorschlag der AEF, siehe oben, eine Isobus Schnittstelle vorgesehen. Wie genau hier ein hochdynamischer Antrieb über einen nicht echtzeitfähigen Bus realisiert werden kann, ist fraglich. Vorteile dieser Version:

- Ein Umrichter am Traktor für mehrere Anbaugeräte
- Erhöhte Sicherheit an der Wechselspannungsschnittstelle

Nachteile:

- Antrieb an Möglichkeiten des Traktorumrichters gebunden
- Umrichter muss für volle Leistung ausgelegt sein
- Filtereinsatz und EMV Störungen auf langen Übertragungswegen
- Beschränkung in der Anzahl unterschiedlicher Antriebe



**Abb. 7.8:** Kombinierte Schnittstelle

Einige Nachteile können aufgehoben werden, wenn am Anbaugerät wieder Gleichspannung erzeugt wird, die dann mehrere Umrichter versorgen kann. Ein Umrichterpaar mehr – dafür die Sicherheit an der Schnittstelle. Natürlich kann auch eine Kombination in allen erdenklichen Varianten eingesetzt werden, siehe Abbildung 7.8. Zum Beispiel kann die Schnittstelle schaltbar sein, wie der erste Antrieb zeigt (M 1). Per Isobus-Anmeldung des Geräts wird dann die entsprechende Spannungsvariante bereitgestellt. Weiters kann es neben einer Kombi-Steckdose auch eine reine AC oder eine reine DC-Steckdose geben (M n und M m), bzw. mehrere. Und je nach Antriebsregelung können dann über den Feldbus Informationen zurückgeliefert werden. Steckt man beispielsweise einen Stromverteiler auf 3x400 V oder 1x230 V an, so kann dieser über eine Busmeldung die gewünschte Spannung mit 50 Hz beantragen und auf Steckdosen verteilen, um Einphasengeräte oder Drehstromgeräte zu betreiben. Beim Gleichstrom wäre nach dem Verteiler ein Umrichter dafür nötig.

## 8 Aktuelle Beispiele

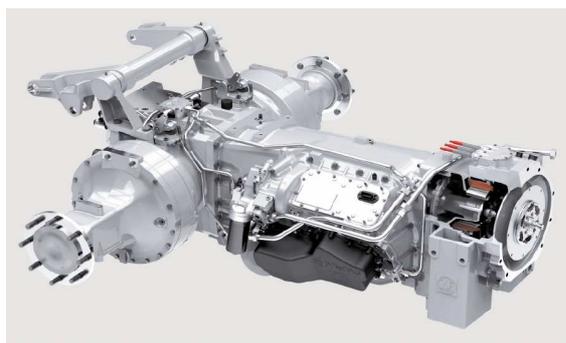
Es gibt einige Studien und Konzepte zum Thema elektrische Landwirtschaftsgeräte und diverse Produkte, die bereits käuflich zu erwerben sind. Im folgenden werden einige Beispiele beschrieben.

### powerMELA

MELA<sup>18</sup> ist eine Plattform für Hybridfahrzeuge rund um die Firma STW. Angeboten werden modulare Komponenten, die dann je nach Bedarf in das Fahrzeug integriert werden können. Ein an die VKM gekoppelter Generator erzeugt mit integriertem Umrichter eine drehzahlunabhängige Gleichspannung von 750 V, die dann als Bordnetz bereitsteht. Weiters gibt es Motor-Umrichter-Pakete mit bis zu 140 kW, siehe Abbildung 8.1, die dann je nach Bedarf in den Antrieb integriert werden, beim Anbaugerät oder als Traktion im Traktor. Energiespeichersysteme, Batterien mit entsprechendem Ladungsmanagement, und Umrichter für 3x400 V AC Steckdosen mit 15 kW runden das die Produktfamilie ab. [Srä09]



**Abb. 8.1:** MELA Antriebseinheit [Srä09]



**Abb. 8.2:** Terra+ Antriebseinheit [Moh11]

### Terra+

Eine ähnliche Plattform bietet die Firma ZF an. Hier wird ebenfalls versucht, den Traktor nicht nur zu elektrifizieren, sondern mit einem Batteriesystem auch zu hybridisieren. Damit erwartet man sich eine Kraftstoffeinsparung von bis zu 12 % in Vergleich zu konventionellen Antrieben. Das System hat ebenso modulare Bausteine, die je nach Bedarf zusammengefügt werden. Die Antriebseinheiten sind etwas komplexer, wie in Abbildung 8.2 zu sehen ist. Hier ist ein Generator gemeinsam mit den Antriebsmotoren als integrierte Einheit ausgeführt. Ebenso sind Zapfwelle und Hydraulik integriert. So kann durch Abkoppeln der VKM und Einsatz einer Batterie rein elektrisch gearbeitet werden. [Moh11]

---

<sup>18</sup>Mobile Elektrische Leistungs- und Antriebstechnik für Fahrzeuge und Maschinen

### E-Premium

Die E-Premium Traktorserie der Firma John Deere hat einen 20 kW Generator an der Motorwelle integriert. Die Kühlung des Generators ist mit dem Kreislauf der VKM gekoppelt. Mit der Energie werden Antriebe im Traktor selbst versorgt:

- Lüfterantrieb - bei kleiner Drehzahl schon hohe Kühlleistung verfügbar, reversierbar
- Kompressor für Bremse - wird nur bei Bedarf aktiviert, lädt dann schneller
- Kompressor für Klimaanlage - mehr Komfort durch lastunabhängige Klimatisierung
- Lichtmaschine - Bis zu 300 A auf 14 V Schiene durch DC/DC Konverter verfügbar

Die Komponenten sind in Abbildung 8.3 dargestellt. Weiters steht ein 3x400 V und 2x230 V Anschluss für externe Geräte bis 5 kW bereit. Die Umrichter sind zentral im Traktor in der Nähe des Generators angebracht und ebenfalls an die Motor- kühlung gekoppelt. Sie haben einen CAN-Anschluss zur Steuerung, so kann z.B. der Lüfter für Reinigungszwecke in umgekehrter Drehrichtung betrieben werden. [Bun10]



**Abb. 8.3:** E-Premium Schematik [Bun10]



**Abb. 8.4:** Belarus 3023 [Bun10]

### Belarus

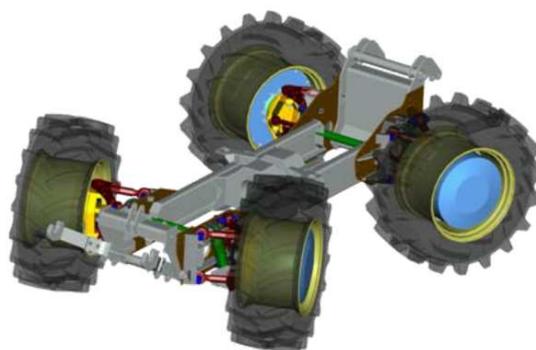
Die Weißrussische Firma Belarus hat mit dem Modell 3023 (Abb. 8.4) den zurzeit wohl leistungsstärksten elektrifizierten Traktor. Eine 220 kW Dieselmachine treibt einen 172 kW Generator an. Somit kann in entlegenen Orten entsprechende elektrische Energie bereitgestellt werden. Weiters ist die Frontzapfwelle elektrisch ausgeführt.

### RigiTrac

Ein Beispiel eines direkten elektrischen Antriebssystems im Prototypenstadium ist der Rigitrac 120 EWD der gleichnamigen Schweizer Firma. Dort werden in allen vier Rädern jeweils 33 kW Radnabenmotoren eingesetzt, siehe Abb. 8.5. Durch die Dezentralisierung des Antriebs wird erstens der Schwerpunkt weiter nach unten versetzt und zweitens bieten sich auch in der Konstruktion neue Möglichkeiten. Einzelradaufhängung, aktive Federung und Hangneigungsregulierung sind einige Punkte. Ein 85 kW Generator, getrieben von einem 91 kW Dieselmotor, stellt eine Gleichspannung her, die dann an die einzelnen Verbraucher zugeführt wird. Ein Bremswiderstand sorgt mangels Batterie für Energieumwandlung beim Bergabfahren. [Böh11, Smi11]



**Abb. 8.5:** Rigitrac Radnabe mit Reifen [Böh11]



**Abb. 8.6:** Rigitrac Fahrwerk mit vier Radnabenmotoren [Gei10]

### UX eSpray

Die Anhängerspritze der Firma Amazone ist ein Prototyp einer elektrischen Feldspritze. Das Gerät hat mehrere Elektromotoren, elektrische Steuerungen, ein Bedienterminal, sowie auch eine Einzeldüsenbeleuchtung für Arbeiten in der Nacht. Abbildung 8.7 gibt eine Übersicht der Bauteile. Als Anschluss wird ein 400 V Drehstromnetz mit 17 kW Gesamtleistung benötigt. Eine Trennung von Klar- und Brühwasser, Mengenregelung der Pumpe, Tauchpumpe statt Saugschlauch beim Füllen und Einzeldüsen-schaltung sind einige Merkmale. [Ama09]

### NH2

Einen anderen Ansatz in der Energiebereitstellung macht die Firma New Holland bzw. die Konzernmutter CNH mit dem NH2, siehe Abbildung 8.8. Die Stromversorgung erfolgt bei diesem Traktor nicht durch die VKM, sondern durch eine Brennstoffzelle. Diese speist zwei Elektromotoren mit jeweils 100 kW. Einer wird

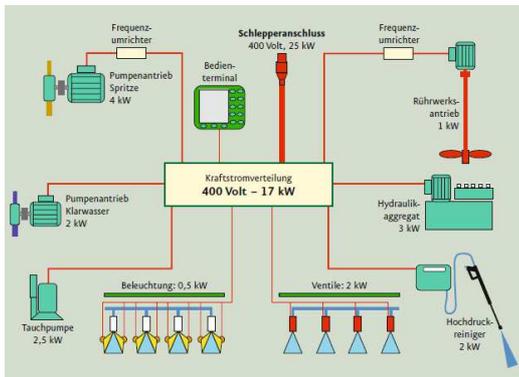


Abb. 8.7: Amazone UX eSpray Schema [Ama09]

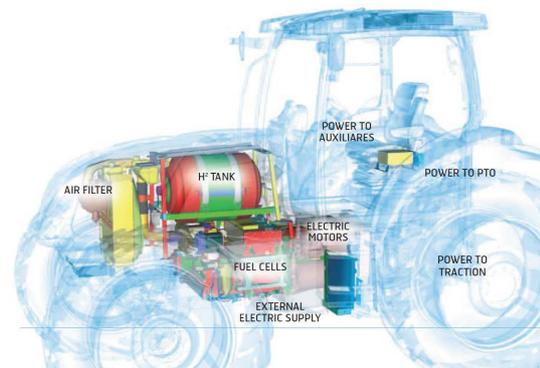


Abb. 8.8: CNH Wasserstofftraktor NH2 [NeH09]

zur Traction eingesetzt, mit einer Leistungsverteilung auf alle vier Räder, der andere treibt die Zapfwelle an. Mit 8,2 kg Wasserstoff bei 350 bar wird der Traktor drei Stunden in Betrieb gehalten. Zusätzlich ist eine 12 kWh Batterie an Bord. Der Prototyp wird seit dem Sommer 2012 in einer Versuchslandwirtschaft in Italien betrieben. [NeH09, NeH11]



Abb. 8.9: Düngerstreuer [Rau10]

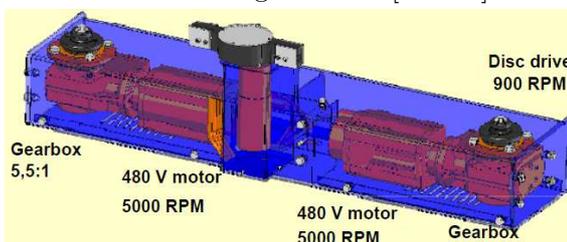


Abb. 8.10: Antrieb [Rau10]

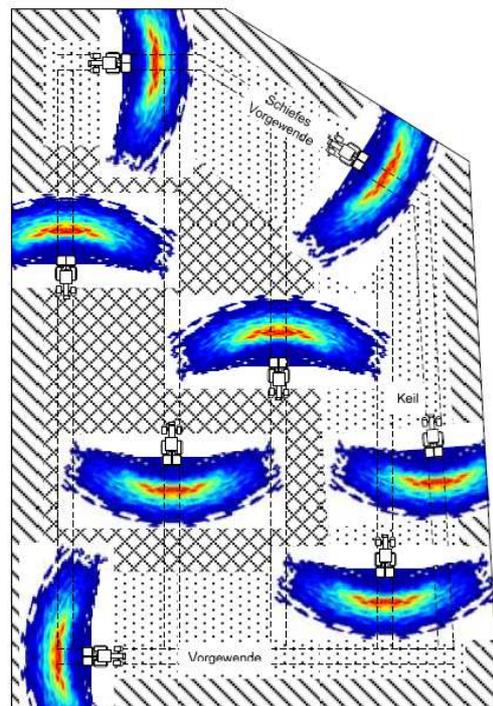


Abb. 8.11: Streufeld [Rau10]

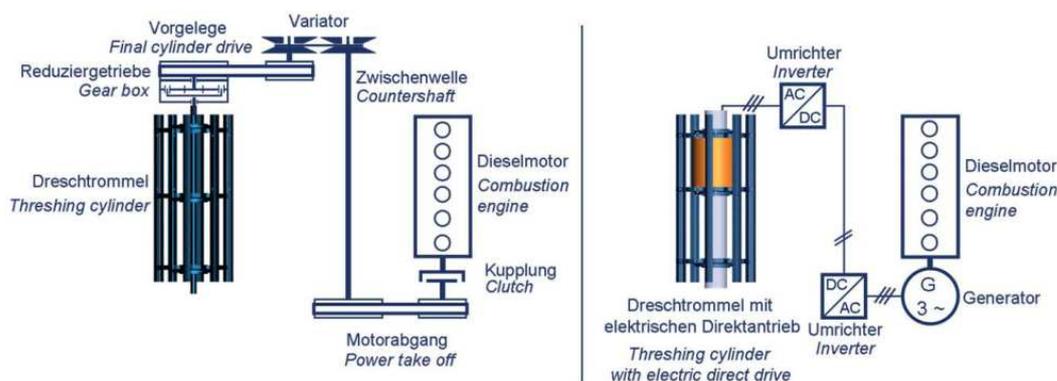
### Axis-E

Die Firma Rauch hat mit ihrem Axis-E einen elektrischen Zweischeibendüngerstreuer im Programm, siehe Abbildung 8.9. Das Ziel bei solch einem Gerät ist die

homogene Aufbringung von Düngemittel am Feld. Die bisherigen Streuer wurden von der Zapfwelle angetrieben und verwendeten Hydraulikmotoren, um die Menge des Düngemittels zu steuern. Dies ist mit elektrischen Antrieben wesentlich leichter. Auch die Flussmenge, proportional dem Moment einer Scheibe, ist so leichter zu messen. Für eine Arbeitsbreite von 36 m wird mit Überlappung ein 60 m Korridor verstreut, Abb. 8.11. Dazu muss die Scheibe 50 m/s erreichen, entspricht rund 900 U/min. Wenn der Traktor mit 20 km/h fährt und rund 400 kg/ha Dünger ausgebracht wird, ist das ein Massenfluss von einer halben Tonne pro Minute. Dafür werden bis zu 17 kW benötigt. Pro Scheibe ist ein Elektromotor (480 V, 5000 rpm) mit Getriebe (auf 900 rpm) im Einsatz, Abb. 8.10. Mit Zuhilfenahme von GPS-basierten Daten kann je nach Standort eine gewisse Menge Dünger ausgebracht werden. Ebenso ist der Massenfluss leicht zu protokollieren, Abb. 8.11. [Rau10]

### Mähdrescher - elektrische Dreschtrommel

Die Produktivität von Mähdreschern wurde bisher durch größere Maschinen mit mehr Leistung gesteigert. Diese haben bereits 150 kW - 470 kW Dieselmotorleistung. Eine weitere Steigerung mit klassischen Antriebskonzepten ist schwierig. In einer Forschungsarbeit hat die TU Dresden eine mechanische Dreschtrommel durch eine elektrische ersetzt, siehe Abbildung 8.12. Der Wirkungsgrad der mechanischen Lösung liegt bereits bei 89 % - 92 %, der von einer elektrischen Lösung nicht wesentlich verbessert werden kann. Die großen Vorteile des Wechsels auf einen Elektromotor sind hier die Drehzahl- und Momentregelung für möglichst effiziente Behandlung des Getreides. [Aum10]

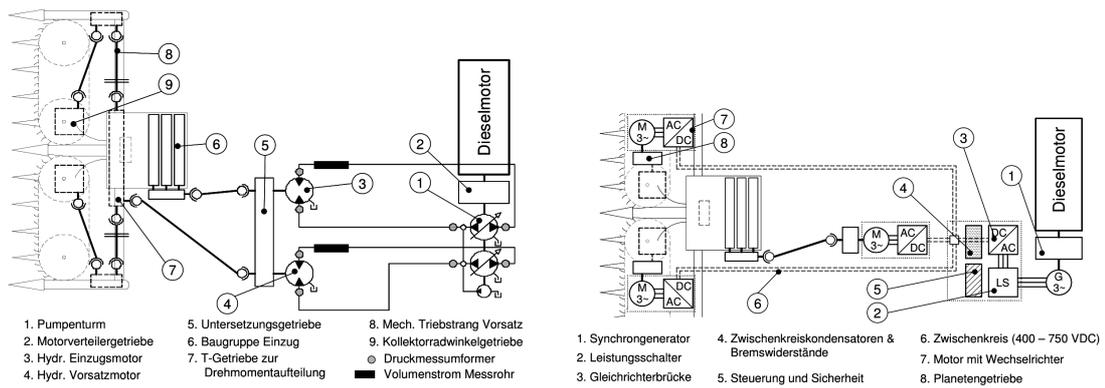


**Abb. 8.12:** Dreschtrommel - Schema des Antriebs  
Vergleich mechanische (links) und elektrische Lösung (rechts) [Aum10]

### Mähdrescher - elektrischer Einzug

An der TU München werden die hydraulischen Antriebe von Einzug und Vorschub eines Mähdreschers durch elektrische Antriebe ersetzt, siehe Abbildung 8.13.

Messungen die mit Prototypen durchgeführt wurden, zeigen einen höheren Wirkungsgrad bei der elektrischen Variante. Unter Volllast beträgt der Unterschied ca. 15 Prozentpunkte, unter Teillast ca. 20 Prozentpunkte. Das Gesamtgewicht wird durch den Austausch von hydraulisch auf elektrisch um 124 kg erhöht – eine Verschlechterung des Leistungsgewichts um 20 %. Das Bauvolumen des Einzugsmotors ist das Vierfache, und auch die Kosten für eine Kleinserie (200 Stück) werden mit dem rund Vierfachen angegeben. [Gal09] (S.142,144,148)



**Abb. 8.13:** Mährescher - Schema von Vorsatz und Einzug  
Vergleich hydraulisch (links) und elektrisch (rechts) [Gal09] S.51,55

### Sonstige Beispiele

Sonstige Beispiele von Serienfahrzeugen oder auch Prototypen sind einer Übersicht aus Abbildung 8.14 zu entnehmen. Es handelt sich um eine Übersicht mobiler, hybrider Arbeitsmaschinen, nicht ausschließlich landwirtschaftliche Geräte. Neben der Auflistung von Beispielen einer elektrischen Hybridisierung werden weitere Beispiele einer Hybridisierung über Hydraulik angegeben.

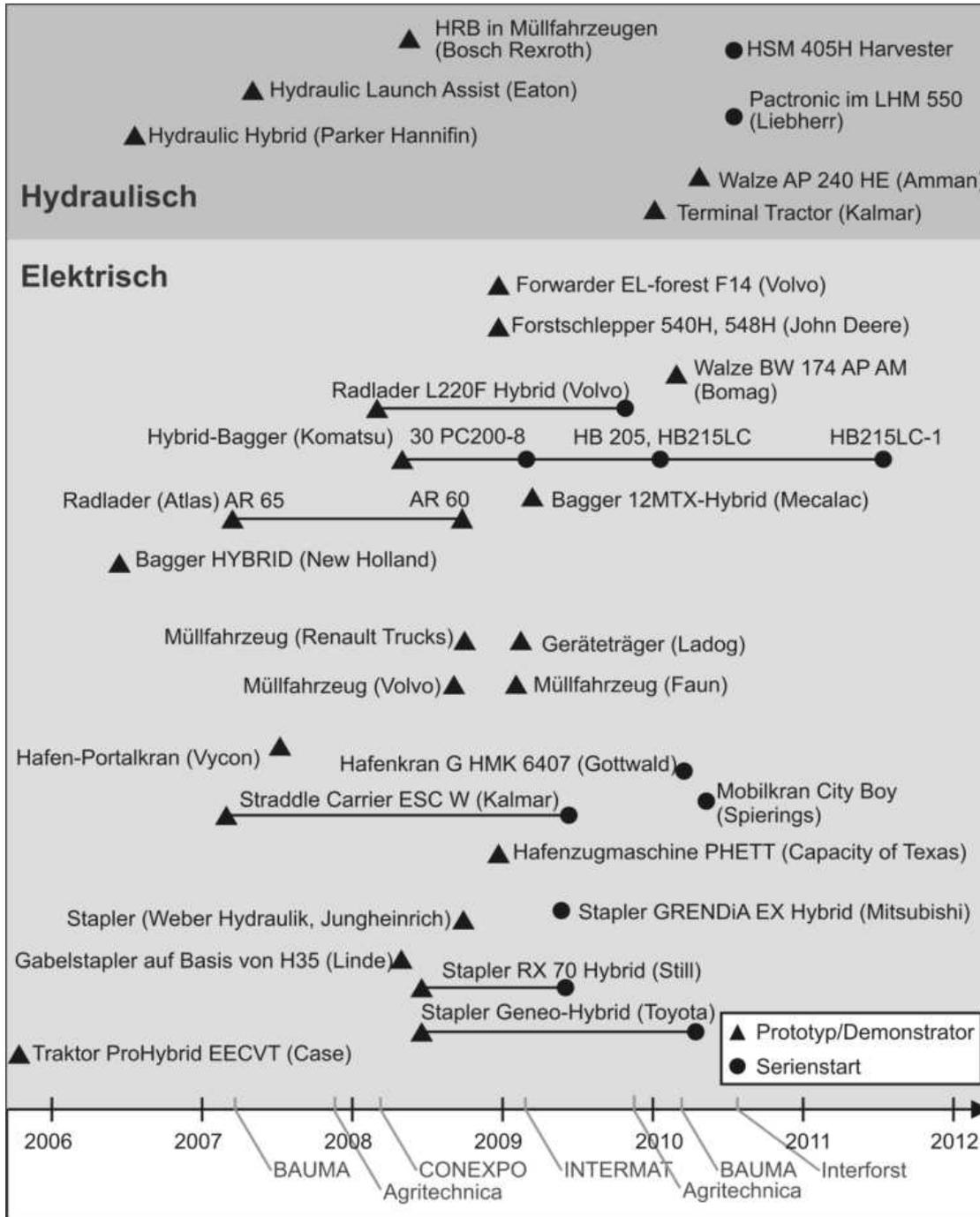


Abb. 8.14: Übersicht hybridisierter Arbeitsmaschinen [Thi12] S.12

Teil II

# Beispiele elektrifizierter Komponenten in der Landwirtschaft

Aufbau eines elektrisch autonomen Komplettsystems zum Antrieb eines elektrischen Anbaugerätes am Feld



## 9 Zapfwellengenerator

### 9.1 Allgemeines

Bis eine Steckdose zur Standardausstattung eines Traktors gehört, wird noch einige Zeit vergehen, bis jeder Landwirt solch einen Traktor hat, ebenfalls. In dieser Übergangsphase dient ein Zapfwellengenerator dazu, elektrische Energie bereitzustellen. Damit können bereits elektrifizierte Anbaugeräte mit konventionellen Traktoren genutzt werden.

Der Generator wird dabei, je nach Art des Anbaugerätes, an die Zapfwelle gekuppelt. Meist geschieht dies an der Frontzapfwelle, da die Anbaugeräte am Heck sitzen oder als Anhänger gezogen werden. Je nach Zapfwellendrehzahl, die grundsätzlich mit der Motordrehzahl gekoppelt ist, wird dann eine elektrische Spannung an den Generatorklemmen zur Verfügung gestellt. Mit einem steuerbaren Gleichrichter wird ein Gleichspannungszwischenkreis bereitgestellt, der dann an die Antriebe und deren Umrichtereinheit verteilt wird.



**Abb. 9.1:** Bediengerät - Grafische Anzeige mit Touchscreen mit freundlicher Genehmigung Fa. HTD

An der TU Wien wurde solch ein Zapfwellengenerator, kurz ZWG, entwickelt und ein Prototyp gebaut. Der ZWG kann mit dem Dreipunkt-Kraftheber vorne oder hinten angekoppelt werden, und hat einen Zapfwellenflansch. Die erzeugte Zwischenkreisspannung ist unabhängig von der Drehzahl oder Drehrichtung der Zapfwelle. Dafür sorgt ein Umrichter, der aktiv im Hochsetz- oder Feldschwächbetrieb eine konstante Zwischenkreisspannung erzeugt. Ein weiterer Umrichter stellt am Ausgang 3x400 V oder 1x230 V mit 50 Hz, einen gesteuerten U/f-Betrieb für eine ASM oder einen geregelten Betrieb für eine PSM zur Verfügung.

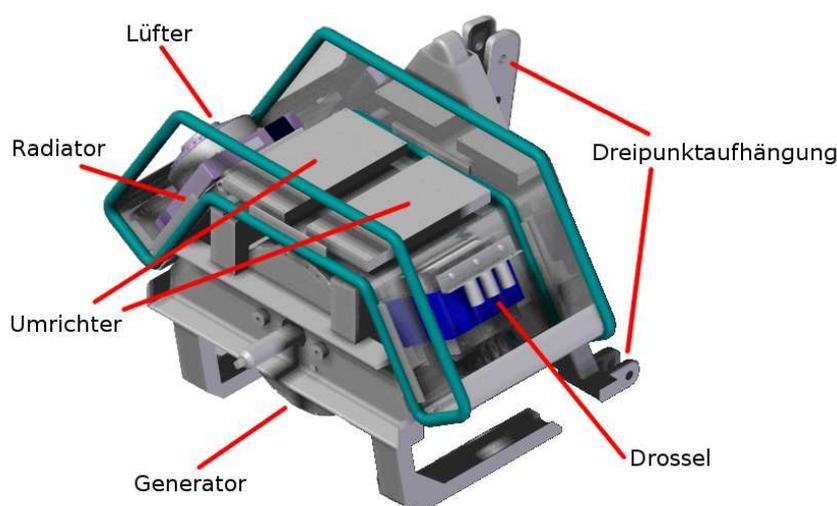
Dieser Prototyp ist sehr modular gestaltet und kann jederzeit mit einem Bediengerät die Modi wechseln. Abbildung 9.1 zeigt solch ein Bediengerät, ein Touchscreen mit Platine, das Gehäuse wurde entfernt. Die wassergekühlte Leistungselek-

tronik, sowie der umluftgekühlte Generator wird für eine Dauerleistung von 15 kW ausgelegt. Im folgenden sind der genaue Aufbau sowie Kenndaten des Generators angegeben. In Kapitel 14 sind Messungen zum ZWG zu finden, in Kapitel 17.1 ein Feldeinsatz.

## 9.2 Aufbau

Der Zapfwellengenerator besteht aus drei Einheiten, die zusammengesetzt in Abbildung 9.2 dargestellt sind:

- Generator
- Elektronik
- Aufhängung



**Abb. 9.2:** Zapfwellengenerator - Konstruktionsskizze mit freundlicher Genehmigung Firma HTD

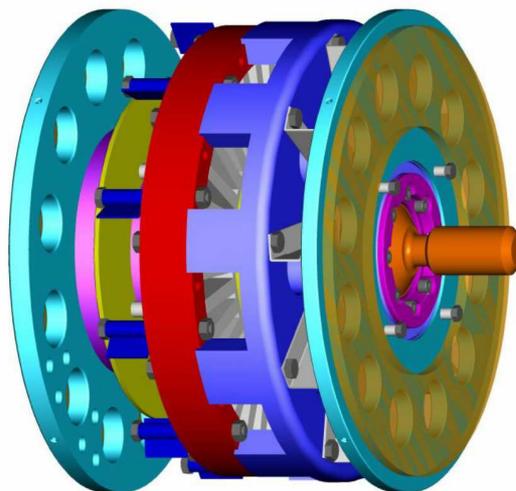
Der Generator sitzt zentral in Höhe der Zapfwellenachse und ist an der Aufhängung montiert. Die Aufhängung ist als Dreipunkt-Kraftheber ausgeführt und dient als Schnittstelle zum Traktor. Die Elektronik ist in einem U-förmigen Gehäuse untergebracht, das über dem Generator sitzt und ebenfalls an der Aufhängung montiert ist. Der Aufbau ist in Abbildung 9.2 ohne Gehäusebleche dargestellt.

Im Gehäuse sind zentral an der Oberseite die beiden Umrichter montiert. Diese sind wassergekühlt und direkt mit dem Wärmetauscher seitlich verbunden. Die Umwälzpumpe befindet sich neben dem Wärmetauscher (in Abb. 9.2 verdeckt), der Lüfter ist direkt am Radiator aufgesetzt. Die Luft wird am unteren schmalen Ende des Gehäuses über Filter eingesaugt und dann durch den Radiator in die

Mitte, direkt auf das Generatorgehäuse ausgeblasen. Luftfilter verhindern ein Verschmutzen, vor allem durch Staub im Feldeinsatz.

### 9.2.1 Generator

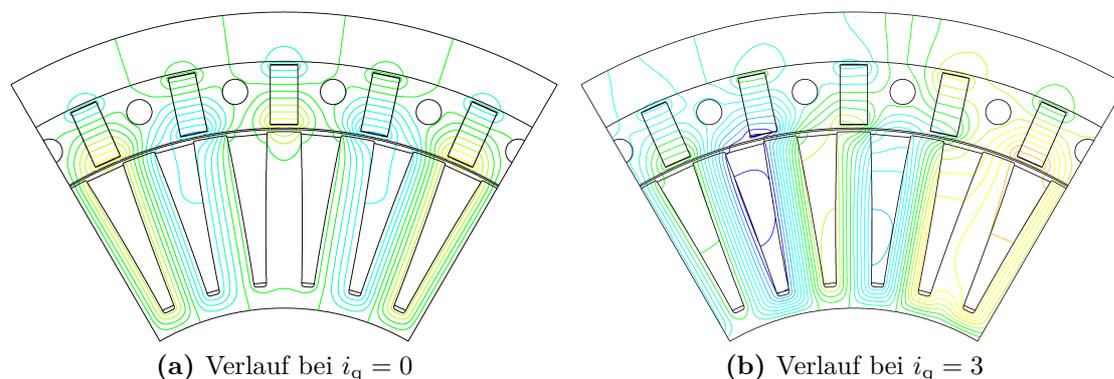
Der Generator ist durch Bleche geschützt und in sich vollkommen abgeschlossen. Dadurch werden äußere Einflüsse weitgehend vermieden, und im Fehlerfall ist ein mechanischer Schutz gegeben. Der Generator ohne Gehäuse ist in Abbildung 9.3 dargestellt. Rechts der Flanschstummel für die Zapfwelle (orange), verbunden mit dem Rotordeckel (blau) und dem Rotor (rot). Innerhalb des Rotors sind die Statorzähne zu erkennen (grau), aufgesetzt auf der feststehenden Welle (violett). Ebenfalls an der Welle befestigt ist der Gehäusedeckel ganz links (türkis), der mit einem zylindrischen Blech (nicht in der Abbildung vorhanden) mit dem Gehäusedeckel rechts (ebenso türkis) verbunden ist, welcher zur rotierende Zapfwelle gelagert ist.



**Abb. 9.3:** Skizze des Generators [Pra10]

Über rotierende Flügel wird eine Kühlung durch Ein- und Auslasslöcher gewährleistet. Optional können diese Löcher verschlossen werden (gelbe Ringe) und die Luft wird intern umgewälzt. So wird die Wärme an die Oberfläche gebracht und dort an die Umluft abgegeben. Mit dieser Maßnahme ist der Generator gegen eine mögliche Verschmutzung im Feldeinsatz geschützt. Temperaturunterschiede zwischen gekapseltem und offenem Generator sind in Kapitel 14.1 angegeben.

Der Generator ist eine permanentmagneterregte Synchronmaschine in Außenläuferbauweise mit vergrabenen Magneten in Flusskonzentrationsanordnung und einer Einschichtwicklung. Einen Querschnitt durch Stator und Rotor zeigt die



**Abb. 9.4:** Flussdichten eines Stator-Rotor-Ausschnittes [Dem11a]

FEM<sup>19</sup>-Simulation der Flussdichte in Abbildung 9.4. Das linke Bild zeigt eine Flussdichteverteilung bei Statorstrom  $i_q = 0$ . Man erkennt die Flusskonzentration zweier Magnete in einen Statorzahn. Das rechte Bild ist eine Aufnahme beim dreifachen Statornennstrom  $i_q = 3$ .



**Abb. 9.5:** Bild von Rotor und Stator im Querschnitt [Dem10]

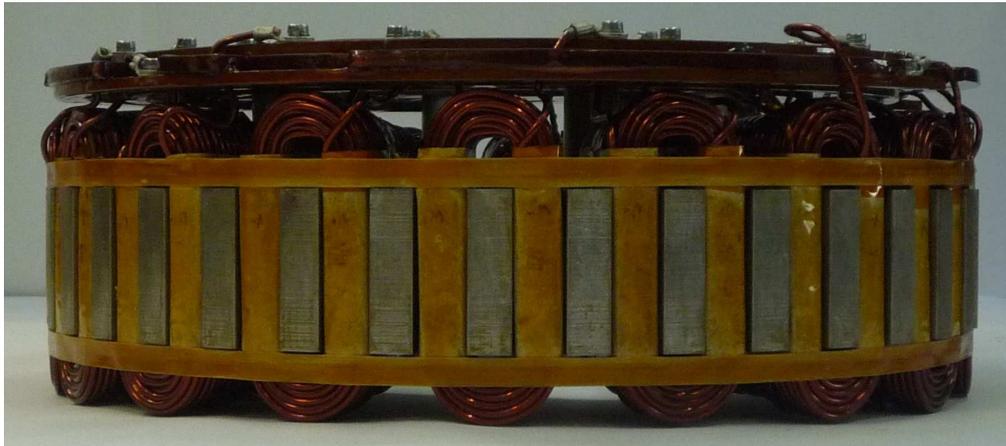
Der Generator hat einen Innendurchmesser von 200 mm und einen Außendurchmesser von 400 mm. Einen Blick auf den Querschnitt zeigt Abbildung 9.5. 36 Statorzähne und 30 Magnete ergeben bei einer Nenndrehzahl von 1000 U/min ein Nennmoment von 165 Nm. Die Einschichtwicklung ist in Abbildung 9.6 zu erkennen. An den Klemmen des dreiphasigen Anschlusses liegen bei Nenndrehzahl eine verkettete effektive Spannung von 400 V mit 25 A effektivem Strangstrom.

Weiterführende Literatur zum Generator siehe [Sch09], [Dem10] und [Dem11a].

### 9.2.2 Leistungselektronik

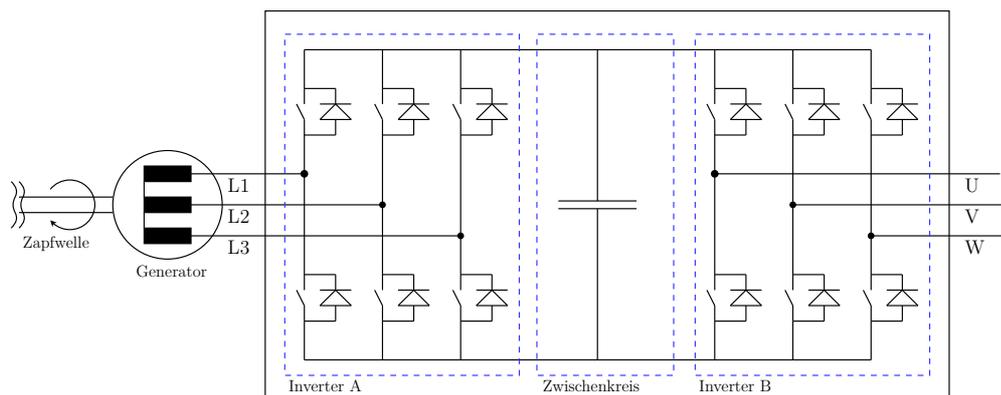
Die drei Phasen gehen direkt an die Halbbrücken der ersten Umrichtereinheit. Zwei solcher Leistungsumrichter sind im ZWG vorhanden, ein Eingangsumrichter und

<sup>19</sup>Finite Elemente Methode



**Abb. 9.6:** Radiale Sicht auf Rotor mit Spulen und Verschaltungsring [Dem10]

ein Ausgangsumrichter, siehe auch Abbildung 9.7.

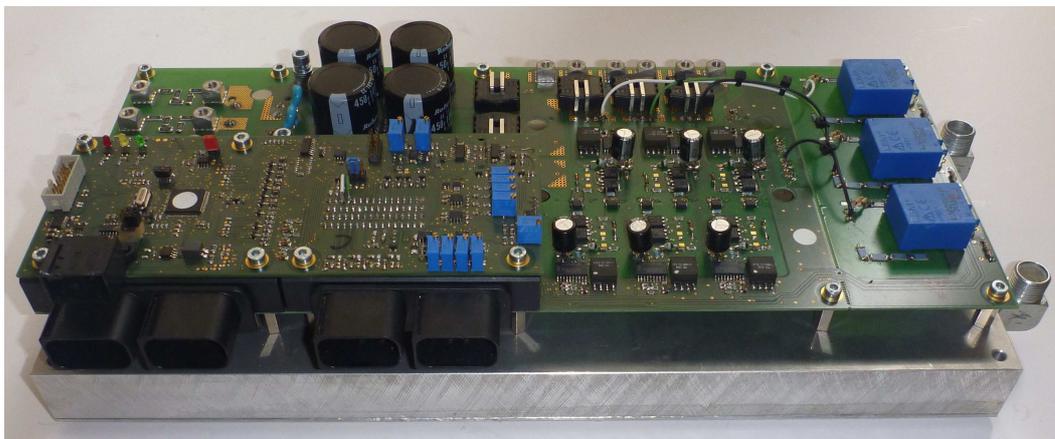


**Abb. 9.7:** Schema der Elektronik mit Generator

Der Eingangsumrichter regelt unabhängig von Eingangsspannung und -frequenz den Zwischenkreis auf ein konstantes Spannungsniveau. Der Zwischenkreis des Eingangsumrichters ist direkt mit dem Zwischenkreis des danebenliegenden Ausgangsumrichters verbunden. Die Hardware dieser Umrichter ist ident. Die Software ist unterschiedlich. Der zweite Umrichter kann je nach Betriebsmodus an den Ausgängen eine Spannung bereitstellen. Mit 50 Hz 3x400 V oder 1x230 V stehen zwei Geräteanschlüsse für einen Netzbetrieb bereit. Mit Hilfe eines U/f-Betriebs können Asynchronmotoren gesteuert werden und mit einer lagegeberlosen Regelung werden PM-Synchronmotoren betrieben.

Der Umrichter hat ein IGBT<sup>20</sup>-Leistungsmodul bis 1200 V und 200 A Dauerstrom bei Raumtemperatur. Dieses Modul ist auf einem Kühlkörper montiert, in

<sup>20</sup>Insulated-Gate Bipolar Transistor



**Abb. 9.8:** Umrichtereinheit [Kog12]

Abbildung 9.8 ganz unten zu sehen, mit den Kühlkreislaufanschlüssen auf der rechten Seite. Darauf aufgesetzt ist die Leistungsplatine, in der linken Hälfte findet sich (v.l.n.r.): Dreiphasiger Anschluss (mit und ohne Ladewiderstände), Gleichrichter, Gleichspannungsanschluss, Zwischenkreiskondensatoren, Zwischenkreisstrommessung. Davor, von der Steuerplatine verdeckt, die Zwischenkreisspannungsmessung sowie die Schnittstellenstecker. In der rechten Hälfte sind ganz oben die Phasenanschlüsse zu erkennen, darunter die Phasenstrommessung, darunter die IGBT-Treiber und rechts davon sind die drei Phasenspannungsmessungen angebracht. Typisch für einen Prototypen ist der Umrichter sehr modular und mit vielen Sensoren für eine leichte Reperatur, Verbesserung und Weiterentwicklung aufgebaut.

Auf der Leistungsplatine aufgesteckt ist die Steuerplatine, Abb. 9.8. Ganz links ist die Programmierschnittstelle (JTAG<sup>21</sup>) zu erkennen, zentriert in der linken Hälfte der Mikroprozessor (TI 2808<sup>22</sup>, sowie in der rechten Hälfte die Sicherheitslogik mit den Potentiometern zur Einstellung von Spannungs- und Stromgrenzen. Die genauen Typenbezeichnungen der Umrichterkomponenten sowie Schaltpläne sind Anhang F zu entnehmen.

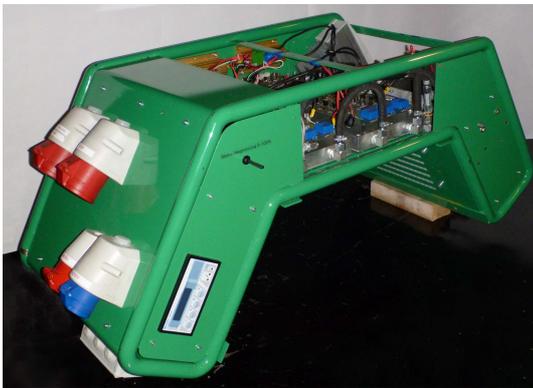
Zwischen den Phasenanschlüssen des Ausgangsumrichters und den Ausgangssteckdosen sind noch einige Relais, Sicherungsautomaten und eine Drossel zwischengeschaltet. So kann bei Bedarf (Modus Netzinselbetrieb) das Ausgangssignal geglättet werden und es werden die Anforderungen an die EMV<sup>23</sup> und an die Sicherheit erfüllt.

In Abbildung 9.9 sind einige Fotografien des fertigen ZWG dargestellt. Zur besseren Ansicht sind einige Verkleidungsbleche entfernt.

<sup>21</sup>Joint Test Action Group - IEEE 1149.1 Standard

<sup>22</sup>Texas Instruments, C2000 Family, TMS320F2808

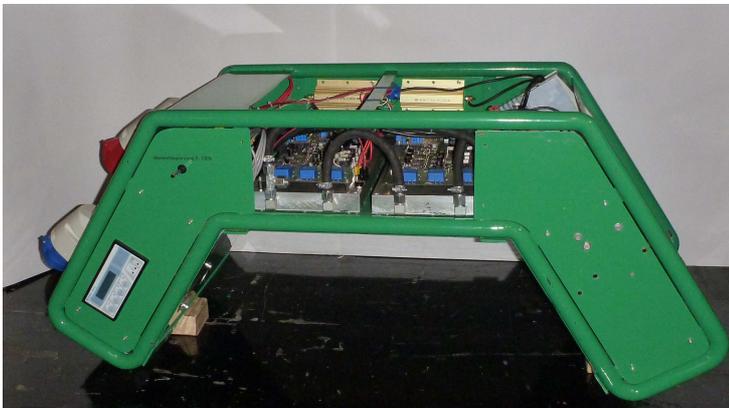
<sup>23</sup>ElektroMagnetische Verträglichkeit



(a) Schräg



(b) Oben



(c) Vorne



(d) Seite

**Abb. 9.9:** Verschiedene Ansichten des Zapfwellengenerators, teilweise geöffnet

In Abbildung 10.1 auf Seite 101 ist der ZWG im Einsatz mit einem Kreiselschwader zu sehen und in Abbildung 17.1 auf Seite 169 im Einsatz beim Mähen am Feld.

### 9.3 Sicherheitsaspekte

Beim Zapfwellengenerator ist auf die Sicherheit bezüglich Mechanik und Elektrik zu achten. Beschädigungen durch mechanische Einflüsse werden einerseits durch eine robuste Bauweise vermieden und andererseits sind die rotierenden Teile völlig verdeckt. Bei der elektrischen Sicherheit sind mehrere Faktoren zu beachten. Zum einen der Schaden an Personen und Maschine durch zu hohe Spannungen und Ströme, und zum anderen können EMV-Einflüsse durch die hochfrequenten Spannungspulsationen im Umrichterbetrieb Schaden am Gerät verursachen.

Die Spannungsflanken durch das Ein- und Ausschalten der Zwischenkreisspan-

nung im PWM<sup>24</sup>-Betrieb werden über die Anschlusskabel bis hin zum Verbraucher übertragen. Die Induktivität eines angeschlossenen Motors reicht zusammen mit einer Pulsfrequenz im kHz-Bereich aus, die daraus resultierenden Stromüberschwingungen auf ausreichend niedrige Werte zu bringen. Wenn ohmsche oder kapazitive Verbraucher versorgt werden sollen, fehlt die stromanstiegsbegrenzende Wirkung der Maschineninduktivität. Die parasitären Induktivitäten sind zu klein und es kommt zu EMV-Störungen, da die Ausgangsspannung direkt aus den Spannungspulsen des Pulswechselrichters gebildet wird. Dies kann dazu führen, dass das angeschlossene Gerät Schaden nimmt oder aus Eigensicherheit nicht funktioniert. Um dem entgegenzuwirken, wird im Inselnetzbetrieb eine Drossel zwischen Umrichter Ausgangsklemmen und Steckdosenklemmen geschaltet. Dadurch entsteht ein angenähert sinusförmiger Strom, entsprechend den normativen Anforderungen (z.B. EN 50160 - siehe auch Kapitel 5).

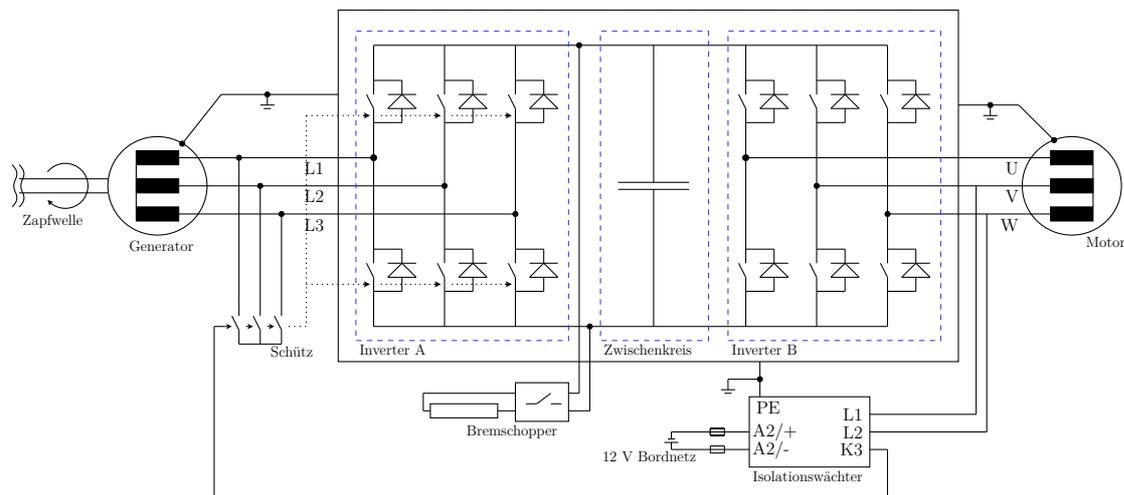


Abb. 9.10: Schema des ZWG mit Sicherheitseinrichtungen

Als Spannungsschutz ist ein Bremschopper installiert. Dieser schaltet bei Erreichen eines gewissen Spannungslevels einen Bremswiderstand an den Zwischenkreis, siehe Abbildung 9.10. Die Spannung vermindert sich bis zu einer Ausschaltsschwelle. So können keine Überspannungen im Zwischenkreis auftreten und keinen Schaden anrichten. Diese Überspannungen könnten auf zwei Arten entstehen. Erstens durch Rückspeisen, dh. die angeschlossene elektrische Maschine liefert Energie in den Zwischenkreis zurück und zweitens durch einen Lastabwurf, ein plötzliches Abschalten oder Ausfall des Geräts oder Antriebs, dh. die Energie des Generators wird nur in den Zwischenkreis geliefert. Je nach Kapazität des Zwischenkreises und Umfang der Laständerung steigt die Spannung an. Ist der Lastwechsel zu schnell und zu groß, dann kann der Spannungsregler an seine Grenzen stoßen und die

<sup>24</sup>PulsweitenModulation

Spannung steigt unzulässig an. Ohne einen Chopper kann die maximal zulässige Spannung im Zwischenkreis überschritten werden und die Umrichter nehmen Schaden.



**Abb. 9.11:** Anzeige des im ZWG eingebauten Isolationswächters

In Abbildung 9.10 ist ein Isolationswächter nach ÖN 8001 (Kap. 5) zu erkennen. Dieser hängt zwischen zwei Ausgangsphasen und der Schutz Erde und schaltet im Fehlerfall (Isolationsverletzung) per Schütz einen Klemmenkurzschluss. Ein möglicher Zwischenkreiskurzschluss über die Leistungstransistoren wird von der Leistungselektronik erkannt und der Umrichter schaltet in weiterer Folge ebenfalls aus. Der Generator, der bis zum Abstellen weiterhin von der Zapfwelle angetrieben wird, ist kurzschlussfest.

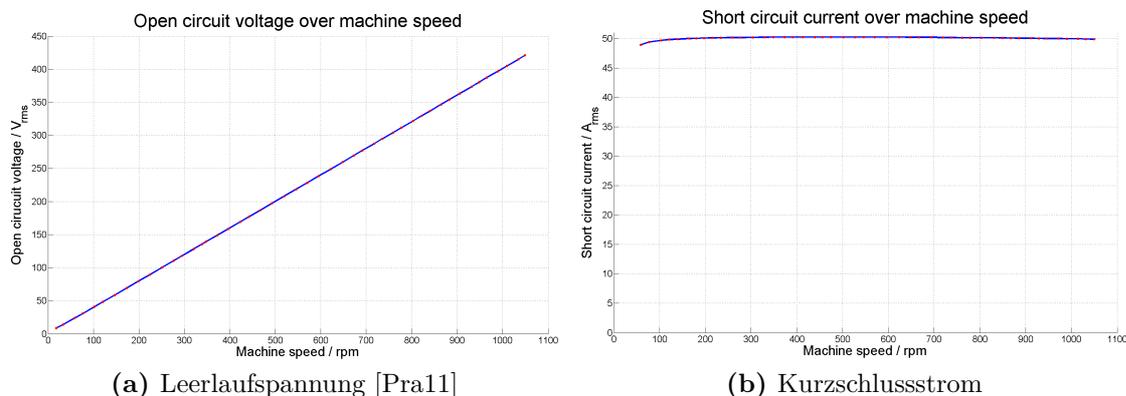
Der Isolationswächter wird direkt vom 12 V Bordnetz des Traktors versorgt, überwacht also als selbstständiges, externes Gerät. In Abbildung 9.11 ist der eingebaute Isolationswächter an der Gehäuseseite zu erkennen. Weitere Informationen zu den Komponenten sind Anhang F zu entnehmen.

## 9.4 Elektrische Kenndaten

### 9.4.1 Messdaten

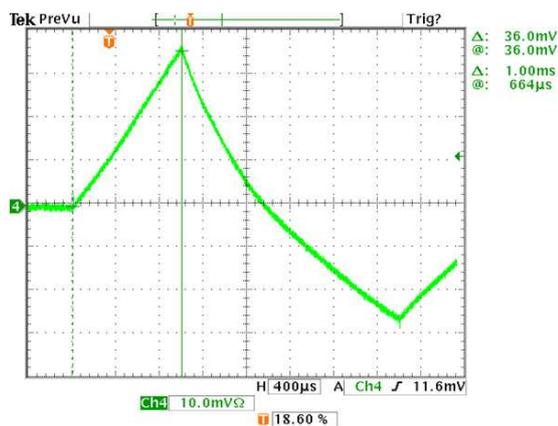
Mit Hilfe einer Lastmaschine wird die Drehzahl des Generators vorgegeben. Die Spannungsmessung an den offenen Klemmen und die Strommessung an den geschlossenen Klemmen sind in Abbildung 9.12 dargestellt. Die Spannung wird zwischen zwei Phasen bzw. Klemmen gemessen, der Strom in einer Phase, die Klemmen sind kurzgeschlossen. Es ergibt sich ein Strom von 50 A effektiv sowie eine Spannung von 400 V effektiv bei der Nenndrehzahl von 1000 U/min.

Weiters ist die Induktivität in Abbildung 9.13 gezeigt. Mittels eines Einzelpulses wird der Stromanstieg in der Phase aufgrund der Induktivitäten in der Maschine beobachtet. Einzelpuls heißt, dass die obere Halbbrücke der Phase U



**Abb. 9.12:** Zapfwellengenerator Kenndaten

und die unteren Halbbrücken von V und W für kurze Zeit eingeschaltet werden. In 1 ms steigt der Strom bei einer Zwischenkreisspannung von 100 V auf rund 35 A an.



**Abb. 9.13:** Zapfwellengenerator  
Stromanstiegsmessung zur Induktivitätsbestimmung  
Ch4: Phasenstrom (10A/Div)

Eine Widerstandsmessung mit einem Ohmmeter ergibt einen Widerstand von  $R_{\text{ph-ph}} = 0,1577$  Ohm zwischen den Phasen und somit einen Strangwiderstand von  $R_{\text{Strang}} = 0,0789$  Ohm.

### 9.4.2 Bezugsgrößen

Um die Kenndaten des Motors leichter handhaben zu können, und zur leichteren Rechenmöglichkeit mit Mikroprozessoren, werden die Daten in einer normierten Schreibweise dargestellt. Dass heißt, die physikalische Größe wird ins Verhältniss zu ihrer Bezugsgröße gesetzt, und man erhält einen bezogenen Wert. Die physikalische

Größe wird wie gewohnt in Großbuchstaben dargestellt, die bezogene Größe, mit der dann gerechnet wird, in Kleinbuchstaben. Ein Beispiel anhand des Stroms zeigt Formel 9.1. [Sch98]

$$i(t) = \frac{I(t)}{I_{\text{Bezug}}} \quad (9.1)$$

Im folgenden werden die Bezugsgrößen des Generators mit kurzer Erklärung angegeben.

### Bezugsdrehzahl

Als Bezugsdrehzahl wird die Nenndrehzahl gewählt:

$$n_{\text{Bezug}} = 1000 \text{ U/min} \quad (9.2)$$

Es ergeben sich die Bezugswinkelgeschwindigkeiten mit der Polpaarzahl  $p = 15$  zu:

$$\Omega_{\text{Bezug, mech.}} = 2\pi \cdot f_{\text{Bezug}} = 2\pi \cdot \frac{n_{\text{Bezug}}}{60} = 104,7 \text{ s}^{-1} \quad (9.3)$$

$$\Omega_{\text{Bezug, elek.}} = \Omega_{\text{Bezug, mech.}} \cdot p = 1571 \text{ s}^{-1} \quad (9.4)$$

### Bezogene Flussverkettung

Die Bezugsgröße der Flussverkettung wird so normiert, dass per Definition die bezogene Flussverkettung aufgrund der Permanentmagneterregung  $\psi = 1$  ist

$$\psi = \frac{\Psi}{\Psi_{\text{Bezug}}} = 1 \quad (9.5)$$

Dies hat folgenden Grund. Setzt man die Statorflussverkettungsgleichung (9.6) in die Statorspannungsgleichung (9.7) so ergibt sich (9.8).

$$\underline{\Psi}_S(\tau) = l_S \underline{i}_S + \underline{\Psi}_M \quad (9.6)$$

$$\underline{u}_S(\tau) = r_S \underline{i}_S + \frac{d\underline{\Psi}_S}{d\tau} + j\omega_K \cdot \underline{\Psi}_S \quad (9.7)$$

$$\underline{u}_S(\tau) = r_S \underline{i}_S + l_S \frac{d\underline{i}_S}{d\tau} + \frac{d\underline{\Psi}_M}{d\tau} + j\omega_K l_S \underline{i}_S + j\omega_K \underline{\Psi}_M \quad (9.8)$$

Bei Betrachtung der Gleichung im rotorfesten Koordinatensystem ( $\omega_K = \omega_m$ ) ist die Flussverkettung der Permanentmagnete konstant  $\frac{d\underline{\Psi}_M}{d\tau} = 0$ . Ist die Maschine im Leerlauf, ist der Statorstrom  $\underline{i}_S = 0$ . Somit vereinfacht sich Gleichung 9.8 zu:

$$\underline{u}_S(\tau) = j\omega_m \underline{\Psi}_M \quad (9.9)$$

Schreibt man diese Gleichung in normierter Schreibweise und berücksichtigt die

Definition  $|\underline{\psi}_m| = 1$ , so ergibt sich aus den bezogenen Größen der Zusammenhang, dass bei Bezugsdrehzahl die Bezugsspannung an der Klemme im Leerlauf anliegt.

$$|\underline{u}_S| = \omega_m \cdot |\underline{\psi}_m| \quad (9.10)$$

### Bezugsspannung

Die Bezugsspannung  $U_{\text{Bezug}}$  ist als Nenn-Spitzen-Strangspannung einer angenommenen Sternschaltung definiert. Die Nennspannung liegt gemäß obiger Überlegung an, wenn der Motor mit Nenndrehzahl im Leerlauf betrieben wird. Die verkettete effektive Nennspannung (zwischen zwei Phasen) wurde beim Leerlaufversuch mit  $U_{\text{verk, eff, nenn}} = 400 \text{ V}$  gemessen:

$$U_{\text{Bezug}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{str, eff, nenn}} = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{\text{verk, eff, nenn}}}{\sqrt{3}} = 326,6 \text{ V} \quad (9.11)$$

### Bezugsflussverkettung

Kennt man nun die Bezugsspannung, so kann mit Hilfe der vorhergehenden Definition die Bezugsflussverkettung errechnet werden:

$$\Psi_{\text{Bezug}} = \frac{U_{\text{Bezug}}}{\Omega_{\text{Bezug}}} = 0,208 \text{ Wb} \quad (9.12)$$

### Bezugsstrom

Der Bezugstrom  $I_{\text{Bezug}}$  ist der Nenn-Spitzen-Strangstrom einer angenommenen Sternschaltung:

$$I_{\text{Bezug}} = I_{\text{str, eff, nenn}} \cdot \sqrt{2} = 25 \text{ A} \cdot \sqrt{2} = 35,36 \text{ A} \quad (9.13)$$

### Bezugswiderstand

$$R_{\text{Bezug}} = \frac{U_{\text{Bezug}}}{I_{\text{Bezug}}} = 9,2 \text{ Ohm} \quad (9.14)$$

### Bezugsinduktivität

$$L_{\text{Bezug}} = \frac{1}{\Omega_{\text{Bezug}}} \frac{U_{\text{Bezug}}}{I_{\text{Bezug}}} = \frac{\Psi_{\text{Bezug}}}{I_{\text{Bezug}}} = 5,881 \text{ mH} \quad (9.15)$$

### Bezugszeit

$$T_{\text{Bezug}} = \frac{\Psi_{\text{Bezug}}}{U_{\text{Bezug}}} = \frac{1}{\Omega_{\text{Bezug}}} = 636,7 \text{ } \mu\text{s} \quad (9.16)$$

### Bezugsleistung

$$P_{\text{Bezug}} = 3 \cdot U_{\text{eff, Strang}} \cdot I_{\text{eff, Strang}} = \frac{3}{2} \cdot U_{\text{Bezug}} \cdot I_{\text{Bezug}} = 17321 \text{ W} \quad (9.17)$$

### Bezugsmoment

$$M_{\text{Bezug}} = \frac{P_{\text{Bezug}}}{\Omega_{\text{Bezug}}} = 165 \text{ Nm} \quad (9.18)$$

Die Nenndaten sowie Bezugs- und bezogenen Größen zum Generator sind in Anhang C.1 zusammengefasst.

## 9.5 Betriebsverhalten

Der Generator liefert je nach Drehzahl der Zapfwelle eine Drehspannung mit entsprechenden Werten von Frequenz und Spannungsbetrag. Durch ein einfaches Gleichrichten ergibt sich eine drehzahlabhängige Klemmenspannung. Deshalb wurde ein aktives Gleichrichtersystem mit Hochsetzfunktion angewendet. Mit dem Einsatz eines entsprechenden Regelalgorithmus kann diese Spannung auf ein konstantes Niveau geregelt werden.

In Abbildung 9.14 ist solch eine Regelung dargestellt. Rechts unten ist der Generator zu erkennen, dessen drei Phasen über ein IGBT-Leistungsmodul mit dem Zwischenkreis verbunden sind. Mit der darüber liegenden Leistungselektronik werden nun die Brücken so geschaltet, dass die Spannung auf ein konstantes Niveau gebracht wird. Liegt die gleichgerichtete induzierte Spannung des Generators unter der gewünschten Spannung, wird das System im Hochsetzbetrieb gefahren, liegt die induzierte Spannung über einem Maximalwert, muss die PSM feldgeschwächt werden.

Die gewünschte Hochsetzspannung (links oben) wird durch einen Hochlaufgeber geführt, zur Glättung beim Einschaltvorgang. Der Sollwert  $U_{\text{DC ref}}$  wird mit der aktuellen Spannung  $U_{\text{DC act}}$  verglichen, gemessen in der Leistungselektronik. Die Differenz wird mittels eines PI-Reglers ausgeregelt. Der Ausgang, eine q-Strom Komponente, wird innerhalb variabler Grenzen  $\mp i_{\text{q ref max}}(T)$  gehalten. Diese Grenzen sind von der Temperatur des Leistungsmoduls abhängig und dienen zum Schutz vor Überhitzung. Der begrenzte Sollstrom  $i_{\text{q ref}}$  wird in den Stromregler (ebenfalls PI-Regler) geführt und ergibt einen q-Anteil des Soll-Spannungsraumzeigers  $u_{\text{q ref}}$ . Eine negative q-Strom-Komponente sorgt für einen generatorischen Betrieb, und die Spannung im Zwischenkreis wird angehoben.

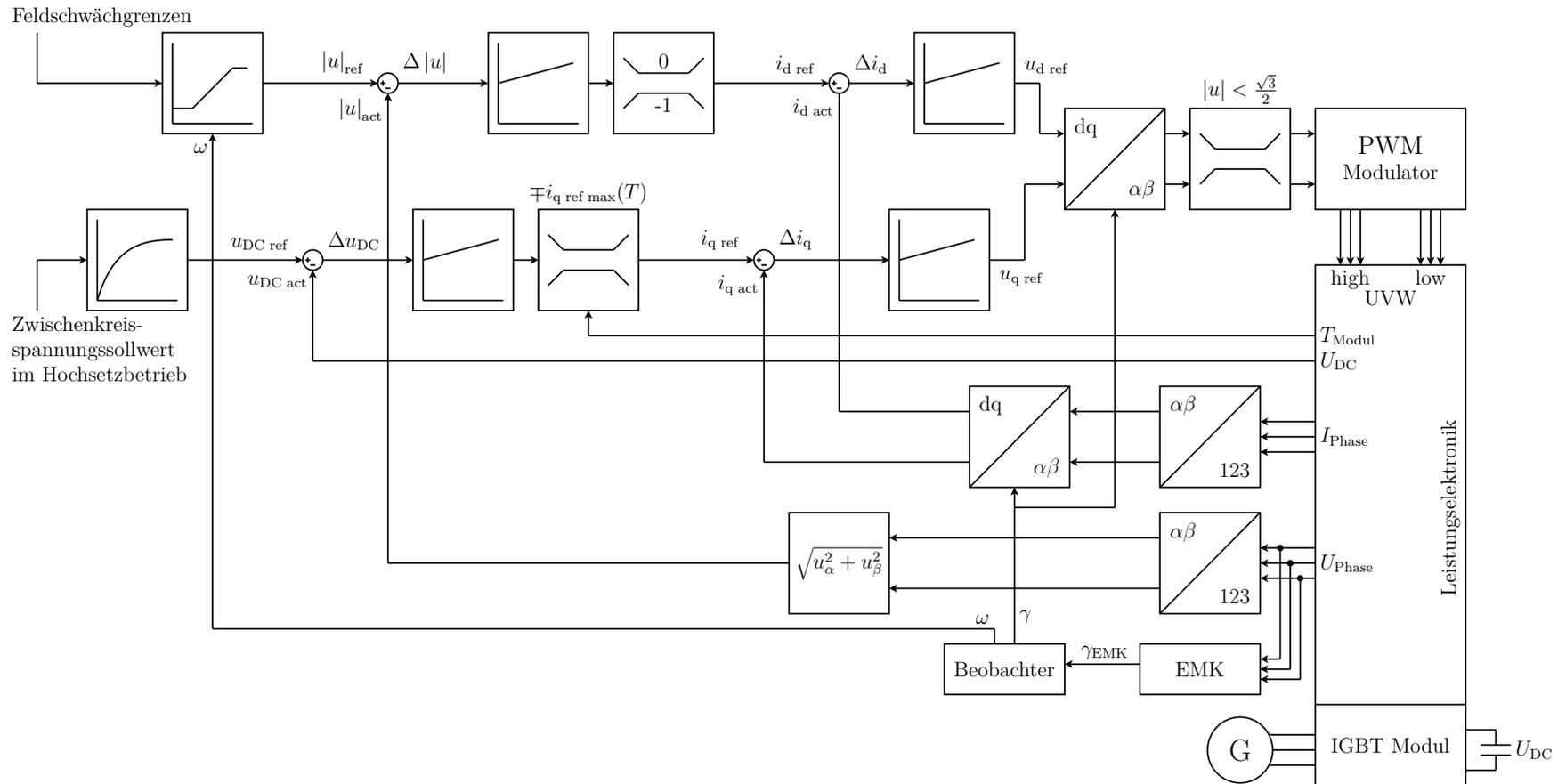


Abb. 9.14: Eingangseitiges Regelschema des ZWG

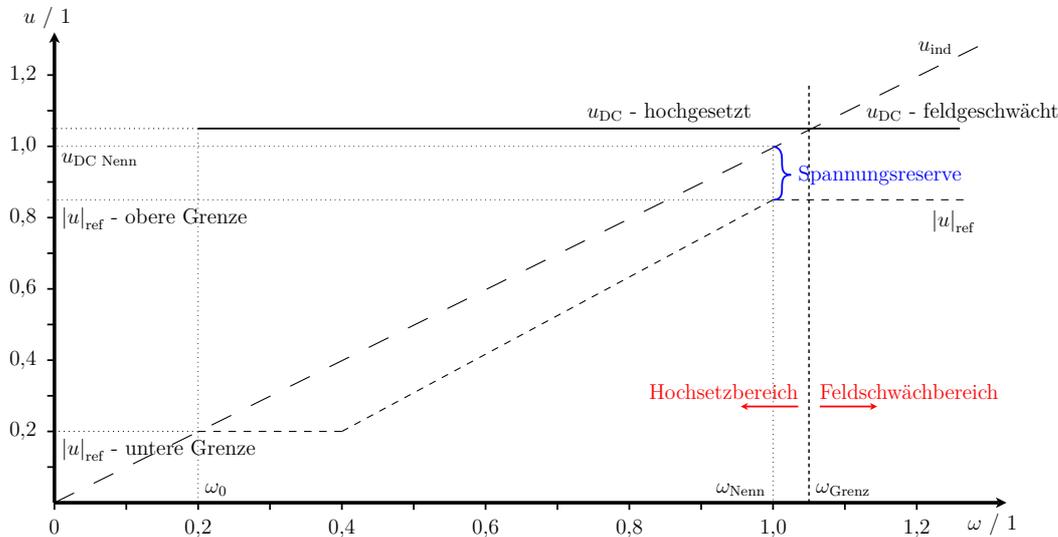
Steigt die Drehzahl der Zapfwelle über einen gewissen Wert, bei der die induzierte Spannung der Hochsetzspannung minus einer Spannungsreserve entspricht, muss eine Feldschwächung eingeleitet werden. Dies geschieht über eine negative d-Strom-Vorgabe  $i_{d \text{ ref}}$ , um den resultierenden magnetischen Fluss in der Maschine zu schwächen. Dazu wird der Betrag der Phasenspannungen  $|u|_{\text{act}}$  mit einer Sollgröße  $|u|_{\text{ref}}$  verglichen. Diese Sollgröße beinhaltet eine Spannungsreserve, um mögliche Momentänderung über die q-Stromkomponente erfüllen zu können. Damit dies über den gesamten Drehzahlbereich möglich ist, wird  $|u|_{\text{ref}}$  in Abhängigkeit von der Drehzahl  $\omega$  über eine Rampe verändert.

Die rotorfesten dq-Komponenten der Sollspannung werden nach einer Umwandlung in die statorfesten  $\alpha\beta$ -Komponenten auf ein Maximum von 0,865 beschränkt. Dies ist knapp unter  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  und somit kann eine vollständige Sinuskommutierung stattfinden. Ohne Begrenzung des Spannungsraumzeigers werden die einzelnen Schaltzeiten voll ausgenutzt und ein Sechseck in der Raumzeigerebene ausgefahren. Die errechneten Schaltzeiten des Modulators werden über die Leistungselektronik an die Halbbrücken des Moduls weitergegeben.

Da hier eine Regelung von d- und q-Stromkomponenten durchgeführt wird, führt dies zu Verkopplungen in den einzelnen Regeltermen. Ein Entkopplungsnetzwerk schaltet die verkoppelten Terme mit verkehrtem Vorzeichen auf den Signalpfad. Dann bleiben nur mehr zwei entkoppelte Regelglieder übrig [Sch00]. Ohne Entkopplungsnetzwerk war beim Einschaltvorgang des Hochsetzers ein enormes Überschwingen zu bemerken. Ein realisiertes Entkopplungsnetzwerk führte jedoch zu einem instabilen Betrieb. Stattdessen wurde beim Sollwerteingang des Spannungsreglers die Regeldifferenz verkleinert und somit der Einschaltsprung geringer. Das anfängliche Überschwingen konnte verhindert werden. Messergebnisse zum Einschalten des Hochsetzers sind Kapitel 14.2 zu entnehmen.

Die einzelnen Betriebsbereiche des ZWG über die Drehzahl sind in Abbildung 9.15 dargestellt. Die induzierte Spannung des Motors  $U_{\text{ind}}$  ist direkt proportional zur Drehzahl. Bei Nenndrehzahl ( $\omega = \omega_{\text{Nenn}} = 1$ ) ergibt sich durch passives Gleichsetzen die Nennzwischenkreisspannung  $u_{\text{DC}} = u_{\text{DC Nenn}} = 1$ . Ausgehend von dieser Drehzahl wird die Spannung etwas hochgesetzt. Sinkt die Drehzahl ab, wird diese Spannung mit einem Hochsetzregler konstant gehalten (Hochsetzbetrieb). Steigt die Drehzahl an, muss durch Feldschwächen die Klemmenspannung auf ein konstanten Wert beschränkt werden, dass dieser Hochsetzer noch funktioniert (Feldschwächbetrieb). Für das Hochsetzen muss eine Mindestdrehzahl  $\omega_0$  vorhanden sein, da sonst die Winkelerfassung durch das EMK-Modell nicht mehr gegeben ist.

Je nachdem, wo die gewünschte Zwischenkreisspannung liegen soll, werden die Betriebsbereiche von Hochsetzen und Feldschwächen verschoben. Dies ist in Abbil-


**Abb. 9.15:** Betriebsbereiche des ZWG

dung 9.15 durch den Grenzwert  $\omega_{\text{Grenz}}$  dargestellt, welcher der Drehzahl entspricht, bei der die an den Klemmen anliegende, passiv gleichgerichtete Spannung der gewünschten Zwischenkreisspannung entspricht. Somit wird über einen längeren Bereich hochgesetzt oder das Feldschwächen startet früher. Die Spannungsreserve ist ebenfalls skizziert. Um diese konstant zu halten, muss der Regelparameter für die Feldschwächung  $|u|_{\text{ref}}$  nachgeführt werden. Dies wird in erster Näherung über eine Rampe abhängig von der Drehzahl erledigt, von  $\omega_0$  bis  $\omega_{\text{Nenn}}$ .

Ein weiterer Punkt im Betriebsverhalten ist der sogenannte Lastabwurf. Schnelle Laständerungen können durch einen schnellen Regler abgefangen werden, da dieser es schafft, die Spannung weiterhin konstant zu halten. Dazu muss kurzzeitig aus dem Normalfall, dem generatorischen Betrieb mit einer negativen  $q$ -Stromkomponente, in einen motorischen Betrieb mit einer positiven  $q$ -Stromkomponente gewechselt werden. Durch das Verwenden eines reinen P-Reglers ist es möglich, schnell auf solch einen Fall zu reagieren. Beim Lastabwurf spricht man vom plötzlichen Trennen der gesamten Last vom Ausgang. In Folge wird die Energie, die zu diesem Zeitpunkt aus dem rotierenden Generator entnommen wird, in den Zwischenkreiskondensator gepumpt, und die Zwischenkreisspannung steigt rasch an. In solch einem Fall ist auch der verwendete Regler dafür zu langsam. Würde man den Regler auf den Fall abstimmen, wäre wegen der hohen Dynamik der normale Hochsetzbetrieb ohne Schwingungen nicht möglich. Eine Störgrößenaufschaltung wäre eine Lösung, ist jedoch nicht möglich, da der Eingangsumrichter nicht mit dem Ausgangsteil kommuniziert und somit der Lastabwurf erst erkannt wird, wenn es zu spät ist. Messungen sind Kapitel 14.4 zu entnehmen.

## 10 Elektrischer Schwader

Ein Beispiel für eine realisierte, elektrifizierte Anbaugeräteanwendung zeigt Abbildung 10.1 in Form eines Kreiselschwaders. Dieser wurde auf der VDI-MEG Tagung 2011 in Wieselburg präsentiert [Pra11]. Mit diesem Gerät wird nach dem Arbeitsschritt des Mähens das Mähgut in eine Schwadform gebracht, um es anschließend leicht einsammeln zu können. Die konventionelle Form eines Schwaders hat als Antrieb eine Kopplung zur Zapfwelle. Per Getriebe wird die Drehzahl der Zapfwelle gesenkt und der Kreisel wird ohne weitere Regelungsmöglichkeit direkt angetrieben. Somit ist die Umdrehungsgeschwindigkeit der Schwaderrechen direkt an die Fahrgeschwindigkeit des Traktors gekoppelt.



**Abb. 10.1:** Kreiselschwader [Pra11]

Bei der elektrifizierten Variante wird statt der Zapfwelle ein Elektromotor an den Schwader geflanscht, Abb. 10.1 rechts. Dabei handelt es sich um eine permanentmagneterregte Synchronmaschine mit direkt verbauter Getriebestufe, da nur kleine Drehzahlen benötigt werden. Mit dieser Lösung kann unabhängig von der Traktorfahrgeschwindigkeit die Schwadkreiseldrehzahl eingestellt werden, und so im Bedarfsfall je nach Bestand und Geländeform eine Anpassung erfolgen.

Der Motor der Firma SEW hat rund 12 kW bei 4500 U/min Nenndrehzahl und einem Nennmoment von 25 Nm. Das Getriebe mit Übersetzung 1 : 7,53 ist direkt angebaut. Die Kühlung erfolgt als passive Luftkühlung. Weitere Daten zum Motor siehe Anhang C.3. Prüfstandsmessungen folgen in Kapitel 15.2. Feldversuchsmessungen wurden bis dato nicht durchgeführt.

## 11 Elektrischer Mähauflbereiter

Ein weiteres Beispiel ist die Elektrifizierung eines Mähauflbereiter [Kog12]. Eine Auflbereiterwelle ist als optionale Zusatzausstattung an einem Mähwerk installiert. Direkt nach dem Schneiden durch das Schneidwerk kommt das lose Mähgut zu einer sich drehenden Welle. Auf dieser Welle sind je nach Futtermittelart diverse Zinken aufgebracht. Die Zinken erfassen das Mähgut und beschleunigen die einzelnen Grashalme. Diese werden verwirbelt und gegen feststehende Zinken geschleudert. Bei diesem Vorgang versucht man den Halm mehrmals zu knicken, um den nachfolgenden Abtrocknungsvorgang zu verkürzen. Ist die Hülle beschädigt, kann die Feuchtigkeit im Inneren schneller entweichen.



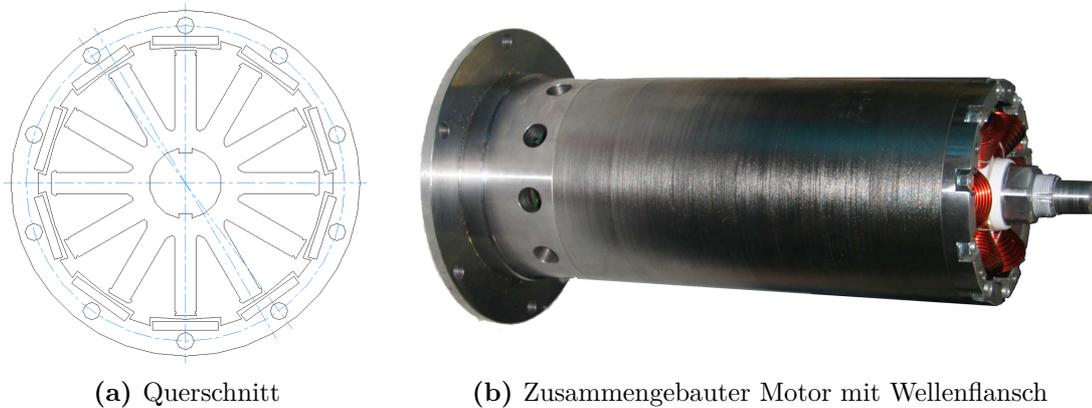
Abb. 11.1: Auflbereiterwelle [Poe13]

Abbildung 11.1 zeigt ein Trommelmähwerk mit Auflbereiterwelle. Bild (a) zeigt eine Detailansicht mit der Welle und den Zinken im Vordergrund. Die Welle wird links per Keilriemen angetrieben. Der Nachteil dabei: Die Drehzahl ist an die Fahrgeschwindigkeit bzw. an die Mähscheibendrehzahl direkt gekoppelt. Der Landwirt kann Parameter am Mähwerk und an der Welle verändern, jedoch nicht während der Fahrt. Dies sind zum Beispiel die Höhe der Welle oder der Abstand der Welle zu den feststehenden Zinken. Bild (b) zeigt das Gerät im Einsatz.

Es wird vermutet, dass die Auflbereiterdrehzahl den stärksten Einfluss auf die Abtrocknungszeit hat. Dieser Parameter steht stark unter dem Einfluss der Futtermittelart (vom Gras bis zur Luzerne) und der Dichte des Bestandes. Eine variable Drehzahl der Welle während des Arbeitsvorganges abhängig vom Mähgut wäre also optimal, um die Trocknungszeit zu verkürzen und somit die Gesamtproduktivität zu steigern.

## 11.1 Rohrmotor

Wegen der baulichen Möglichkeiten wurde an einen Rohrmotor gedacht. Dieser wird als Außenläufer in die Welle eingebaut und treibt die Welle direkt an. Dadurch sind keine weiteren Getriebe oder Keilriemen nötig und der Platzbedarf sinkt auf ein Minimum. Die permanentmagneterregte Synchronmaschine wurde auf eine Nenndrehzahl von 1000 U/min mit einem Nennmoment von 100 Nm ausgelegt. Ein Querschnitt des Motors ist in Abbildung 11.2 (a) zu sehen. Zu erkennen 10 magnetische Pole, vergraben im Rotor, und 12 Zähne am innenliegenden Stator. Die Spulen sind als Einschichtwicklung ausgeführt.



**Abb. 11.2:** Rohrmotor einer Aufbereiterwelle [Kog12]

In Abbildung 11.2 (b) ist der zusammengebaute Motor zu erkennen. Links ist die Flanschplatte für die Befestigung in der Aufbereiterwelle abgebildet. Der restliche, schmälere Teil des Motors steht in das Rohr hinein. Auf der rechten Seite fehlt der Rotordeckel, um einen Blick auf die Statorspulen zu erlangen.

Weitere Kenndaten sowie die bezogenen Größen des Rohrmotors sind in Anhang C.2 einzusehen. Die Prüfstandsversuche sind in Kapitel 15.1 zu finden. Die Feldversuche wurden in abgeänderter Form (siehe nächstes Kapitel) durchgeführt und sind in Kapitel 17 zu finden.

## 11.2 Riemenantrieb

Wegen absehbarer zeitlicher Probleme des Rohrmotor-Prototypen zum Feldversuchstermin, geplant war der erste Schnitt<sup>25</sup> 2012, wurde als Alternative eine handelsübliche PSM auf ein konventionelles Mähwerk installiert und per Riemen mit

<sup>25</sup>Erster Schnitt: Das erste Mal Mähen einer jeden Saison, besonders ertragreicher, dichter Bestand und somit leistungsintensives Mähen

der Aufbereiterwelle verbunden. Wegen der relativ hohen Aufbereiterdrehzahl war ein getriebeloser Motor im Einsatz. Mit einer Riemenübersetzung von 160:224 und einem 1:3 Planetengetriebe wurde die Motornendrehzahl von 4500 U/min auf die Aufbereiterwellendrehzahl von 1040 U/min gebracht.



**Abb. 11.3:** Mähwerk mit Industrieelektrokomponenten

Passend zum Elektromotor wurde auch ein Industrieumrichter verwendet, um die PSM mit integriertem Lagegeber geregelt betreiben zu können – ein sensorloser Betrieb mit der eigenen Umrichterhardware wurde erst in späterer Folge realisiert.

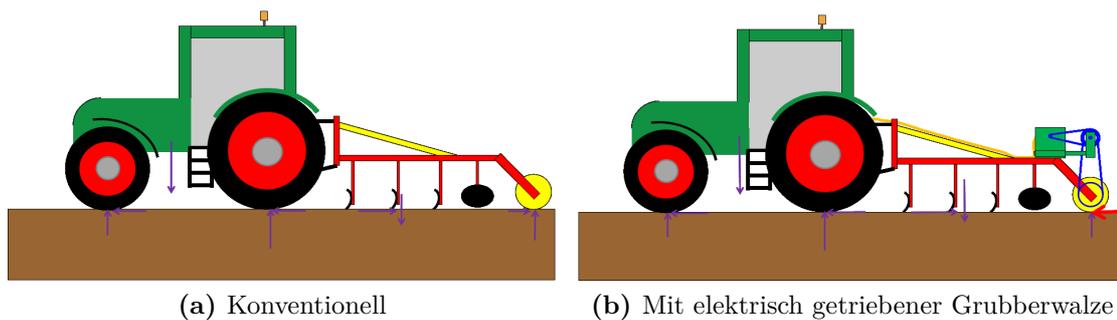
Die Komponenten sind in Abbildung 11.3 im eingebauten Zustand am Feld zu betrachten. Links ist der am Traktor montierte Schaltschrank mit dem Industrieumrichter der Fa. Refu zu erkennen, gekoppelt mit einem Notebook zur Parametereinstellung am Boden darunter liegend. Die Zapfwelle (etwa Bildmitte) treibt weiterhin die Mähscheiben an. Im rechten hinteren Teil des Mähwerks ist die PSM der Fa. Schabmüller zu erkennen. An der Außenseite des Mähwerks ist ein Riemen zur darunterliegenden Aufbereiterwelle gespannt, die Schutzvorrichtung ist hochgeklappt. Die elektrische Leistung wurde vom ZWG an der Frontzapfwelle zur Verfügung gestellt.

Somit war ein drehzahlunabhängiger Betrieb der Aufbereiterwelle mit zugekauften Komponenten möglich. Datenblatt zum Motor sowie die bezogenen Größen sind in Anhang C.4 gelistet. Die Feldversuche sowie Prüfstandsversuche sind

in Kapitel 17 und 15.3 zu finden, Daten zum Industriemrichter der Fa. Refu in Anhang D.5

## 12 Elektrische Grubberwalze

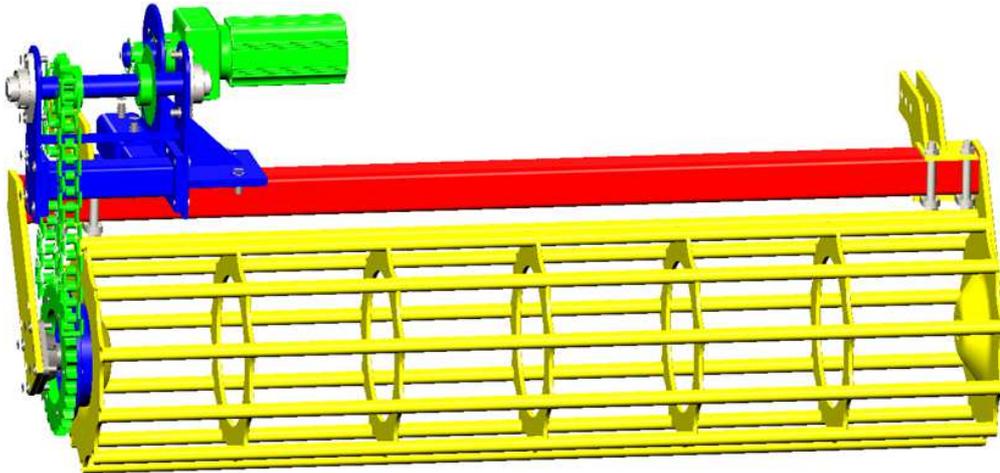
Ein weiteres Anbaugerät, das mit einem Elektromotor ausgestattet wurde, ist ein Grubber. Dieser wird zum Lockern des Bodens sowie Einarbeitung von Humus und Unkraut verwendet. Im Vergleich zum Pflug wird die oberste Bodenschicht jedoch nicht gewendet. Der Grubber wird an der Hinterseite des Traktors befestigt und beim Arbeitsvorgang nachgezogen. Grubberzacken bearbeiten den Boden und im Anschluss zerkleinert eine Grubberwalze mögliche größere Erdbrocken und walzt den Boden. Der konventionelle Grubber hat keinerlei Antriebs- oder Steuereinheiten. In Abbildung 12.1 ein ein Grubber mit Traktor skizziert.



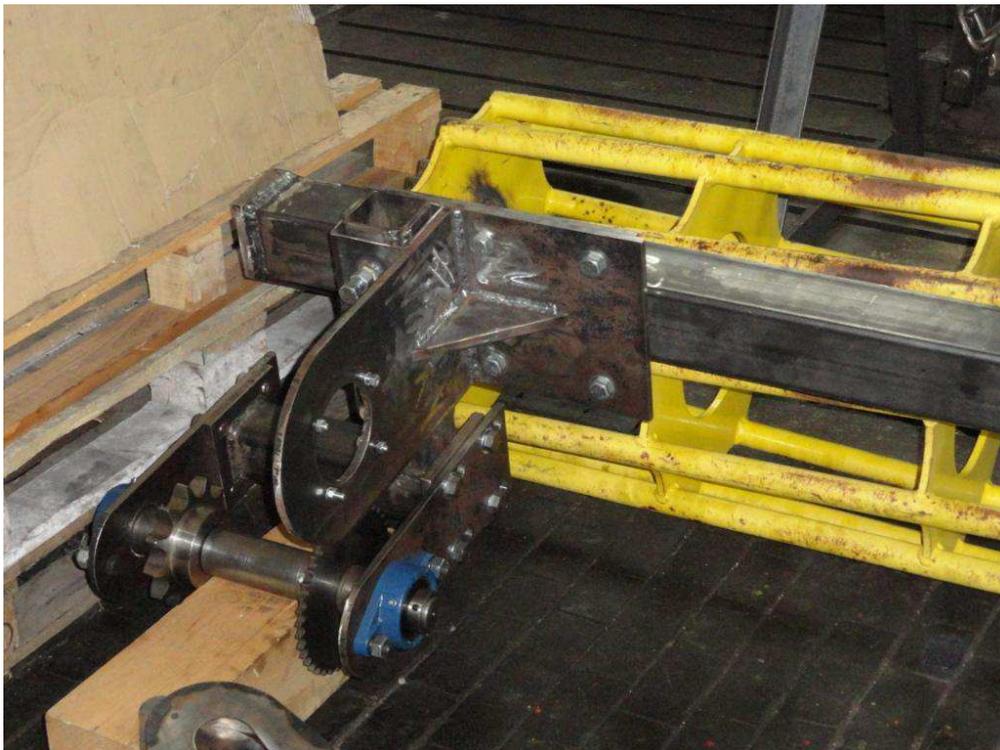
**Abb. 12.1:** Skizze eines Traktors mit Grubber [BLT13]

Da die Grubberwalze nicht angetrieben wird, erhöht sich die nötige Zugkraft und es entstehen zusätzliche Schleppverluste zwischen Traktorrads und Boden. Wenn die Walze aktiv angetrieben wird, so können diese Effekte vermieden werden, und der Systemwirkungsgrad sollte steigen. Dies ist in Abbildung 12.1 rechts dargestellt.

Zum Antreiben der Walze wird, wie schon beim Schwader, der Getriebemotor der Fa. SEW verwendet. Abbildung 12.2 zeigt eine Skizze und ein Foto einer umgebauten Walze. Weitere Kettengetriebestufen sind nötig, um die Drehzahl der Grubberwalze soweit zu verringern, dass diese der Fahrgeschwindigkeit angepasst ist. Prüfstandsmessungen folgen in Kapitel 15.2. Feldversuchsmessungen wurden bis dato nicht durchgeführt.



(a) Skizze des Gesamtaufbaus



(b) Foto von der Antriebsseite

**Abb. 12.2:** Die umgebaute Grubberwalze [BLT13]

## Teil III

# Am Prüfstand und am Feld

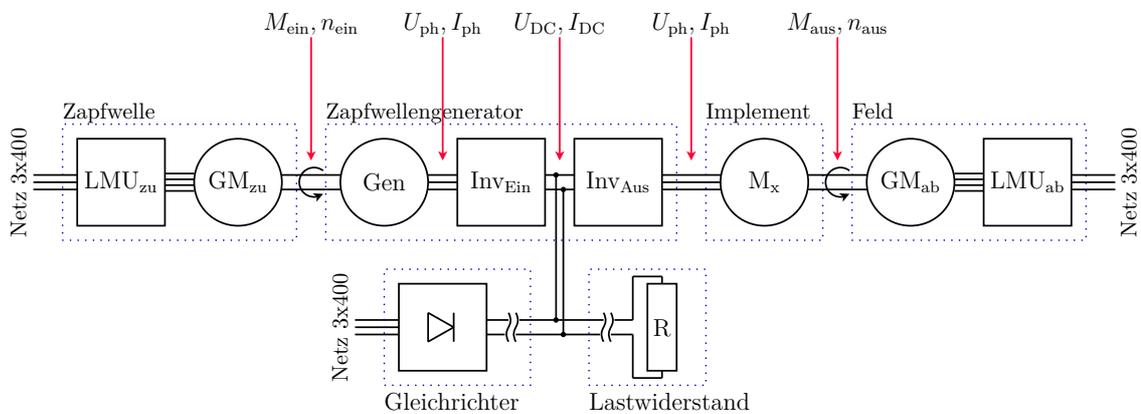
Messungen, Betrieb und Tests eines elektrischen Gesamtsystems



## 13 Prüfstandsaufbau

### 13.1 Aufbau am Maschinenbett

Die Prüfstandsversuche wurden sowohl mit dem Zapfwellengenerator als auch mit den drei vorhin beschriebenen Antrieben (Rohrmotor, Getriebemotor, getriebeloser Motor) an zwei Prüfständen durchgeführt. Die erzeugte elektrische Energie des ZWG wurde dabei entweder an einem Lastwiderstand in Wärme umgewandelt, oder bei kombinierten Messungen an die Motoren weitergegeben. Analog dazu wurden die Motoren aus dem Stromnetz oder vom ZWG versorgt. Einen Überblick des Aufbaus zeigt Abbildung 13.1.



**Abb. 13.1:** Messaufbau – Verschiedene Variationen eines Messablaufs

Der Energiefluss ist hier von links nach rechts aufgetragen. Vom Stromnetz aus wird per Lastmaschinenrichter (LMU<sub>zu</sub>) und Gleichstrommaschine (GM<sub>zu</sub>) die Zapfwelle angetrieben. Es gibt eine Drehmoment- und Drehzahlmessung mit einer Momentmesswelle. Der gekoppelte Generator speist den Eingangsumrichter (Inv<sub>ein</sub>). Über einen gemeinsamen Zwischenkreis wird der Ausgangsumrichter (Inv<sub>aus</sub>) versorgt. Im Zwischenkreis sowie in einer Generatorphase werden Strom und Spannung gemessen. Mit dem Ausgangsumrichter wird der Motor angetrieben. Es erfolgt wiederum eine Messung von Strom und Spannung einer Phase. Der Motor ist an eine weitere Gleichstrommaschine mit Umrichter gekoppelt und die Energie wird ans Netz zurückgegeben. An dieser Welle erfolgt ebenfalls eine Messung von Drehzahl und Moment.

#### 13.1.1 Zapfwellengenerator

Der Generator wurde statt des Zapfwellenstummels per Kardanwelle an die Gleichstrommaschine angekoppelt, die per Umrichter mit ferngesteuertem Bediengerät

in Betrieb genommen werden kann. Die Gleichstrommaschine wurde drehzahlge-  
regelt betrieben und simulierte die Zapfwelle des Traktors mit der gekoppelten  
Drehzahl zur VKM. Das Umrichterpaket des ZWG war von der Aufhängung de-  
montiert, seitlich platziert und mit den selben Phasenkabeln angeschlossen um die  
Leitungslänge gleich zu lassen.



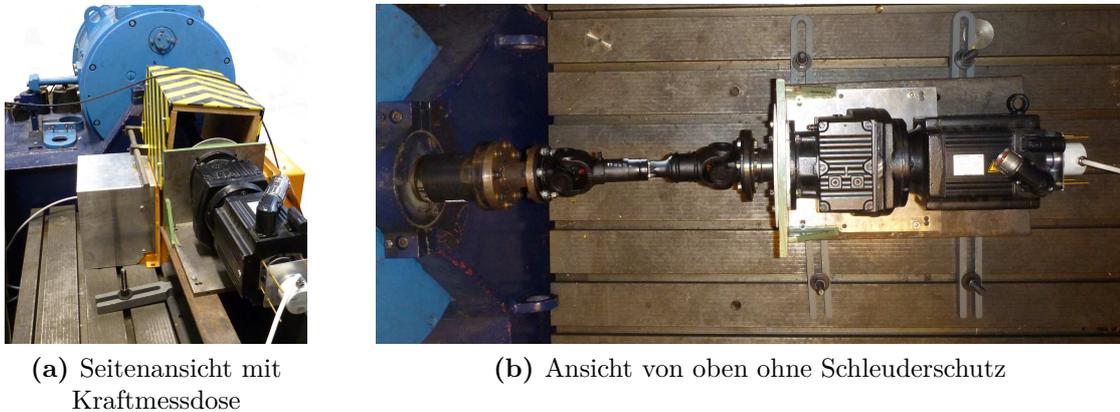
**Abb. 13.2:** ZWG am Prüfstand

Abbildung 13.2 zeigt ein Bild des Prüfstandaufbaus. Links der ZWG mit Blech-  
gehäuse, rechts die Lastmaschine in blau. Eine Momentmesswelle nach der Kar-  
danwelle liefert ein frequenzmoduliertes Signal über Drehzahl und Drehmoment.  
Aus dem Anhang sind Details über die Gleichstrommaschine (D.2), den dazuge-  
hörigen Umrichter (D.4) sowie die Messwelle (D.1) zu entnehmen.

### 13.1.2 Motoren

Die drei zu prüfenden Motoren waren an einer weiteren Gleichstrommaschine ge-  
koppelt, betrieben mit einem Umrichter gleicher Bauart. Hier war die Gleichstrom-  
maschine als Lastabnahme in Verwendung, sowohl drehzahlge-regelt bei Momenten-  
tests als auch momentgeregelt bei Drehzahltests am Prüfling. Diese Gleichstrom-  
maschine ist als Pendelmaschine konzipiert, dh. der Stator ist drehbar gelagert.  
Zwischen einem am Stator befestigten Arm und einem Abnehmer am Maschinen-  
bett wird per Kraftmessdose das Drehmoment bestimmt. Der Arm mit Messdose  
ist in Abbildung 13.3 (a) links zu erkennen. Die Drehzahlmessung erfolgte über

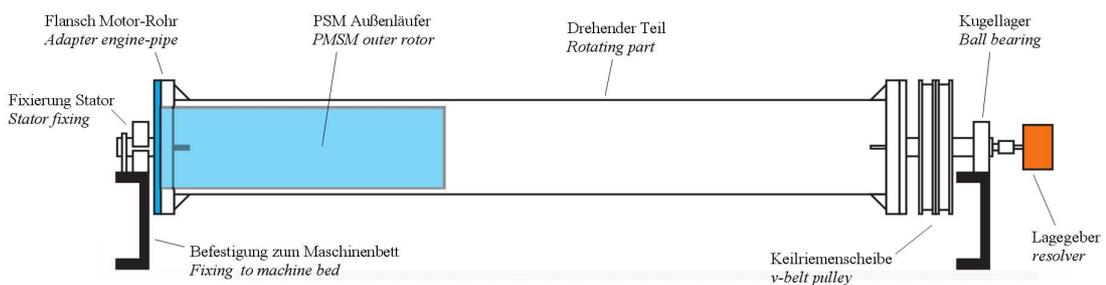
eine Nulldurchgangsmessung der Phasenspannung des Prüflings.



**Abb. 13.3:** Motor am Prüfstand

Abbildung 13.3 (b) zeigt den Getriebemotor als Beispiel für einen am Prüfstand montierten Motor. Alle Motoren werden per INFORM-Verfahren geregelt und benötigen somit keinen Lagegeber. Für die Prüfstandsversuche wurden trotzdem zu jedem Motor Lagegeber installiert. In der Abbildung ist links ein solcher zu erkennen. Details zum INFORM-Betrieb finden sich in Kapitel 16.

Aus dem Anhang sind Details über die Gleichstrommaschine (D.3), den dazu gehörigen Umrichter (D.4) sowie der Momentmeseinrichtung (D.6) zu entnehmen.



**Abb. 13.4:** Skizze des Aufbereiterwellenprüfstands [Kog12]

Der Aufbau des Rohrmotors unterschied sich zu den beiden Industriebmotoren. Für den Prüfstand wurde eine Welle angefertigt, mit der halben Länge einer konventionellen Aufbereiterwelle. Zur Befestigung am Maschinenbett wurden die Aufnahmelager etwas adaptiert. Der Motor wurde wie geplant in die Welle eingeschoben und verschraubt. Zu Testzwecken wurde auch eine Wasserkühlung im Stator installiert, die auf einer Seite der Lagerung zugänglich ist. Auf der anderen

Seite wurden nach dem Lager zwei Riemenscheiben befestigt. Per Keilriemen wurde die Welle an die Gleichstrommaschine gekoppelt. Nach den Scheiben wurde ein Lagegeber befestigt. Eine Übersicht gibt Abbildung 13.4 wieder.

## 13.2 Leistungsmessung

Neben den bereits beschriebenen Moment und- Drehzahlmessungen zur Erfassung der mechanischen Leistung wurden auch Strom und Spannung am Zwischenkreis gemessen. Dadurch konnte die elektrische Leistung zwischen dem Eingangs- und dem Ausgangsumrichter bestimmt werden. Somit war eine getrennte Bestimmung des Wirkungsgrades der Eingangsseite und der Ausgangsseite möglich. Um den Phasenstrom sowohl beim Generator als auch beim Motor zu kennen, wurde jeweils eine Phase mit einer Strommessung bestückt und bzw. die verkettete Spannung gemessen. Der Messaufbau in Abbildung 13.1 zeigt eine Übersicht.

Die Auswertung all dieser Messsignale wurde mit einem Leistungsmessgerät<sup>26</sup> durchgeführt. So konnten die Werte gleichzeitig erfasst und im Anschluss gemeinsam ausgewertet werden. Die Spannungsmessung wurde direkt über die Messkarten erledigt, die Ströme per Stromwandler und Bürde zuerst in Spannungen gewandelt. Die Kraftmessdose für die Momentmessung am Abgang lieferte eine Spannung, die Messwelle am Eingang ein PFM<sup>27</sup>-Signal und wurde über einen eigenen Eingang eingelesen. Nähere Informationen sind in Anhang D.7 gelistet.

## 13.3 Temperaturmessung

Da in landwirtschaftlichen Anwendungen sehr große Leistungen benötigt werden, meist auch über einen längeren Zeitraum, ist die Betrachtung der Temperatur wichtig. Deshalb wurden Temperaturmessungen, jeweils mit geschlossenem, und mit offenem Generator, an folgenden Stellen durchgeführt:

- 3 Berührungssensoren am Stator (Statorspule, Statorblech, Statorwelle)
- 3 Berührungssensoren am Rotor (Oberfläche, Magnete, Rotorblech)
- 1 mal berührungslos an der Rotoroberfläche
- 2 mal an der Umrichtereinheit (direkt im Modul, am Kühlkörper)

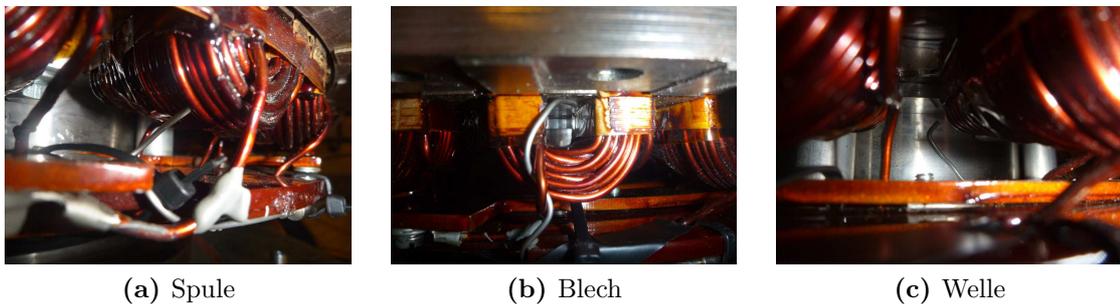
Die Temperatur des Leistungsmoduls wird über einen integrierten Sensor ermittelt und steht im DSP<sup>28</sup> jederzeit zur Verfügung. Um die Wärmeabgabe an den

---

<sup>26</sup>Dewetron DEWE 2600

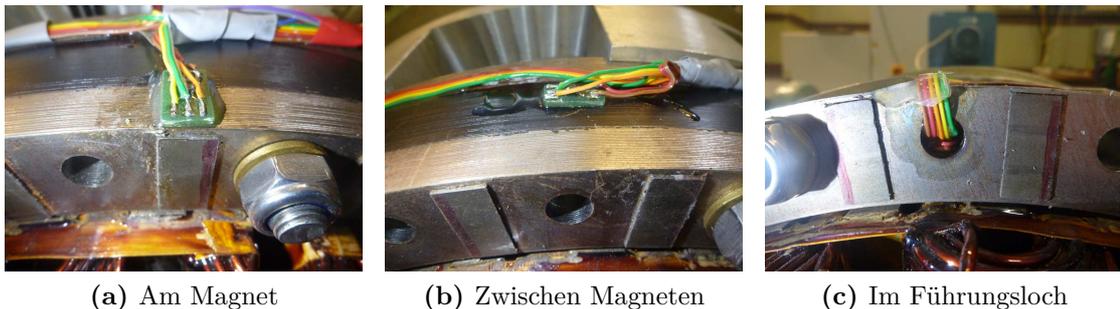
<sup>27</sup>Puls-Frequenz-Modulation

<sup>28</sup>Digitaler Signalprozessor



**Abb. 13.5:** Temperatursensoren am Stator

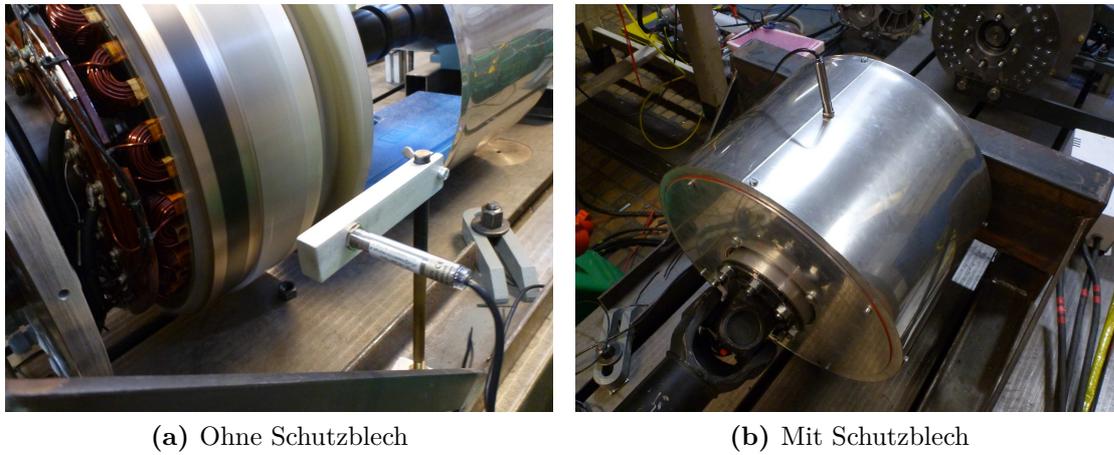
Kühlkörper zu überprüfen, wurde an der Längsseite in der Nähe des Rücklaufanschlusses ein Sensor befestigt. Der Stator wurde mit drei Sensoren ausgestattet – einer direkt an der Spule, einer am Blechpaket und einer an der Statorwelle, um die Wärmeabgabe über die mechanischen Bauteile zu überprüfen. Die genaue Positionierung ist aus Abbildung 13.5 zu entnehmen.



**Abb. 13.6:** Temperatursensoren am Rotor

Am Rotor wurden drei Temperatursensoren an drei verschiedenen Stellen positioniert, wie Abbildung 13.6 zeigt – am Blech direkt beim Magneten, am Blech zwischen zwei Magneten und zentral im Blechpaket durch Nutzung eines Führungslochs zur Verschraubung. Die Informationen der Temperatursensoren wurden per Funk an einen PC übertragen. Eine weitere Temperaturmessung wurde berührungslos mit einem Infrarotsensor durchgeführt, dieser wurde in radialer Richtung auf die Rotoroberfläche ausgerichtet. Nähere Informationen zu den Messinstrumenten siehe Anhang D.8.

Bei Temperaturläufen mit offenem Generator wurden die zwei Systeme verglichen und lieferten weitgehend idente Temperaturen an der Oberfläche. Der im Loch platzierte Temperatursensor war jeweils um ein bis zwei Grad wärmer. Durch diese Information konnten die Temperaturläufe mit geschlossenem Generatorgehäuse mit dem Infrarotsensor durchgeführt werden. Die Funkmessung war wegen



**Abb. 13.7:** Infrarottemperaturmessung am Rotor

der guten elektromagnetischen Schirmwirkung des Schutzes nicht möglich. Abbildung 13.7 (a) zeigt eine Messung bei offenem Generator. Beim geschlossenen Generator wurde der Sensor am Schutzblech befestigt, siehe (b). Die Messergebnisse der Infrarotmessung sind in Kapitel 14 zu finden.

## 14 Zapfwellengenerator im Test

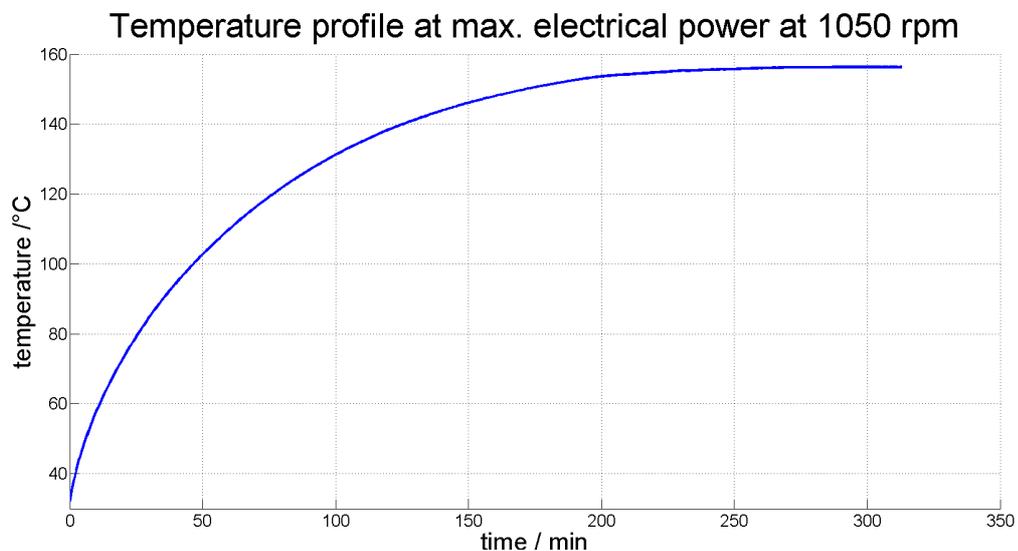
Im folgenden werden die Messergebnisse des Zapfwellengenerators präsentiert. Gemessen wurde Temperaturentwicklung, Wirkungsgrad und Funktionalität folgender Komponenten:

- Generator alleine,
- Generator mit Eingangsumrichter,
- gesamter ZWG (Generator mit Eingangs- und Ausgangsumrichter)

### 14.1 Temperaturmessung

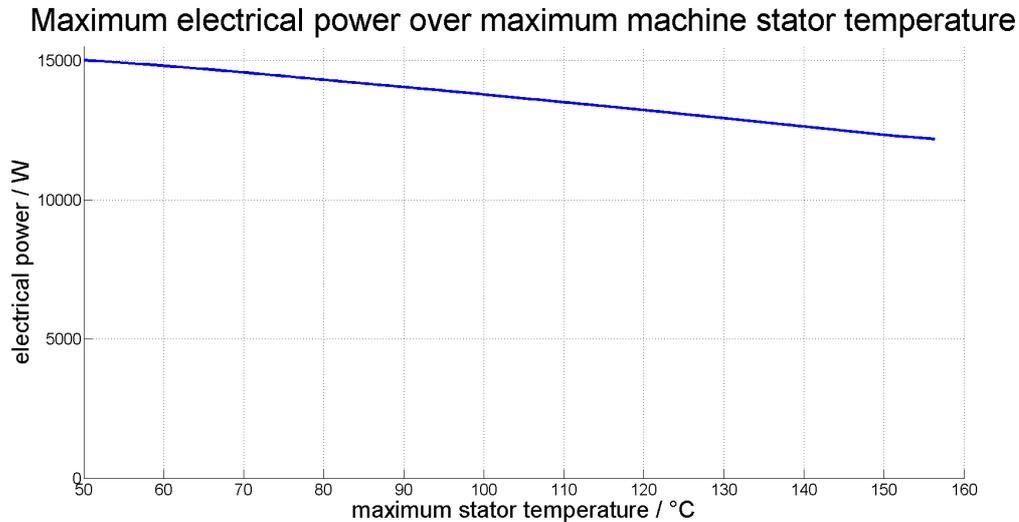
Der Messaufbau zur Temperaturmessung ist in Kapitel 13.3 beschrieben. Gemessen wurde die Rotor-, Stator- und Modultemperatur bei unterschiedlichen Leistungen. Der Generator wurde im gekapselten sowie im offenen Zustand vermessen, mit und ohne Schutzblech.

#### 14.1.1 Offener Generator



**Abb. 14.1:** Statortemperatur

Bei der Messung der Temperaturentwicklung ohne Schutzblech wurden die drei Phasenklammern mit einem Lastwiderstand verbunden. Per Gleichstrommaschine wurde die Nenn Drehzahl von rund 1000 U/min vorgegeben und der Widerstand so eingestellt, dass die Nennleistung von 15 kW entnommen wird. Der Temperaturverlauf ist in Abbildung 14.1 dargestellt. Nach zirka dreieinhalb Stunden stellt sich eine stabile Temperatur des Stators bei rund 155 °C ein.



**Abb. 14.2:** Leistungsverlauf am Lastwiderstand

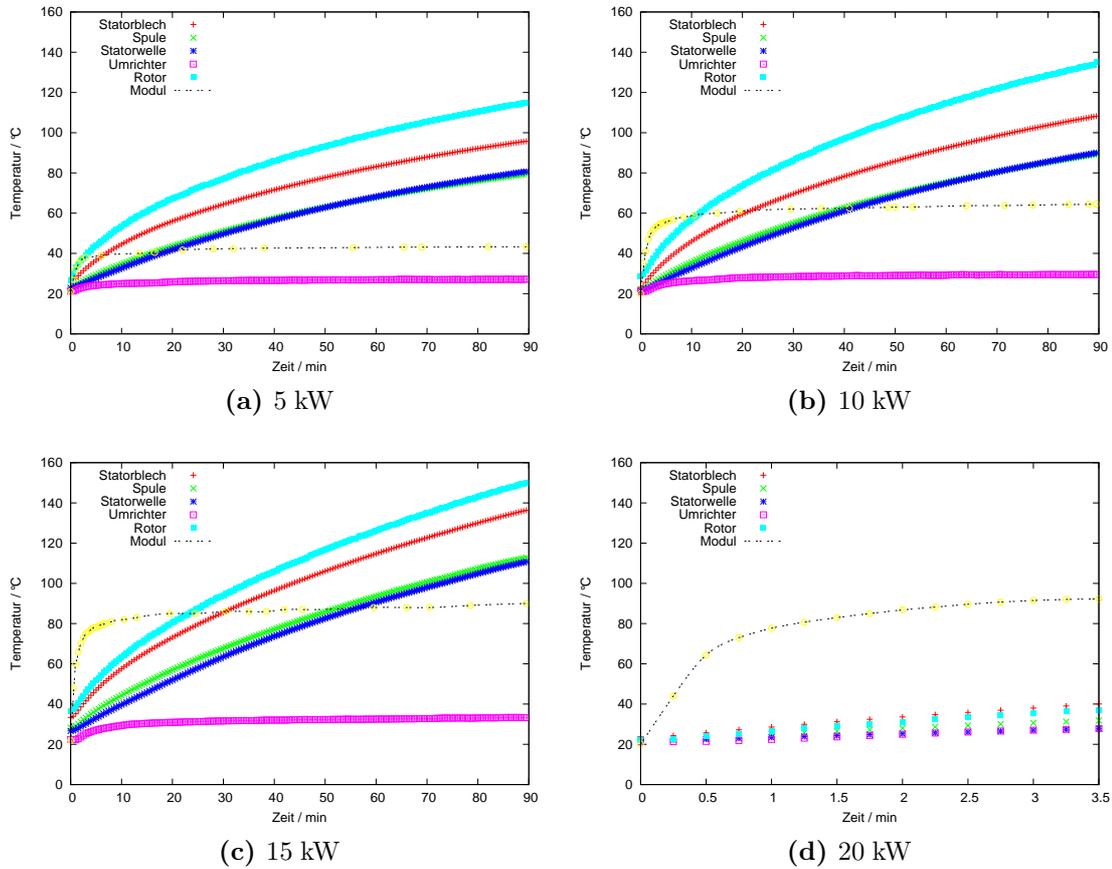
Der eingestellte Widerstand wurde während des Messablaufs nicht verändert. Mit steigender Maschinentemperatur sinkt die Leistung am konstanten Lastwiderstand aufgrund der reduzierten Flussdichte der Dauermagnete und des vergrößerten Widerstandes der Statorwicklung. Bei Erreichen der stabilen Temperatur ist diese um rund 20 % geringer. Der Verlauf der Leistung aufgrund der Temperaturerhöhung ist in Abbildung 14.2 aufgetragen.

#### 14.1.2 Geschlossener Generator – ZWG Gesamtpaket

Bei Betrachtung des gesamten Zapfwellengenerators wird auch die Temperatur der Module bzw. des Modulkühlkörpers des Umrichters hinzugenommen. Der Generator ist mit dem Gehäuseblech verschlossen. Der Lastwiderstand wurde mit den Zwischenkreisklemmen verbunden. Der Hochsetzbetrieb auf eine Zwischenkreisspannung von rund 600 V war aktiv. Die Temperatur wurde bei vier Leistungen, 5 kW, 10 kW, 15 kW und 20 kW, gemessen, wie Abbildung 14.3 zeigt.

Bei 20 kW wurde nach vier Minuten die Temperaturnotabschaltung ausgelöst, da die Modultemperatur 95 °C erreichte. Die Kühlung der Umrichterkomponenten erfolgte über die Stadtwasserleitung. Wie zu erkennen ist, liegt die Kühlkörpertemperatur des Umrichters nach den vier Minuten bei rund 37 °C. Durch einen effizienteren Wärmeübergang von Modul auf den Kühlkörper können somit auch höhere Leistungen für längere Zeit zur Verfügung gestellt werden.

Der Generator erreicht nach rund eineinhalb Stunden bei Nennleistung eine kritische Temperatur. Vor allem die Permanentmagnete im Rotor sind bei 150 °C in Gefahr entmagnetisiert zu werden. Zu erwähnen ist, dass der Generator im Labor keinerlei Luftbewegung ausgesetzt war. Im Feldeinsatz sollte die Abluft

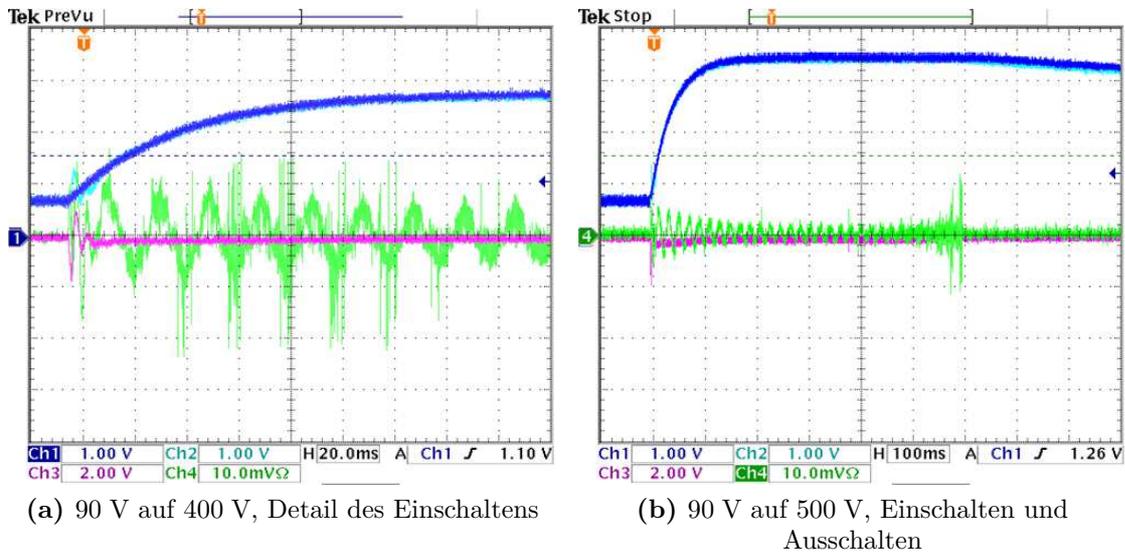


**Abb. 14.3:** Temperaturen des Zapfwellengenerators bei verschiedenen Leistungen

der darüberliegenden Leistungselektronikkühlung die Oberfläche des Generators überströmen. Auch der Fahrtwind sorgt für einen Luftaustausch. Dem entgegen stehen die höheren Umgebungstemperaturen, wie es zum Beispiel im Sommer am Feld vorkommt, und somit kleinere Temperaturunterschiede. Dieser Punkt bedarf weiterer Untersuchungen. Bei einer möglichen Neukonstruktion muss ein aktives Kühlungskonzept entworfen werden.

## 14.2 Hochsetzbetrieb

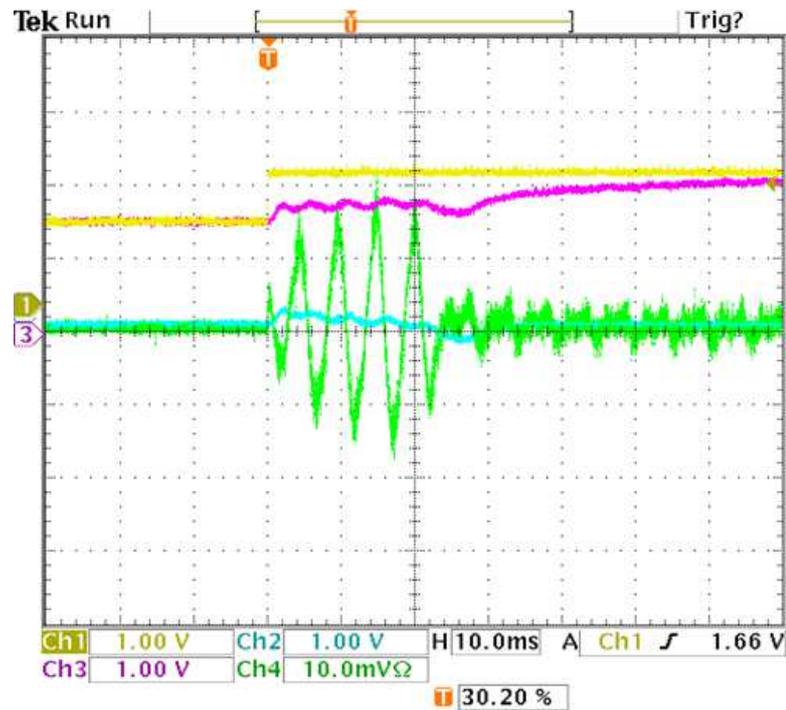
Das Hochsetzen der Generatorklemmenspannung auf das gewünschte Zwischenkreisspannungsniveau wird mit einer Regelung gemäß Abbildung 9.14 durchgeführt. In Abbildung 14.4 ist das Ein- und Ausschalten eines Hochsetzbetriebs zu erkennen. Bei einer ZWG-Drehzahl von rund 225 U/min, was einer induzierten Spannung von 90 V entspricht, wird auf die gewünschte Spannung (links - 400 V, rechts - 500 V) hochgesetzt. Zu erkennen ist die Zwischenkreisspannung (Ch1 - Sollwert  $U_{DC\ ref}$ , Ch2 - Istwert  $U_{DC\ act}$ ), durch das Eingangsfilter geglättet, in grün (Ch4) der Phasenstrom. Anfangs hat dieser eine hohe Amplitude, um den Zwi-



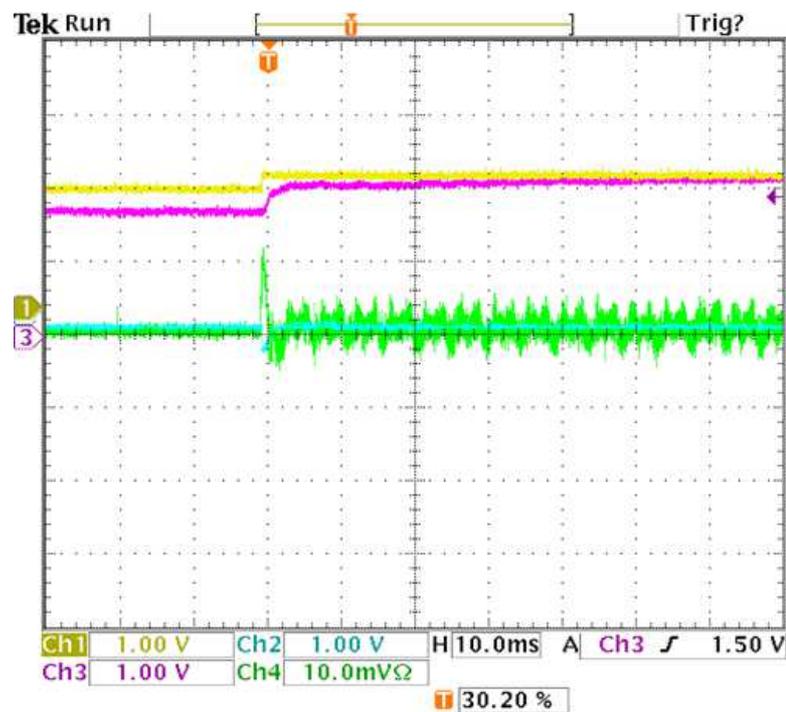
**Abb. 14.4:** Hochsetzbetrieb im Leerlauf  
 Ch1:  $U_{dcReference}$  (1/Div), Ch2:  $U_{dcActual}$  (1/Div),  
 Ch3:  $I_{qReference}$  (1/Div), Ch4: Phasenstrom (2A/Div)

schrenkreis entsprechend zu laden. Später reicht eine kleinere Stromamplitude aus, um die Spannung zu erhalten.

Das Auftreten von Schwingungen durch gekoppelte Terme beim Einschalten des Hochsetzers ist in Abbildung 14.5 dargestellt. Das Regelkonzept verwendet die Stromreglerausgangsgrößen  $u_{d\ ref}$  und  $u_{q\ ref}$  direkt (ohne Entkopplungsterme) zur Festlegung des Spannungsraumzeigers, wodurch sich die Stromregelkreise gegenseitig beeinflussen. In der Abbildung wird bei einer Drehzahl von  $\omega = 0,75$ , was einer induzierten Spannung von  $U_{ind} = 400\text{ V}$  entspricht, auf 600 V hochgesetzt. Im oberen Bild kommt der Regler ohne Entkopplungsnetzwerk in Schwingungen. Ein realisiertes Entkopplungsnetzwerk führte zu einem instabilen Betrieb. So wurde, wie bereits beschrieben, der Filtereingang des Spannungsreglersollwertes optimiert. Ein geringerer Sollwertsprung und damit reduzierte Reglerdifferenz dämpft den Einschaltsprung. Im unteren Bild ist dieser an der unterschiedlichen Höhe des Filtereingangs (Ch1) und des Zwischenkreisspannungs-Istwertes (Ch3) zu erkennen. Somit treten die Schwingungen nicht auf. Die Differenz aus Soll- und Istwert (Ch2) wird optimal ausgeregelt.



(a) maximaler Sollwertsprung



(b) optimierter Sollwertsprung

**Abb. 14.5:** Verkoppelungsschwingungen beim Hochsetzen  
 Ch1: UdcFilterIn (1/Div), Ch2: UdcDelta (1/Div),  
 Ch3: UdcActual (1/Div), Ch4: Phasenstrom (2A/Div)

## 14.3 Hochsetzen/Feldschwächen unter Last

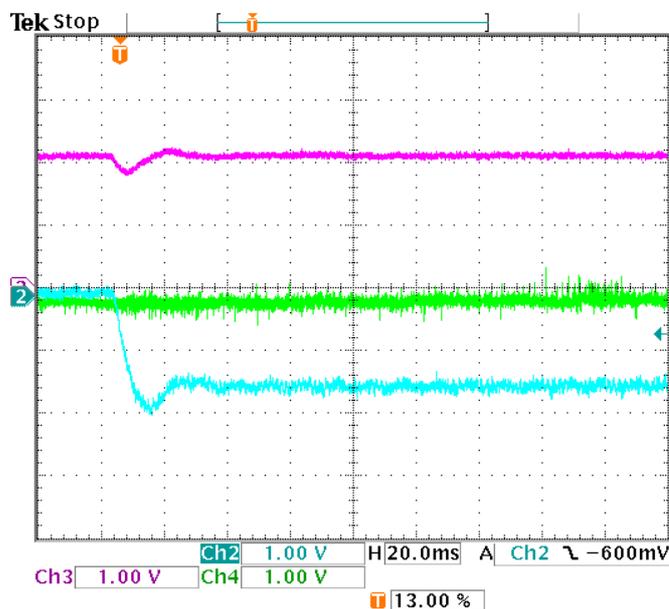
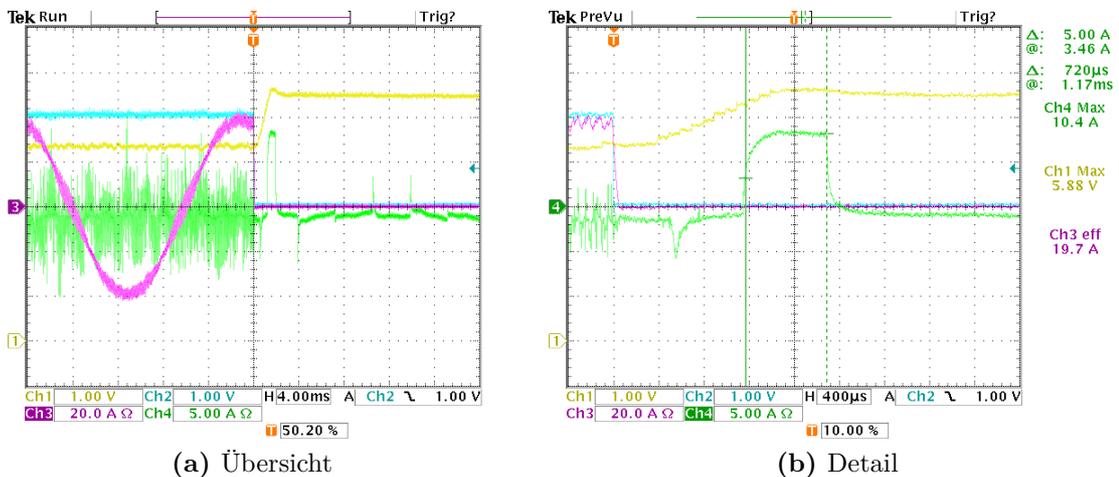


Abb. 14.6: Lastaufschaltung

Ch2:  $i_q$ Reference (0,25/Div), Ch3:  $U_{dc}$ Actual (0,5/Div), Ch4:  $i_d$ Reference (0,25/Div)

Das Hochsetzen und Feldschwächen garantiert eine stabile Zwischenkreisspannung unabhängig von der Drehzahl. Auch bei einer Laständerung sollte die Spannung, bis auf Regelabweichungen, konstant bleiben. Abbildung 14.6 zeigt einen sehr schnellen Lastwechsel. Hier wird dem Zwischenkreis ein Ohmscher Widerstand zugeschaltet, der daraufhin rund 5 kW an Leistung in Wärme umwandelt. Die feldschwächende Komponente  $i_d$  bleibt gleich. Diese ist bei einer Drehzahl von rund 900 U/min sehr klein. Der aufgeschaltete Verbraucher führt zu einem Einbruch der Zwischenkreisspannung. Der Regler versucht dies mit einer momentbildenden Komponente  $i_q$  auszugleichen. Ein leichtes Überschwingen ist sowohl im q-Strom als auch in der Zwischenkreisspannung zu erkennen.

## 14.4 Lastabwurf - Bremschopper



**Abb. 14.7:** Lastabwurf mit Bremschopperbetrieb  
 Ch1: UdcActual (0,25/Div), Ch2: EnableRun (0,5/Div),  
 Ch3: Phasenstrom Last (20A/Div), Ch4: Strom Bremswiderstand (5A/Div)

Beim plötzlichen Aufschalten einer Last gibt es einen Spannungseinbruch im Zwischenkreis, der vom Zwischenkreisspannungsregler ausgeregelt wird. Bei Lastabwurf steigt die Zwischenkreisspannung, und der Leistungsfluss vom Generator kann nicht sofort gestoppt werden.

Ist zum Zeitpunkt des Lastabwurfs  $i_q$  hoch, weil die Last sehr groß oder die Zapfwellendrehzahl sehr klein ist, so führt dieser hohe q-Strom zu einer sehr schnellen Erhöhung der Zwischenkreisspannung in einen unzulässig hohen Bereich. Der Regelalgorithmus ist zu langsam, um dies ausgleichen zu können. Die Sicherheitsabschaltung wegen Überspannung spricht an. Versucht man den Regler auf diesen Fall abzugleichen und dynamischer einzustellen, so führt dies beim normalen Hochsetzbetrieb zu unruhigem Verhalten.

Um die Überspannungsabschaltung nicht auszulösen, wird ein Bremschopper parallel zum Zwischenkreis geschaltet. In Abbildung 14.7 ist ein solcher Fall dargestellt. Beim plötzlichen Abschalten (Ch2) unter hoher Last (Ch3) steigt die Zwischenkreisspannung (Ch1) und der Chopper schaltet einen Strom auf den Bremswiderstand durch (Ch4). Die Zwischenkreisspannung steigt auf 785 V, es fließen 10 A für 720  $\mu s$ .

## 14.5 Wirkungsgradmessung

Aufgrund der zu Verfügung stehenden Möglichkeiten an Leistungsmessgeräten wurden zwei Messungen durchgeführt, um dann den Wirkungsgrad aller Komponenten zu erfassen. Zum Einen wurde der Generator alleine vermessen und zum anderen der Generator mit dem Eingangsumrichter. Einen Überblick gibt eine Skizze des Messaufbaus in Abbildung 13.1 in Kapitel 13.

### 14.5.1 Wirkungsgrad Generator

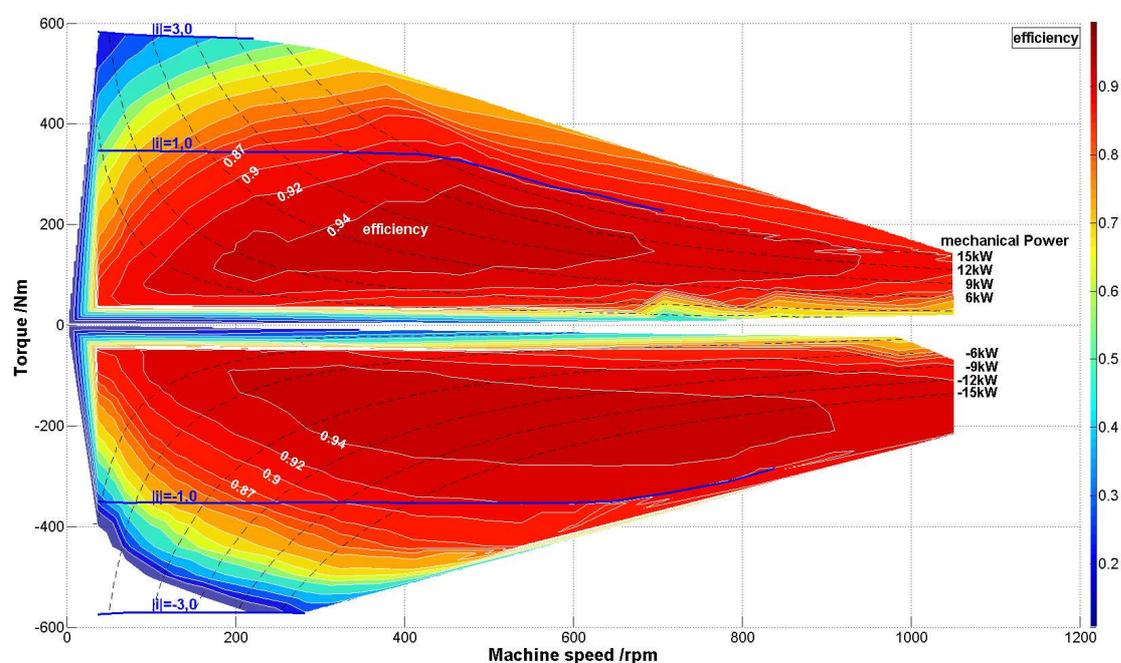


Abb. 14.8: Muschelkurve des Generators [Dem10]

Der Wirkungsgrad des Generators als einzelnes Gerät wurde bestimmt. Die elektrische Ausgangsleistung wurde direkt mit dem Leistungsmessgerät am Dreiphasensystem gemessen. Als mechanische Eingangsleistung wurden Drehzahl und Drehmoment der Zapfwelle durch die Messwelle erfasst. Die Wirkungsgradabhängigkeit vom jeweiligen Moment und der jeweiligen Drehzahl ist in Abbildung 14.8 als Kennfeld dargestellt, im oberen Teil der motorische, im unteren Bereich der generatorische Betrieb. Zu erkennen ist, dass über einen sehr weiten Drehzahlbereich von 200 U/min bis 900 U/min bei halbem Moment der Wirkungsgrad über 94 % liegt, typisch für eine PSM in dieser Größe.

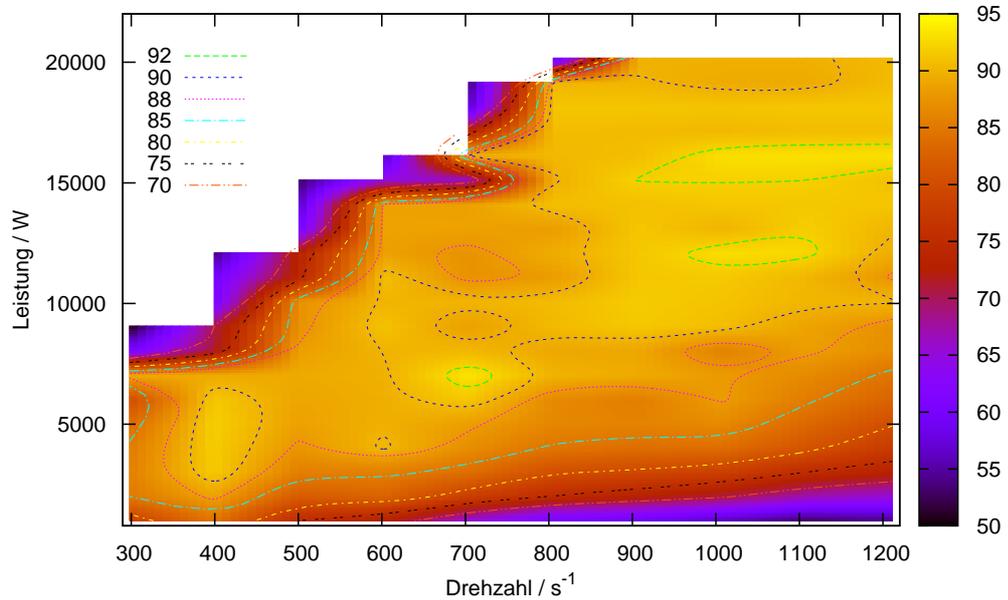


Abb. 14.9: Muschelkurve des ZWG (Generator mit Eingangsumrichter)

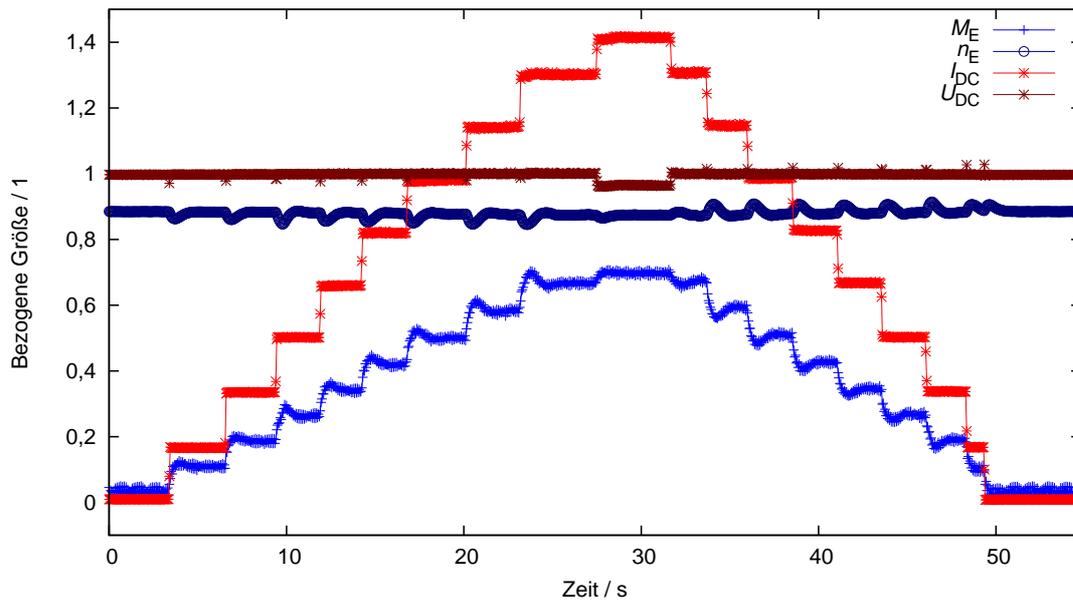
### 14.5.2 Wirkungsgrad Generator & Eingangsumrichter

In einer weiteren Messung wurde der Wirkungsgrad des Generators mit dem Eingangsumrichter bestimmt. Der Eingangsumrichter sorgt durch Hochsetzen und gegebenenfalls Feldschwächen des Generators für eine konstante Zwischenkreisspannung. Somit wurde als Ausgangsleistung die Zwischenkreisspannung sowie der Zwischenkreisstrom gemessen. Eingangsseitig wurde abermals Drehmoment und Drehzahl erfasst. Das Kennlinienfeld des Wirkungsgrades abhängig von Ausgangsleistung und Zapfwellendrehzahl ist in Abbildung 14.9 dargestellt. Über einen weiten Bereich liegt der Wirkungsgrad über 90 %. Lokale Minima und Maxima ergeben sich aus Ungenauigkeiten der Messung.

## 14.6 Ausgänge

### 14.6.1 3x400 V

Der Dreiphasenwechselstrom-Anschluss wurde im Hinblick auf Leistungsabgabe, Signalqualität und Einschalt- bzw. Ausschaltverhalten getestet. Dazu war der Ausgang mit einem veränderbaren Leistungswiderstand in Sternschaltung verbunden.



**Abb. 14.10:** Treppenverlauf bei Leistungsänderung am 3x400 V-Ausgang

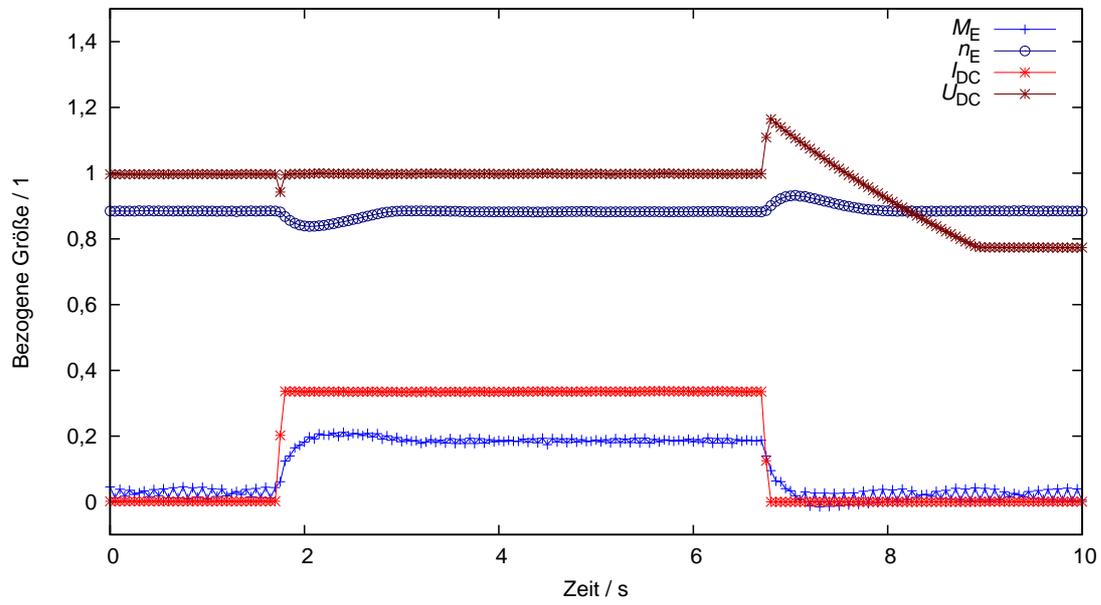
In Abbildung 14.10 ist eine treppenförmig veränderte Leistungsaufnahme dargestellt. Mit abnehmendem Widerstand steigt der Leistungsbedarf und somit der Zwischenkreisstrom sowie das Eingangsmoment. Die hochgesetzte Spannung  $U_{DC}$  sowie die Drehzahl  $n_E$  der Gleichstrommaschine (sprich Zapfwelle) sind konstant, bis auf geringe Schwankungen bei den Leistungsänderungen durch Schalten des Widerstandes. Unter Nennlast (15 kW) fließen bei einer Zapfwelldrehzahl von 880 U/min (entspricht einer Klemmenspannung von 340 V verketteter, effektiv) 32,3 A (Strang, effektiv) mit 220 Hz.

Das Einschalten und Ausschalten bzw. das An- und Abstecken verschiedener Lasten zeigt Abbildung 14.11 und 14.12. Zu beachten ist, dass beim Einschalten die Zwischenkreisspannung einbricht und mit leichter Verzögerung ausgeregelt wird. Beim Ausschalten hingegen steigt die Zwischenkreisspannung sehr stark an und der Eingangsregler kann dies nicht mehr ausregeln. In Folge kommt es zu einer Abschaltung und die Zwischenkreisspannung sinkt auf die induzierte Spannung ab. Mit Einsatz eines Bremschoppers kann auf den Extremfall eines Lastabwurfs

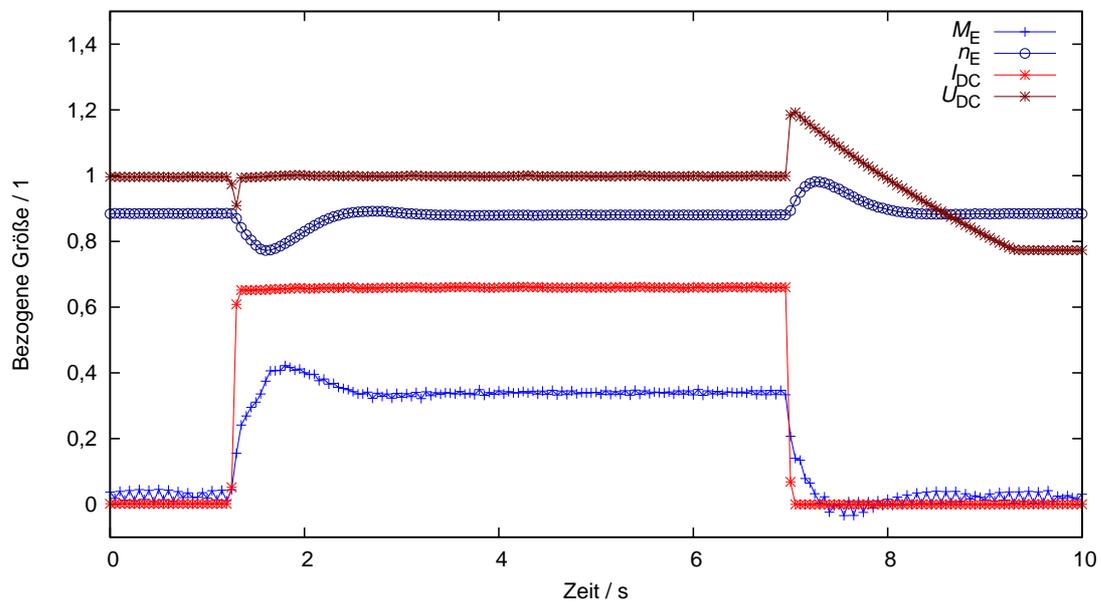
bei 20 kW reagiert werden. Siehe Kapitel Lastabwurf (14.4).

Wichtig für den Anschluss externer Geräte ist die Netzqualität der bereitgestellten Dreiphasenspannung. Bei der Spannung sind zum Beispiel  $\pm 10\%$  Abweichung laut Norm EN 50160 möglich (Kap. 5). Abbildung 14.13 zeigt zwei Momentaufnahmen des Phasensignals am Ausgang. In Bild (a) sind bei einer Leistung von rund 9 kW der Strom mit  $I_{\text{RMS,Ph}} = 13,3\text{ A}$  und die Spannung mit  $U_{\text{RMS,Verk}} = 380,5\text{ V}$  dargestellt. In (b) wird bei 18 kW mit  $I_{\text{RMS,Ph}} = 28,6\text{ A}$  und  $U_{\text{RMS,Verk}} = 364,6\text{ V}$  ein Überlastfall gezeigt. Dies ist die letzte Leistungsstufe, bevor die Zwischenkreisspannung einbricht.

Die Leistungsmessung im Zwischenkreis ergab dabei 8941 W bzw. 18535 W, was auf Wirkungsgrade des Ausgangsumrichters von 98 % und 97,4 % zwischen Zwischenkreis und Ausgang führt.

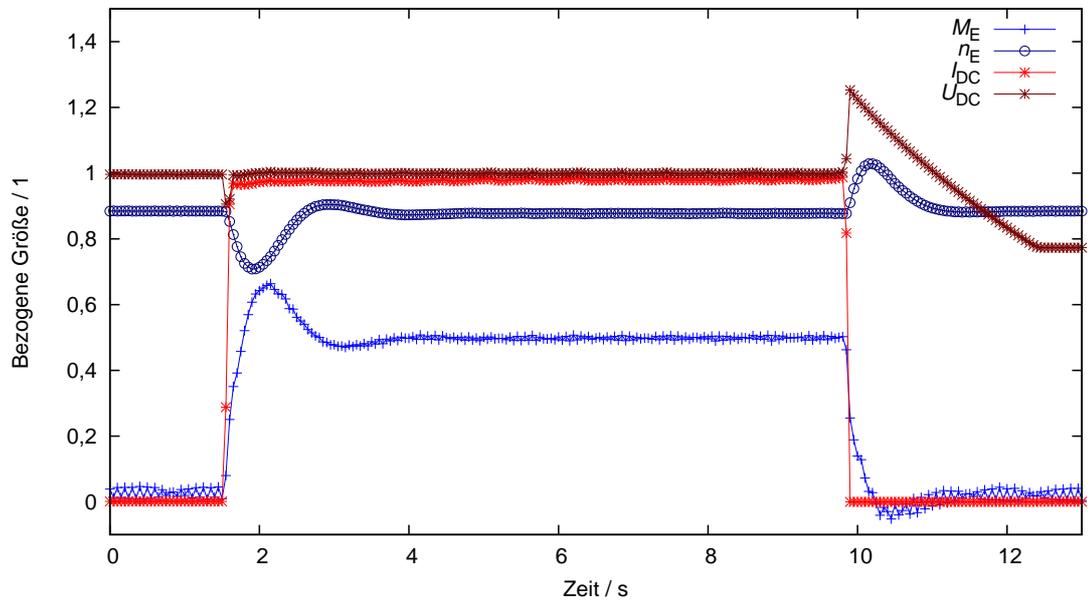


(a) 5 kW

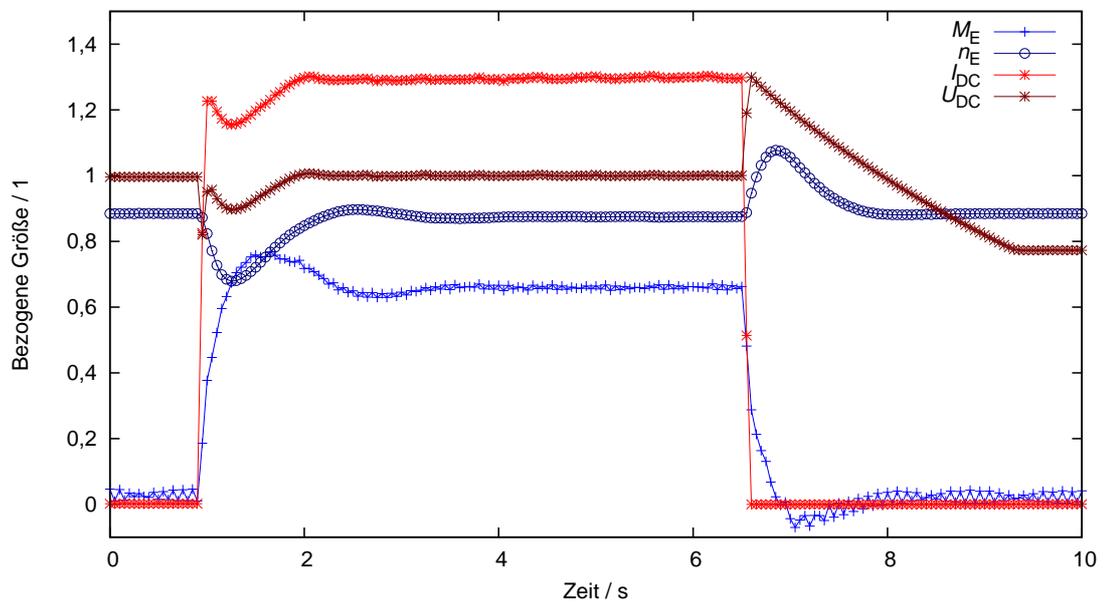


(b) 10 kW

Abb. 14.11: Ein- und Ausschalten kleiner Lasten

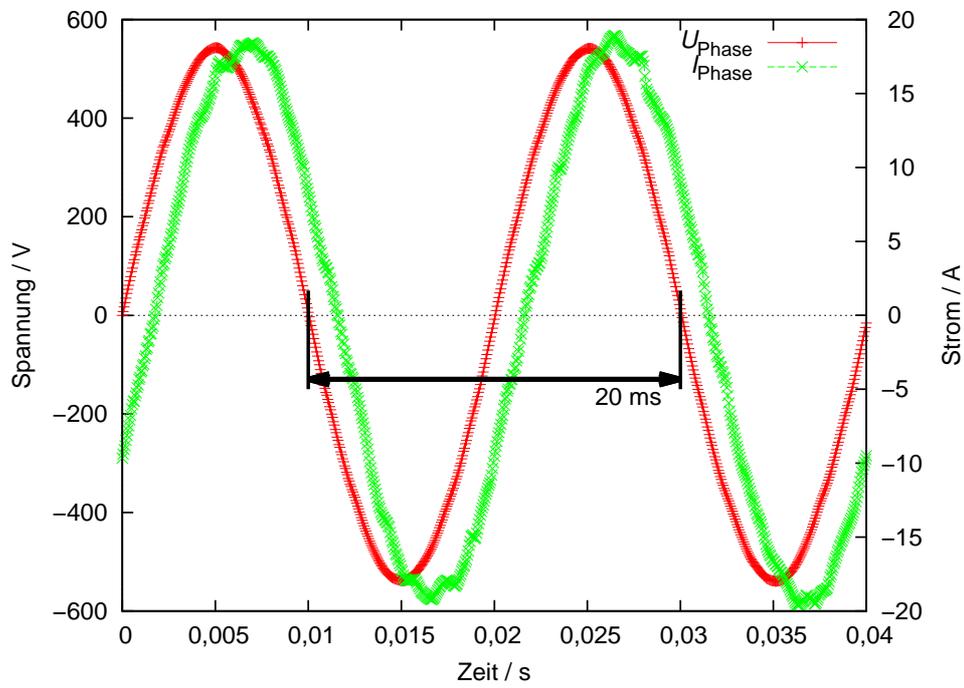


(a) 15 kW

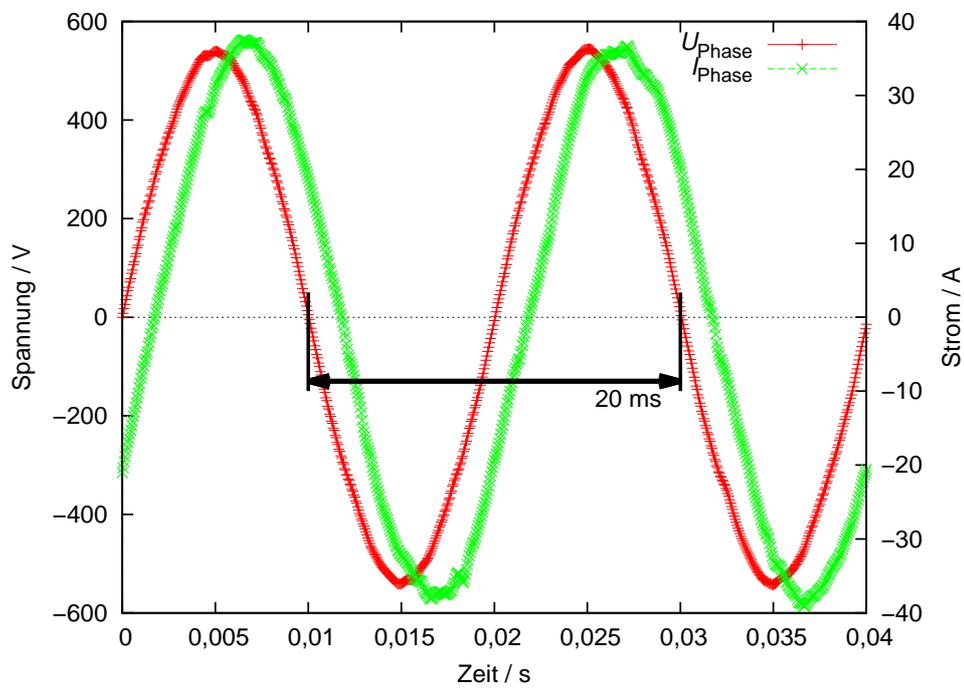


(b) 20 kW

**Abb. 14.12:** Ein- und Ausschalten hoher Lasten



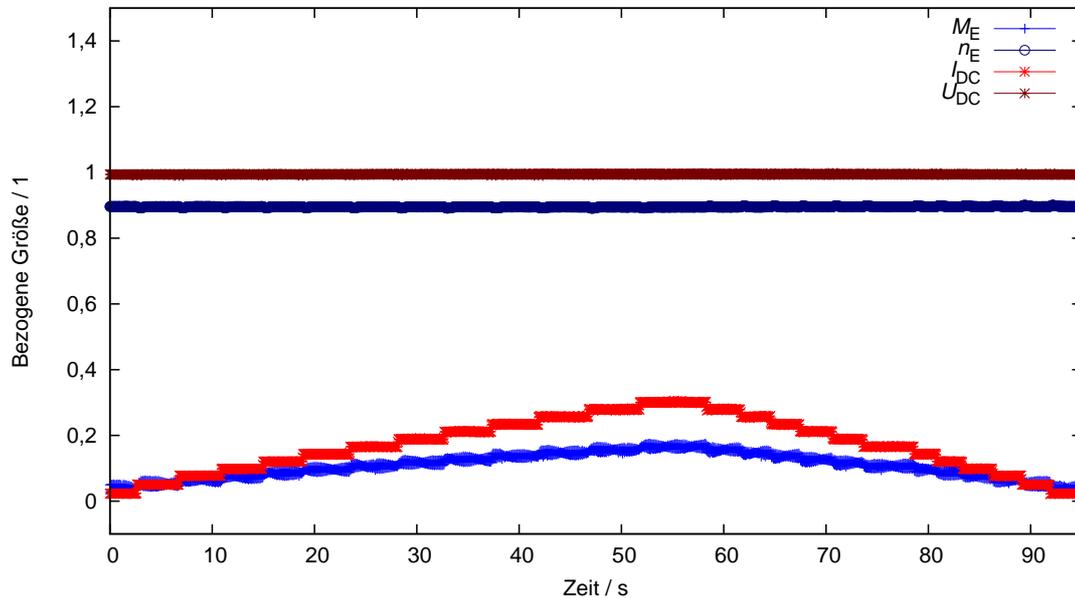
(a) 9 kW



(b) 18 kW

Abb. 14.13: Signalqualität unter verschiedenen Lasten

## 14.6.2 1x230 V

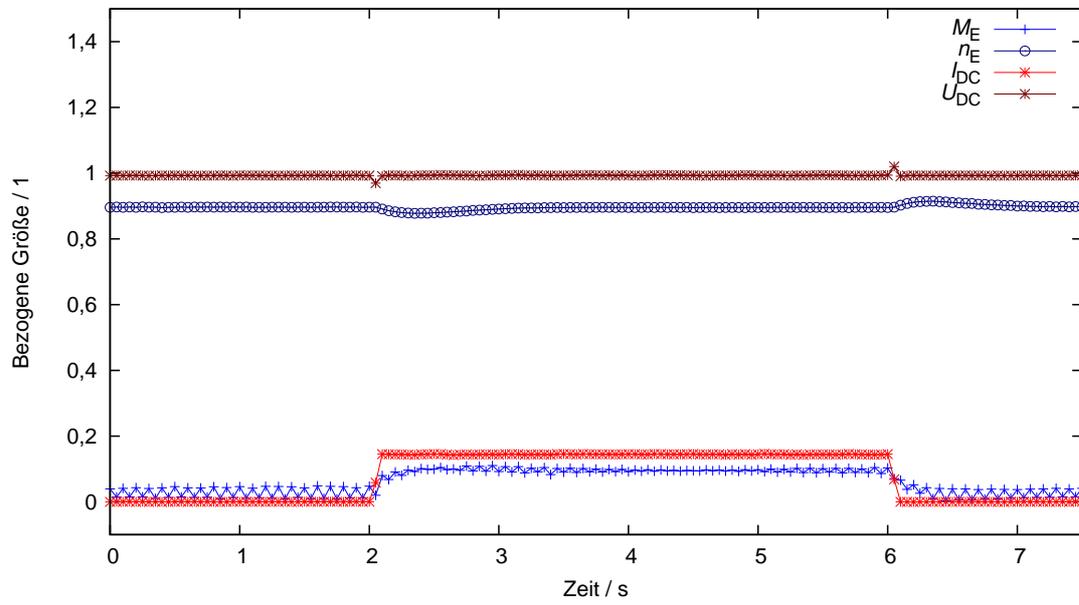


**Abb. 14.14:** Treppenverlauf bei Leistungsänderung am 1x230 V-Ausgang

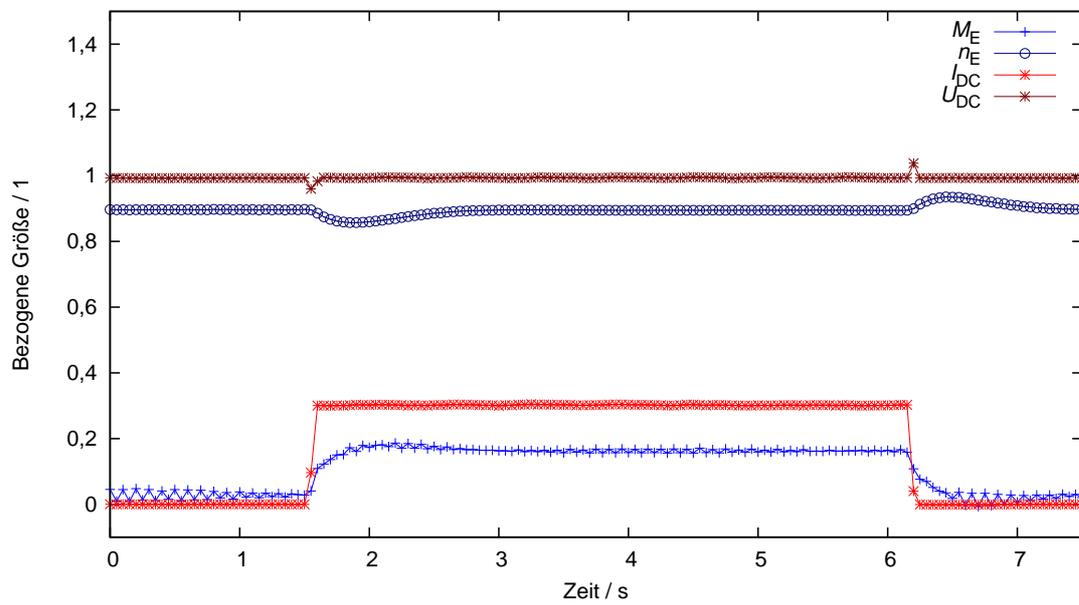
In Abbildung 14.14 ist analog zum Drehstromausgang der einphasige 230 Volt Ausgang unter Belastung dargestellt.

Abbildung 14.15 zeigt das Einschalten und Ausschalten unterschiedlicher Belastungen am einphasigen Anschluss. Auch hier ist ein Lastabwurf nicht ohne weiteres möglich.

Abbildung 14.16 zeigt den Strom- und Spannungsverlauf am Ausgang, (a) mit rund 2 kW:  $I_{\text{RMS,Ph}} = 9,4 \text{ A}$ ,  $U_{\text{RMS,Ph}} = 205,6 \text{ V}$ , (b) mit rund 4 kW:  $I_{\text{RMS,Ph}} = 18,1 \text{ A}$  und  $U_{\text{RMS,Ph}} = 199,1 \text{ V}$ .

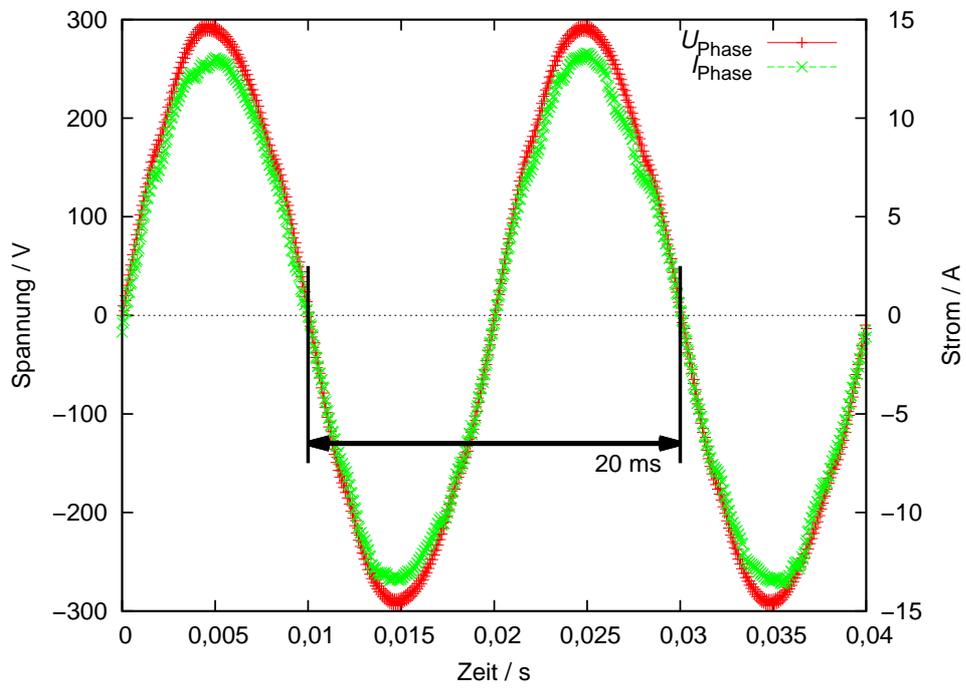


(a) 2 kW

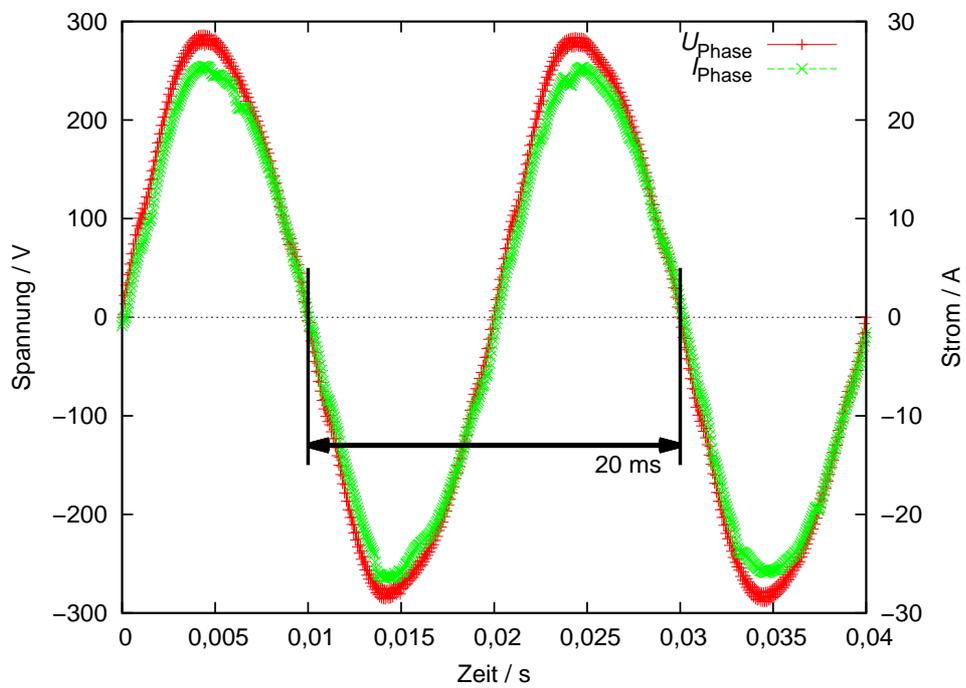


(b) 4 kW

Abb. 14.15: Ein- und Ausschalten von halber Last (a) und Nennlast (b)



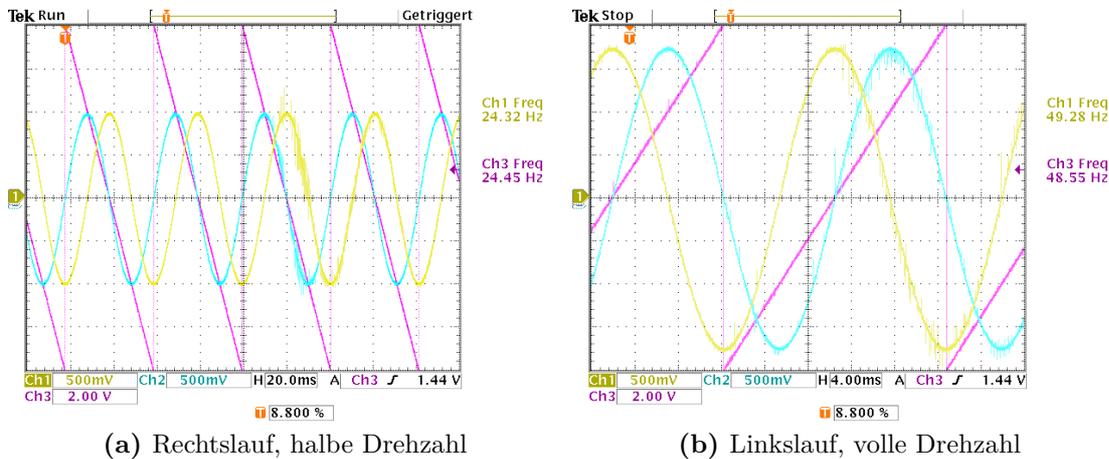
(a) 2 kW



(b) 4 kW

Abb. 14.16: Signalqualität unter verschiedenen Lasten

### 14.6.3 ASM gesteuert



**Abb. 14.17:** ASM Betrieb  
 Ch1: Ualpha (0.25/Div), Ch2: Ubeta (0.25/Div), Ch3: Lagegeber (2/Div)

Der Ausgang für die Asynchronmaschine ist als gesteuerter Betrieb konzipiert (open loop). Per  $U/f$ -Kennlinie wird die gewünschte Drehzahl vorgegeben. In Abbildung 14.17 ist der Sollspannungsraumzeiger bei halber und bei voller Drehzahl in jeweils eine Drehrichtung dargestellt.

Abbildung 14.18 zeigt das Einschalten und Hochfahren einer ASM. Dargestellt ist die verkettete Spannung  $U_{12}$ . Ausgehend von einer gewissen Mindestspannung erfolgt eine kontinuierliche Spannungs- und Frequenzsteigerung bis zur Nennfrequenz von 50 Hz. Die verkettete Spannung erreicht 400 V effektiv.

### 14.6.4 PSM geregelt

Der PSM Ausgang ist auf den jeweilig angeschlossenen Motor abgestimmt. Um die PSM geregelt betreiben zu können, wird entweder ein Lagegeber benötigt oder es wird mit dem sensorlosen INFORM-Verfahren gearbeitet. Dafür muss der Motor parametrisiert werden. Dies wurde für drei Motoren durchgeführt, für Messergebnisse sei auf die jeweiligen Kapitel verwiesen:

- Rohrmotor - siehe Kapitel 15.1
- Getriebemotor SEW - siehe Kap. 15.2 für allgemeine Daten bzw. Kap. 16.3 für sensorlose Messergebnisse
- Getriebeloser Motor Schabmüller - siehe Kap. 15.3 und 16.4 bzw. Kap. 17.1 für den Feldtest, der mit dieser Maschine durchgeführt wurde.

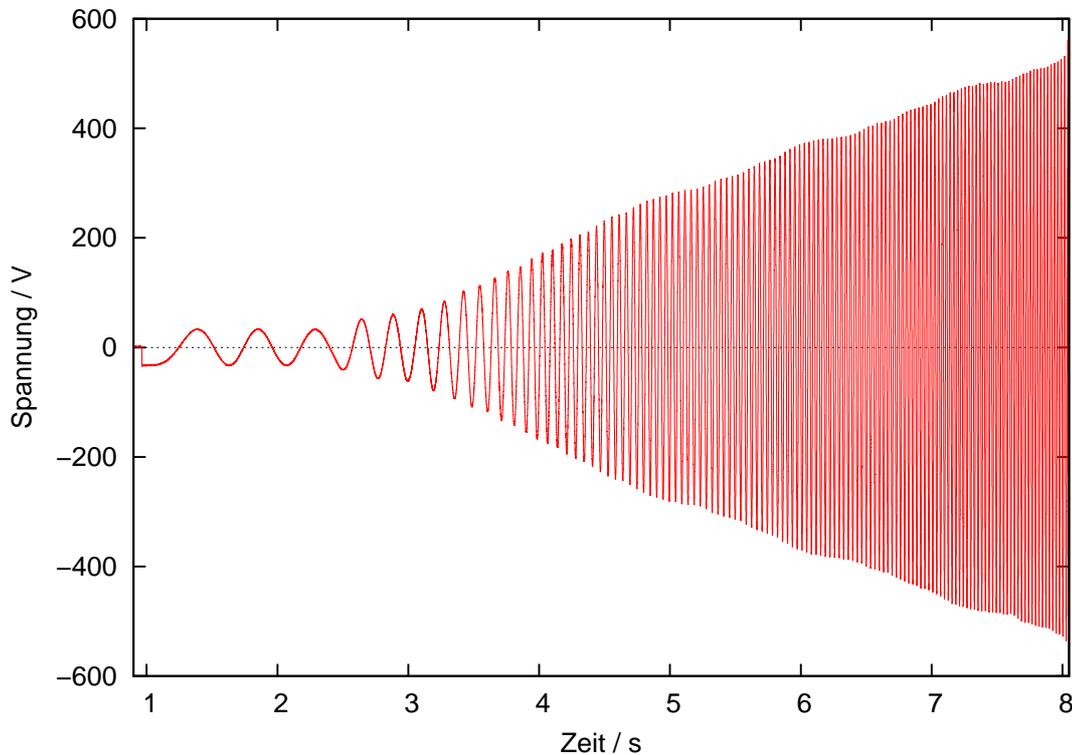


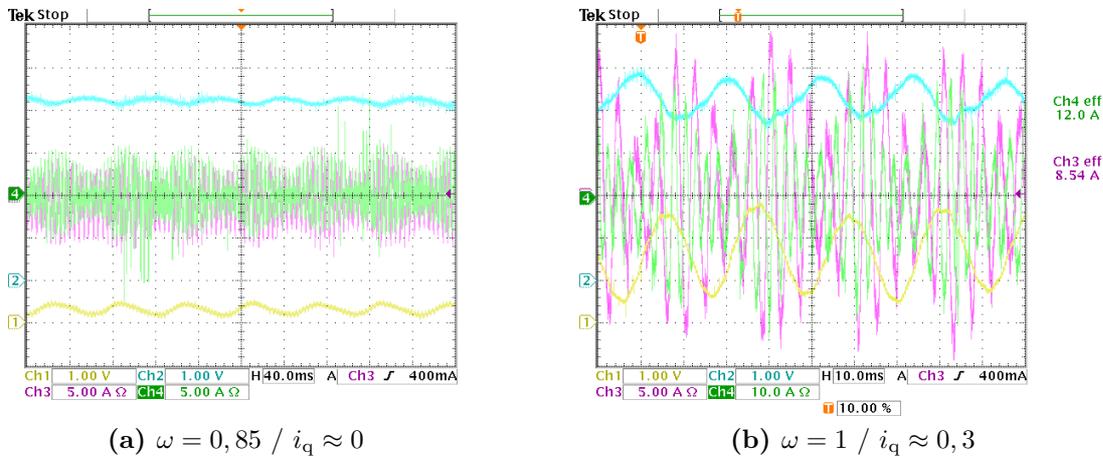
Abb. 14.18: Verkettete Spannung beim Einschalten und Hochfahren einer ASM

## 14.7 Resonanzen

Der Prüfstandsbetrieb des Gesamtsystems ist schwierig für den gesamten Betriebsbereich mit einem einheitlichen Parametersatz zu parametrieren. Dies ist zurückzuführen auf die große Anzahl an Reglern, die mitwirken:

- Drehzahlregler der Gleichstrommaschine für konstante Zapfwellendrehzahl
- Stromregler mit überlagertem Spannungsregler im Eingangsumrichter für konstante Zwischenkreisspannung
- Drehzahlregler (oder Momentregler) am Ausgangsumrichter für den Motor
- Momentregler (oder Drehzahlregler) der Gleichstrommaschine für Lastabnahme.

Zusätzlich zu diesen reglerbedingten Schwingungen treten auch mechanische Schwingungen durch die rotierenden Massen und elastischen Verformungen auf. Torsionsschwingungen der Kardanwelle sowie ein Spiel der Zahnräder, wie im Fall des Getriebemotors, sind zwei Beispiele. Durch Optimieren aller beteiligten Regler können auftretende Resonanzen beherrscht werden. Optimiert wurde auf einen Betrieb mit relativ konstantem Leistungsfluss. Lastabwürfe führen, wie bereits erwähnt, somit zur Abschaltung, sofern kein Bremschopper verwendet wird. Unter gewissen Umständen, meist bei hoher Drehzahl und kleiner Last am Ausgangsmo-



**Abb. 14.19:** Resonanzen im ZWG Betrieb mit Getriebemotor  
 Ch1:  $i_q$ Reference (1/Div), Ch2:  $U_{dc}$ Actual (0,25/Div),  
 Ch3: Phasenstrom Generator (5A/Div), Ch4: Phasenstrom Motor (5A/Div)

tor, traten trotzdem Schwierigkeiten mit Resonanzerscheinungen auf.

Abbildung 14.19 zeigt ein Beispiel des ZWG mit SEW Getriebemotor. Der Motor wurde an die Gleichstrommaschine geflanscht und mit einer Drehzahlregelung betrieben. Nach leichten Drehzahländerungen traten schlussendlich bei einer Drehzahl von rund 85 % der Nenn Drehzahl Schwingungen auf, auch hörbar am Getriebe, zu sehen im linken Bild. Dann wurde die Motorwelle mit dem Momentregler der Gleichstrommaschine mit rund 50 Nm, entspricht ca. einem Drittel  $i_q$ -Strom, belastet. Die Schwingungen wurden stärker. Nach weiterem Erhöhen der Drehzahl auf 100 % bei dieser Last trat eine Resonanz auf (siehe rechtes Bild), die, der Lautstärke des Getriebes zu urteilen, zur Zerstörung dessen geführt hätte.

In den beiden Abbildungen ist das Schwingen der Zwischenkreisspannung (Ch2) in blau dargestellt. Phasenverschoben sieht man den Strom in der Generatorphase (Ch3), der versucht die Spannung konstant zu halten und somit mitschwingt. Auf der Motorseite versucht der Stromregler die Spannungsschwankungen zu kompensieren und es entsteht ein Momentrippel. Dieser Momentrippel äußert sich zumindest akustisch im Getriebe durch das spielbedingte Abheben der Zahnflanken.

Beim Betrieb im Feld ändern sich die Bedingungen völlig. Die Zapfwelldrehzahl beim Traktor verhält sich unterschiedlich zur Simulation mit der Gleichstrommaschine. Zum Beispiel hat die VKM mit dem Schwungrad eine höhere Massenträgheit. Weiters ist das Lastverhalten des Anbaugerätes stark gedämpft durch zum Beispiel die Bodeneigenschaften. Andererseits treten zeitweise starke Stoßbelastungen auf. Hier wirkt kein Moment- oder Drehzahlregler einer Lastmaschine. Somit sind die Reglerparameter neu einzustellen.

## 14.8 Dynamischer Betrieb am Prüfstand

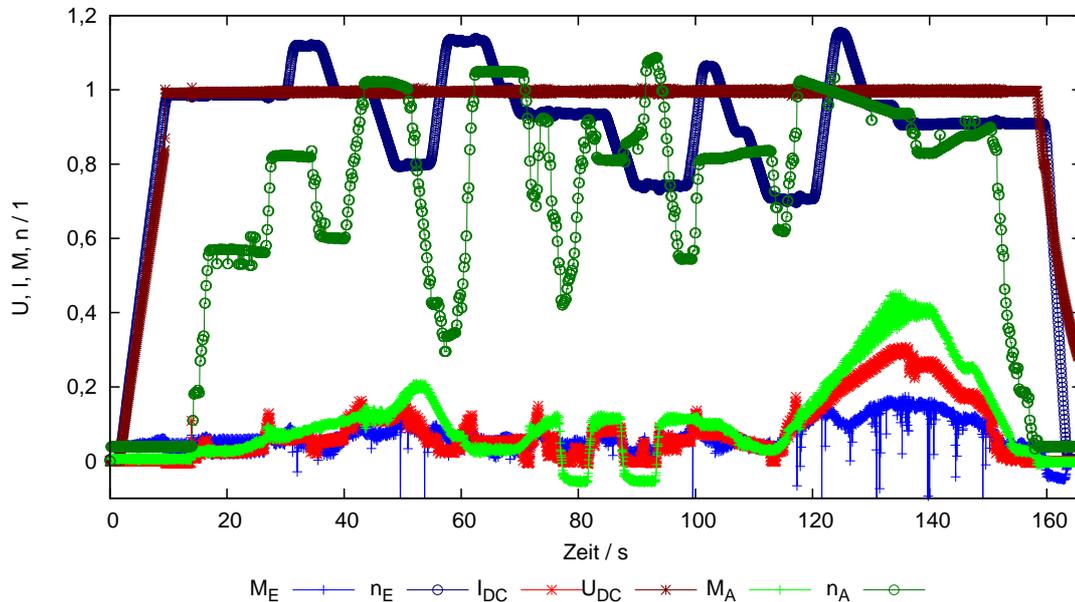


Abb. 14.20: Systemverhalten bei dynamischer Betriebspunktänderung

Durch relativ rasche und stochastisch verteilte Änderungen der Drehzahlen und Drehmomente wurde versucht, dynamische Änderungen ähnlich dem Betrieb in der Praxis so weit wie möglich nachzustellen. Die Drehzahlen der Gleichstrommaschine als Zapfwellensimulator sowie die Drehzahl des Getriebemotors wurden unabhängig voneinander verändert. Das Drehmoment der Gleichstrommaschine als Lastabnahme (Simulation des Feldes) ebenso. Dabei wurde ein durchaus zufriedenstellendes Ergebnis erreicht, wie Abbildung 14.20 zeigt. Über den gesamten Verlauf ist die Zwischenkreisspannung  $u_{DC} = 1$  unabhängig der Eingangsdrehzahl  $n_E$ . Die restlichen Betriebspunkte ändern sich je nach Vorgabe ( $n_E$ ,  $n_A$ ,  $M_A$ ) bzw. resultieren aus der Anforderung ( $M_E$ ).

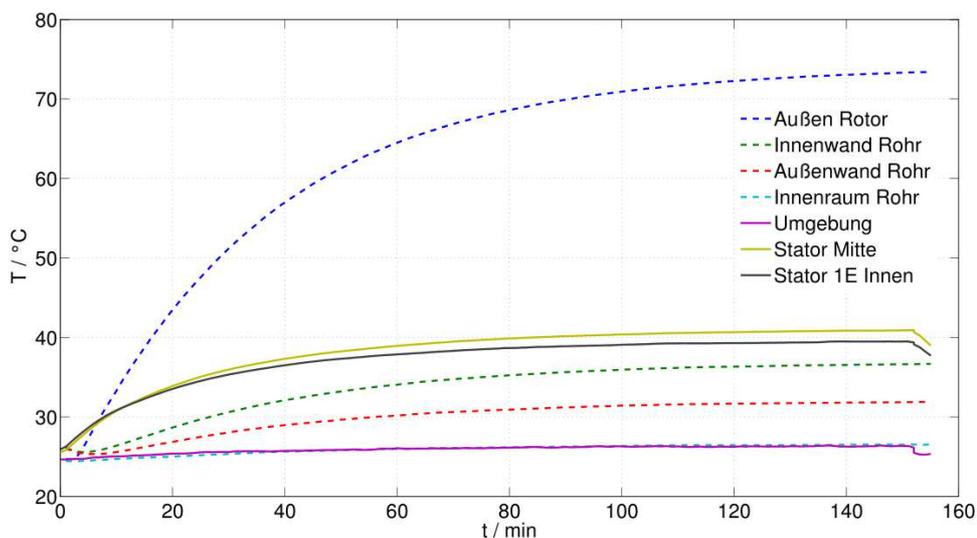
## 15 Antriebe im Test

### 15.1 Rohrmotor

Das Hauptaugenmerk beim Vermessen des Rohrmotors waren die Temperaturentwicklung und die Leistungsanforderungen durch ein vorgegebenes Lastprofil. Durch den kompletten Einbau in das Rohr gestaltete sich die Kühlung schwierig. Durch die völlig neue Konstruktion war seitens des Auftragsgebers und Projektpartners ein Lastprofil zu erfüllen. Dieses Lastprofil wurde durch Momentmessungen an einer konventionellen Aufbereiterwelle im Feldeinsatz erstellt.

#### 15.1.1 Temperaturmessung

Es wurden diverse Temperaturmessungen am Rohrmotor vorgenommen. Als Problem stellte sich der konstruktionsbedingte Luftspalt zwischen Rotoraußenwand und Aufbereiterwelleninnenwand heraus. Dies ist in Abbildung 15.1 am großen Temperaturunterschied zwischen „Innenwand Rohr“ und „Außen Rotor“ zu erkennen“. Hier wurde der Motor lastfrei mit Nenndrehzahl von 1000 U/min betrieben und die Erwärmung an mehreren Stellen gemessen.



**Abb. 15.1:** Lastfreier Erwärmungslauf bei Drehzahl  $\omega = 1$  [Buc12]

Durch einen besseren Wärmeübergang zwischen der Innenwand und der Rotoroberfläche kann das Problem weitgehend beseitigt werden. Die Aufbereiterwelle sollte durch die große Oberfläche und die starke Luftbewegung genug Kühlung bieten. Bedenken, dass Verschmutzungen im Betrieb den Kühleffekt vermindern, konnten durch Beobachtungen im Feldversuch zum Teil widerlegt werden. Es bleibt keinerlei Verschmutzung an der Welle haften, die thermisch isolieren würde. Das Schnittgut wird weggeschleudert und hat durch die Nässe einen zusätzlichen

Kühleffekt. Bei zukünftigen Feldeinsätzen sollte dies weiter beobachtet werden. Weitere Messungen sowie ein detaillierter Messaufbau sind in [Buc12] zu finden.

### 15.1.2 Wirkungsgradkennfeld des Rohrmotors

Es wurde der Wirkungsgrad des Motors vermessen. Als Eingangsmessung wurde eine elektrische Leistungsmessung des dreiphasigen Anschlusses durchgeführt, als Ausgangsmessung wurde das Moment über die Kraftmessdose sowie die Drehzahl der drehzahlgeregelten Lastmaschine erfasst. Abbildung 15.2 zeigt das Kennlinienfeld des Rohrmotors bei einer Wicklungstemperatur von 80 °C mit sensorlosem EMK Betrieb.

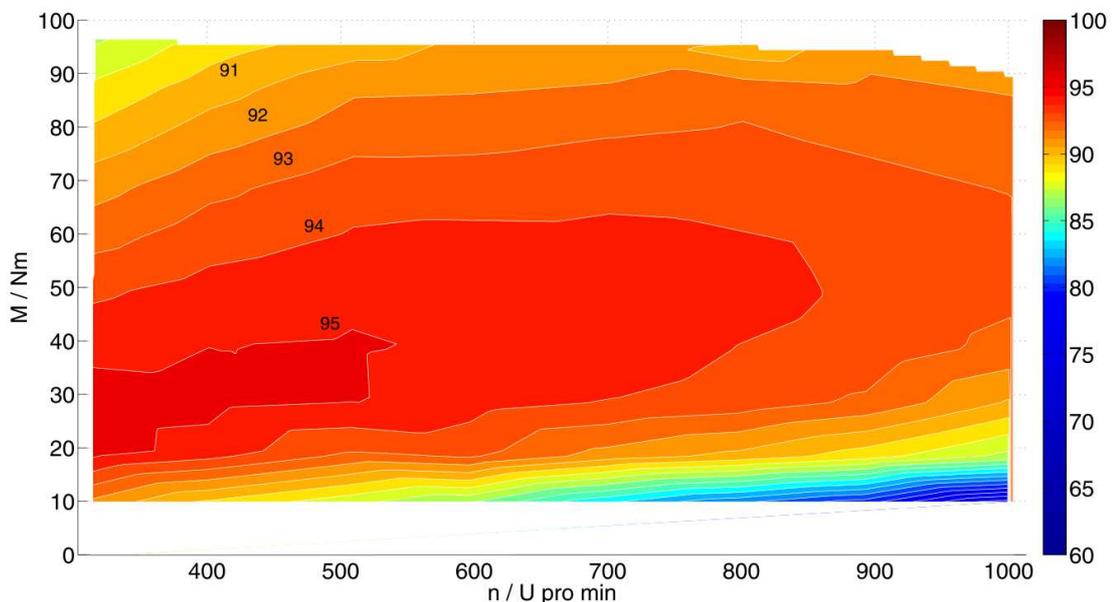
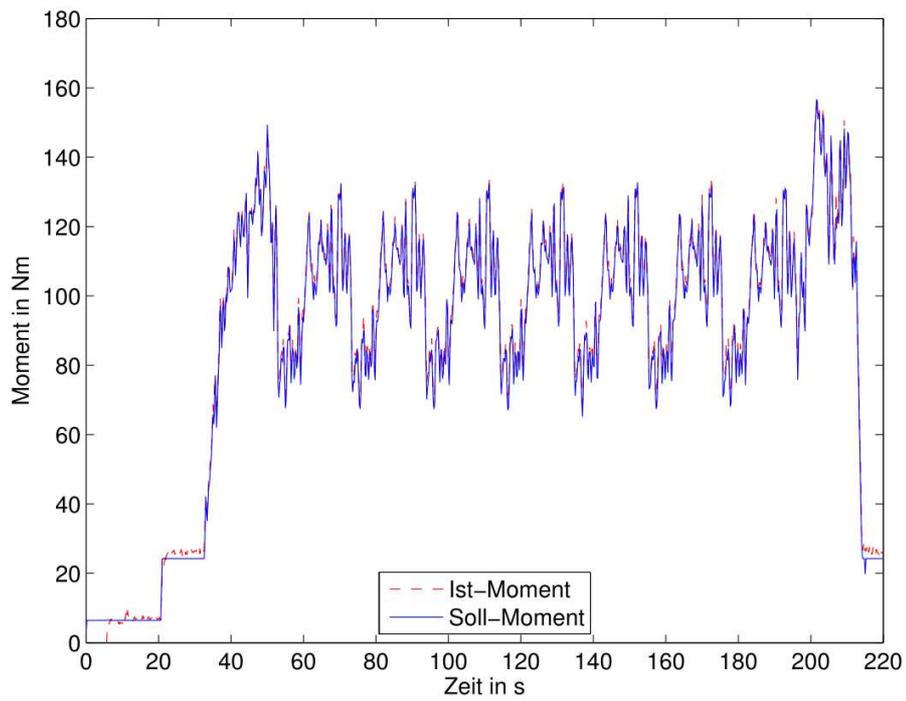


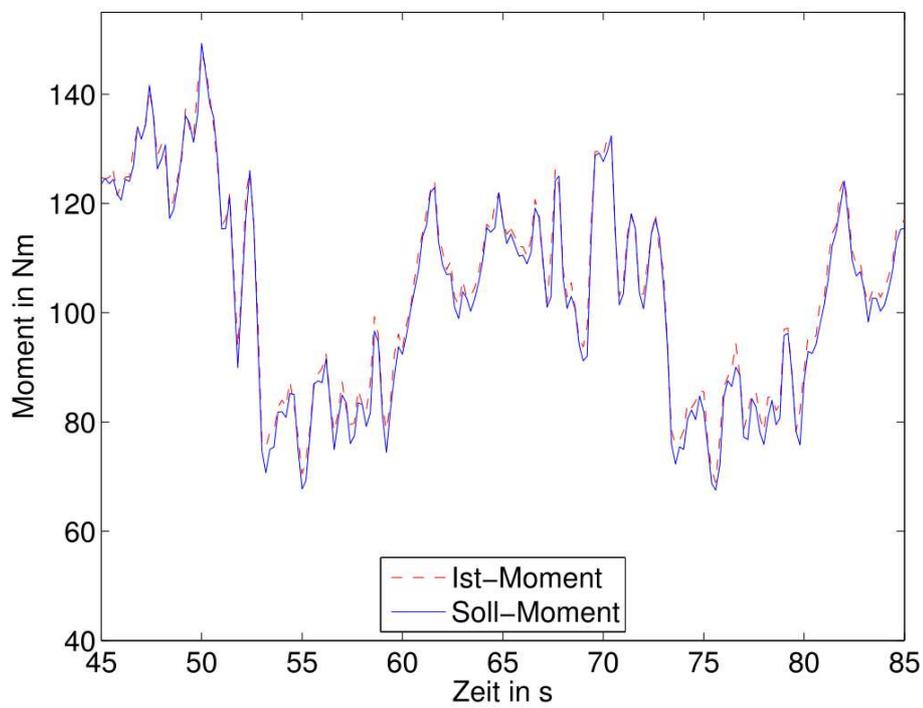
Abb. 15.2: Muschelkurve der Aufbereiterwelle bei 80 °C [Kog12]

### 15.1.3 Leistungsanforderungen

Die Dynamik des Systems wurde untersucht. Per angekoppelter Lastmaschine wurde durch ein vorgegebenes Lastprofil die Situation am Feld simuliert. Ein Lastprofil zeigt Abbildung 15.3: Links die Übersicht, rechts ein vergrößerter Ausschnitt. In blau ist das Soll-Moment aufgetragen. Dieses wurde im Feldeinsatz gemessen, abgespeichert und per Sollvorgabe in den Momenteneingang der Lastmaschine eingespeist. In rot ist das gemessene Ist-Moment dargestellt. Wie zu erkennen, sind die beiden Graphen beinahe deckungsgleich. Abbildung 15.3 zeigt beispielhaft eine Messung bei Nenndrehzahl (1000 U/min) im sensorlosen EMK-Betrieb. Weitere Messungen sowie detaillierte Informationen zum Messaufbau sind in [Han11] zu finden.



(a) Übersicht



(b) Detailausschnitt

Abb. 15.3: Lastprofil der Aufbereiterwelle [Kog12]

## 15.2 Getriebemotor

Der Getriebemotor wurde für den Einsatz mit dem elektrifizierten Schwader sowie der elektrischen Grubberwalze verwendet. Hier war die Temperatur zweitrangig, da der Serienmotor mit passiver Luftkühlung in freier Umgebung installiert war. Interessant war das Moment, das unter EMK-Betrieb erreicht werden kann, sowie die Möglichkeit den Motor einzuschalten, wenn er schon läuft (synchronisiertes Aufschalten), vorallem bei der Grubberwalze, die vom Traktor gezogen wird. Für den Einsatz im Schwader wurde eine Lastprofilmessung vorgenommen.

Die Messungen wurden mit einer sensorlosen Lageerfassung durchgeführt. Detaillierte Messungen zur Qualität der sensorlosen Regelung bei diesem Motortyp sind Kapitel 16.3 zu entnehmen.

### 15.2.1 Drehmoment

Das Drehmoment des Getriebemotors wurde bei Nenndrehzahl sowie halber Nenndrehzahl vermessen. Der Motor wurde mit dem EMK-Modell drehzahl geregelt betrieben. Mit der momentgeregelten Gleichstrommaschine wurde der Prüfling belastet. Die Kennlinien sind in Abbildung 15.4 dargestellt.

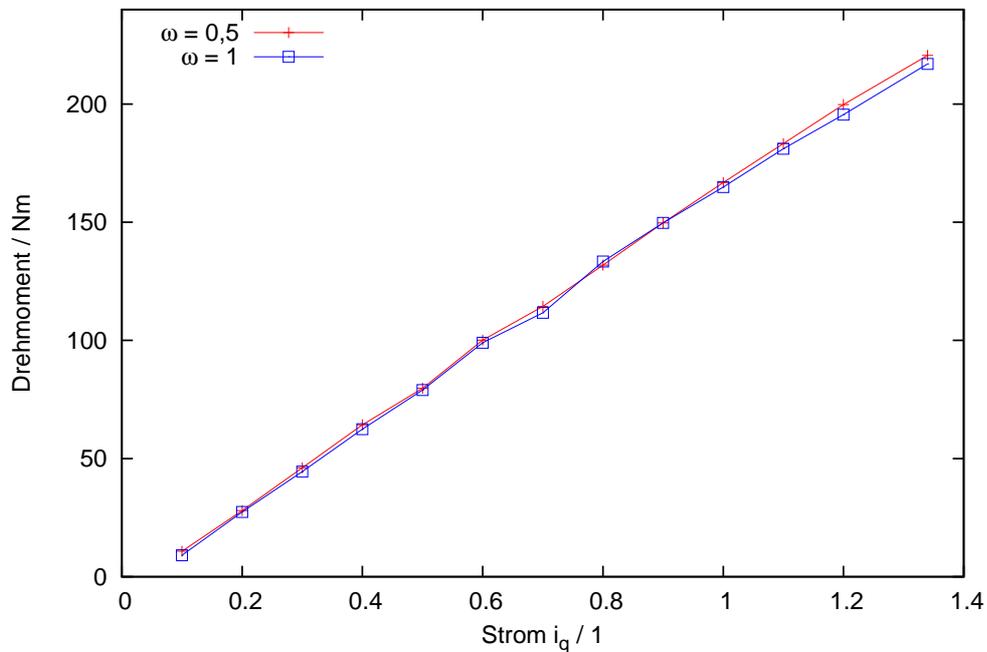
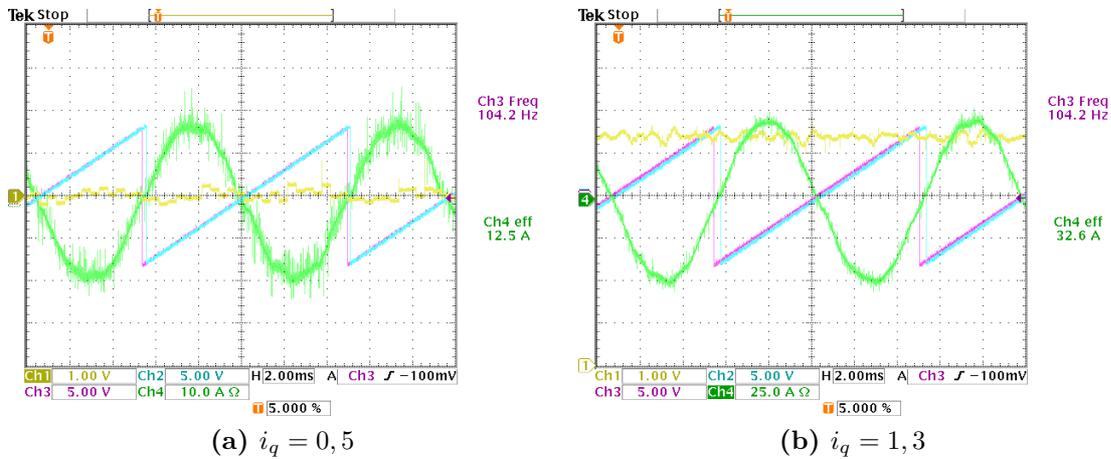


Abb. 15.4: Momentenkennlinie des Getriebemotors

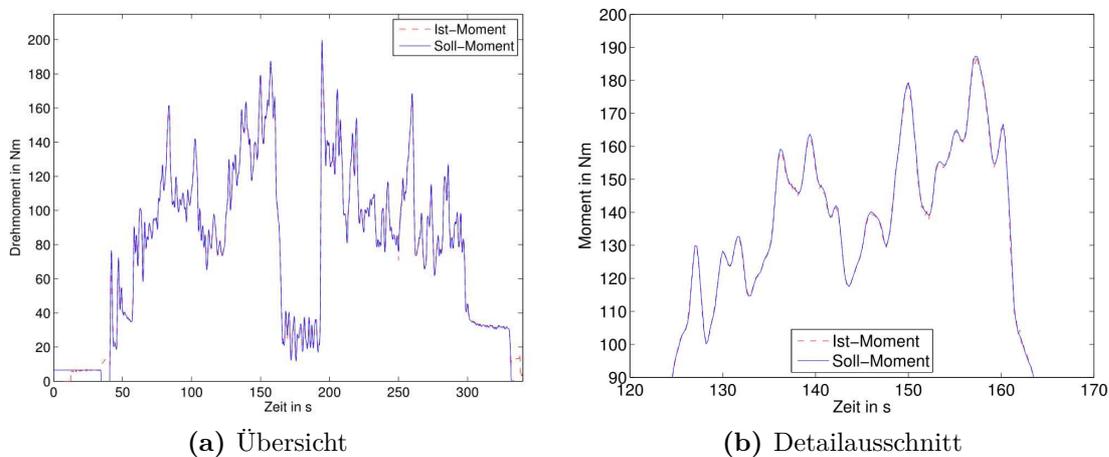


**Abb. 15.5:** Verschiedene Belastungen bei Nenndrehzahl im EMK-Betrieb  
 Ch1:  $I_q$ Reference (1/Div), Ch2: Lage EMK (5/Div),  
 Ch3: Lagegeber (5/Div), Ch4: Phasenstrom (10A|25A/Div)

Abbildung 15.5 zeigt Aufnahmen zweier Betriebspunkte, jeweils mit Nenndrehzahl und zwei verschiedenen Belastungen, halbe Last ( $i_q = 0,5$ ) und Überlast ( $i_q = 1,3$ ).

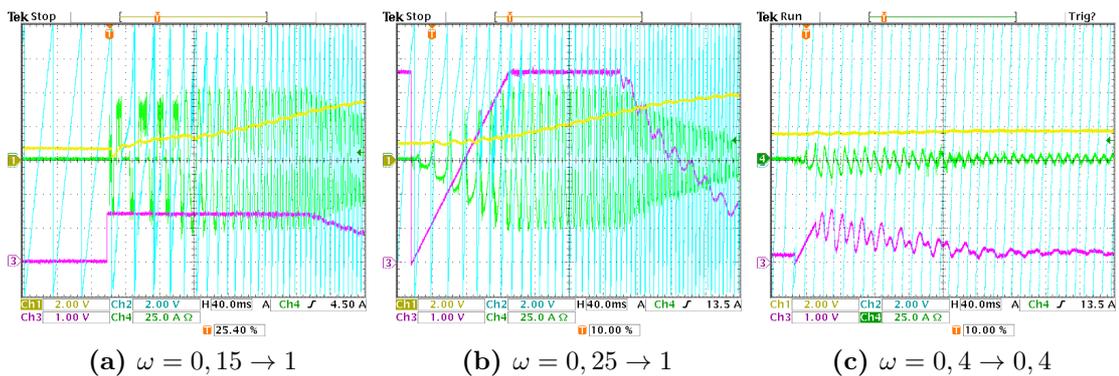
### 15.2.2 Leistungsanforderungen

Mit dem Getriebemotor wurde versucht, die Momentanforderungen eines Kreiselschwaders zu erfüllen. Dazu wurde ebenfalls ein Lastprofil aufgenommen und in die Gleichstrommaschine eingespielt, die dann den Getriebemotor mit dem entsprechenden dynamischen Drehmomentverlauf belastete.



**Abb. 15.6:** Lastprofil eines Kreiselschwaders

In Abbildung 15.6 ist solch ein Lastprofil in Form des Soll-Momentverlaufs (blau) aufgetragen. Das Beispiel zeigt eine Messung bei 500 U/min an der Ausgangswelle des Getriebemotors, was einer Rotordrehzahl von 3750 U/min entspricht. Beinahe deckungsgleich das Ist-Moment (rot), mit dem die Anforderungen erfüllt wurden. Die Messung wurde mit einer sensorlosen Lagermittlung per EMK-Modell durchgeführt. Weitere Messungen zu unterschiedlichen Drehzahlen sind in [Han11] zu finden.



**Abb. 15.7:** Einschaltvorgang bei verschiedenen Drehzahlen  
 Ch1: Drehzahl (0,5/Div), Ch2: Lage EMK (2/Div),  
 Ch3: IqReference (0,25/Div), Ch4: Phasenstrom (25A/Div)

### 15.2.3 Synchronisation auf einen laufenden Antrieb

Bei Antrieben in der Landwirtschaft ist nicht nur ein Einschalten des Motors unter Last im Stillstand gefragt, sondern auch das möglichst stoßfreie Zuschalten auf einen bereits in Drehung befindlichen Antrieb. Der sensorlose Einschalt- und Hochfahrvorgang ist ausführlicher in Kapitel 16.2 beschrieben. Hier werden Ergebnisse zum Einschalten auf den bereits laufenden Elektromotor präsentiert.

In Abbildung 15.7 sind drei solcher Fälle dargestellt. Im ersten Fall (a) ist die Startdrehzahl mit  $\omega = 0,15$  noch knapp im Bereich des INFORM-Betriebs. Der Antrieb wird mit einer Blockkommutierung beschleunigt. In (b) ist die Drehzahl mit  $\omega = 0,25$  bereits im EMK-Bereich. Hier wird zuerst die aktuelle Position bestimmt, und dann direkt mit der Sinuskommutierung gestartet. Um den Beschleunigungsvorgang sanfter durchzuführen, wird die q-Strom-Vorgabe über eine Rampe erhöht, siehe Ch3. In (c) ist diese Rampe ebenfalls zu sehen. Hier wird bei  $\omega = 0,4$  eingeschaltet und die Drehzahl gehalten.

### 15.2.4 Wirkungsgradkennfeld des Getriebemotors

Aus Abbildung 15.8 ist die das Wirkungsgradkennlinienfeld des Getriebemotors zu entnehmen. Zu beachten, dass hier auch der Umrichter berücksichtigt ist. Die Eingangsleistung wurde aus Spannung und Strom des Zwischenkreises ermittelt, die Ausgangsleistung aus Moment und Drehzahl an der Welle zur Lastmaschine. Mit rund 88 % Wirkungsgrad als Maximum ist ein durchaus üblicher Wert erreicht, auch das gesamte Kennfeld zeigt eine übliche Verteilung, siehe auch Abbildung 4.13

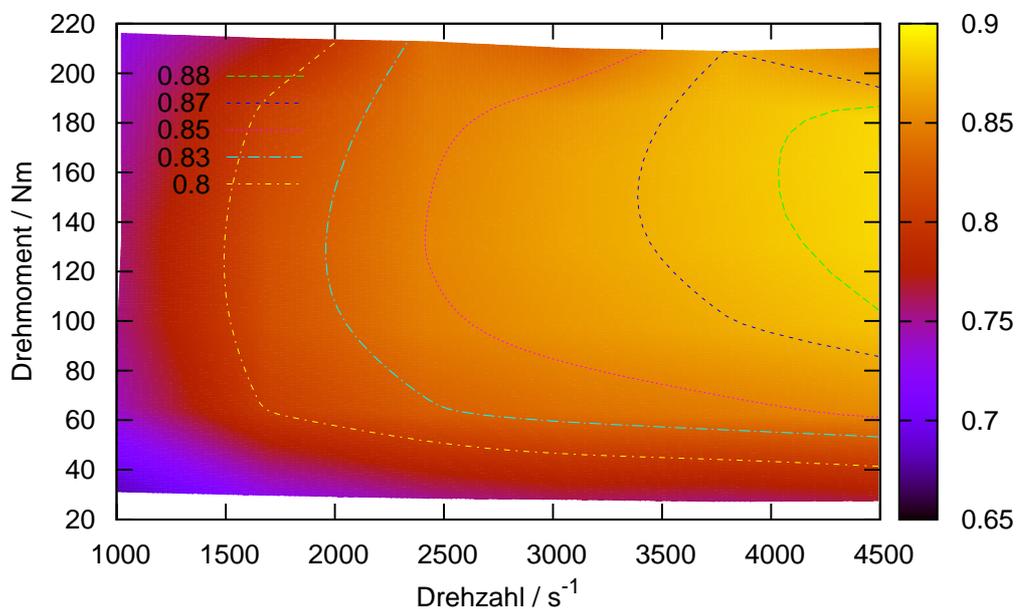


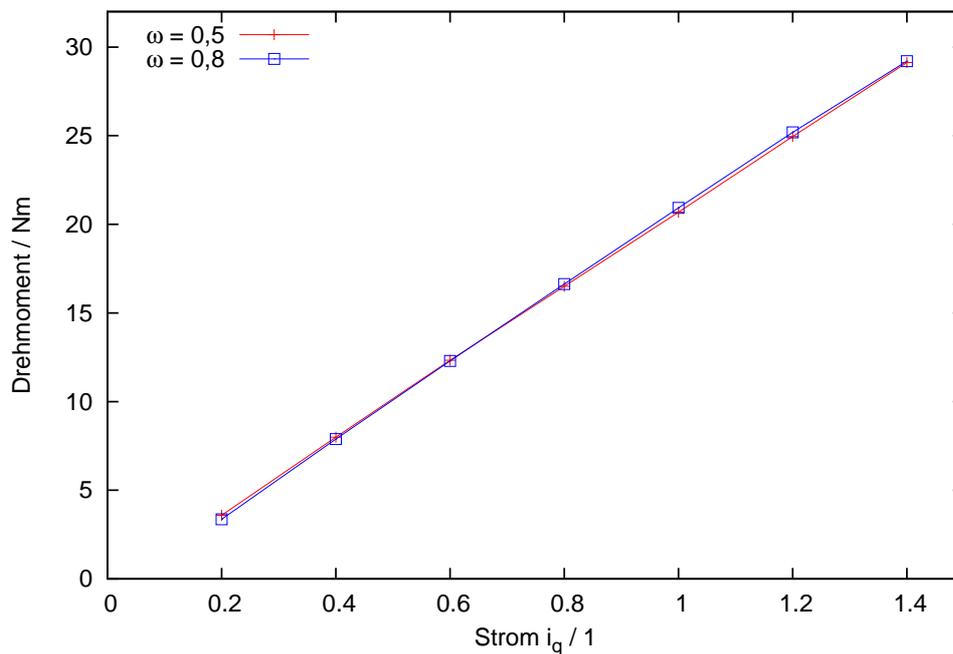
Abb. 15.8: Muschelkurve des Getriebemotors

### 15.3 Getriebeloser Motor

Der getriebelose Motor war bei der elektrifizierten Aufbereiterwelle im Einsatz. Ähnlich dem Getriebemotor liegen hier die Temperaturmessungen im Hintergrund. Der Motor hat eine Lüftkühlung mittels internem Lüfter. Die Synchronisation des Umrichters auf die laufende Maschine war ebenfalls nicht relevant, da der Aufbereiter nicht extern angetrieben werden kann. Die Messungen wurden entweder sensorlos mit eigenem Umrichter durchgeführt (siehe auch Kapitel 16.4) oder mit einem zugekauften Industrieumrichter der Fa. Refu mit Lagegeber.

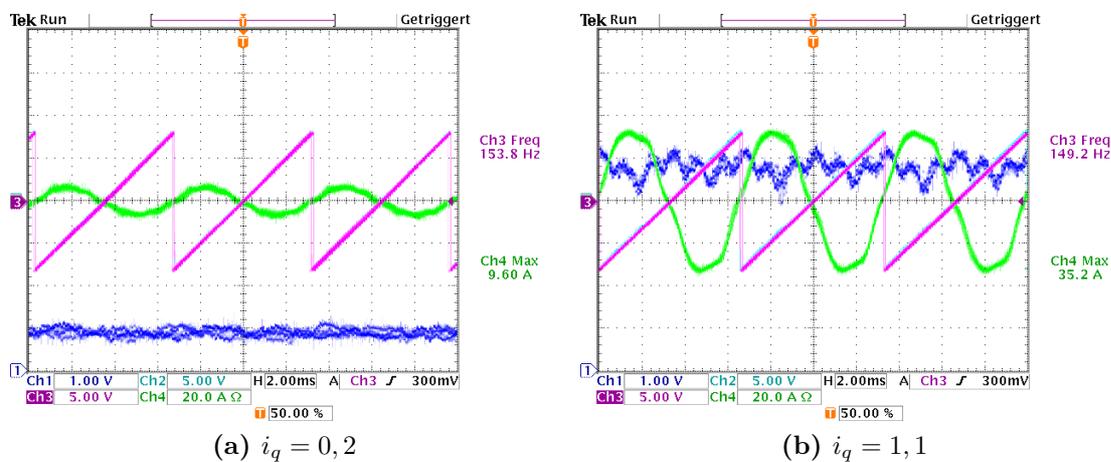
#### 15.3.1 Drehmoment

Das Drehmoment des getriebelosen Motors wurde bis zur Drehzahl  $\omega = 0,8$  vermessen (knapp über der zulässigen Drehzahl der Kardanwelle von 3000 U/min). Der Motor wurde mit dem EMK-Modell drehzahl geregelt betrieben. Mit der momentengeregelten Gleichstrommaschine wurde der Prüfling belastet. Die Drehmoment-/Querstromkennlinien bei zwei Drehzahlen sind in Abbildung 15.9 dargestellt.



**Abb. 15.9:** Momentenkennlinie des getriebelosen Motors

Abbildung 15.10 zeigt Aufnahmen zweier Betriebspunkte, jeweils mit Drehzahl  $\omega = 0,6$  und zwei verschiedenen Belastungen, Teillast ( $i_q = 0,2$ ) und Überlast ( $i_q = 1,1$ ). Zu erkennen ist der aktuelle Winkel laut Lagegeber und laut dem EMK-Modell.



**Abb. 15.10:** Verschiedene Belastungen bei Nenndrehzahl im EMK-Betrieb  
 Ch1:  $I_q$ Actual (0,25/Div), Ch2: Lage EMK (5/Div),  
 Ch3: Lagegeber (5/Div), Ch4: Phasenstrom (20A/Div)

### 15.3.2 Wirkungsgradkennfeld des getriebelosen Motors

In Abbildung 15.11 ist das Wirkungsgradkennlinienfeld des getriebelosen Motors mit dem Umrichterprototypen aus dem Projekt (Fa. HTD) abgebildet. Die Eingangsmessung war elektrisch am Zwischenkreis, die Ausgangsmessung war mechanisch an der Welle. Der Betrieb erfolgte mit EMK-Lagerfassung. Mit 89 % als maximalem Wirkungsgrad und einer typischen Wirkungsgradverteilung einer PSM ergibt sich ein ähnliches Bild zum Getriebemotor.

Abbildung 15.12 zeigt zum Vergleich das Kennlinienfeld mit dem Industrieumrichter (Fa. Refu). Ebenfalls von Zwischenkreis (elektrisch) zu Wellenabgang (mechanisch) mit EMK-Betrieb. Dies wurde im Zuge des Nachstellens des Feldversuches aufgenommen (siehe Kapitel 17.2). Das Wirkungsgradmaximum liegt mit 90 % etwas höher, die Verteilung ist ähnlich. Wegen einer höheren Stromgrenze des Industrieumrichters konnten höhere Momente bei Nenndrehzahl erreicht werden.

### 15.3.3 Feldtests

Dieser Motor war im Feldeinsatz. Als Alternative zum Rohrmotor wurde eine konventionelle Aufbereiterwelle damit bestückt. Relevante Messungen dazu sind in Kapitel 17.1 zusammengefasst.

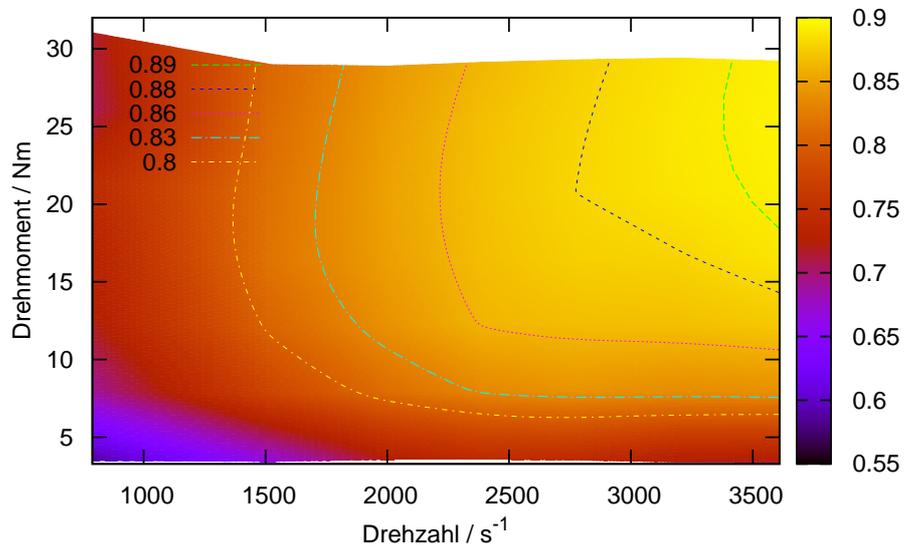


Abb. 15.11: Muschelkurve des getriebelosen Motors mit HTD Umrichter

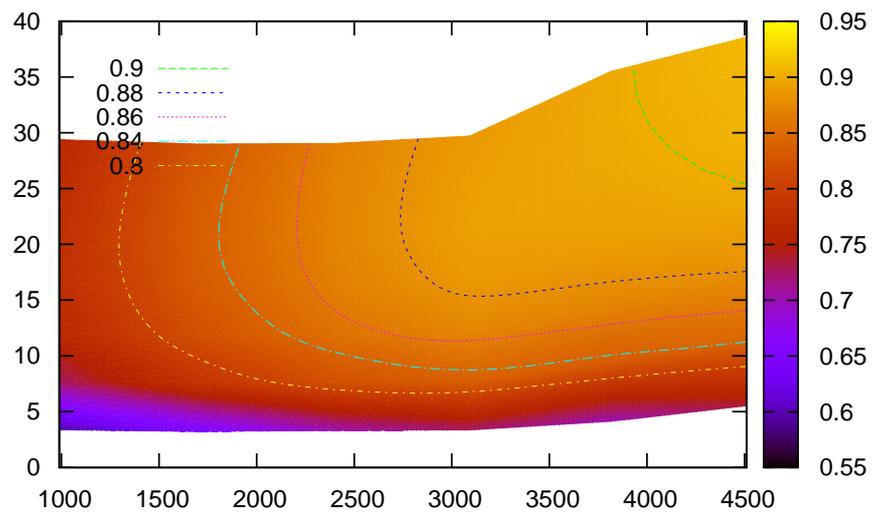


Abb. 15.12: Muschelkurve des getriebelosen Motors mit Refu Umrichter

## 16 Sensorlose Regelung

### 16.1 Einleitung

Alle verwendeten Antriebe, sowohl der ZWG als Generator, als auch die drei Motoren, werden sensorlos betrieben – nicht zuletzt im Hinblick auf den zukünftigen Einsatz mit einer definierten Leistungsschnittstelle, bei der über Isobus eine Regelung stattfinden soll (siehe Kap. 7). Ein sensorloser Betrieb schafft hier Unabhängigkeit.

Beim Zapfwellengenerator wird mit dem EMK<sup>29</sup>-Modell der Lagewinkel bestimmt. Aus dem Verlauf der induzierten Spannung wird die Rotorposition errechnet. Der Generator, angetrieben durch die Zapfwelle, induziert zu jedem Betriebszeitpunkt eine Spannung.

Da im Stillstand keine Spannung induziert wird, findet bei den Motoren neben dem EMK-Modell noch das INFORM<sup>30</sup>-Modell Verwendung. Es werden kurze Stromimpulse in den Motor geschickt. Unterschiedliche Induktivitäten aufgrund unterschiedlicher Rotorstellungen führen zu unterschiedlichen Stromanstiegen. Diese Stromanstiege werden gemessen und daraus die Winkelinformation berechnet. Dieses System wird vom Stillstand bis zu einer Drehzahl von rund 20 % der Nenndrehzahl eingesetzt. Ab rund 10 % ist die induzierte Spannung bereits so groß, dass das EMK-Modell aktiviert werden kann. Somit ist über den gesamten Drehzahlbereich der Maschine, vom Stillstand bis über die Nenndrehzahl, eine sensorlose Regelung mit vollem Moment möglich.

Der Lagegeber ist mitunter eine weitere Einschränkung beim Einbau und Betrieb elektrischer Maschinen in landwirtschaftlichen Geräten. Mit einem lagegeberlosen System sind mehr Freiheiten gegeben:

- ausfallssicherer Betrieb  
(mechanisch robuster, weniger Störungsmöglichkeiten)
- kostengünstiger (weniger Kabel, kein Sensor)
- leichter Einbau des Motors
- keine komplexe Isobus-Kommunikation über eine Closed-Loop AC-Schnittstelle Traktor–Anbaugerät

Im folgenden Kapitel finden sich detaillierte Messungen zu den sensorlosen Verfahren an zwei Industriemotoren, einem Getriebemotor und einem getriebelosen Motor. Dies zeigt die Umsetzbarkeit einer sensorlosen Regelung in typischen PSMs für Anwendungen in der Landtechnik. Weiterführende Informationen sind in den Papers [Sch88] und [Sch96], in [Sch92] sowie den Dissertationen [Kal12], [Eil11],

---

<sup>29</sup>ElektroMotorische Kraft (engl.: Back-EMF)

<sup>30</sup>Indirekte Flussermittlung durch Online Reaktanzmessung

[Iza09], [Rie05] und [Rob03] zu finden.

## 16.2 Sensorlose Antriebe in der Landtechnik

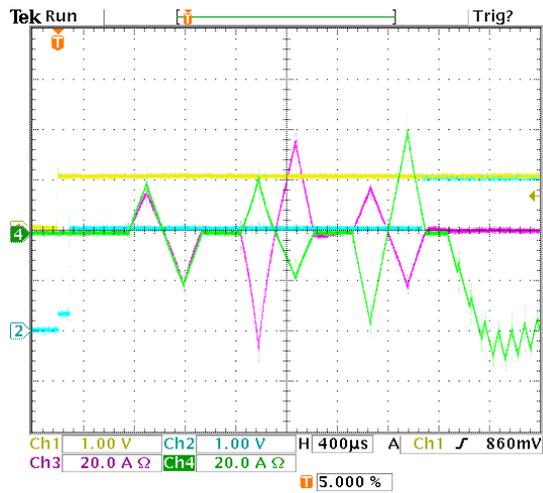
Der typische Antrieb in der Landtechnik muss im Stillstand unter Last starten können. Der Betriebsbereich nach dem Start liegt üblicherweise zwischen halber Nenndrehzahl und maximal 50-prozentiger Überdrehzahl. Dies war auch bei den hier behandelten Anwendungen (Schwader, Mähauflbereiter, Grubberwalze) so der Fall. Deshalb wurde die sensorlose Regelung dahingehend optimiert:

- Erkennen des Winkels im Stillstand
- Wegdrehen mit vollem Moment
- Beschleunigen auf eine gewünschte Drehzahl
- Drehzahlregelung im EMK-Bereich des Motors

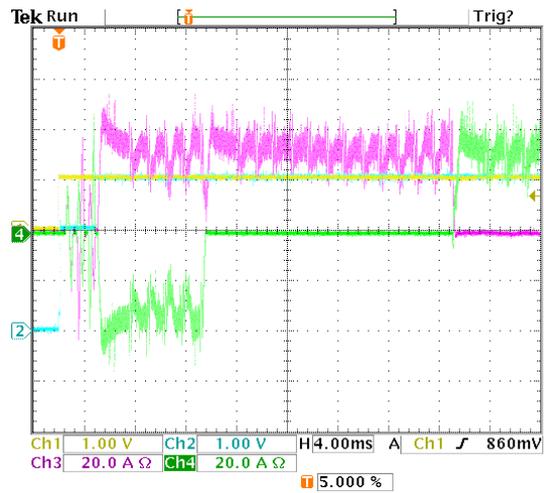
Ein solcher Startvorgang des Elektromotors ist in Abbildung 16.1 am Beispiel des Getriebemotors dargestellt. Zuerst erfolgt eine Überprüfung, ob der Motor bereits eine gewisse Drehzahl hat (für direkten Einstieg in den EMK-Betrieb) oder still steht, wie dies hier der Fall ist. Zu erkennen ist dieser Vorgang im kleinen Sprung im Reglerstatus Ch2, siehe (a). Dann wird mit dem sogenannten Großsignal die anfängliche Position des Rotors bestimmt. Nach rund 3 ms ist die absolute Rotorposition aufgrund der Magnetstellung gefunden und der Motor kann starten, wie der Reglerstatus (Ch2) zu erkennen gibt. Es wird mit einem Blockkommutierungsbetrieb die Maschine beschleunigt, siehe (b). Die Positionsmessungen, in den Phasenstrommessungen während des Blockbetriebs zu erkennen, benötigen eine wesentlich kürzere Zeit, da die 180° Unsicherheit (Nordpol oder Südpol?) nicht mehr relevant ist. Nach zirka 70 ms ist der Motor auf rund 15 % der Nenndrehzahl beschleunigt und der Blockbetrieb wird durch eine Sinuskommutierung ersetzt, siehe (c). Nach dem Umschalten wird mit der Sinusmodulation die Maschine auf die gewünschte Drehzahl beschleunigt, siehe (d).

Die Genauigkeit der absoluten Lageermittlung mit dem Großsignal ist vorwiegend durch die Reluktanzunterschiede der Maschine sowie der Zeiten, in denen der Strom aufgrund der angelegten Zwischenkreisspannung ansteigen kann, gegeben. Mit der Großsignal-INFORM Methode wird eine Genauigkeit von ungefähr 5 bis 7 Grad elektrisch erreicht, was für den Start ausreichend genau ist. Für die anschließende Blockkommutierung wird nur die Startsektorinformation, also eine Winkelauflösung von 60 ° elektrisch gefordert. [Kal12] S.63

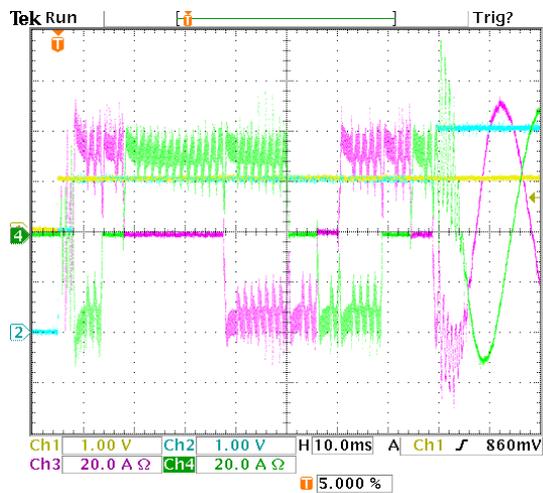
Beim Blockbetrieb ist die genaue Winkelangabe nebensächlich. Es werden sechs Sektoren durchlaufen und jeweils ein Stromzeiger eingepreßt. Gegen Sektorende hat der Flussraumzeiger  $\Psi_M$  zum Statorstromraumzeiger  $i_s$  einen Winkel kleiner



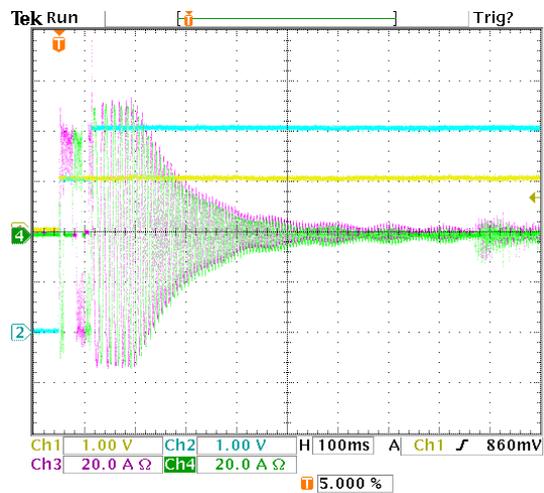
(a) Start mit Großsignal



(b) Umschalten auf Blockbetrieb



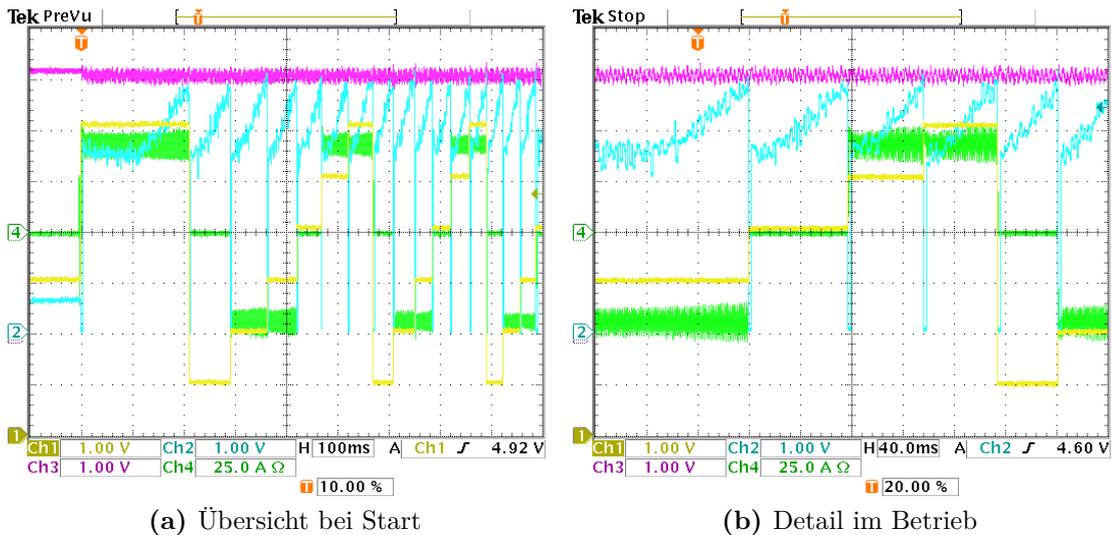
(c) Umschalten auf Sinusbetrieb



(d) Gesamtübersicht

**Abb. 16.1:** Regelungsabschnitte beim Startvorgang  
 Ch1: EnableRun (1/Div), Ch2: ControlState (1/Div),  
 Ch3: Phasenstrom U (20A/Div), Ch4: Phasenstrom V (20A/Div)

90°. Somit wird eine feldstärkende Komponente erzeugt, die für eine Induktivitätsabnahme sorgt – somit einen größeren differentiellen Stromanstieg bewirkt. Legt man den Raumzeiger nun einen Sektor weiter, so ist dieser Winkel größer 90° und eine feldschwächende Komponente erzeugt eine Induktivitätszunahme – somit eine kleineren differentiellen Stromanstieg. [Kal12] S.75



**Abb. 16.2:** Sektorumschalten bei Erreichen der Kommutierungsschwelle  
 Ch1: SektorBLDC (1/Div), Ch2: CurrDiff (0,25/Div),  
 Ch3: CurrDiffThreshold (0,25/Div), Ch4: Phasenstrom (25A/Div)

Diesen differentiellen Stromanstieg nutzt man zum Sektorumschalten aus. Steigt der differentielle Stromanstieg über eine Kommutierungsschwelle, so wird der Stromraumzeiger einen Sektor weitergeschaltet. Der Stromanstieg wird damit wieder kleiner und steigt bis zum nächsten Erreichen der Schwelle wieder an, und so weiter. Die Genauigkeit der Sektorauflösung ist somit von der Kommutierungsschwelle und dem eingprägten Statorstrom abhängig. Solch ein Sektor-Umschaltvorgang (Ch1), mit ansteigendem differentiellen Stromanstieg (Ch2) ist in Abbildung 16.2 zu sehen. Ist die Kommutierungsschwelle – die Umschaltgrenze – (Ch3) zu hoch, wird nicht umgeschaltet, ist die Grenze zu niedrig, wird sofort geschaltet. Zu jedem Strom gibt es eine optimale Umschaltgrenze.

Im EMK-Betrieb wird die Rotorlage nicht durch eine Strommessung sondern durch eine Spannungsmessung ermittelt. Die Genauigkeit ist hier nach der Statorspannungsgleichung (9.7) abhängig von der Drehzahl und dem Statorstrom. Je höher die Drehzahl, desto höher die induzierte Spannung, desto genauer der Winkel. Je höher die Belastung, desto höher der Statorstrom, desto ungenauer der Winkel.

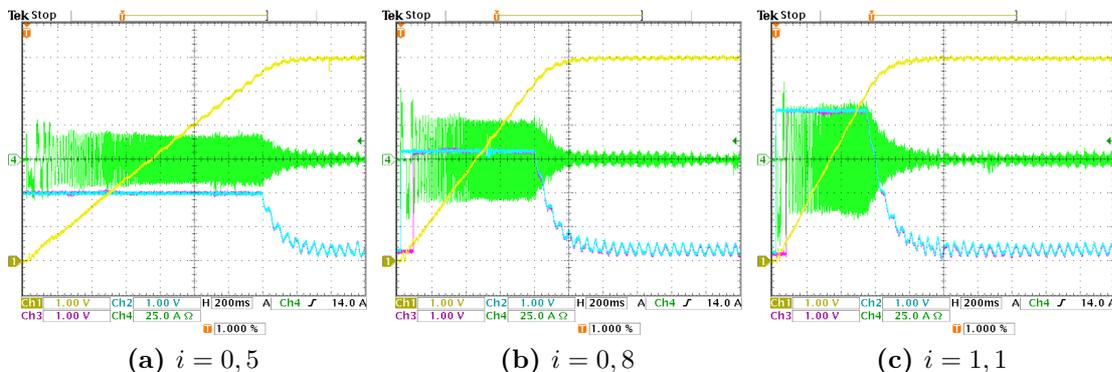
Im folgenden sind statistische Messungen zur Genauigkeit der einzelnen Methoden anhand zweier Beispielmotoren für den landwirtschaftlichen Einsatz angegeben.

## 16.3 Getriebemotor (SEW)

### 16.3.1 Hochlaufversuche

Es wurde der Hochlauf des Getriebemotors mit verschiedenen Strömen verglichen. Dabei wurde die Stromgrenze sowohl im INFORM-Bereich ( $i_{DC}$ ) als auch in EMK-Bereich ( $i_q$ ) auf gleiche Werte gesetzt. So kann die Dauer der Beschleunigung vom Stillstand zur gewünschten Drehzahl verglichen werden. Die Maschine wurde auf dem Prüfstand mit der Gleichstrommaschine mit einer vergleichsweise hohen Trägheit gekoppelt. Dadurch wurde die Hochlaufzeit für mehr Aussagekraft verlängert, die Lastmaschine lief rein passiv mit.

In Abbildung 16.3 sind die Hochläufe von Stillstand bis zur Nenndrehzahl (4500 U/min) bei drei unterschiedlichen Strömen ( $i = i_{DC} = i_q$ ,  $i = 0,5$ ,  $i = 0,8$  sowie  $i = 1,1$ ) dargestellt. An den Motor war eine Last in Form der Gleichstrommaschine gekoppelt.



**Abb. 16.3:** Getriebemotor - Hochlaufversuche

Ch1: OmegaActual (0,16/Div), Ch2: IdcReference (0,25/Div),  
Ch3: IqReference (0,25/Div), Ch4: Phasenstrom (25A/Div)

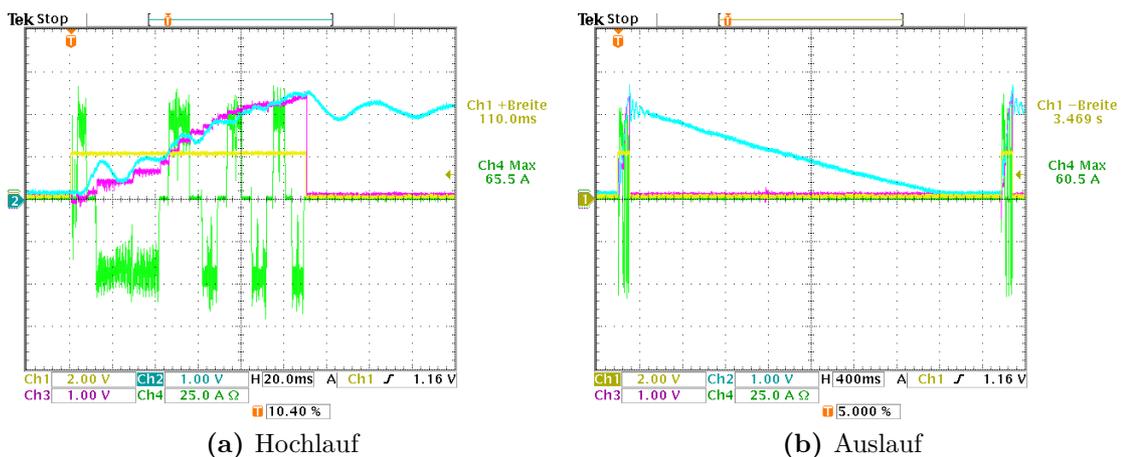
Bei Strom  $i = 1,1$  ist nach ca. 800 ms die Nenndrehzahl erreicht, bei  $i = 0,8$  nach 1,1 s und bei  $i = 0,5$  nach 1,6 s

### 16.3.2 Inform

Um die sensorlose Tauglichkeit im INFORM-Bereich zu untersuchen wurden zeitlich begrenzte Hochlaufversuche mit verschiedenen Parametervariationen durchge-

führt. Der Motor war wiederum an die Gleichstrommaschine als Last gekoppelt.

Die Messungen unterschieden sich in fünf unterschiedlichen Strömen und Umschaltgrenzen – die Kommutierungsschwelle „Threshold“ – sowie ein Vergleich im Betrieb mit Lagegeber. Pro Betriebspunkt gab es 250 Durchgänge. Pro Durchgang wurde der Motor mit dem jeweiligen Moment bzw. Strom von Drehzahl null ausgehend beschleunigt. Nach 110 ms Beschleunigung wurde die erreichte Drehzahl gemessen, diese entspricht zirka der Grenzgeschwindigkeit zum EMK-Bereich. Der Beschleunigungsvorgang wurde abgebrochen, und der Motor konnte für eine erneute Messung auslaufen. Die gemessene Drehzahl wurde im Prozessor gespeichert und nach Fertigstellen der Messreihe aus dem Prozessor ausgelesen und weiterverarbeitet (Anhang E.2). Solch ein Messvorgang ist in Abbildung 16.4 als Beispiel mit  $i_{DC} = 1,1$  und Threshold = 1,9 dargestellt. Zu erkennen ist ein Schwingen in der Drehzahl beim Start und am Ende des Beschleunigungsvorganges., wegen eines Zusammenwirkens der Trägheit der angeschlossenen Last und dem Spiel der Zahnräder des Getriebes, siehe unten.

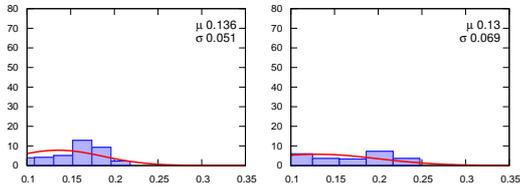


**Abb. 16.4:** Getriebemotor - 110 ms-INFORM-Hochlauf  
 Ch1: EnableRun (1/Div), Ch2: OmegaLagegeber (0,125/Div),  
 Ch3: OmegaSensorlos (0,125/Div), Ch4: Phasenstrom (25A/Div)

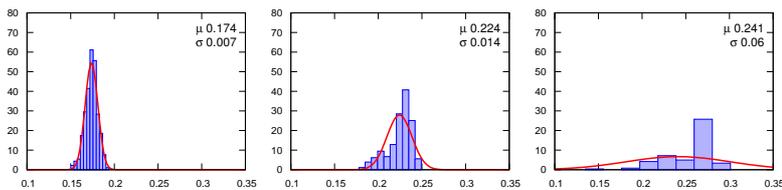
In Abbildung 16.5 sind die einzelnen Messungen an der SEW-Maschine dargestellt. Die Messungen wurden bei unterschiedlichen Stromvorgaben und Umschaltgrenzen (Threshold) durchgeführt. Weiters ist ein Vergleich mit einer Winkelvorgabe durch einen Lagegeber angegeben. Auf der x-Achse ist die jeweilige Drehzahl aufgetragen, die nach den 110 ms Beschleunigen erreicht wurde, auf der y-Achse die Wahrscheinlichkeitsdichte. Jeder einzelne Hochlauf wurde in einen Balken eingeordnet. Es sind pro Messreihe 13 Balken mit einer Breite entsprechend der halben Standardabweichung der jeweiligen Messreihe vorhanden. Zusätzlich zu den Balken, die die Wahrscheinlichkeit wiedergeben, ist noch die dazugehörige Normalverteilung dargestellt, beschriftet mit dem jeweiligem Mittelwert und der

### III Am Prüfstand und am Feld

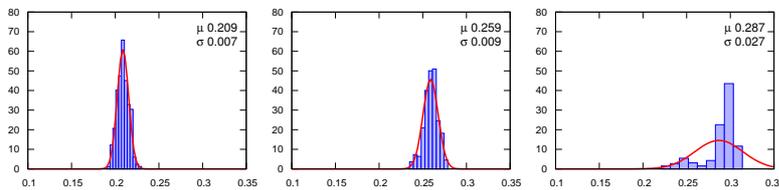
#### Inform



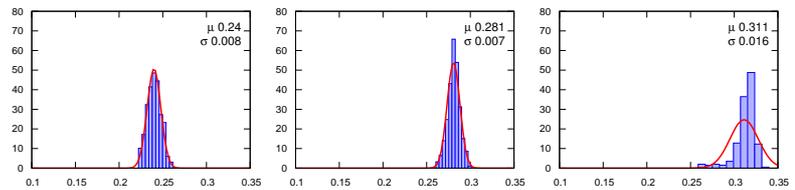
Threshold = 1,3



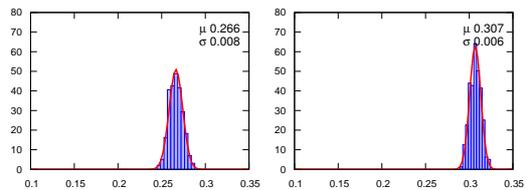
Threshold = 1,45



Threshold = 1,60

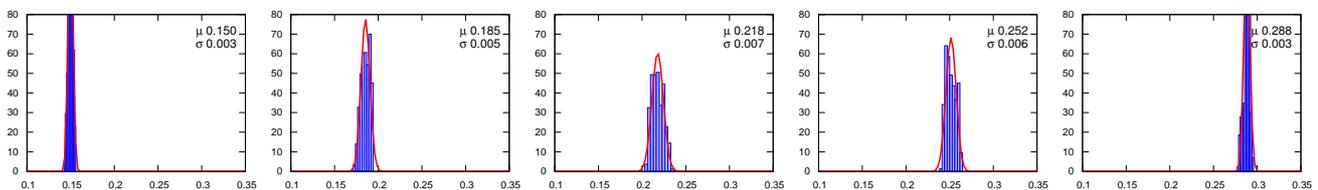


Threshold = 1,75



Threshold = 1,90

#### Lagegeber



$i_{DC} = 0,5$

$i_{DC} = 0,65$

$i_{DC} = 0,8$

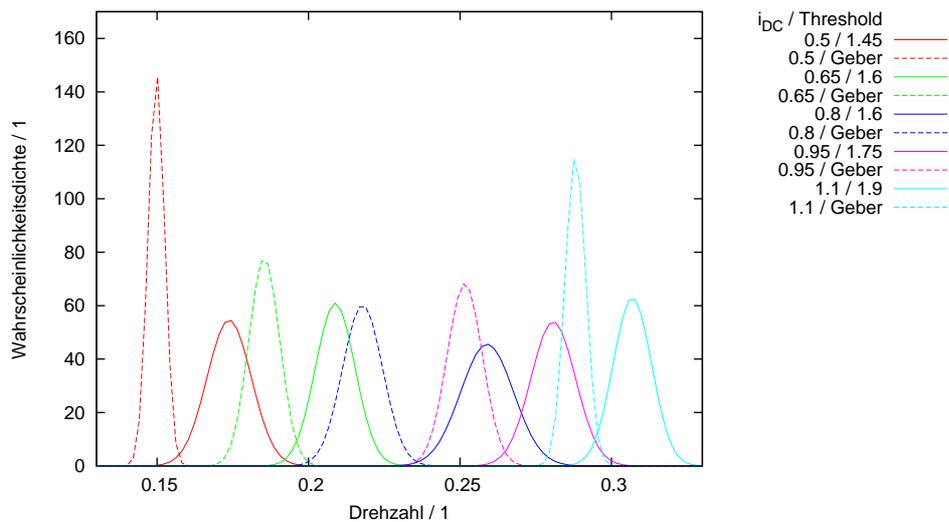
$i_{DC} = 0,95$

$i_{DC} = 1,1$

**Abb. 16.5:** Getriebemotor - 110 ms-Hochlaufstatistik  
Einteilung nach Strom und Umschaltchwelle (INFORM-Grenze bzw. Lagegeber)  
Abszisse:  $\omega / 1$ , Ordinate: Wahrscheinlichkeitsdichte / 1

Standardabweichung.

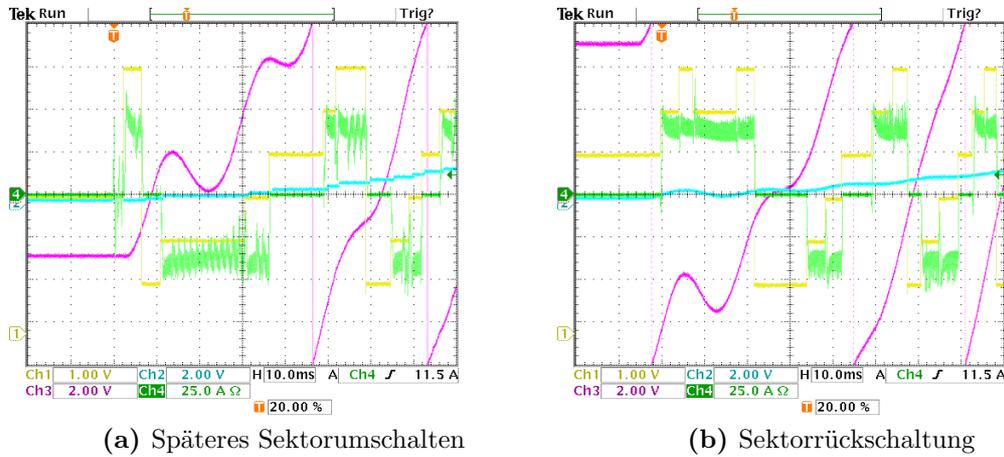
Zu erkennen sind die wesentlich höheren Standardabweichungen bei den Messreihen mit relativ kleiner Umschaltgrenze. Hier wird die Schwelle zu schnell erreicht und nicht korrekt umgeschaltet. Wird die Schwelle zu hoch gewählt, bleibt der Sektor konstant und der Motor fährt nicht hoch.



**Abb. 16.6:** INFORM-Statistikvergleich - Getriebemotor  
Erreichte Drehzahl nach 110 ms Hochlauf und deren statistische Verteilung

Um die einzelnen Messreihen leichter vergleichen zu können, sind in Abbildung 16.6 der subjektiv optimale INFORM-Fall zum jeweiligen Strom und der dazugehörige Geberlauf zum Vergleich dargestellt. Die Standardabweichung der Messungen mit Lagegeber sind vergleichsweise geringer, was auf die höhere Winkelgenauigkeit durch den Lagegeber im Vergleich zum Berechneten zurückzuführen ist. Der erreichte Drehzahlmittelwert der Lagegebernversuche bei allen fünf Strömen liegt unter den Mittelwerten der Hochläufe mit INFORM, was auf Reluktanzeffekte zurückzuführen ist. Der Effekt führt dazu, dass das maximale Moment nur mit einer zusätzlichen negativen d-Strom-Komponente erreicht wird.

Der eingesetzte Stromregler berücksichtigt diese Effekte nicht. Es wird ein reiner q-Strom zum Beschleunigung genutzt. Beim INFORM-Betrieb ist dieser Effekt wegen der variablen Sektorumschaltgrenzen berücksichtigt. Eine zusätzliche d-Strom-Komponente ist gleichzusetzen mit einer Winkelverschiebung zwischen Stromraumzeiger und mittlerem Flussraumzeiger, die durch späteres oder früheres Umschalten automatisch entsteht. Somit werden in der gleichen Zeit höhere Geschwindigkeiten erreicht.



(a) Späteres Sektorumschalten

(b) Sektorrückschaltung

**Abb. 16.7:** Rückdrehen durch Massenträgheit bei Hochlauf  
 Ch1: Sektor, Ch2: Drehzahl, Ch3: Lage, Ch4: Phasenstrom

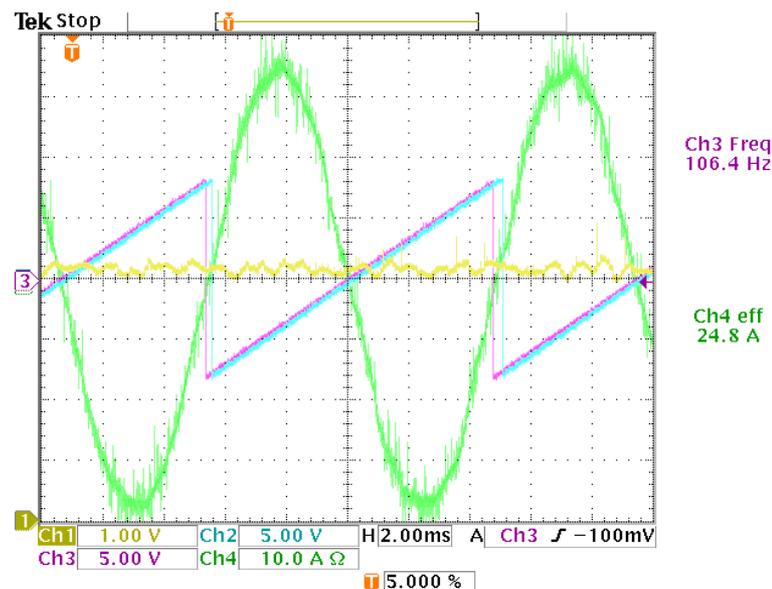
Der Variationskoeffizient<sup>31</sup> der Lagegebersversuche dieser Messreihe ist im Bereich von 0,03. Bei der Lagegebermessreihe des getriebelosen Motors – siehe unten, Kapitel 16.4.2 – hat der Variationskoeffizient eine Größenordnung von 0,008. Vergleichsweise erreicht der getriebelose Motor seine Endgeschwindigkeit genauer. Der Grund dafür ist das Getriebe des SEW Motors. Durch das Spiel der Zahnräder im Zusammenwirken mit der Trägheit der angeflanschten Lastmaschine kommt es zu einem Einschwingvorgang. Dies wurde akustisch bei den Messversuchen wahrgenommen und ist in Abbildung 16.7 anhand von gemessenen Werten zu erkennen. Links und rechts erkennt man am Lagegeber (Ch3) einen kurzen Rücklauf nach dem Starten. Beim Lagegeberbetrieb (rechts) erkennt man, dass beim Rücklauf auch die Sektorinformation verändert wird. Beim INFORM-Verfahren (links) bleibt dieses Rücklaufen unbemerkt, da der Winkel sensorlos errechnet wird (Ch1). Nur die Weiterschaltzeit ist etwas länger, da die Umschaltgrenze erst später erreicht wird. Je nach Rotor- und Zahnradstellung beim Start ist die Hochlaufzeit somit leicht unterschiedlich.

### 16.3.3 EMK-Modell

Neben der INFORM-Tauglichkeit wurde auch die sensorlose Tauglichkeit im hohen Drehzahlbereich geprüft. Dabei wurde die Winkelerfassung über EMK mit verschiedenen Parametervariationen (Drehzahl und Strom) verglichen. Die angekoppelte Gleichstrommaschine diente zur Belastung, und somit Änderung der Stromvorgabe.

<sup>31</sup>Der Variationskoeffizient ist der Quotient aus Standardabweichung durch Mittelwert, eine normierte Kenngröße zum Vergleichen mehrerer statistischer Verteilungen

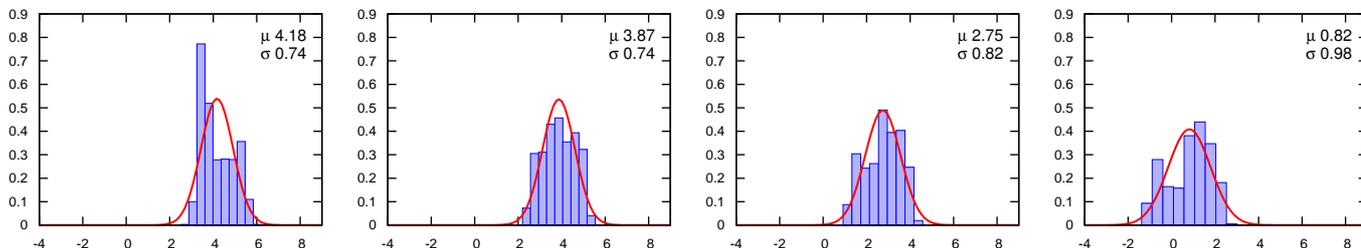
Nach einem Abgleich des  $\Psi_M$ -Raumzeigers im lastfreien Betrieb (Offset der Spannungsmessung, optimaler Rückkoppelterm des EMK-Modells), wurde ein winkelabhängiger und ein stromabhängiger Offset eingestellt. Somit konnte über den gesamten Betriebsbereich ein stabiler Betrieb gewährleistet werden. Unabhängig von Strom und Drehzahl sind die Winkelabweichungen zwischen EMK- und Lagegeberwinkel klein.



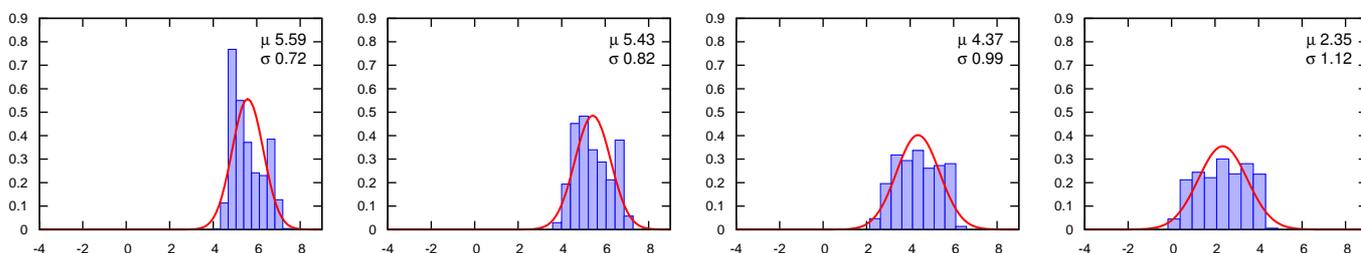
**Abb. 16.8:** Lagegebervergleich - Getriebemotor  
 Ch1:  $i_q$ Reference (0,25/Div), Ch2: Lage EMK ( $180^\circ/1,6$  Div),  
 Ch3: Lagegeber ( $180^\circ/1,6$  Div), Ch4: Phasenstrom (10A/Div)

Ein Vergleich der beiden Lagewinkel ist in Abbildung 16.8 anhand eines Beispiels mit Nennstrom  $i_q = 1$  und einer Drehzahl von  $\omega = 0,3$  dargestellt. Zum Vergleich der Abweichungen bei unterschiedlichen Drehzahlen und Belastungen wurde die Differenz zwischen dem Winkel nach dem EMK-Modell und dem Vergleichswinkel des Lagegebers ermittelt (Ch2 & Ch3, 16 V entsprechen  $360^\circ$ , somit  $112,5^\circ/\text{Div}$ ). Für eine statistische Aussage wurde die Abweichung pro Betriebspunkt 2000 mal erfasst. Jeden zehnten PWM-Zyklus (also jeder zehnte Durchgang des „kurz-task-Zyklus“) wurde diese Differenz gespeichert und im Nachhinein aus dem Prozessor ausgelesen und weiterverarbeitet (Anhang E.2). Die Messreihen bzw. Betriebspunkte unterscheiden sich in vier unterschiedlichen Strömen sowie in vier unterschiedlichen Drehzahlen, in Abbildung 16.9 dargestellt. Auf der x-Achse ist der Winkelfehler in elektrischen Graden und auf der y-Achse die Wahrscheinlichkeitsdichte aufgetragen. Die Flächen der Balken repräsentieren die Wahrscheinlichkeit, die Breite ist die halbe Standardabweichung, die dazugehörige gerechnete Normalverteilung ist mit dem Mittelwert und der Standardabweichung dargestellt.

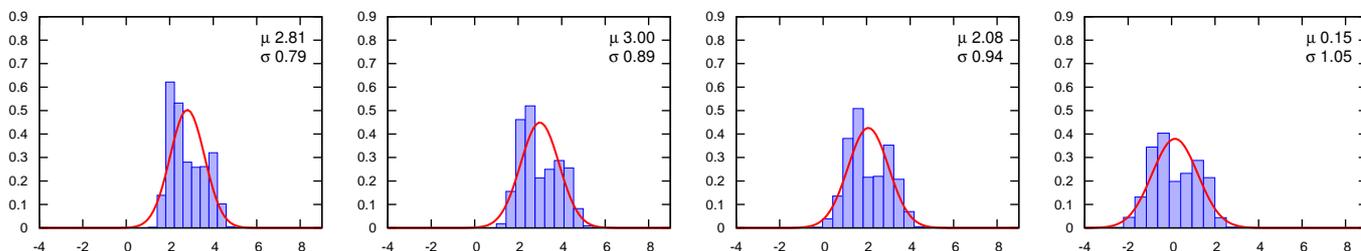
$\omega = 0,15$



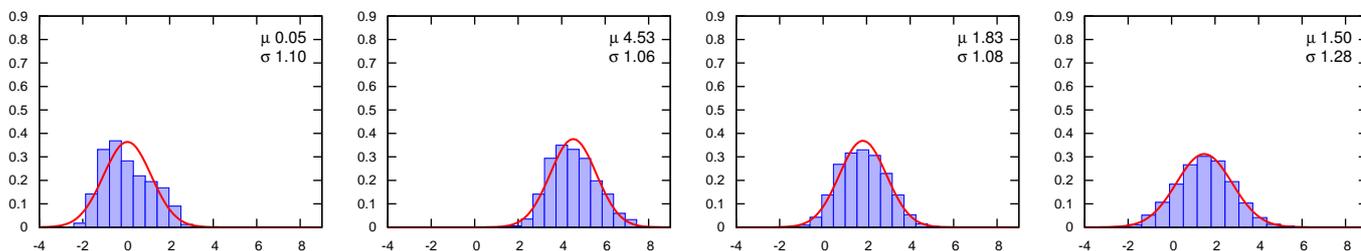
$\omega = 0,4$



$\omega = 0,66$



$\omega = 1,0$



$i_q = 0,2$

$i_q = 0,5$

$i_q = 0,8$

$i_q = 1,1$

**Abb. 16.9:** Getriebemotor - EMK-Winkelfehlerstatistik  
Einteilung nach Drehzahl und Strom

(Abszisse: Winkelfehler / ° Grad elektrisch, Ordinate: Wahrscheinlichkeitsdichte / 1)

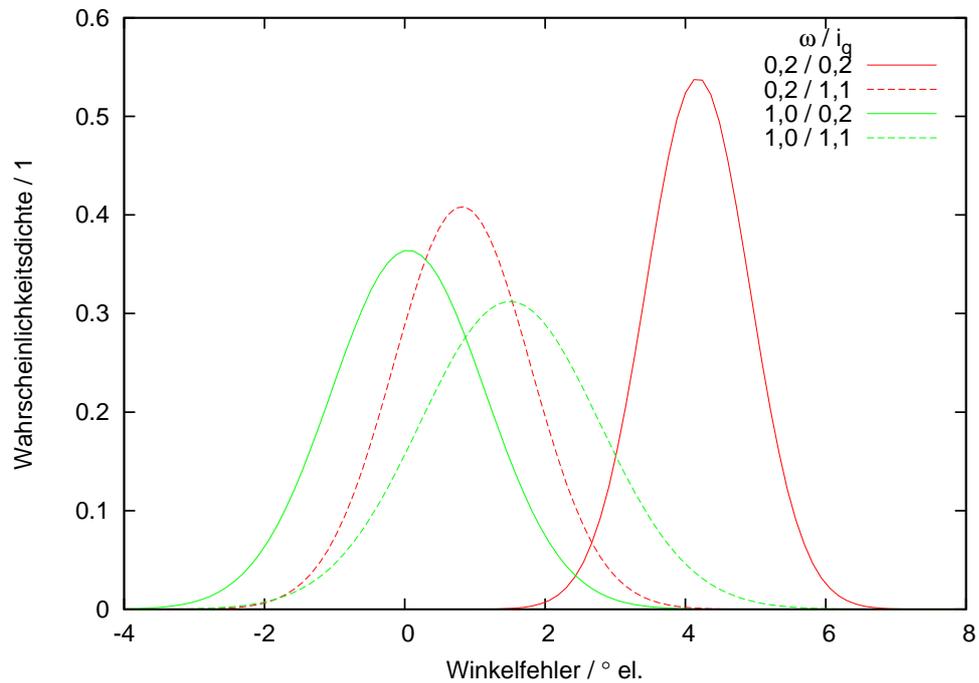


Abb. 16.10: Getriebemotor - Vergleich der Winkelfehlerstatistik

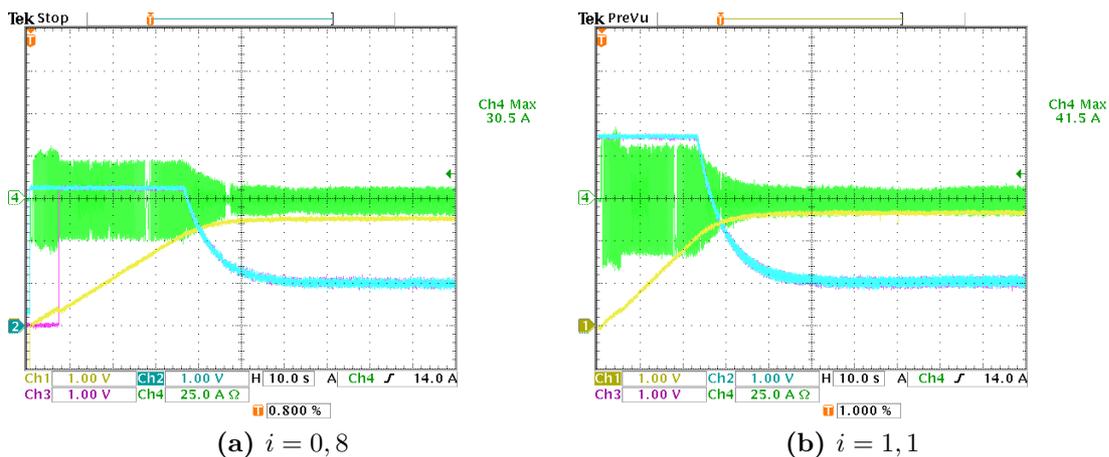
Um die einzelnen Messreihen leichter vergleichen zu können, sind in Abbildung 16.10 vier ausgewählte Betriebspunkte gegenübergestellt. Zwei Drehzahlen, eine kleine bei der bereits ein INFORM-Betrieb möglich wäre, bzw. die Nenndrehzahl, sowie ein Teillast mit  $i_q = 0,2$  und leichte Überlast mit  $i_q = 1,1$ .

## 16.4 Getriebeloser Motor (Schabmüller)

### 16.4.1 Hochlaufversuche

Beim getriebelosen Motor wurde ebenfalls der Hochlauf mit verschiedenen Strömen verglichen (INFORM- und EMK-Strom ident). Im Vergleich zum Getriebemotor werden hier, mit gleicher Last, wesentlich längere Hochfahrzeiten benötigt.

In Abbildung 16.11 sind die Hochläufe von Stillstand bis zu zwei Drittel der Nenndrehzahl (3000 U/min), der maximal zulässigen Drehzahl der verwendeten Kardanwelle, bei zwei unterschiedlichen Strömen ( $i = i_{DC} = i_q$ ,  $i = 0,8$  und  $i = 1,1$ ) dargestellt. An den Motor war eine Last in Form der Gleichstrommaschine gekoppelt. Die Maschine lief rein passiv mit, hatte jedoch eine vergleichsweise hohe Trägheit.



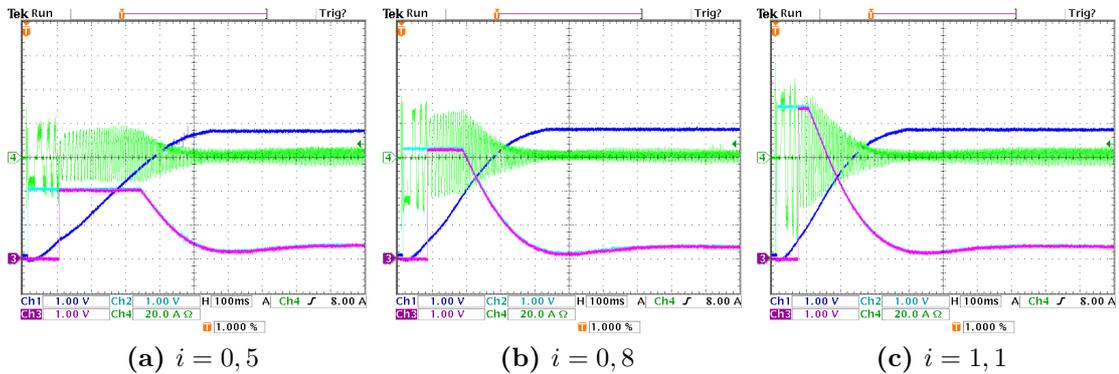
**Abb. 16.11:** Getriebeloser Motor - Hochlaufversuche mit Last  
 Ch1: OmegaActual (0,25/Div), Ch2: IdcReference (0,25/Div),  
 Ch3: IqReference (0,25/Div), Ch4: Phasenstrom (25A/Div)

Bei Strom  $i = 1,1$  ist nach ca. 35 s die Nenndrehzahl erreicht, und bei  $i = 0,8$  nach 45 s.

Als Vergleich wurden die Hochlaufzeiten ohne angekoppelte Last wiederholt. Diese sind in Abbildung 16.12 dargestellt. Hier wird bei Strom  $i = 0,5$  nach ca. 540 ms, bei  $i = 0,8$  nach ca. 430 ms und bei  $i = 1,1$  nach ca. 380 ms die Nenndrehzahl erreicht. Dies war mit Entfall der Kardanwelle möglich.

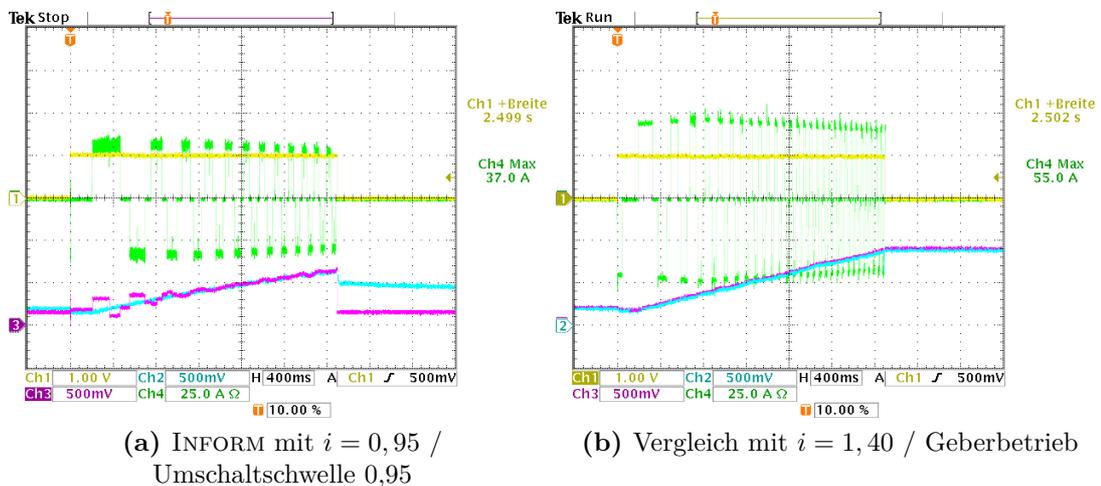
### 16.4.2 Inform

Analog zur Getriebemotormessung wurde auch hier ein reiner INFORM-Hochlauf mit verschiedenen Strömen und Umschaltgrenzen durchgeführt. Abbildung 16.13



**Abb. 16.12:** Getriebeloser Motor - Hochlaufversuche ohne Last  
 Ch1: OmegaActual (0,25/Div), Ch2: IdcReference (0,25/Div),  
 Ch3: IqReference (0,25/Div), Ch4: Phasenstrom (20A/Div)

zeigt zwei Hochläufe mit unterschiedlichen Strömen ( $i_{DC} = 1,4$  und  $i_{DC} = 0,95$ ) sowie unterschiedlichen Sektorumschaltarten (per Lagegeber oder per INFORM mit Grenze 0,95). Die Hochlaufzeit betrug hier 2 Sekunden. Ohne Getriebe wurde erst nach dieser Zeit die Drehzahlgrenze zum EMK-Bereich erreicht.



**Abb. 16.13:** Getriebeloser Motor - 2 s-INFORM-Hochlauf mit Last  
 Ch1: EnableRun, Ch2: OmegaLagegeber,  
 Ch3: OmegaSensorlos U, Ch4: Phasenstrom

In Abbildung 16.14 sind die einzelnen Messungen der getriebelosen Maschine mit gekoppelter Last in Form der Gleichstrommaschine dargestellt. Wiederum erfolgt eine Einteilung in die Stromvorgabe und Umschaltgrenzen (Threshold) bzw. Lagegeber. Auf der x-Achse findet sich die erreichte Drehzahl nach der Beschleunigungszeit von 2 s. Die gemessene Drehzahl wurde im Prozessor gespeichert und

nach Fertigstellen der Messreihe aus dem Prozessor ausgelesen und weiterverarbeitet (Anhang E.2). Auf der  $y$ -Achse ist die Wahrscheinlichkeitsdichte mit der gerechneten Normalverteilung angegeben. Die zugehörigen Balken (Breite ist die halbe Standardabweichung) stehen für die auftretende Wahrscheinlichkeit.

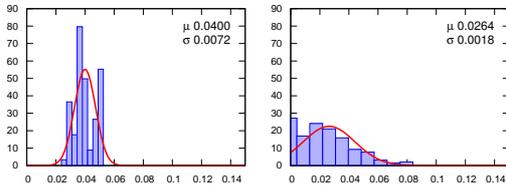
Analog zum Getriebemotor sind bei gleichem Strom die Endgeschwindigkeiten höher, je kleiner die Umschaltgrenze ist. Ist die Umschaltgrenze zu klein, wird die Sektorkommutierung nicht mehr richtig durchgeführt und der Hochlauf ist nicht erfolgreich. Daraus resultierend auch die hohe Standardabweichung.

Um die einzelnen Messreihen leichter zu vergleichen, sind in Abbildung 16.15 die subjektiv optimale INFORM-Schaltswelle zum jeweiligen Strom und der dazugehörige Geberhochlauf zum Vergleich dargestellt. Wie zu erwarten ist die Standardabweichung mit dem Lagegeber kleiner. Der INFORM-Betrieb erreicht eine höhere Endgeschwindigkeit als der Lagegeber-Betrieb, was, wie beim Getriebemotor, auf Reluktanzeffekte zurückzuführen ist.

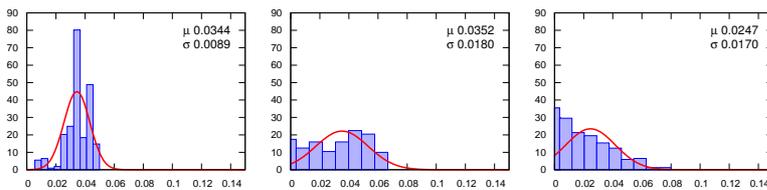
Zum Vergleich wurde eine Messreihe mit dem lastfreien Motor aufgetragen. Ohne die Trägheit der Gleichstrommaschine beschleunigt der Motor wesentlich schneller. Die Beschleunigungszeit wurde somit auf 100 ms gesetzt, wie Abbildung 16.16 an einem Beispiel mit gleichem Strom und INFORM- (a) bzw. Lagegeberumschaltung (b) zeigt.

In Abbildung 16.17 sind die einzelnen Messreihen aufgetragen. Neben der Hochlaufzeit wurden auch die Ströme an den lastfreien Betrieb angepasst.

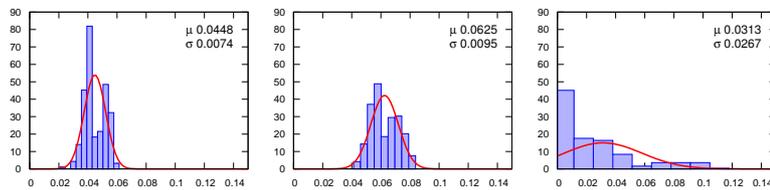
Inform



Threshold = 0,75

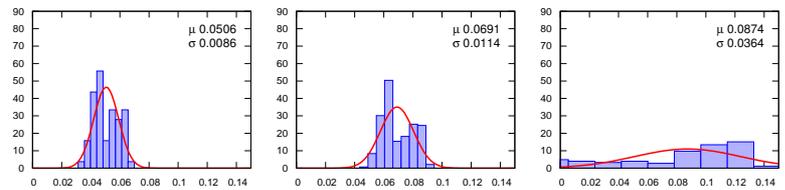


Threshold = 0,85

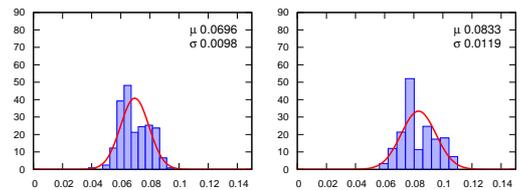


Threshold = 0,95

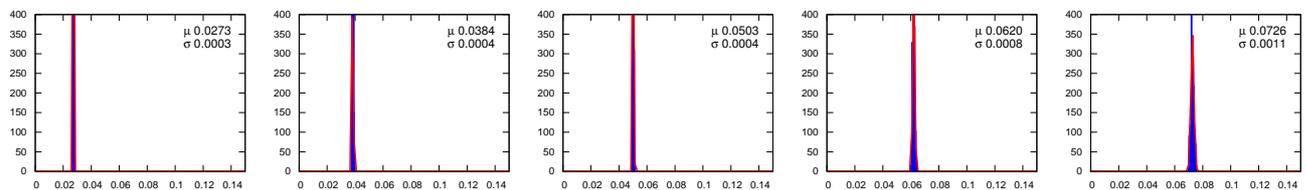
Threshold = 1,1



Threshold = 1,25



Lagegeber



$i_{DC} = 0,6$

$i_{DC} = 0,8$

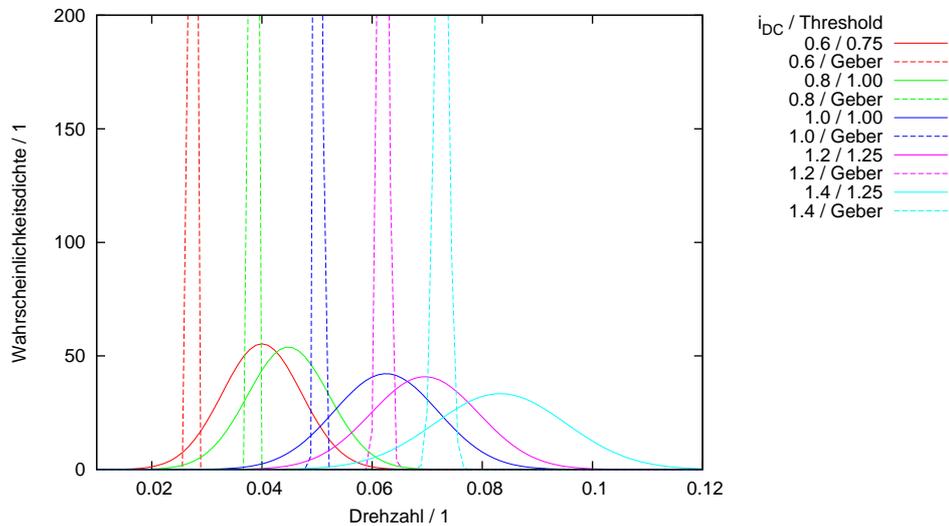
$i_{DC} = 1,0$

$i_{DC} = 1,2$

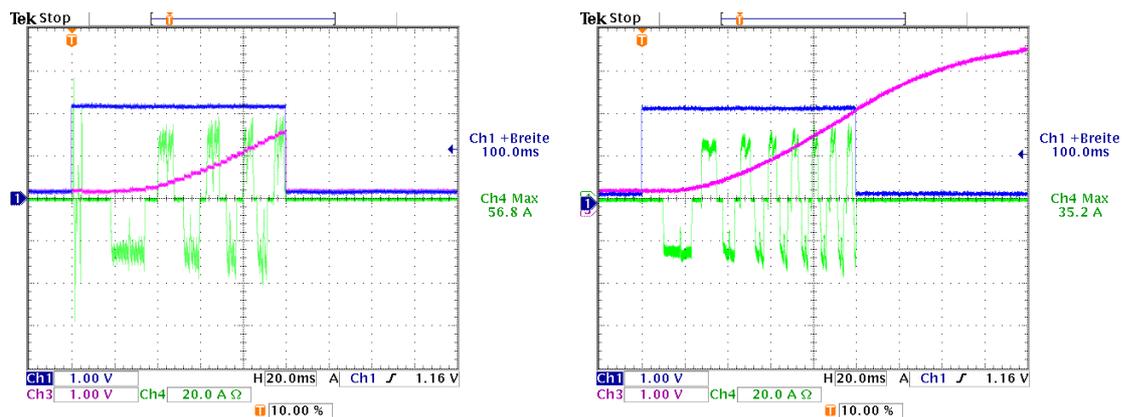
$i_{DC} = 1,4$

**Abb. 16.14:** Getriebeloser Motor - 2 s-Hochlaufstatistik mit Last  
Einteilung nach Strom und Umschaltswelle (INFORM-Grenze bzw. Lagegeber)

Abszisse:  $\omega / 1$ , Ordinate: Wahrscheinlichkeitsdichte / 1



**Abb. 16.15:** INFORM-Statistikvergleich - getriebeloser Motor mit Last  
Erreichte Drehzahl nach 2 s Hochlauf und deren statistische Verteilung

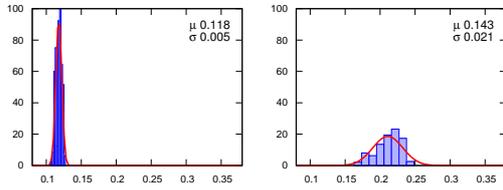


(a)  $i_{DC} = 0,8$  mit INFORM

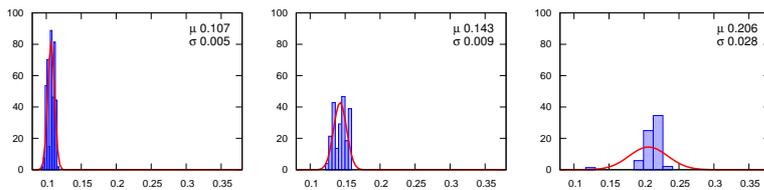
(b)  $i_{DC} = 0,8$  mit Lagegeber

**Abb. 16.16:** Getriebeloser Motor - 100 ms-INFORM-Hochlauf ohne Last  
Ch1: EnableRun (0,5/Div), Ch2: OmegaLagegeber (0,125/Div),  
Ch3: OmegaSensorlos (0,125/Div), Ch4: Phasenstrom (20A/Div)

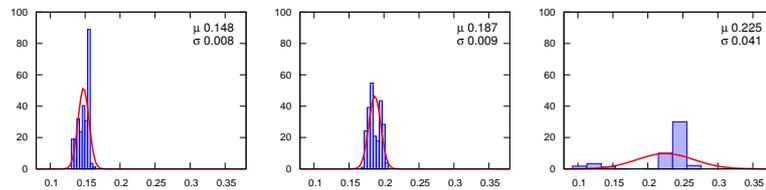
Inform



Threshold = 0,7

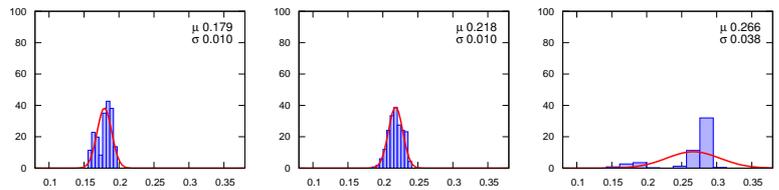


Threshold = 0,8

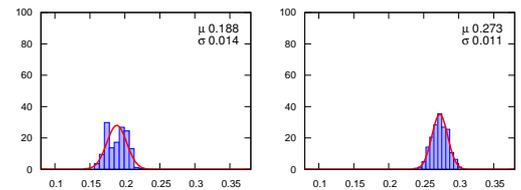


Threshold = 0,9

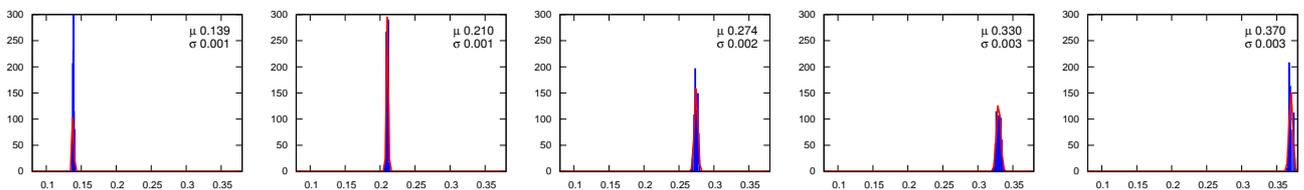
Threshold = 1,0



Threshold = 1,1



Lagegeber



$i_{DC} = 0,4$

$i_{DC} = 0,6$

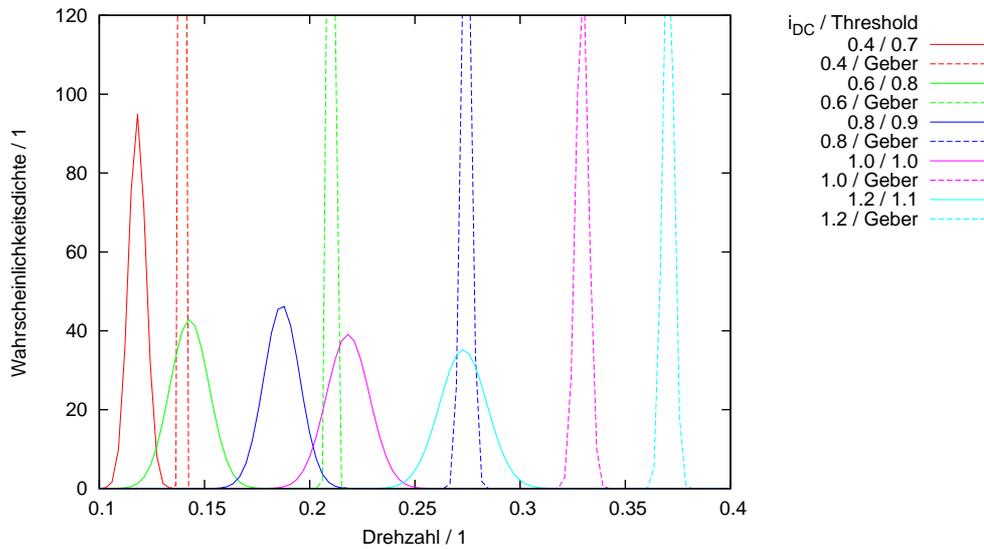
$i_{DC} = 0,8$

$i_{DC} = 1,0$

$i_{DC} = 1,2$

**Abb. 16.17:** Getriebeloser Motor - 100 ms-Hochlaufstatistik ohne Last  
Einteilung nach Strom und Umschaltchwelle (INFORM-Grenze bzw. Lagegeber)

Abszisse:  $\omega / 1$ , Ordinate: Wahrscheinlichkeitsdichte / 1

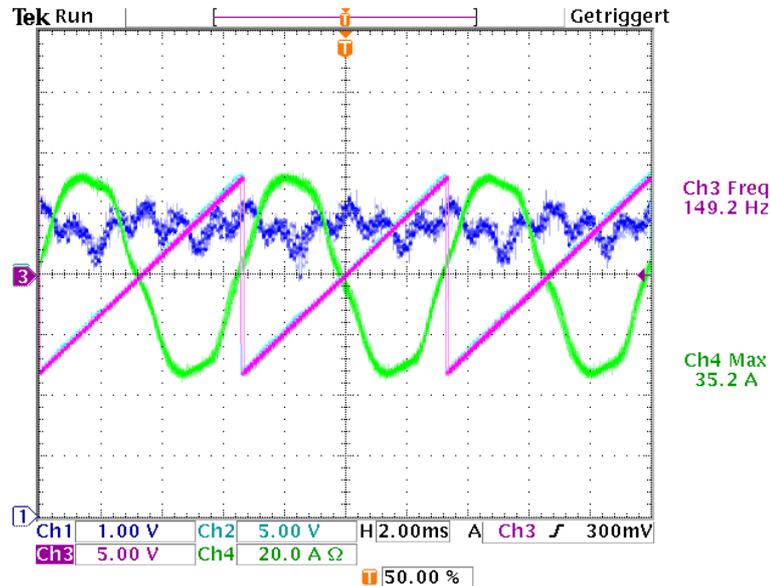


**Abb. 16.18:** INFORM-Statistikvergleich - getriebeloser Motor ohne Last  
Erreichte Drehzahl nach 100 ms Hochlauf und deren statistische Verteilung

Um die einzelnen Messreihen graphisch leichter zu vergleichen, sind in Abbildung 16.18 der subjektiv optimale INFORM-Fall und der dazugehörige Geberhochlauf zum Vergleich dargestellt. Die Standardabweichung der Messungen mit Lagegeber ist kleiner als bei der INFORM-Messung, was auf die höhere Winkelgenauigkeit durch den Lagegeber zurückzuführen ist. Dadurch steigt auch die Genauigkeit der Umschaltung und der Motor fährt schneller hoch, erreicht in der gleichen Hochlaufzeit eine höhere Drehzahl.

Beim lagegeberlosen Betrieb ist der Variationskoeffizient beim Lastversuch rund doppelt so groß wie beim lastfreien Versuch. Zurückzuführen ist dies auf die längere Hochlaufzeit. Beim Lagegeberbetrieb schneidet der lastfreie Versuch ebenfalls knapp besser ab. Im Vergleich zum Getriebemotor ist der Unterschied zwischen INFORM-Betrieb und Lagegeberbetrieb groß. Ohne das Einschwingen durch das Spiel der Getriebezahnräder im Zusammenwirken mit der Trägheit der angeflanschten Lastmaschine, erreicht der Motor die selbe Endgeschwindigkeit genauer.

## 16.4.3 EMK-Modell



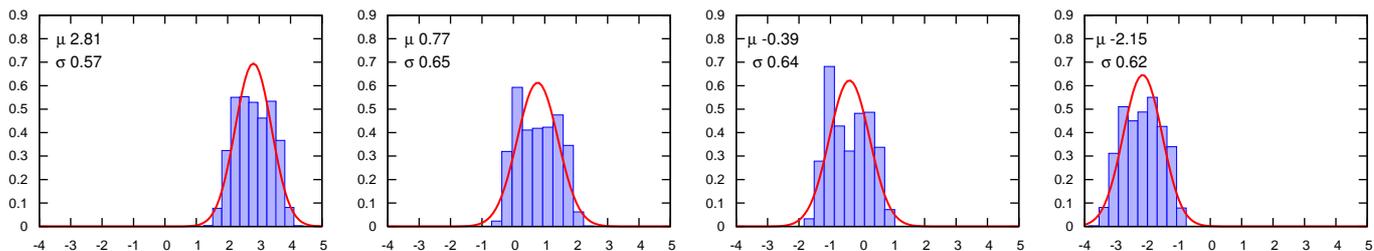
**Abb. 16.19:** Lagegebervergleich - getriebeloser Motor  
 Ch1:  $i_q$ Reference (0,25/Div), Ch2: Lage EMK ( $180^\circ/1,6$  Div),  
 Ch3: Lagegeber ( $180^\circ/1,6$  Div), Ch4: Phasenstrom (20A/Div)

Wie beim Getriebemotor wurde auch hier die Winkelgenauigkeit des EMK-Modells überprüft. Wegen der höchstzulässigen Drehzahl der Kardanwelle von 3000 U/min wurden nur drei Drehzahlen mit vier Strömen verglichen. Pro Messung wurden 4000 Messwerte erfasst. Diese Differenz wurde im RAM gespeichert und im Nachhinein aus dem Prozessor ausgelesen und weiterverarbeitet (Anhang E.2).

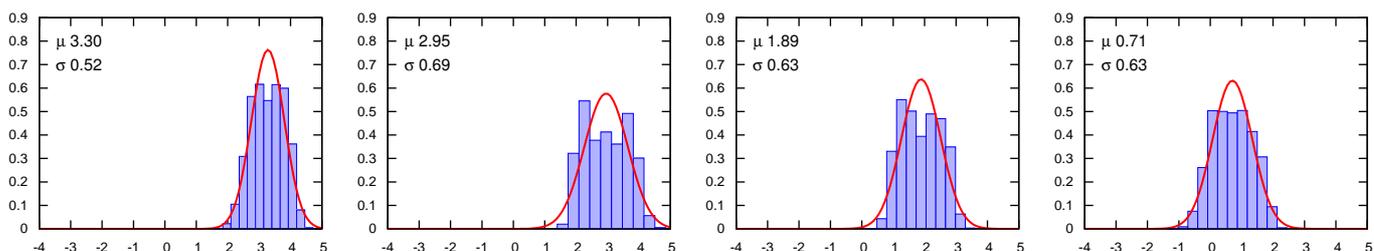
Abbildung 16.19 zeigt ein Beispiel mit  $i_q = 1,1$  bei einer Drehzahl von  $\omega = 0,6$ . Die Lage des EMK-Modells sowie des Lagegebers ist in Ch2 und Ch3 dargestellt (16 V entsprechen  $360^\circ$ , somit  $112,5^\circ/\text{Div}$ ).

Die einzelnen Messreihen sind in Abbildung 16.20 dargestellt. Analog zu vorher sind auf der x-Achse die Winkelabweichung in elektrischen Graden aufgetragen, auf der y-Achse die Wahrscheinlichkeitsdichte.

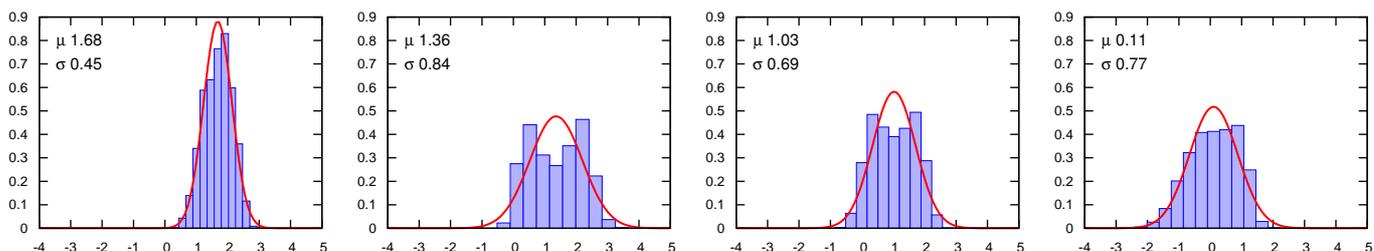
$\omega = 0,2$



$\omega = 0,4$



$\omega = 0,6$



$i_q = 0,2$

$i_q = 0,5$

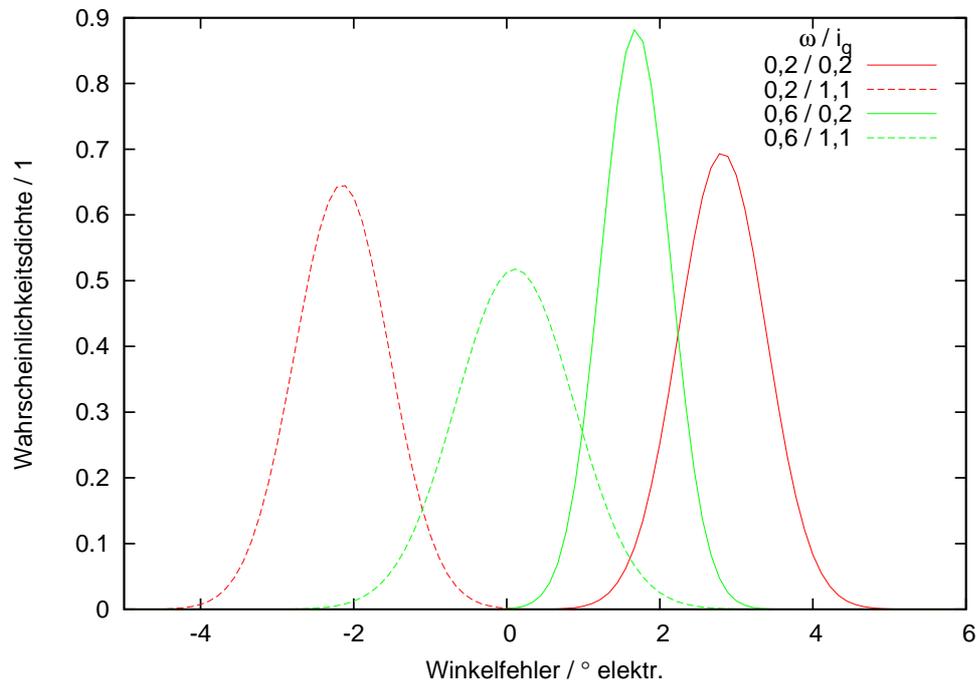
$i_q = 0,8$

$i_q = 1,1$

**Abb. 16.20:** Getriebeloser Motor - EMK-Winkelfehlerstatistik

Einteilung nach Drehzahl und Strom

(Abszisse: Winkelfehler / ° Grad elektrisch, Ordinate: Wahrscheinlichkeitsdichte / 1)



**Abb. 16.21:** Getriebeloser Motor - Vergleich der Winkelfehlerstatistik

In Abbildung 16.21 wird ein Vergleich vier ausgewählter Betriebspunkte (niedrige Drehzahl, hohe Drehzahl mit jeweils Teillast mit  $i_q = 0,2$  und leichte Überlast mit  $i_q = 1,1$ ) gezeigt.

## 16.5 Zusammenfassung

Die behandelten Motoren haben im EMK-Bereich weniger Winkelabweichung als in der Literatur als Standard angegeben, eignen sich somit sehr gut für einen sensorlosen Betrieb mit hohen Drehzahlen wie auch im mittleren Drehzahlbereich.

Auch im INFORM-Bereich ist durch die hohe Toleranz im Hinblick auf die Kommutierungsschwelle ein sicherer Betrieb möglich. Die Kommutierungsschwelle ist stromabhängig. Dies ist in Abbildung 16.22 zusammengefasst dargestellt. Hier sind die optimalen Umschaltgrenzen zu den verschiedenen Strömen der Motoren aufgetragen.

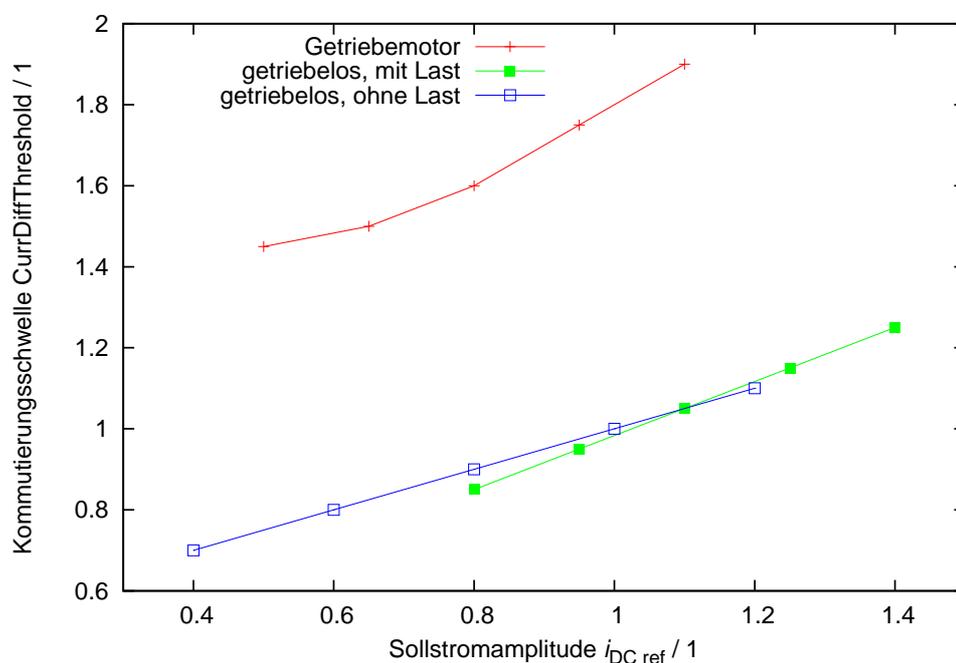


Abb. 16.22: Vergleich verschiedener INFORM-Umschaltkriterien

In Summe sind beide Motoren mit der richtigen Parametereinstellung für einen robusten Betrieb im landwirtschaftlichen Einsatz sehr geeignet. Sowohl ein Hochstarten vom Stillstand mit dem INFORM-Betrieb als auch eine exakte Regelung im EMK-Bereich sind möglich.

## 17 Gesamtpaket im Feldeinsatz

Im Juni 2012 wurde ein Feldversuch mit der elektrisch betriebenen Aufbereiterwelle auf einer Wiese, in der Nähe von Wieselburg/Erlauf, Österreich, durchgeführt. Der primäre Grund des Versuchs war es, den Abtrocknungsverlauf des Mähgutes in Abhängigkeit der Drehzahl der Aufbereiterwelle zu erfahren. Da zu diesem Zeitpunkt der entwickelte Rohrmotor noch am Prüfstand war, wurde das Vorhaben mit Industriekomponenten gelöst.



**Abb. 17.1:** Gesamtpaket im Feldeinsatz

Wie bereits erwähnt, wurde auf einem konventionellen Scheibenmähwerk eine PSM der Fa. Schabmüller installiert. Diese war per Planetengetriebe (1:3) und Keilriemen (Scheibendurchmesser 160 mm zu 240 mm) mit der Aufbereiterwelle verbunden. Die Regelung der PSM erfolgte mit einem Umrichter der Fa. Refu. Die Stromversorgung wurde durch den Zapfwellengenerator an der Frontzapfwelle erledigt. Der 600 V Zwischenkreis war direkt mit dem Umrichter am Heck verbunden, zu erkennen in Abbildung 17.1 am gelben Kabel rechts an der Fahrerkabine. Im Vordergrund jeweils der ZWG an der Front. Im linken Bild sieht man das Mähwerk mit aufgebautem Elektromotor unter einer Edelstahlhaube (linker Bildrand) bei einer Probefahrt. Im rechten Bild ist der Einsatz beim darauffolgenden Feldtest gezeigt. Beim Feldtest wurden zahlreiche Daten gesammelt. Die relevanten Messstellen waren:

- Drehzahl/Drehmoment der Frontzapfwelle – ZWG
- Drehzahl/Drehmoment der Heckzapfwelle – Mähwerk (rein für Abtrocknungsvergleich)
- Strom bzw. Spannung vom Zwischenkreis (Gleichstrom)
- Strom bzw. Spannung zwischen Umrichter und Motor (Dreiphasenwechselstrom)
- Aufbereiterwellendrehzahl (Analoger Ausgang am Umrichter)
- Fahrgeschwindigkeit (Bodenradar)

Drehzahl und Drehmoment an der Frontzapfwelle wurden mit einer Messwelle erfasst. Die Leistungsmessung am Ausgang wurde zwischen Umrichter und Motor im Dreiphasensystem durch dreimalige Spannungsmessung und dreimalige Strommessung realisiert. Eine Drehzahlmessung wurde über ein Ausgangssignal des Umrichters erfasst. Diese Daten wurden von einem Messsystem in der Fahrerkabine des Traktors aufgezeichnet. Zusätzliche Eingänge des Messsystems wurden mit einer Zwischenkreismessung belegt. Der Strom wurde mit einer Strommesszange erfasst, die Spannung per Differenztastrkopf. Abbildung 17.2 zeigt das Innere des Schaltschranks mit dem Umrichter und den Messgeräten.



**Abb. 17.2:** Blick in den Schaltschrank mit Umrichter und Messgeräten

Beim Feldversuch gab es technische Probleme. Drehzahlschwankungen der Aufbereiterwelle waren hörbar und Sicherheitsabschaltungen am Zapfwellengenerator kamen vor. Um die Probleme zu untersuchen, wurde am Prüfstand der Feldversuch nachgestellt.

In den folgenden Kapitel ist nun die Messauswertung des Feldversuches sowie die Auswertung des Prüfstandsversuchs beschrieben.

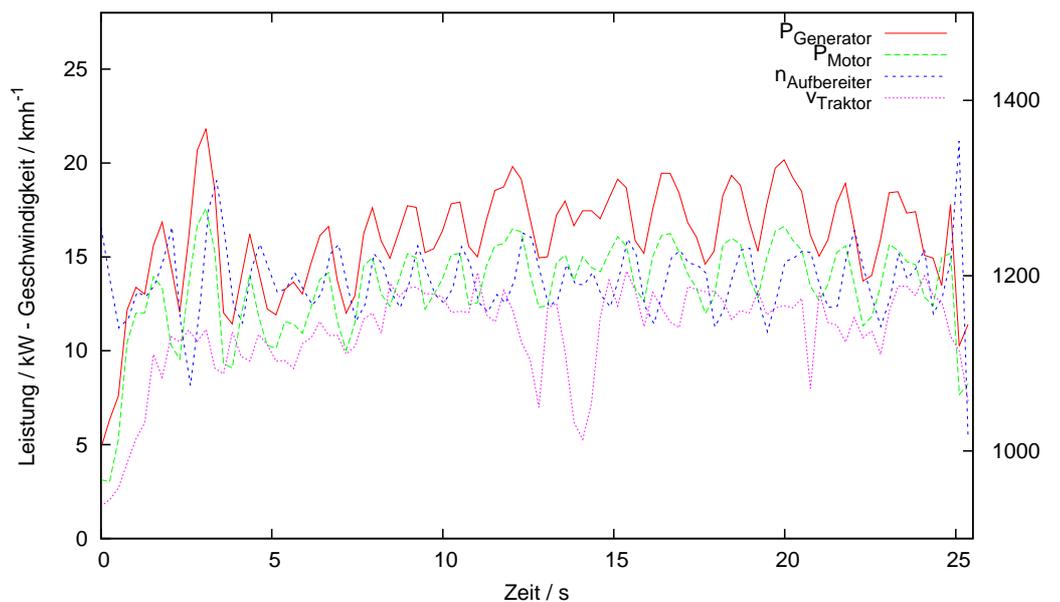
## 17.1 Feldversuch

Beim Feldversuch wurden verschiedene Parametervariationen durchgeführt:

- Zwei Fahrgeschwindigkeiten mit 7 km/h und 12 km/h
- Drei Aufbereiterdrehzahlen mit 750, 1000 und 1250 U/min

Zur Auswertung der elektrisch relevanten Daten wird beispielhaft die Fahrt mit 7 km/h und einer Drehzahl von 1250 U/min betrachtet. Die Leistung von Zapfwelle und Motor wurde wie bereits erwähnt direkt ermittelt. Bei der Messwerterfassung vom Zwischenkreis und der Drehzahl per Umrichterausgang gab es technische Probleme. Somit erfolgte die Drehzahlmessung der Aufbereiterwelle durch eine Messung der Periodendauer des Spannungsverlaufs, siehe Formel 17.1 mit Periodendauer  $T$ , Polpaarzahl  $p$  und Übersetzung  $i$ .

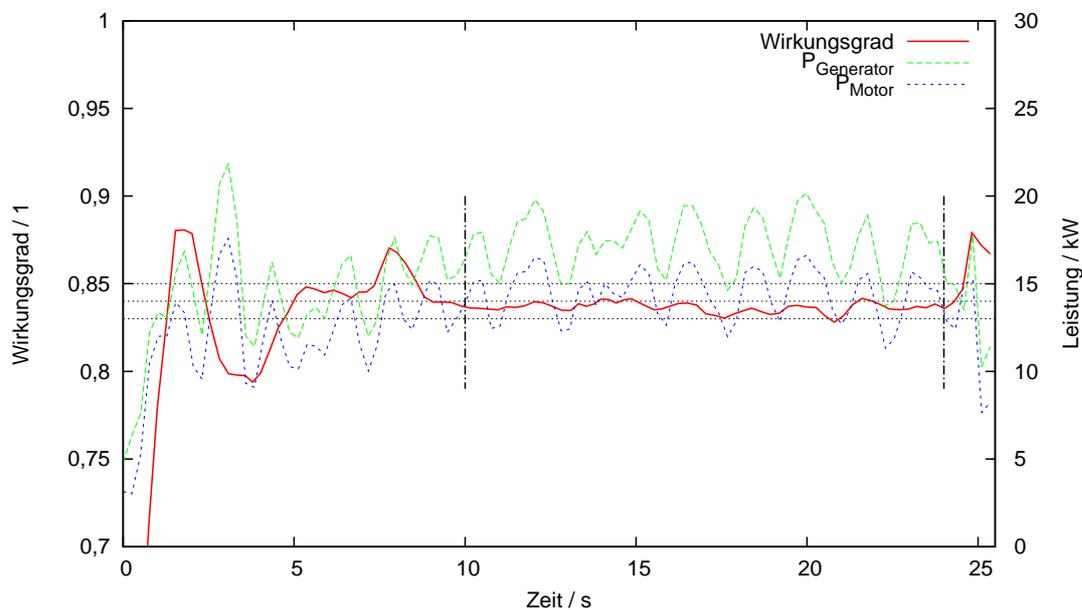
$$n = \frac{1}{T} \cdot p \cdot i_{\text{Planetengetriebe}} \cdot i_{\text{Keilriemen}} \quad (17.1)$$



**Abb. 17.3:** Verlauf von Leistung, Drehzahl und Fahrgeschwindigkeit des Feldversuches

In Abbildung 17.3 sind die ermittelten Werte im Vergleich zueinander aufgetragen. Als Einheiten sind links die Leistung in Watt und die Fahrgeschwindigkeit des Traktors in Meter pro Stunde aufgetragen, auf der rechten Seite die Drehzahl der Aufbereiterwelle in Umdrehungen pro Minute. Die beiden Leistungen und die Drehzahl korrelieren sehr gut. Vor jeder Drehzahländerung ändern sich die Leistungen gleichermaßen. Die Motorleistung steigt, weil der Drehzahlregler eine höhere Drehzahl fordert, die Generatorleistung folgt, wenn nach Absinken der Zwischenkreisspannung diese nachgeregelt wird. In der Folge steigt die Drehzahl.

In den ersten Sekunden, beim Starten der Aufbereiterwelle bzw. des Mähvorganges sind vergleichsweise große Schwingungen zu erkennen. Die Drehzahl der Aufbereiterwelle steigt über die Soll-Drehzahl. Es kommt zu einem Leistungseinbruch, da der Drehzahlregler offensichtlich mit einer negativen q-Strom-Komponente die Welle wieder einbremst. Die Drehzahl sinkt rapide und die Rotationsenergie der Welle lädt den Zwischenkreis. Berechnungen mit der Drehzahländerung und dem Trägheitsmoment der Welle bestätigten diese Energiewandlung. Dieses Betriebsverhalten führte zur Sicherheitsabschaltung des Zapfwellengenerators sowie des Industrieumrichters.



**Abb. 17.4:** Wirkungsgradverlauf

Neben der Leistungsanalyse wurde der Wirkungsgrad des Systems bestimmt. Die Rohwerte der Leistungen wurden durch einen einfachen gleitenden Mittelwert gefiltert und anschließend der Wirkungsgrad berechnet. Abbildung 17.4 zeigt die Eingangsleistung  $P_{\text{Generator}}$  (mechanisch Zapfwelleneingang) und die Ausgangsleistung  $P_{\text{Motor}}$  (elektrisch Motoreingang) und den dazugehörigen Wirkungsgrad. Ausreißer sind bei den starken Leistungsänderungen vor allem am Anfang zu bemerken. Im zweiten Teil der Messung ist der Leistungsverlauf annähernd konstant und der Wirkungsgrad erreicht einen Durchschnitt von rund 84 % (Zapfwelle-Motoreingang). Zum Vergleich, beim ZWG wurden in diesem Betriebsbereich an die 90 % (Zapfwelle-Zwischenkreis) und beim Refu-Schabmüller Versuch rund 88 % (Zwischenkreis-Welle) gemessen.

## 17.2 Nachstellen am Prüfstand

Durch ein Nachstellen am Prüfstand, wurde versucht die Sicherheitsabschaltungen am Feld zu ergründen. Der Schabmüller-Motor wurde an die Gleichstrommaschine gekoppelt und mit dem Refu-Umrichter betrieben. Durch die Kopplung an die Gleichstrommaschine war die Trägheit annähernd die Gleiche wie im Feldversuch. Gespeist durch das Netz war die Zwischenkreisspannung mit 565 V gegeben. Gemessen wurden Zwischenkreisstrom und -spannung sowie Drehmoment und Drehzahl am Wellenabgang.

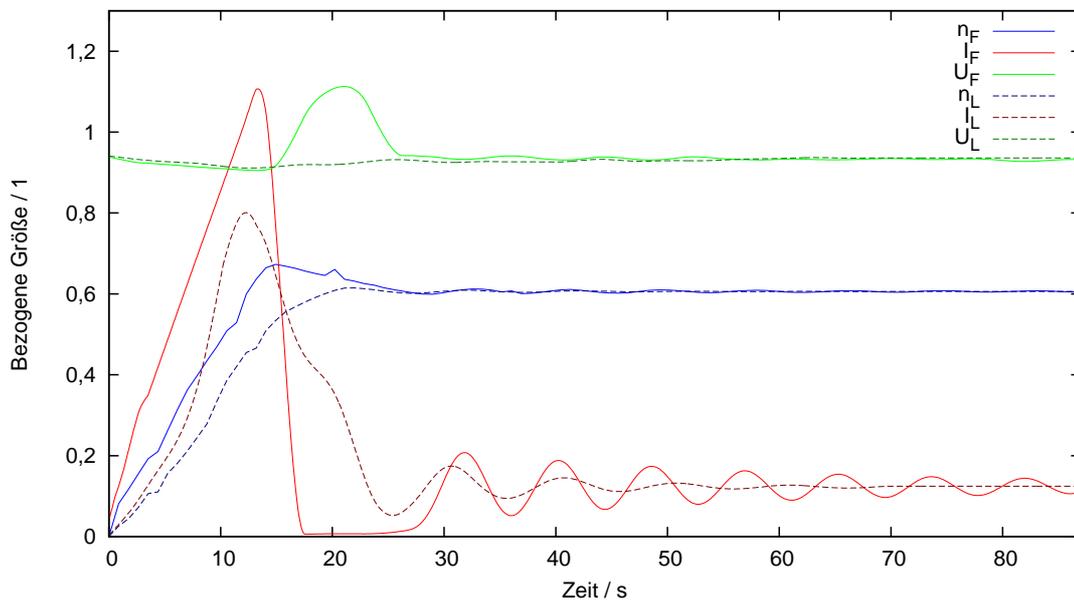


Abb. 17.5: Hochlaufvergleich

Abbildung 17.5 zeigt einen Vergleich zweier Hochläufe aus dem Stillstand auf rund 3000 U/min mit normierten Einheiten. Die Unterschiede zum Betrieb im Feld waren die geringere Drehzahl ( $\omega = 0,6$  statt  $\omega = 1$ ), eine geringere Zwischenkreisspannung ( $U_{DC} = 0,95$  statt  $U_{DC} = 1$ ), und das Deaktivieren negativer q-Ströme, um die Rückspeisemöglichkeit zu vermeiden. Mit dem Zulassen negativer q-Ströme kann die Zwischenkreisspannung über ein erlaubtes Level ansteigen und der Umrichter würde wegen Überspannung abschalten.

Die durchgezogenen Linien zeigen einen Hochlauf mit dem Parametersatz vom Feldversuch mit Zwischenkreisstrom  $I_F$ , Zwischenkreisspannung  $U_F$  und Drehzahl des Motors  $n_F$ . Zu erkennen ist ein Überschwingen der Drehzahl wegen eines zu hohen Proportionalanteils im Drehzahlregler. In Folge stellt dieser einen negativen Soll-q-Strom ein, um die Drehzahl zu vermindern. Negative q-Ströme werden hier nicht zugelassen und der Sollstrom wird per Definition auf null gesetzt. Der Iststrom hat eine Regelabweichung aufgrund einer fehlenden Störgrößenaufschal-

tung. Die induzierte Spannung als Störgröße bewirkt eine negative Regelabweichung. Dies hat bei einem Sollstrom von Null einen realen negativen Iststrom zur Folge, bis der Integralanteil des Stromreglers diese Differenz ausregelt. In dieser Zeit führt der negative q-Strom zur Erhöhung der Zwischenkreisspannung.

Die durchgezogenen Linien zeigen zum Vergleich einen Hochlauf mit optimiertem Parametersatz. Durch Ändern des p-Faktors des Drehzahlreglers gibt es einen sanfteren Drehzahlanstieg ohne Überschwingen. Der Sollstrom bleibt positiv und die Zwischenkreisspannung bleibt somit konstant.

Neben dem Nachstellen des Feldversuches konnte mit diesem Prüfstands Aufbau auch der Wirkungsgrad des getriebelosen Motors in Kombination mit dem Industrieumrichter bestimmt werden. Diese Daten wurden bereits in Kapitel 15.3.2 präsentiert.

### 17.3 Fazit

Der Feldversuch mit einer Industrie-Motor-Umrichter-Kombination und dem Zapfwellengenerator als Stromversorgung wurde erfolgreich durchgeführt. Die Ursachen der aufgetretenen Fehler wurden erkannt. Bedenken, dass der Zapfwellengenerator den Einsatz durch mechanische Belastungen nicht übersteht, konnten verworfen werden. Trotz enormer Schläge, vor allem bei hohen Geschwindigkeiten am Feld, und ohne Verguss der elektrischen Bauteile, wurde der Feldeinsatz überstanden. Die Luftkühlung führte zu leichter Verschmutzung im Gerät. Diese kann mit Luftfiltern gestoppt werden. Die Temperaturentwicklung war unkritisch, sollte jedoch bei weiteren Versuchen näher untersucht werden.

Probleme gab es durch ein plötzliches Abschalten der Generatorelektronik, die nur mit einer Fehlerrücksetzung behoben werden konnte, und deren Ursache vor Ort nicht geklärt werden konnte. Beobachtungen zeigten, dass der Fehler vor allem bei Laständerungen und auch beim Starten der Welle, hörbar durch ein Drehzahlüberschwingen, auftrat. Es wurde vermutet, dass eine Spannungserhöhung aufgrund von Rückspeiseeffekten auftrat, die zur Abschaltung führte.

Diese Vermutungen wurden nachfolgend am Prüfstand bestätigt. Mit dem Nachstellen des Feldversuches im Labor konnte gezeigt werden, dass der Industrieumrichter nicht optimal kalibriert war. Falsche Reglereinstellungen führten zur Rückspeisung und Erhöhung der Zwischenkreisspannung. Der Spannungsregler des Eingangsumrichters war nicht immer in der Lage, diese Erhöhung auszugleichen und es kam zu Sicherheitsabschaltungen. Diese Erkenntnis führte zum Einbau eines Bremschoppers, da im Feldbetrieb unter Umständen ein Rückspeisen nicht ausgeschlossen werden kann.

## 18 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich Elektromotoren in der Landtechnik sehr gut als Antriebe eignen. Die Vorteile liegen vor allem in den Regelungsmöglichkeiten. Zusammen mit den bisher schon eingesetzten elektrischen Stellantrieben ist ein sehr hoher Automatisierungsgrad möglich. Hinzukommend sind elektrische Antriebe effizienter als hydraulische Antriebe, wie ein Vergleich zeigte. Demgegenüber stehen vergleichsweise ein höheres Gewicht und ein höherer Preis.

Der Einsatz der Elektrotechnik wird die bisherigen Antriebsysteme nicht verdrängen. Die Kraft eines Hydraulikzylinders ist schwer zu ersetzen, die hohe Energiedichte des Flüssigtreibstoffs ebenso. Verbrennungskraftmaschinen werden in näherer Zukunft weiter als primäre Energiebereitstellung verwendet werden. Die nächste Traktorgeneration wird mit einer Kombination aus allen drei Antriebsarten ausgestattet sein und somit die jeweiligen Vorteile nutzen.

In der Übergangszeit werden Zapfwellengeneratoren als Bindeglied dienen. Mit ihnen kann nachträglich an einem herkömmlichen Traktor elektrischer Strom erzeugt werden. Wie erstmals gezeigt wurde, können damit nicht nur Motoren an diversen Anbaugeräten versorgt werden. Mit 3x400 V und 1x230 V als Ausgang dient der Traktor auch als mobile Stromversorgung für netzbetriebene Geräte. Die von der Zapfwellendrehzahl unabhängige Gleichspannung des Zwischenkreises kann ebenso verwendet werden und bietet Möglichkeiten für zukünftige Anwendungen.

Die Schnittstelle zwischen Traktor mit dem Generator und dem Anbaugerät wird zurzeit in diversen Normungsgremien diskutiert. Dass nicht nur Standards, Richtlinien und die technische Realisierbarkeit für Rahmenbedingungen sorgen, zeigte eine Umfrage unter den Landtechnikherstellern, die erstmals in Österreich zu dieser Thematik durchgeführt wurde. Die Kundenakzeptanz und die Umsetzbarkeit in der Produktion sind nicht zu vernachlässigende Aspekte. Dass es bereits einen Einsatz elektrischer Antriebe in der Landtechnik gegeben hat, wurde mit geschichtlichen Beispielen dargelegt. Jedoch haben aktuelle Beispiele gezeigt, dass mit dem derzeitigen technischen Stand der elektrischen Antriebe und der Umrichtersteuerung, diese wieder am Markt präsent sind.

Ergebnisse des völlig neu konstruierten Zapfwellengenerators wurden präsentiert. Dieser eignet sich hervorragend als Stromversorgung, einerseits für den Betrieb von Motoren wie PSM und ASM, und andererseits als Versorgung für externe Geräte am einphasigen oder dreiphasigen Stromnetz. Konzepte zur Eigensicherheit mittels Bremschopper und Personensicherheit mittels Isolationswächter wurden gezeigt, Probleme im Gesamtverbund mit Reglereinstellungen und Lastabwürfen

ebenso.

Neben dem Zapfwellengenerator wurden auch zum ersten mal diverse Motoren auf die Einsatztauglichkeit in der Landwirtschaft überprüft. Die neuartige Entwicklung eines Rohrmotors für eine Aufbereiterwelle zeigt die Möglichkeiten, elektrische Antriebe in der Landtechnik platzsparend einzusetzen. Aber auch herkömmliche industrielle Serienmotoren sind sehr gut für diverse Geräte geeignet, wie die Premiere an einigen Beispielen zeigte. In Prüfstandsversuchen wurden die Motoren hinsichtlich angeforderter Lastdynamik, Wirkungsgrad, maximaler Leistung und dergleichen vermessen und somit zum ersten Mal die Einsatztauglichkeit elektrischer Antriebe für landwirtschaftliche Anwendungen überprüft.

Ein durchgeführter, bis dato einzigartiger, Feldversuch mit dem Zapfwellengenerator und der Aufbereiterwelle zeigte eine praktische Anwendung des Systems. Die Erkenntnisse und aufgetretenen Herausforderungen, wie z.B. die Temperaturentwicklung, zeigen Verbesserungspotential für weiterführende Entwicklungen.

Nicht zuletzt wurde auch die Möglichkeit untersucht, die permanentmagneterregten Synchronmaschinen lagegeberlos zu betreiben. Dieses System bietet einige Vorteile, die vor allem in der Landtechnik genutzt werden können. Es wurden bereits alle Messversuche mit diesem System, dass im landwirtschaftlichen Bereich weit über den Stand der Technik hinausgeht, durchgeführt. Zusätzlich wurde eigens ein Vergleich zwischen dem sensorlosen INFORM/EMK-Betrieb und dem konventionellen Betrieb mit Lagegeber erstellt. Es konnte erstmalig gezeigt werden, dass diese Art der Regelung in der Landtechnik sehr viel Potential hat.

Die Arbeit wurde im Zuge des Projekts Future Farm Technology durchgeführt. Ein Teil dieses Projekts war die Betrachtung der elektrischen Antriebe in der Zukunft der Landwirtschaft gewidmet. In zukünftigen Projekten kann hier noch sehr viel Know-How entwickelt werden. Den optimalen elektrischen Antrieb für jede Aufgabe zu finden, das Zusammenspiel der Antriebe in der Isobus-Kommunikation zu untersuchen und die Kühlungsproblematik zu lösen, sind einige Beispiele. Es ist nur eine Frage der Zeit, bis sich elektrische Antriebe in der Landtechnik etabliert haben.

# Anhang

## A Normen

Im folgenden eine Liste der Normen, die für die elektrisch betriebene Landwirtschaft interessant sind, eingeteilt nach:

- Allgemeine Information
- Fahrzeuge und Antrieb
- Messungen und Tests
- Elektrik
- Sicherheit und Schutz
- Batterie
- Kabel und Stecker
- Kommunikation
- Landwirtschaft

Ein kurzer Querverweis mit dieser Einteilung ist in Kapitel 5 zu finden.

Sollte man sich für eine Norm speziell interessieren, ist darauf hinzuweisen, dass es möglicherweise eine Aktualisierung dieser gibt. Vielleicht auch nur zum einem Teil (Part), oder ein solcher ist neu hinzugekommen. Der Vollständigkeit halber wurde der Punkt Batterie, welcher die Leistungsversorgung elektrischer Antriebe beinhaltet, hinzugenommen.

### A.1 Allgemeine Information

**ONR 225007:** Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Übersicht und Normen

**ÖN EN 13447:** Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Terminologie

**ISO 8713:** Electric road vehicles - Vocabulary

### A.2 Fahrzeug und Antriebe

**UNECE R100:** Battery electric vehicles with regard to specific requirements for construction and functional safety

**2005/32/EG:** Richtlinie für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte (Energy-using Products - EuP Directive)

Schreibt z.B. die Wirkungsgradmaxima der Motoren nach EN 60034 vor, Abgelöst durch 2005/32/EG

**2009/125/EG:** Richtlinie für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Energy-related Products - ErP Directive)

Nachfolger der 2005/32/EG

**IEC/TR 60785:** Rotating machines for electric road vehicles (Anm.: Jahrgang 1984)

Applies to rotating electrical machines (traction motors and auxiliary motors) of electric road vehicles including hybrids, which are fed from the main traction battery

**IEC 60034:** Rotating electrical machines

Umfassende Norm in der versucht wurde weltweit eine Einheit zu erreichen, aktuell, viele Teile, wie zum Beispiel:

- Part 5: Degrees of protection provided by integral design of rotating electrical machines (IP code)

- Part 9: Noise Limits

- Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code) low voltage AC motors

In EU seit Juni 2011 Klasse IE2 vorgeschrieben, ab 2015 IE3

**IEC 60349:** Electric traction - Rotating electrical machines for rail and road vehicles

Elektrische Zugförderung - Drehende elektrische Maschinen für Bahn- und Straßenfahrzeuge

Spezialisierung der IEC 60034 auf Fahrzeugen

- Teil 1: Elektrische Maschinen, ausgenommen umrichter gespeiste Wechselstrommotoren

- Teil 2: Umrichter gespeiste Wechselstrommotoren

**IEC/TR 60786:** Controllers for electric road vehicles

Applies to the equipment on the electric vehicle which controls the rate of energy transfer between the traction battery or batteries and the motor or motors. Outlines the minimum recommended requirements for the construction and performance of electric vehicle traction controllers. Has the status of a technical report.

### A.3 Messungen und Tests

**DIN ISO 14982:** Land- und forstwirtschaftliche Maschinen - Elektromagnetische Verträglichkeit - Prüfverfahren und Bewertungskriterien

**ISO 11451:** Vehicle test methods for electrical disturbance from narrow band radiated energy

Specifies methods for testing the immunity of passenger cars and commercial vehicles to electromagnetic disturbances from on-board transmitters and off-vehicle radiation sources, regardless of the vehicle propulsion system (e.g. spark ignition engine, diesel engine, electric motor). Specifies general conditions, defines terms, gives practical guidelines and establishes the basic principles of the vehicle tests and gives the methods for such testing, like the bulk current injection.

- Part 1: General principles and terminology
- Part 2: Off-vehicle radiation source
- Part 3: On Boardtransmitter simulation
- Part 4: Bulk current injektion (BCI)

**ISO 11452:** Road Vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy  
Analog zu ISO 11451

**ISO 16750:** Road vehicles - Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment

**SAE J1113:** Electromagnetic Compatibility Diverse Unterteile zu jeweiligen Themen (Prozeduren, Limits, Immunity characteristics). Verweist mitunter auf ISO 11451 und ISO 11452

**ÖN EN 1821:** Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Messverfahren für Fahreigenschaften

- Teil 1: Reine Elektrofahrzeuge
- Teil 2: Hybride Elektrofahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor

**ISO 8715:** Electric road vehicles - Road operating characteristics

**ÖN EN 1986:** Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Messverfahren für Energieausnutzung

- Teil 1: Reine Elektrofahrzeuge
- Teil 2: Thermische hybride Elektrofahrzeuge

**ISO 8714:** Electric road vehicles - Reference energy consumption and range - Test procedures for passenger cars and light commercial vehicles

**ÖN EN 12736:** Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Luftschallemission von Fahrzeugen während der Ladung mit bordeigenem Ladegerät - Bestimmung des Schall-Leistungspegels

**ISO 10605:** Test methods for electrical disturbances from electrostatic discharge  
Specifies the electrostatic discharge (ESD) test methods necessary to evaluate electronic modules intended for vehicle use. It applies to discharges in the

following cases: ESD in assembly; ESD caused by service staff; ESD caused by occupants

**EN 13444:** Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Messung der Emissionen von Hybridfahrzeugen  
- Teil 1: Thermische hybride Elektrofahrzeuge

**ISO/DIS 12405:** Electrically propelled road vehicles - Test specification for lithium-ion traction battery systems  
- Part 1 (PRF/50.2): High-power applications  
- Part 2 (DIS): High energy applications  
- Part 3 (NP/10.99): Safety performance requirements

**ISO 23274:** Hybrid-electric road vehicles - Exhaust emissions and fuel consumption measurements  
- Part 1 (CD): Non-externally chargeable vehicles  
- Part 2 (DIS): Externally chargeable vehicles

**ISO/TR 11955:** Hybrid-electric road vehicles - Guidelines for charge balance measurement

**EN 61557:** Elektrische Sicherheit in Niederspannungsnetzen bis AC 1000 V und DC 1500 V – Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen

## A.4 Elektrik

**RL 2005/83/EG:** EMV-Richtlinie in KFZ  
Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Funkentstörung (elektromagnetische Verträglichkeit) von Kraftfahrzeugen zwecks ihrer Anpassung an den technischen Fortschritt

**RL 2004/108/EG:** EMV-Richtlinie  
Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit

**IEC 60664:** Insulation coordination for equipment within low-voltage systems  
Grundsätze, Anforderungen und Prüfungen sowie Berücksichtigung von Schnittstellen für die Isolationskoordination bei elektrischen Niederspannungsanlagen. Weiters Anwendung von Beschichtungen, Eingießen oder Vergießen zum Schutz gegen Verschmutzung

**ISO 10924:** Road Vehicles - Circuit Breakers  
- Part 1: Definition and general test requirements  
- Part 4: Medium circuit breakers with tabs (Blade Type) Form CB15

- EN 61000:** Electromagnetic compatibility (EMC)  
Sehr umfassende Norm mit mehreren Teilen und Unterteilen über diverse Gebiete der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV)
- EN 55022:** Information Technology Equipment - Radio Disturbance Characteristics - Limits and Methods of Measurement  
Gilt für die Begrenzung der hochfrequenten Störaussendung (Funk-Entstörung) von Einrichtungen der Informationstechnik (ITE) und legt hierfür die entsprechenden Grenzwerte der Störspannung, beziehungsweise des Störstromes, sowie der Störfeldstärke und die zugehörigen Messverfahren sowie das statistische Auswertungsverfahren bei Geräten aus der Serienfertigung fest
- EN 50065:** Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz  
Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen für Wohn-, Geschäfts-, Gewerbe- und Industriezwecke. Filterung der Signale sowie Sicherheitsanforderungen.
- ISO 7637:** Road Vehicles - Electrical Disturbances from conduction and coupling  
Beschreibt eingekoppelte Störungen auf Daten- und Versorgungsleitungen.
- EN 60947:** Low-voltage switchgear and controlgear  
Umfassende Normenreihe zur Festlegung allgemeinen Regeln und Anforderungen von Niederspannungsschaltgeräte (Anm.: siehe auch Abschnitt Sicherheit)
- EN 55011:** Industrial, Scientific and Medical (ISM) radio-Frequency Equipment  
Gilt für die Funk-Entstörung von von industriellen, wissenschaftlichen, medizinischen und häuslichen (Hochfrequenz-)Geräten
- EN 55016:** Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods  
Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit
- EN 55012:** Vehicles, boats and internal combustion engine driven devices - Radio disturbance characteristics  
Grenzwerte und Messverfahren zum Schutz von Empfängern mit Ausnahme derer, die in den Fahrzeugen, Booten, Geräten selbst oder in benachbarten Fahrzeugen, Booten, Geräten installiert sind
- IEC 61204:** Low-Voltage Power Supplies, D.C. Output  
- Part 3: EMC

Elektromagnetische Verträglichkeit für Stromversorgungsgeräte für Niederspannung mit Gleichstromausgang

**IEC 62040:** Uninterruptable power systems (UPS)

Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme (USV), Anforderungen an EMV sowie Sicherheitsanforderungen  
- Part 2: EMC

**IEC 60870:** Telecontrol equipment and systems

Allgemeiner, offener Kommunikationsstandard für die industrielle Automation, die in den Bereichen der Infrastrukturautomation  
- Part 2 Section 1: Power supply and EMC

**SAE J551:** Electromagnetic Coupling

Diverse Unterteile zu jeweiligen Gruppen (Frequenz, Art des Fahrzeugs, ...),  
Verweist mitunter auf ISO 11451 und ISO 11452

**EN 50160:** Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen

Legt u.a. die zulässigen Abweichungen hinsichtlich der Signalqualität in Stromnetzen fest, z.B.  $\pm 10\%$  der Nennspannung, 49,5 Hz - 50,5 Hz Frequenzintervall, mit zulässiger Abweichung bis zu 47 Hz - 52 Hz für maximal 44 Stunden pro Jahr

## A.5 Sicherheit und Schutz

**RL 2006/95/EG:** Niederspannungsrichtlinie

Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend elektrische Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen

**EN 50110:** Betrieb von elektrischen Anlagen

- Teil 1: Europäische Norm

**EN 60331:** Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke

Umfasst laut Teil 1 auch Geräte in der Landwirtschaft, die zu einer Gefahrenquelle für die Allgemeinheit werden können

**ÖN 8385:** Betrieb von elektrischen Anlagen – Besondere Festlegungen für landwirtschaftliche und gartenbauliche Betriebsstätten

**DIN EN 60529:** Schutzarten durch Gehäuse

Gibt die Eignung von elektrischen Betriebsmitteln für verschiedene Umgebungsbedingungen und den Schutz von Menschen gegen potentielle Gefährdung bei deren Benutzung an

**DIN 40050:** Schutzarten

- Teil 9: Straßenfahrzeuge; IP-Schutzarten; Schutz gegen Fremdkörper, Wasser und Berühren; Elektrische Ausrüstung
- Fast analog der EN 60529, besonderes Augenmerk auf Straßenfahrzeuge

**ISO 20653:** Road vehicles - Degrees of protection (IP-Code) - Protection of electrical equipment against foreign objects, water and access  
Analog EN 60529 beziehungsweise DIN 40050

**OVE EN 50102:** Schutzarten durch Gehäuse für elektrische Betriebsmittel (Ausrüstung) gegen äußere mechanische Beanspruchungen (IK-Code) (Anm.: Abgelöst durch IEC 62262)

**IEC 62262:** Degrees of protection provided by enclosures for electrical equipment against external mechanical impacts (IK code) (Anm.: Nachfolger von EN 50102)  
Der IK-Stoßfestigkeitsgrad ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit eines Gehäuses für elektrische Betriebsmittel gegen Stoßbeanspruchung

**DIN EN 61140:** Schutz gegen elektrischen Schlag - Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel

**ISO 6469:** Electric Road Vehicles - Safety specifications

- Part 1: On-board electrical energy storage
- Part 2: Vehicle operational safety means and protection against failures
- Part 3: Protection of persons against electric hazards

**ÖN EN 1987:** Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Besondere Festlegungen für die Sicherheit

- Teil 1: Bordeigene Energiespeicher
- Teil 2: Funktionelle Sicherheitsvorkehrungen und Schutz gegen Fehler
- Teil 3: Schutz der Benutzer gegen elektrische Gefahren

**J2344:** Guidelines for Electric Vehicle Safety

This SAE Information Report identifies and defines the preferred technical guidelines relating to safety for Electric Vehicles (EVs) during normal operation and charging. Guidelines in this document do not necessarily address maintenance, repair, or assembly safety issues.

**EN 1175:** Safety of industrial trucks - Electrical requirements

Beschreibt die elektrischen und damit zusammenhängenden mechanischen Sicherheitsanforderungen für die Auslegung und Herstellung der elektrischen Ausrüstung von Flurförderzeugen

- Part 1: General requirements for batterie powered trucks
- Part 2: General requirements for internal combustion engine powered trucks

- Part 3: Specific requirements for the electric power transmission systems of internal combustion engine powered trucks

**EN 50126:** Bahnanwendung - Spezifikationen und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit (RAMS)

RAMS ist ein Prozess oder eine Methodik, die mithelfen soll, Fehler schon in der Planungsphase von Projekten zu verhindern. RAMS kann angewendet werden bei der Entwicklung und Einführung von neuen Produkten, aber auch bei der Planung und Realisierung von neuen Anlagen. Ein RAMS Management stellt sicher, dass Systeme definiert, Risikoanalysen durchgeführt, Gefährdungsraten ermittelt, detaillierte Prüfungen gemacht und Sicherheitsnachweise erstellt werden. Siehe auch IEC 62278.

**ÖN 8001:** Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V

- Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen)  
- Teil 4-56: Elektrische Anlagen in landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Betriebsstätten

**EN 60335:** Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke

**ÖN EN 50272:** Sicherheitsanforderungen an Batterien und Batterieanlagen

- Teil 1: Allgemeine Sicherheitsinformation  
- Teil 3: Antriebsbatterien für Elektrofahrzeuge

**IEC/ANW 60364:** Low voltage electrical installations

National codes and site guides are meant to attain the common objectives of IEC 60364, and provide rules in a form that allows for guidance of persons installing and inspecting electrical systems.

- Part 7-722: Requirements for special installations or locations - Supply of electric vehicle

**ISO 23273:** Fuel cell road vehicles - Safety specifications

- Part 3: Protection of persons against electric shock

**EN 62485:** Safety requirements for secondary batteries and battery installations

- Part 3: Traction batteries

## **Grundnormen für die Sicherheit von Mensch und Maschine**

**RL 2006/42/EG:** Maschinenrichtlinie

Regelt ein einheitliches Schutzniveau zur Unfallverhütung für Maschinen

**EN 14121:** Sicherheit von Maschinen - Risikobeurteilung

Nachfolger von EN 1050 - Sicherheit von Maschinen - Leitsätze zur Risikobeurteilung

**EN ISO 12100:** Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung  
Legt die grundsätzliche Terminologie und Methodologie sowie allgemeine Leitsätze zur Risikobeurteilung und Risikominderung fest. Umfasst Teile der EN 14121.

### **Normen für die funktionale Sicherheit**

**EN ISO 13849:** Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen

**EN IEC 62061:** Sicherheit von Maschinen - Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer und programmierbar elektronischer Steuerungssysteme

**EN IEC 61508:** Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer und programmierbarer elektronischer Systeme

**EN IEC 61511:** Funktionale Sicherheit - Sicherheitstechnische Systeme für die Prozessindustrie

**EN 954:** Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen  
Wird in Zukunft durch EN 13849 ersetzt

### **Grundnormen für die Elektrische Sicherheit**

**EN 60204:** Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstungen von Maschinen  
Enthält Anforderungen und Empfehlungen für die elektrische Ausrüstung von Maschinen, zur Vermeidung von gefahrbringenden Situationen und deren Risiken, berücksichtigen von Sicherheitsmaßnahmen während der Konstruktion, Wartungs- und Reparaturmaßnahmen sollen erleichtert werden, die Maschine zuverlässiger werden und leichter zu bedienen sein

**EN 60947:** Niederspannungsschaltgeräte  
- Teil 1-1: Allgemeine Festlegungen  
Allgemeine Vorschriften für Steuergeräte und Schaltelemente von Niederspannungsanlagen  
- Teil 5-5: Steuergeräte und Schaltelemente - Elektrisches NOT-AUS-Gerät mit mechanischer Verrastfunktion  
Elektrische und mechanische Spezifikationen von NOT-AUS-Geräten  
- Teil 5-3: Anforderungen an Sicherheitsnäherungsschalter

**NFPA 79:** Electrical Standard for Industrial Machinery  
Für den US-Amerikanischen Raum, entspricht der EN 60204, Schutz vor direkten und indirekten Kontakten, Überstromschutz, Erdungskonzepte

## Schutzeinrichtungen

**EN 953:** Sicherheit von Maschinen - Trennende Schutzeinrichtungen - Allgemeine Anforderungen an Gestaltung und Bau von feststehenden und beweglichen trennenden Schutzeinrichtungen

**EN 1088:** Verriegelungseinrichtungen in Verbindung mit trennenden Schutzeinrichtungen

**EN 1037:** Verhinderung von unerwartetem Anlauf

**ISO 26262:** Road vehicles – Functional safety  
Die Norm ist eine Ableitung der IEC 61508 an die spezifischen Gegebenheiten im Automobilbereich

## A.6 Batterien

**ÖN EN 61982:** Sekundärbatterien für den Antrieb von elektrischen Straßenfahrzeugen

- Teil 1: Messgrößen
- Teil 2: Dynamische Kapazitäts- und dynamische Lebensdauerprüfung
- Teil 3: Anforderungen und Prüfung der Lebensdauer (verkehrstaugliche Stadtfahrzeuge)
- Teil 4 (CD): Prüfung des Leistungsverhaltens von Lithium-Ionen-Zellen
- Teil 5 (CD): Zuverlässigkeits- und Missbrauchsprüfung von Lithium-Ionen-Zellen - Teil 4,5: wurde übernommen, siehe Nachfolger EN 62660 Part 1,2

**EN 62660:** Secondary batteries for the propulsion of electric road vehicles

- Part 1: Performance testing for lithium-ion cells
- Part 2: Reliability and abuse testing for lithium-ion cells

**ÖN EN 61851:** Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge

- Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- Teil 21: Anforderung eines Elektrofahrzeuges für konduktive Verbindung an AC/DC-Versorgung
- Teil 22: Wechselstrom-Ladestation für Elektrofahrzeuge
- Part 23 (ANW): D.C. electric vehicle charging station

**DIN EN 62620 CD:** Akkumulatoren und Batterien mit alkalischen oder anderen nichtsäurehaltigen Elektrolyten

Große Lithium-Akkumulatoren und -batterien für industrielle Anwendungen

**IEC 62281:** Safety of primary and secondary lithium cells and batteries during transport

## A.7 Kabel und Stecker

**ISO 6722:** Road Vehicles - 60 V and 600 V single-core cables, Dimensions, test methods and requirements

**ISO 14572:** Road vehicles - Round, screened and unscreened 60 V and 600 V multi-core sheathed cables - Test methods and requirements for basic and high-performance cables

**ISO 4141:** Road Vehicles - Multi Core connecting cables

- Part 1: Test methods and requirements for basic performance sheathed cables

- Part 2: Test methods and requirements for high performance sheathed cables

- Part 3: Construction, dimensions and marking of unscreened sheathed low-voltage cables

- Part 4: Test methods and requirements for coiled cable assemblies

**IEC/TR 60783:** Wiring and connectors for electric road vehicles

Applies to cabling and connectors used in battery electric road vehicles. These recommendations are not applicable to the low tension wiring (e.g. 12 V) for the auxiliary and signalling accessories, such as horn, lighting, signalling lamps, wipers, etc., nor do they apply to connections between cells of the traction battery. Provides general rules for all external wiring and connectors which are used for interconnecting the traction components and sub-systems. The rules are applicable to the heavy current, the light current and the signal harnesses

**IEC/TR 60784:** Instrumentation for electric road vehicles

Applies to the instrumentation of electric road vehicles, excluding those items which are used as instrumentation in vehicles with internal combustion engines. Defines the type of instruments and signalling devices that could be fitted, defines how they should be fitted and how they should be treated

**ISO/TS 16553:** Road Vehicles - Data Cables - Test Methodes and requirements

Specifies test methods, requirements for screened and unscreened, and sheathed and unsheathed twisted pair data cables, and coaxial cables intended for use in road vehicle applications.

**AEF:** Hochvolt-Kupplungssystem für hohe Leistungen - siehe Kapitel 7

**ÖN EN 62196:** Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker - Ladung von Elektrofahrzeugen

- Teil 1: Leitungsgebundenes Laden von Elektrofahrzeugen bis 250 A Wechselstrom und 400 A Gleichstrom

- Teil 2: Anforderungen an und Hauptmaße für die Austauschbarkeit von

Stift und Buchsensteckvorrichtungen AC Stecker

- Teil 3: Anforderungen an und Hauptmaße für die Austauschbarkeit von Stift und Buchsensteckvorrichtungen DC Stecker

**ÖN EN 60309:** Stecker, Steckdosen und Kupplungen für industrielle Anwendungen

- Teil 1: Allgemeine Anforderungen (Anm.: Farbcodes der Stecker)
- Teil 2: Anforderungen und Hauptmaße für die Austauschbarkeit von Stift- und Buchsensteckvorrichtungen
- Teil 4: Abschaltbare Steckdosen und Kupplungen mit oder ohne Verriegelung

**OVE EN 60464:** Elektroisolierlacke

- Teil 1: Begriffe und allgemeine Anforderungen
- Teil 2: Prüfverfahren
- Teil 3: Bestimmungen für einzelne Materialien

**DIN IEC 60085:** Elektrische Isolierung - Thermische Bewertung und Bezeichnung

## A.8 Kommunikation

**ISO 11783:** Isobus - An electronic communications protocol for agricultural equipment

**ISO 15118:** Road vehicles - communication protocol between electric vehicle and grid

- Part 1 (CD/30.20): Definitions and use-case
- Part 2 (CD/30.20): Sequence diagrams and communication layers

**ÖN EN 61851:** Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge (Anm.: siehe auch refkap:batterien)

- Part 24 (ANW): Communication protocol between off-board charger and electric vehicle

## A.9 Landwirtschaft

**RL 2003/37/EG :** Traktorrichtlinie

Richtlinie über die Typgenehmigung für land- oder forstwirtschaftliche Zugmaschinen, ihre Anhänger und die von ihnen gezogenen auswechselbaren Maschinen sowie für Systeme, Bauteile und selbstständige technische Einheiten dieser Fahrzeuge

**ÖN M 9801:** Flurförderfahrzeuge und Anbaugeräte - Prüf und Betriebsvorschriften, Merkblatt

**ÖN EN 15811:** Landmaschinen - Schutzeinrichtungen für bewegte Teile der Kraftübertragung - Mit Werkzeug zu öffnende Schutzeinrichtungen

Beschreibt Sicherheitsanforderungen und Maßnahmen für die Gestaltung und Konstruktion von Schutzeinrichtungen, die nur mit Hilfe eines Werkzeuges geöffnet werden können. Die Einrichtungen dienen zum Schutz von bewegten Teilen der Kraftübertragung bei selbstfahrenden, angebauten, aufgesattelten und gezogenen Maschinen, die in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Zusätzlich legt sie fest, welche Informationen zum sicheren Betrieb (einschließlich Restgefahren) vom Hersteller zur Verfügung zu stellen sind.

**ÖN EN ISO 4254:** Landmaschinen - Sicherheit

Je nach Teil handelt es sich um selbstfahrende Landmaschinen oder diverse Anbaugeräte, Bsp:

- Teil 1: Generelle Anforderungen
- Teil 11: Sammelpressen
- Teil 12: Kreiselmäherwerke und Schlegelmäher

## B Umfrageformular

**FRANCISCO JOSEPHINUM WIESELBURG**  
JOSEPHINUM RESEARCH

  
lebensministerium.at

### 3 Umfrage

#### 3.1 Allgemeiner Teil

In diesem Kapitel soll die grundsätzliche Einstellung zur Anwendung und Einführung von elektrischen Antrieben ermittelt werden. Dies betrifft insbesondere die subjektive Meinung zu:

- E-Antrieben
- Entwicklung/Trend
- Erwartungshaltung
- Akzeptanz/Vorbehalte
- Potenzial
- Voraussetzungen
- Visionen/Strategie.

#### 3.1.1 Angaben zur Person

Ihre Position/Funktion im Unternehmen:

.....

.....

Ihre Ausbildung:

.....

.....

#### 3.1.2 Erwartungshaltung, Trend und Motivation

Haben Sie sich schon mit elektrischen Antrieben beschäftigt?

.....ja, in der Produktentwicklung

Josephinum Research  
umfrage a1-wp2\_d.docx / Druck: 17.02.2013

Seite 6

Umfrageformular - Seite 6 (Seite 1-5: Einleitung, allgemeine Information)



- .....*ja, über generelle Einsatzmöglichkeiten nachgedacht*
- .....*ja, in der Fachliteratur darüber gelesen*
- .....*nein*

Wie sehen Sie als Hersteller grundsätzlich den Einsatz von Elektrotechnik (Sensoren, Steuerungen etc.) in Landmaschinen?

- .....*daran führt kein Weg vorbei*
- .....*wird zunehmend wichtiger*
- .....*in Teilgebieten relevant*
- .....*problematisch*

Welche Rolle werden künftig E-Antriebe in der Landtechnik spielen?

- .....*werden hydraulische oder mechanische Antriebe weitgehend verdrängen*
- .....*werden sich nur bei manchen Maschinen (Antrieben) durchsetzen*
- .....*werden sich kaum durchsetzen*
- .....*werden wieder vom Markt verschwinden*

Wie hoch ist Ihr Interesse E-Antriebe einzuführen?

- .....*sehr hoch*
- .....*interessiert*
- .....*noch abwartend*
- .....*kaum oder nicht interessiert*

Was spricht aus Hersteller-Sicht dafür/dagegen?

.....

.....

.....

.....

Wie würden sich E-Antriebe auf die Bedienung auswirken?

- .....*automatisierte Zusatzfunktionen und gleichzeitig einfachere Bedienung*
- .....*erweiterter Funktionsumfang bei ähnlicher Bedienlogik wie bisher*





- .....erweiterter Funktionsumfang bei mehr Bedienkomplexität
- .....wesentlich kompliziertere Bedienung

Wie würden sich E-Antriebe auf die Produkt-Funktionalität auswirken?

- .....wesentlich höhere Futter- oder Bodenschonung  
bzw. Qualitäts-, Ertragssteigerung oder Produktivitätssteigerung
- .....keine Auswirkung auf die Produkt-Funktionalität
- .....Qualitätseinbußen bzw. Minderertrag

Haben Sie eine Strategie zur Einführung von E-Antrieben bzw. haben Sie Vorstudien durchgeführt?

- .....Umsetzung in einem Serienprodukt in den nächsten 5 Jahren geplant
- .....Prototypen gebaut oder in Planung
- .....theoretisch mit dem Thema befasst / Vorstudien durchgeführt
- .....keine Aktivitäten auf dem Gebiet

Wohin geht der Trend? Welche Entwicklungen und welche neuen Funktionen erwarten Sie in den nächsten 10 Jahren?

.....

.....

.....

### 3.1.3 Kundenakzeptanz

Werden E-Antriebe (>12 V) von den Kunden bereits jetzt akzeptiert?

- .....werden voll akzeptiert
- .....werden nur teilweise akzeptiert
- .....werden sich kaum durchsetzen
- .....werden wieder vom Markt verschwinden

Welche Vorbehalte gibt es von den Kunden?

.....





.....  
.....  
Was erwartet der Kunde (bedarfsorientierte Wartung, Fehlerdiagnose, selbstkonfigurierende Maschinen, Komfort, mehr Effizienz ...)?  
.....  
.....

### 3.2 Technische Voraussetzungen

Sollte die Zapfwellenübersetzung am Traktor stufenlos (vollvariabel oder teilvariabel) ausgeführt werden, um die Zapfwelldrehzahl unabhängig von der Motordrehzahl steuern zu können?

- .....ja
- .....nein

Soll die elektrische Leistung direkt vom Traktor bzw. einem Zapfwellengenerator kommen, oder am Gerät generiert werden?

- .....Leistungsbereitstellung direkt vom Traktor
- .....von Zapfwellengenerator
- .....am Gerät generiert
- .....keine elektrische Energie erforderlich

Welche elektrischen Leistungen erwarten Sie vom Traktor bzw. Generator zum Betreiben der elektrischen Antriebe?

- | <i>dennächst</i>                            | <i>mittelfristig</i>                  |
|---|---------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> ..... >100 kW      | <input type="checkbox"/> >100 kW      |
| <input type="checkbox"/> ..... >50...100 kW | <input type="checkbox"/> >50...100 kW |
| <input type="checkbox"/> ..... >20...50 kW  | <input type="checkbox"/> >20...50 kW  |
| <input type="checkbox"/> ..... bis 20 kW    | <input type="checkbox"/> bis 20 kW    |





Wie viele Anschlüsse (Stecker) sollte der Traktor bzw. Generator (bei AC-Architektur) haben, wenn die elektrische Leistung dort generiert wird?

- ..... 1
- ..... 2
- ..... 3
- ..... >3

Welche Spannungsform sollte an den Steckern verfügbar sein?

- ..... Gleichspannung
- ..... Wechselspannung 50 Hz
- ..... geregelte Wechselspannung (Frequenzumrichter am Traktor bzw. Generator)
- ..... egal

Wann wird diese Leistung Ihrer Meinung nach von den Traktorherstellern zur Verfügung stehen?

- ..... in 3 Jahren
- ..... in 5 Jahren
- ..... in 5 bis 10 Jahren
- ..... in mehr als 10 Jahren

Welche technischen Voraussetzungen müssen vor der Einführung von E-Antrieben noch erfüllt werden?

.....

.....

.....

Welche anderen Rahmenbedingungen sind noch relevant?

.....

.....

.....





### 3.3 Wirtschaftliche Auswirkungen

Ist die Technologieführerschaft wirtschaftlich für Sie wichtig?

- .....*sehr wichtig*
- .....*wichtig*
- .....*weniger wichtig*
- .....*unwichtig*

Könnten durch E-Antriebe die Produktionskosten gesenkt werden (z.B. durch Wegfall mechanischer Komponenten)?

- .....*ja*
- .....*möglicherweise*
- .....*kaum*
- .....*nein*

Werden die Lieferantenbeziehungen gestärkt?

- .....*ja*
- .....*möglicherweise*
- .....*kaum*
- .....*nein*

Gibt es durch den Einsatz von E-Antrieben ein Potenzial zur Steigerung Ihrer Umsätze?

- .....*ja*
- .....*möglicherweise*
- .....*kaum*
- .....*nein*

Werden mehr Reklamationen aufgrund von E-Antrieben erwartet?

- .....*deutlich mehr*
- .....*etwas mehr*
- .....*kaum mehr*
- .....*nein*





FRANCISCO JOSEPHINUM WIESELBURG  
JOSEPHINUM RESEARCH



lebensministerium.at

Mit welchen Argumenten könnten Sie E-Antriebe verkaufen?

.....  
.....

Müssten Sie Personal aufnehmen (Produktmanagement, Service)?

.....  
.....

Würde das Markenimage beeinflusst werden?

.....  
.....



*Josephinum Research*  
umfrage a1-wp2\_d.docx / Druck: 17.02.2013

Seite 13



### 3.4 Produktbezogene Fragen

Hier werden Bereiche erläutert, die die Umsetzung von E-Antriebe an einer konkreten Maschine betreffen. Relevant sind beispielsweise

- technische Umsetzungsmöglichkeit
- Leistungsbedarf/Lastspitzen
- Einsatzbedingungen
- Kundennutzen
- sonstige Anforderungen.

Könnte eine Ihrer Maschinen auf E-Antrieb umgerüstet werden?

.....*nein*

.....*ja, nämlich* .....

Welche Antriebe der Maschine könnten auf E-Antrieb umgerüstet werden?

.....*Antrieb 1:* .....

.....*Antrieb 2:* .....

.....*Antrieb 3:* .....

.....*Antrieb 4:* .....

Wie erfolgt der Antrieb aktuell?

.....*Antrieb 1:* .....

.....*Antrieb 2:* .....

.....*Antrieb 3:* .....

.....*Antrieb 4:* .....

Was sind die Betriebstemperaturen?

*min.* ..... °C

*max.* ..... °C





Wie hoch ist die Verschmutzung des Antriebselements im normalen Betrieb und üblicher Wartung?

- .....extreme Verschmutzung
- .....starke Verschmutzung
- .....geringe Verschmutzung
- .....Antrieb könnte gekapselt werden

Verschmutzungsmedium.....

Wie hoch ist die Drehzahl im Normalbetrieb?

Antrieb 1:

von..... U/min bis..... U/min

Antrieb 2:

von..... U/min bis..... U/min

Antrieb 3:

von..... U/min bis..... U/min

Antrieb 4:

von..... U/min bis..... U/min

Ist stufenlose Drehzahlverstellung in dieser Anwendung bereits im Einsatz (z.B. hydrostatisch) oder deren Einführung sinnvoll?

Antrieb 1:

- .....ja
- .....möglicherweise
- .....kaum
- .....nein

Antrieb 2:

- .....ja
- .....möglicherweise
- .....kaum
- .....nein

Antrieb 3:

- .....ja
- .....möglicherweise
- .....kaum
- .....nein

Antrieb 4:

- .....ja
- .....möglicherweise
- .....kaum
- .....nein





Wie hoch ist der mittlere Leistungsbedarf / das mittlere Drehmoment?

Antrieb 1:

..... kW..... Nm

Antrieb 2:

..... kW..... Nm

Antrieb 3:

..... kW..... Nm

Antrieb 4:

..... kW..... Nm

Gibt es kurzzeitige Lastspitzen?

Antrieb 1:

- .....sehr oft
- .....manchmal
- .....kaum
- .....nein

Antrieb 3:

- .....sehr oft
- .....manchmal
- .....kaum
- .....nein

Antrieb 2:

- .....sehr oft
- .....manchmal
- .....kaum
- .....nein

Antrieb 4:

- .....sehr oft
- .....manchmal
- .....kaum
- .....nein

Wie hoch ist die Spitzenleistung?

Antrieb 1:

..... kW ..... Nm

Antrieb 2:

..... kW ..... Nm

Antrieb 3:

..... kW ..... Nm

Antrieb 4:





..... kW ..... Nm

Sind die Masse und das Volumen des Antriebes ausschlaggebende Kriterien?

Antrieb 1:

- .....ja, sehr entscheidend
- .....wichtig
- .....kaum
- .....nein

Antrieb 3:

- .....ja, sehr entscheidend
- .....wichtig
- .....kaum
- .....nein

Antrieb 2:

- .....ja, sehr entscheidend
- .....wichtig
- .....kaum
- .....nein

Antrieb 4:

- .....ja, sehr entscheidend
- .....wichtig
- .....kaum
- .....nein

Ist eine hohe Systemdynamik wichtig? – Z.B. sich rasch ändernde Drehzahlen im Einsatz.

Antrieb 1:

- .....ja, sehr entscheidend
- .....wichtig
- .....kaum
- .....nein

Antrieb 3:

- .....ja, sehr entscheidend
- .....wichtig
- .....kaum
- .....nein

Antrieb 2:

- .....ja, sehr entscheidend
- .....wichtig
- .....kaum
- .....nein

Antrieb 4:

- .....ja, sehr entscheidend
- .....wichtig
- .....kaum
- .....nein

Gibt es im konkreten Anwendungsfall spezielle Anforderungen an den Antrieb?

.....  
.....

Welchen Nutzen hätte der Kunde bei Anwendung eines E-Antriebes im konkreten Fall?

.....





.....

Wären neue – derzeit aufgrund mangelnder Steuer-/Regelbarkeit der Antriebe nicht realisierte - Funktionen z.B. zur Steigerung der Arbeitseffizienz oder Entlastung des Bedieners denkbar?

.....

.....

.....

.....

Bei welchen Anwendungen kommen E-Antriebe nicht in Frage?

.....

.....

.....

.....



## C Maschinendaten

### C.1 Zapfwellengenerator

In Kapitel 9.4 wurden die Kenndaten und Bezogenen Größen des ZWG ermittelt. Eine Zusammenfassung ist Tabelle C.1 zu entnehmen.

Bezeichnung	Wert	Einheit
Nenn Drehzahl $n_{\text{Nenn}}$	1000	U/min
Nennmoment $M_{\text{Nenn}}$	150	Nm
Polpaarzahl $p$	15	1
Strangspannung $U_{\text{eff, Strang}}$	231	V
Nennstrom $I_{\text{eff, Strang}}$	25	A
Stranginduktivität $L_{\text{S}}$	1,907	mH
Strangwiderstand $R_{\text{S}}$	78,85	m $\Omega$
Bezugsdrehzahl $n_{\text{Bezug}}$	1000	U/min
Bezugswinkelgeschwindigkeit		
elektrisch $\Omega_{\text{Bezug, el.}}$	1571	s <sup>-1</sup>
mechanisch $\Omega_{\text{Bezug, mech.}}$	105	s <sup>-1</sup>
Bezugsspannung $U_{\text{Bezug}}$	326,6	V
Bezugsstrom $I_{\text{Bezug}}$	35,36	A
Bezugswiderstand $R_{\text{Bezug}}$	9,2	$\Omega$
Bezugsfluss $\Phi_{\text{Bezug}}$	207,919	mWb
Bezugsinduktivität $L_{\text{Bezug}}$	5,881	mH
Bezugszeit $T_{\text{Bezug}}$	0,637	ms
Bezugsmoment $M_{\text{Bezug}}$	165,4	Nm
Bezugsleistung $P_{\text{Bezug}}$	17230,5	W
Bezogene Stranginduktivität $l_{\text{S}}$	0,324	1
Bezogener Strangwiderstand $r_{\text{S}}$	0,009	1

**Tab. C.1:** Kenndaten des Zapfwellengenerators

## C.2 Rohrmotor

In Tabelle C.2 sind die bezogenen Daten des Rohrmotors zu entnehmen. Die Aufbereiterwelle mit bestücktem Rohrmotor zeigt Abbildung C.1. In Abbildung C.2 sind Leerlaufspannung bei Nenndrehzahl sowie Kurzschlussstrom des Motors über die Drehzahl dargestellt.

Bezeichnung	Wert	Einheit
Nenndrehzahl $n_{\text{Nenn}}$	1000	U/min
Nennmoment $M_{\text{Nenn}}$	100	Nm
Polpaarzahl $p$	5	1
Strangspannung $U_{\text{eff, Strang}}$	166	V
Nennstrom $I_{\text{eff, Strang}}$	25	A
Stranginduktivität $L_S$	7,96	mH
Strangwiderstand $R_S$	247	m $\Omega$
Bezugsdrehzahl $n_{\text{Bezug}}$	1000	U/min
Bezugswinkelgeschwindigkeit		
elektrisch $\Omega_{\text{Bezug, el.}}$	524	s <sup>-1</sup>
mechanisch $\Omega_{\text{Bezug, mech.}}$	105	s <sup>-1</sup>
Bezugsspannung $U_{\text{Bezug}}$	235,15	V
Bezugsstrom $I_{\text{Bezug}}$	35,355	A
Bezugswiderstand $R_{\text{Bezug}}$	6,7	$\Omega$
Bezugsfluss $\Phi_{\text{Bezug}}$	449,105	mWb
Bezugsinduktivität $L_{\text{Bezug}}$	12,703	mH
Bezugszeit $T_{\text{Bezug}}$	1,91	ms
Bezugsmoment $M_{\text{Bezug}}$	119,087	Nm
Bezugsleistung $P_{\text{Bezug}}$	12470,77	W
Bezogene Stranginduktivität $l_S$	0,627	1
Bezogener Strangwiderstand $r_S$	0,037	1

**Tab. C.2:** Kenndaten des Rohrmotors

Durch eine Strom-/Spannungsmessung wurde der Widerstand zwischen Klemme und Sternpunkt mit 0,247  $\Omega$  bestimmt. Die Induktivität wurde mit einem Spannungspuls ermittelt. Aus dem Stromanstieg, siehe Abbildung C.3 ein Beispiel mit 220 V, ergibt sich mit die Induktivität mit  $L_{\text{Strang}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_{\text{DC}}}{\frac{di}{dt}}$



Abb. C.1: Rohrmotor am Prüfstand

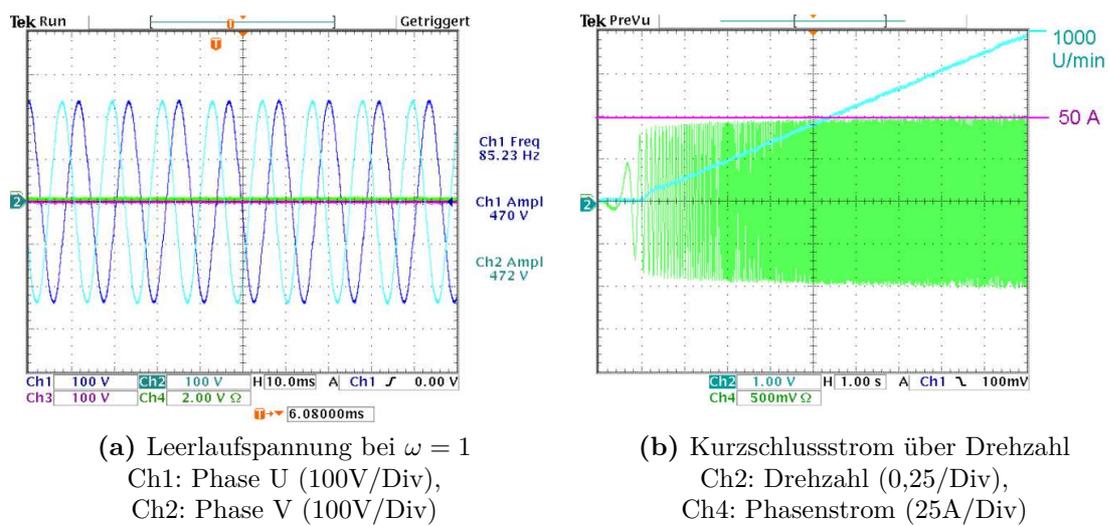
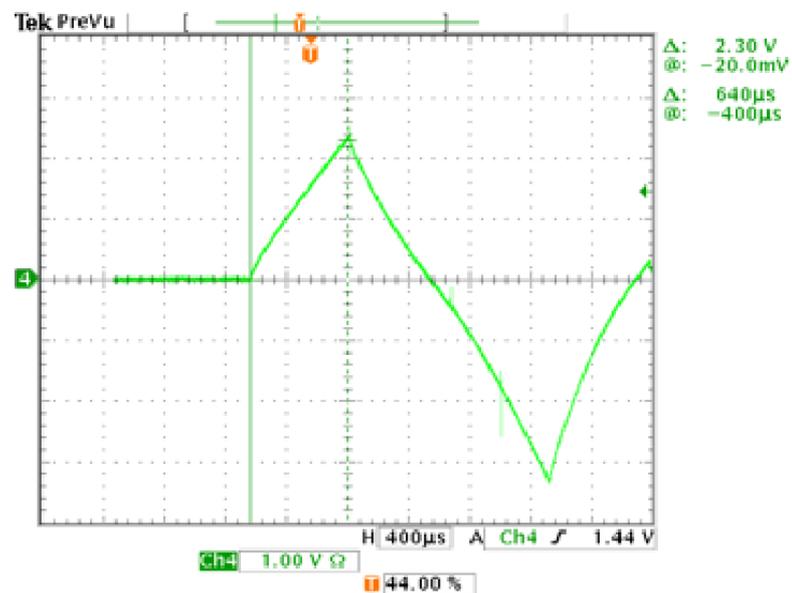


Abb. C.2: Rohrmotor Kenndaten



**Abb. C.3:** Induktivitätsmessung im Rohrmotor  
Sprungantworten des Stroms zu Spannungssprüngen  
 $0 \rightarrow +U_{DC} \rightarrow -U_{DC} \rightarrow +U_{DC}$   
Ch4: Phasenstrom (5A/Div)

### C.3 Getriebemotor SEW

Die Kenndaten des Getriebemotors sind in Tabelle C.3 gelistet. Das Typenschild zeigt Abbildung C.4. Fotos des SEW Motors in Abbildung C.5, links am Maschinenbett mit Lastabnahme über eine Kardanwelle, rechts in einer Detaildarstellung mit Lagegeberanbau für Prüfstandzwecke.

Bezeichnung	Wert	Einheit
Nenn Drehzahl $n_{\text{Nenn}}$	4500	U/min
Nennmoment $M_{\text{Nenn}}$	25,50	Nm
Polpaarzahl $p$	5	1
Strangspannung $U_{\text{eff, Strang}}$	100,5	V
Nennstrom $I_{\text{eff, Strang}}$	30	A
Stranginduktivität $L_{\text{S}}$	2,241	mH
Strangwiderstand $R_{\text{S}}$	86	m $\Omega$
Bezugsdrehzahl $n_{\text{Bezug}}$	3000	U/min
Bezugswinkelgeschwindigkeit		
elektrisch $\Omega_{\text{Bezug, el.}}$	1571	s <sup>-1</sup>
mechanisch $\Omega_{\text{Bezug, mech.}}$	314	s <sup>-1</sup>
Bezugsspannung $U_{\text{Bezug}}$	142,07	V
Bezugsstrom $I_{\text{Bezug}}$	42,426	A
Bezugswiderstand $R_{\text{Bezug}}$	3,3	$\Omega$
Bezugsfluss $\Phi_{\text{Bezug}}$	90,445	mWb
Bezugsinduktivität $L_{\text{Bezug}}$	2,132	mH
Bezugszeit $T_{\text{Bezug}}$	0,637	ms
Bezugsmoment $M_{\text{Bezug}}$	28,779	Nm
Bezugsleistung $P_{\text{Bezug}}$	9041,31	W
Bezogene Stranginduktivität $l_{\text{S}}$	1,051	1
Bezogener Strangwiderstand $r_{\text{S}}$	0,026	1

**Tab. C.3:** Kenndaten des Getriebemotors

In Abbildung C.6 sind die Leerlaufspannung bei rund 1000 U/min sowie der Kurzschlussstrom des Motors über eine variable Drehzahl dargestellt.

Abbildung C.7 zeigt einen Spannungspuls zur Induktivitätsmessung bei einer Zwischenkreisspannung von 500 V.



Abb. C.4: Typenschild SEW

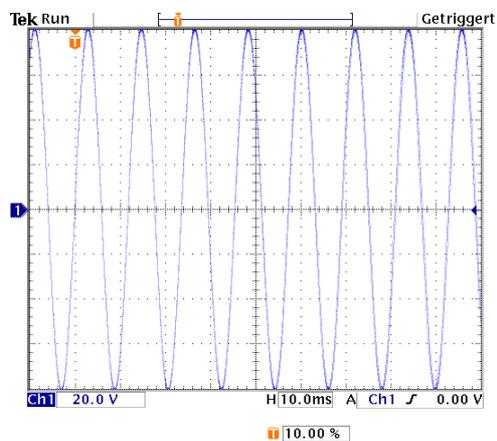


(a) Maschinenbett

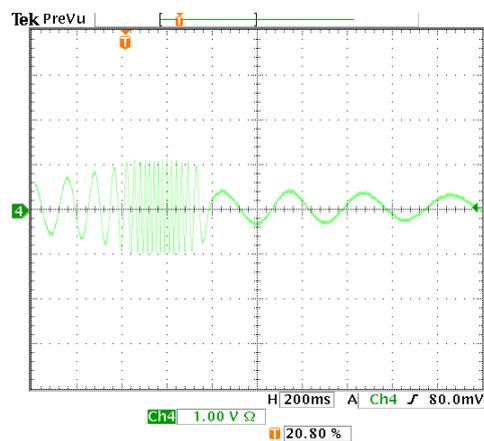


(b) Mit Lagegeber

Abb. C.5: Getriebemotor am Prüfstand



(a) Leerlaufspannung bei  $\omega = 0,2$   
Ch1: Phase U (20V/Div)



(b) Kurzschlussstrom bei variabler Drehzahl  
Ch4: Phasenstrom (50A/Div)

Abb. C.6: Getriebemotor Kenndaten

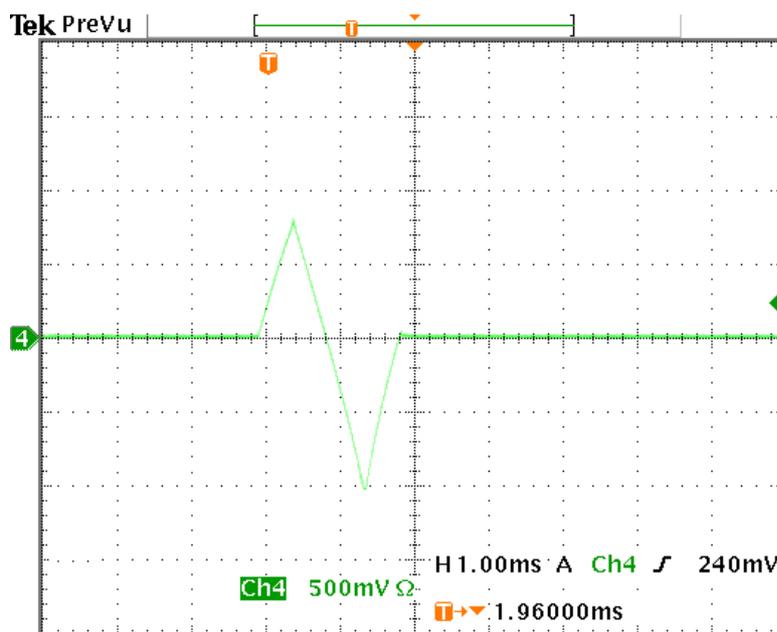


Abb. C.7: Induktivitätsmessung im Getriebemotor  
Sprungantworten des Stroms zu Spannungssprüngen  
 $0 \rightarrow +U_{DC} \rightarrow -U_{DC} \rightarrow +U_{DC}$   
Ch4: Phasenstrom (25A/Div)

## C.4 Getriebeloser Motor - Schabmüller

Die Kenndaten der getriebelosen PSM der Firma Schabmüller sind aus Tabelle C.4 zu entnehmen. Das Typenschild zeigt Abbildung C.8. Fotos des Motors am Prüfstand mit montiertem Lagegeber und Schleuderschutz über der Kardanwelle zeigt Abbildung C.9.

Bezeichnung	Wert	Einheit
Nenndrehzahl $n_{\text{Nenn}}$	5000	U/min
Nennmoment $M_{\text{Nenn}}$	25	Nm
Polpaarzahl $p$	3	1
Strangspannung $U_{\text{eff, Strang}}$	187	V
Nennstrom $I_{\text{eff, Strang}}$	23,2	A
Stranginduktivität $L_{\text{S}}$	2,793	mH
Strangwiderstand $R_{\text{S}}$	152,5	m $\Omega$
Bezugsdrehzahl $n_{\text{Bezug}}$	4950	U/min
Bezugswinkelgeschwindigkeit		
elektrisch $\Omega_{\text{Bezug, el.}}$	1555	s <sup>-1</sup>
mechanisch $\Omega_{\text{Bezug, mech.}}$	518	s <sup>-1</sup>
Bezugsspannung $U_{\text{Bezug}}$	264,5	V
Bezugsstrom $I_{\text{Bezug}}$	32,8	A
Bezugswiderstand $R_{\text{Bezug}}$	8,1	$\Omega$
Bezugsfluss $\Phi_{\text{Bezug}}$	170,116	mWb
Bezugsinduktivität $L_{\text{Bezug}}$	5,186	mH
Bezugszeit $T_{\text{Bezug}}$	0,643	ms
Bezugsmoment $M_{\text{Bezug}}$	25,1	Nm
Bezugsleistung $P_{\text{Bezug}}$	13015,6	W
Bezogene Stranginduktivität $l_{\text{S}}$	0,539	1
Bezogener Strangwiderstand $r_{\text{S}}$	0,019	1

**Tab. C.4:** Kenndaten des getriebelosen Motors

In Abbildung C.10 sind Leerlaufspannung bei 3500 U/min sowie Kurzschlussstrom des Motors über die Drehzahl dargestellt. Abbildung C.11 zeigt den Strompuls zur Induktivitätsmessung bei einer Zwischenkreisspannung von 600 V.

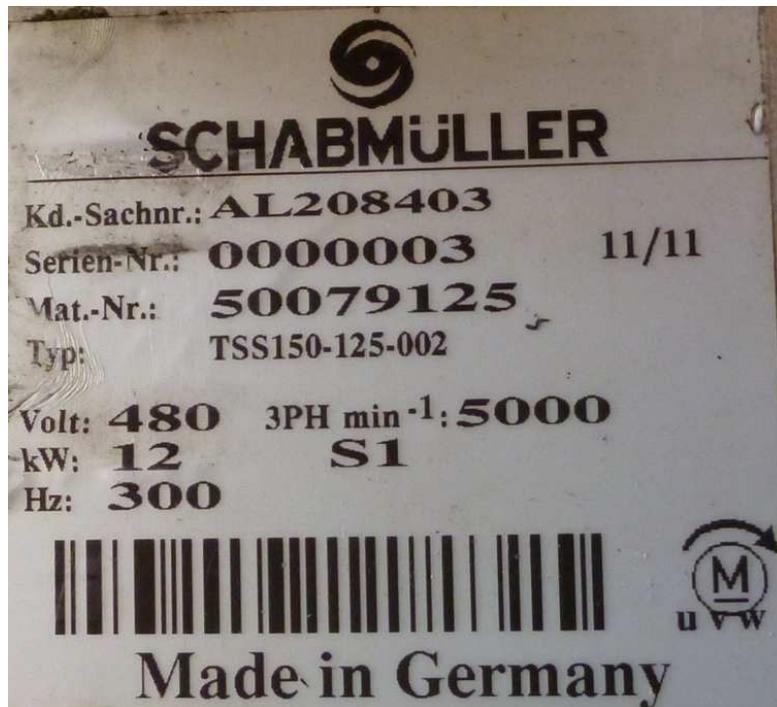
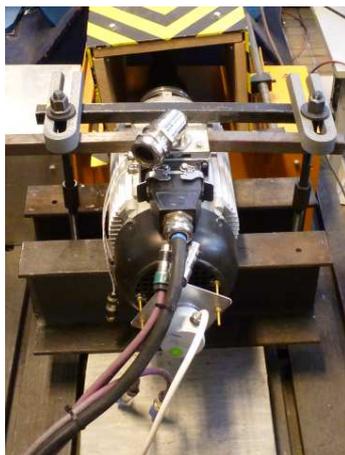
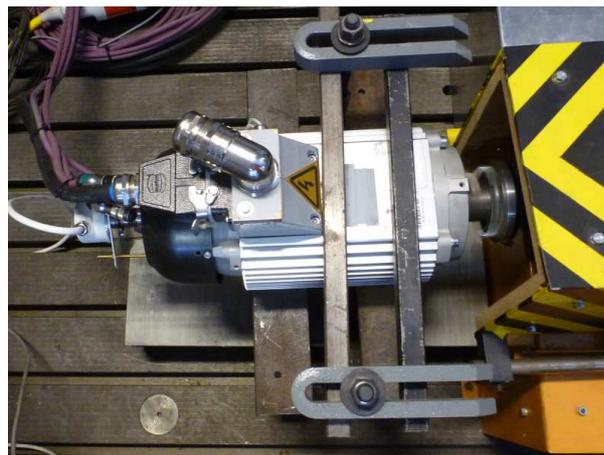


Abb. C.8: Typenschild Schabmüller

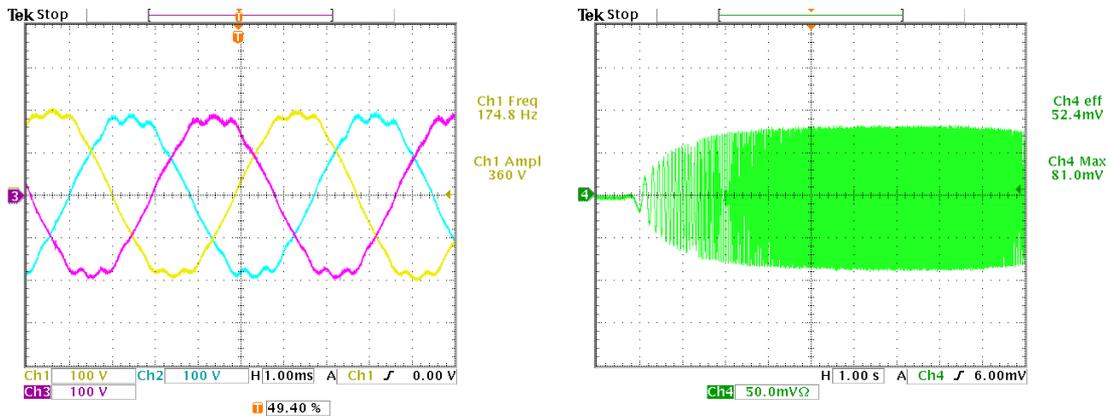


(a) Mit Lastmaschine im Hintergrund



(b) Seitenansicht

Abb. C.9: Getriebeloser Motor am Prüfstand



(a) Leerlaufspannung bei  $\omega = 0,7$   
Ch1: Phase U (100V/Div),  
Ch2: Phase V (100V/Div),  
Ch3: Phase W (100V/Div)

(b) Kurzschlussstrom über Drehzahl  
Ch4: Phasenstrom (50A/Div)

Abb. C.10: Getriebeloser Motor Kenndaten

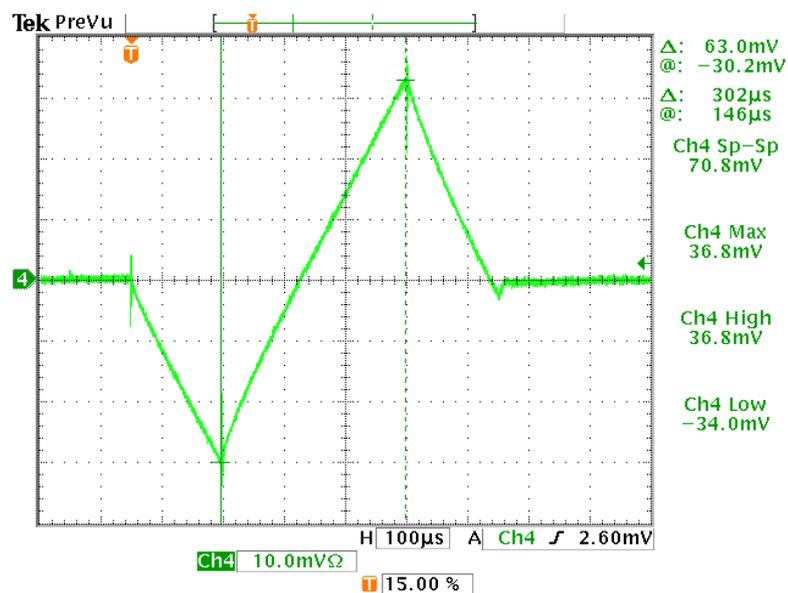
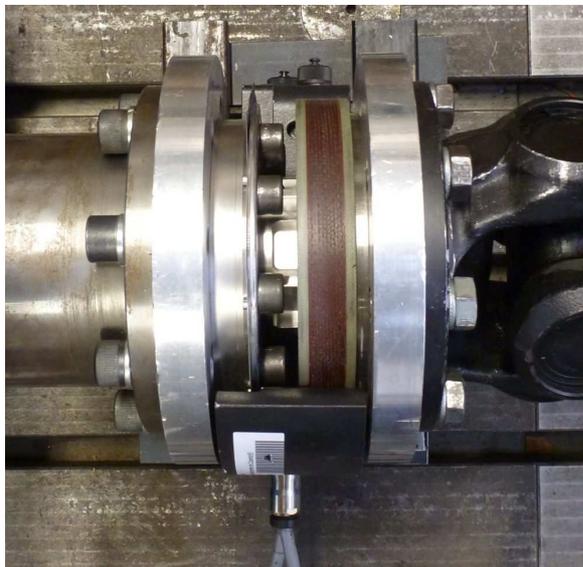


Abb. C.11: Induktivitätsmessung im getriebelosen Motor  
Sprungantworten des Stroms zu Spannungssprüngen  
 $0 \rightarrow -U_{DC} \rightarrow +U_{DC} \rightarrow -U_{DC}$   
Ch4: Phasenstrom (10A/Div)

## D Messgeräte

### D.1 Momentmesswelle HBM T12

Die Momentmesswelle T12 der Fa. HBM besteht aus zwei Teilen. Ein rotierender Teil mit Dehnmessstreifen wird zwischen die Wellenteile geflanscht. Ein feststehender Teil, der zum Rotor gestellt wird, empfängt die Messstreifensignale des Rotors und macht eine Drehzahlmessung mittels Einlesen der Lochscheibe am Rotor, siehe Abbildung D.1 (a). Das Ausgangssignal von Drehmoment und Drehzahl ist ein frequenzabhängiges pulsmoduliertes Signal, das im Dewetron eingelesen werden kann. Abbildung D.1 (b) zeigt das Typenschild der Messwelle, sowie den Rotor und den Stator im eingebauten Zustand in der Welle.



(a) Rotor und Stator eingebaut



(b) Typenschild

Abb. D.1: Messwelle

### D.2 Gleichstrommaschine – Zapfwelle

Die Gleichstrommaschine zum Antreiben des Zapfwellengenerators war, als Simulation der Zapfwelle, drehzahlregelt betrieben. Im Vergleich zur Zapfwelle einer VKM mit Schwungrad sind hier durch den Drehzahlregler abweichende Bedingungen gegeben. Abbildung D.2 zeigt ein Typenschild. Betrieben wurde die Maschine mit einem Simoreg Umrichter, siehe unten.

### D.3 Gleichstrommaschine – Lastabnahme

Die Gleichstrommaschine zur Lastabnahme der Motoren wurde je nach Bedarf drehzahl- oder momentgeregelt betrieben. Ein Typenschild ist aus Abbildung D.3

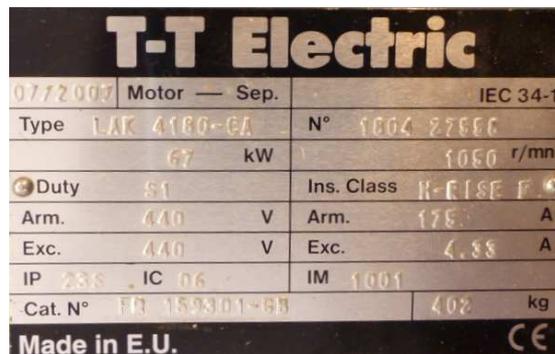


Abb. D.2: Zapfwellengleichstrommaschine

zu entnehmen. Betrieben wurde die Gleichstrommaschine ebenfalls mit dem Simoreg Umrichter, siehe unten. Die Maschine ist als Pendelmaschine konzipiert und kann zur Drehmomentmessung benutzt werden (Anhang D.6).

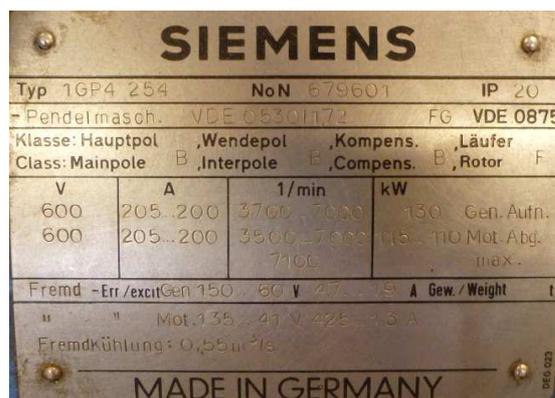


Abb. D.3: Lastmaschine

## D.4 Umrichtereinheit Simoreg

Beide Gleichstrommaschinen (als Zapfwellenantrieb sowie zur Lastabnahme) wurden mit einem Umrichter der Fa. Siemens, Typ Simoreg, benutzt. Ein Typenschild zeigt Abbildung D.4. Eine Parameterliste zu den wichtigsten Einstellungen und Änderungen, die bezüglich der Messungen gemacht wurden (Drehzahl-/Momentgeregelt, Sicherheitseinstellungen, ...), findet sich in Anhang G.1.

## D.5 Umrichtereinheit Refu

Der Umrichter der Fa. Refu wurde als Ersatzlösung für die Feldversuche verwendet und anschließend am Prüfstand vermessen um die Feldversuche nachzustellen. Mit diesem Umrichter wurde nur der getriebelose Motor der Fa. Schabmüller betrieben. Ein Typenschild ist in Abbildung D.5 gezeigt. Eine Parameterliste der wichtigsten Betriebseinstellungen ist in Anhang G.2 zu finden.

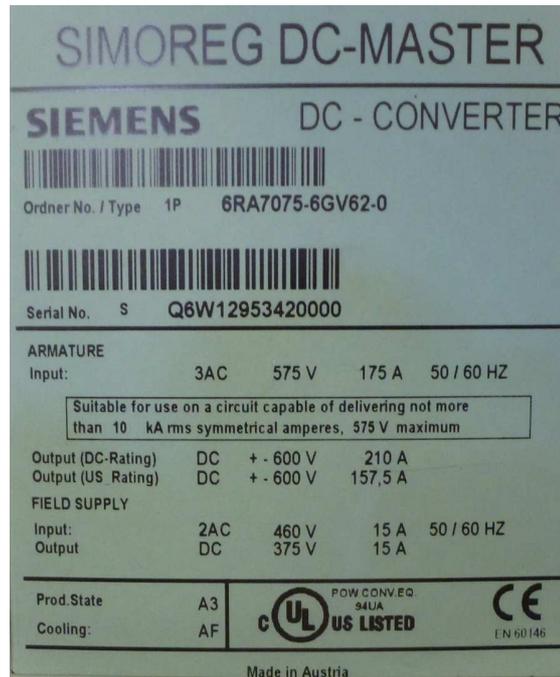


Abb. D.4: Simoreg-Umrichter

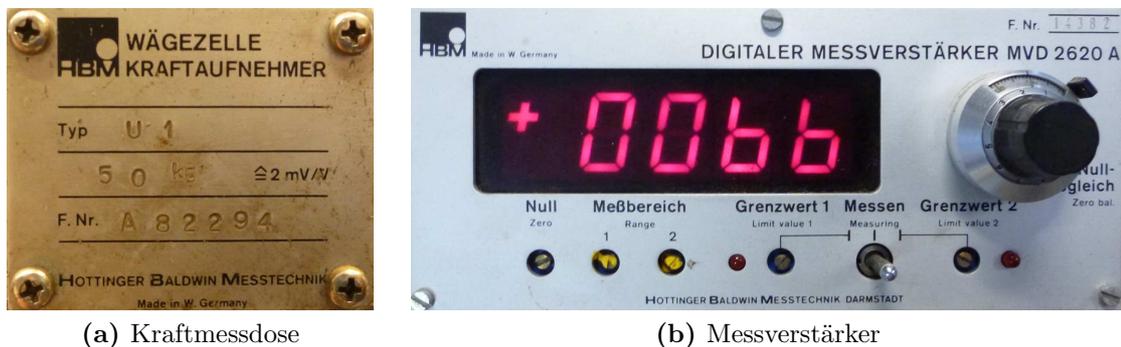
## D.6 Kraftmessdose mit Auswerteeinheit

Die Gleichstrommaschine der Fa. Siemens als Pendelmaschine hat am Stator einen Arm befestigt. Dieser Arm ist an einer Kraftmessdose der Fa. HBM<sup>32</sup> Typ U1 befestigt. Zur Auswertung wurde ein Messverstärker Typ MVD2630A verwendet. Die beiden Geräte sind in Abbildung D.6 dargestellt. Der Messverstärker hat u.a. einen analogen Spannungsausgang, der wiederum im Dewetron Messsystem eingelesen wurde.

<sup>32</sup>Hottinger Baldwin Messtechnik



Abb. D.5: Refu-Umrichter



(a) Kraftmessdose

(b) Messverstärker

Abb. D.6: Drehmomentmessung an der Pendelmaschine

## D.7 Leistungsmessgerät Dewetron

Die Leistungsmessung wurde mit dem DEWE 2600 der Fa. Dewetron durchgeführt. Mit drei Hochspannungsmodulen (DAQP-HV) wurden die Spannungen von Zwischenkreis sowie Eingangs- und Ausgangsphase direkt abgenommen, mit drei Niederspannungsmodulen (DAQP-LV) und Stromwandlern (MCTS-200) wurden die Ströme von Zwischenkreis und Phase vermessen. Weiters wurde der Frequenzgang der HBM T12 Messwelle per Frequenzzähler eingelesen sowie der Spannungsausgang der Kraftmessdose der Pendelmaschine. Somit waren fünf Leistungsmessungen (Eingang (elektr./mech.), Zwischenkreis, Ausgang (elektr./mech.) mit einem Gerät möglich, aufgrund der geringen Anzahl der Module jedoch maximal drei zugleich, ausreichend für die durchgeführten Messungen.

Folgende Einstellungen und Abfolgen wurden bei der Messung mit dem Dewetron durchgeführt:

- Eingangfilter: Gleichsignale mit 0,3 kHz, Wechselsignale mit 1 kHz
- Abtastgenauigkeit: Je nach maximaler Amplitudenhöhe des Signals
- Abtastrate: 20.000 Samples pro Sekunde
- Messdauer: Um Schwingungen aller Messgrößen auszumitteln, wurde ein Betriebspunkt bis zu einer Minute gehalten
- Datenreduzierung: interne Dewetron Mittelung auf 0,05 Sekunden pro Wert
- Nachbearbeitung: Mittelung der gewünschten Daten eines Betriebspunktes und Errechnen des Wirkungsgrades, Moments, Drehzahl, etc.

## D.8 Rotortemperaturmessung

### D.8.1 Messung per Bluetooth

Die Funk-Temperaturmessung wurde selbst entwickelt. Auf Basis eines Microcontrollers<sup>33</sup> werden aus SPI<sup>34</sup>-Temperatursensoren<sup>35</sup> die Werte ausgelesen und per SCI<sup>36</sup> an ein Bluetooth-Modul<sup>37</sup> gesendet. Dieses überträgt die Daten per Funk an jedem PC mit Bluetooth und über eine simulierte serielle Schnittstelle können diese eingelesen werden. Zur Stromversorgung wird ein Lithium-Polymer-Akkumulator mit 1600 mAh verwendet. Eine Übersicht liefert Abbildung D.7.

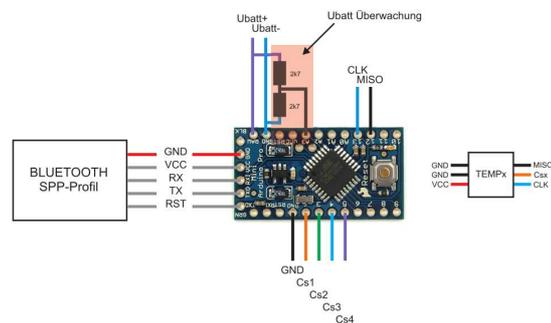


Abb. D.7: Funktemperaturmessung [Buc12]

### D.8.2 Messung per Infrarot

Die Temperaturmessung per Infrarot wurde mit dem CompactConnect CS LT der Fa. Optris durchgeführt. Eine Messung über Thermosäule (Strahlungsthermoelement) kann in einem Temperaturbereich von  $-40\text{ °C}$  bis  $1030\text{ °C}$  und einer Genauigkeit von  $\pm 1,5\text{ °C}$  durchgeführt werden. Damit konnte der Rotor im abgeschlossenen Zustand, durch ein Loch im Blech, vermessen werden. Ausgabe digital über USB-Schnittstelle. Abbildung D.8 zeigt den Sensor mit Typenschild.



Abb. D.8: Infrarottemperaturmessung

<sup>33</sup>Arduino Pro Mini

<sup>34</sup>Serial Peripheral Interface

<sup>35</sup>ADT7301

<sup>36</sup>Serial Communication Interface

<sup>37</sup>ARF32

## E Source Code

Im folgenden finden sich einzelnen verwendete Codeteile zum jeweiligen Thema mit einer kurzen, stichwortartigen Beschreibung. Programmiert wurde mit der Entwicklungsumgebung von Texas Instruments (Code Composer Studio) in der Sprache C++.

### E.1 RAM beschreiben und auslesen

Für die Statistikmessungen wurden die jeweiligen Messwerte in das Ram geschrieben, DRAM\_START legt dabei die Anfangsadresse fest:

```
long DRAM_START=0x003FA000; // internes RAM für 2808
int Index_RAM = 0;
int Max_IndexRAM = 0x1FF0; // Platz für rund 8000 Werte

void ramwrite(int value)
{
    int *ramadresse;
    ramadresse = (int*)(DRAM_START + Index_RAM);
    *ramadresse = value;
    Index_RAM++;
    if (Index_RAM >= Max_IndexRAM)
    {
        Index_RAM = 0;
    }
}
```

Ausgelesen wird das RAM über die hausinterne Kommunikationssoftware „COM“ am PC, die mittels RS232 mit der Umrichter-CPU kommuniziert, hier wird wiederum auf DRAM\_START zugegriffen, der darauf gesetzte SCI\_RamPointer\_int wird in den Sendebuffer der Seriellen Schnittstelle geladen, die Codeteile dazu in „comm.c“:

```
extern long DRAM_START;
static int *ramadresse;

void SCI_variablen_init(void)
{
    [...]
    ramadresse = (int*)(DRAM_START);
    [...]
}

void SCI_ValidTelegram(void)
{
    [...]
```

```
case(COMMANDO_READ_RAM):
{
    // Index des Pakets
    SCI_RamPaket= RX_Puffer[4] | (RX_Puffer[5]<<8);
    // Pointer des Pakets berechnen
    SCI_RamPointer_int = ramadresse + (16 * SCI_RamPaket);
}
[...]
```

## E.2 Statistikmessungen

Statistikmessung der Winkelabweichung von EMK und Lagegeber, Differenz wird in den RAM geschrieben (siehe oben), `EmkStatSpeicherCounterGrenze` legt Anzahl der Messwerte fest, `EmkStatCounterGrenze` legt den zeitlichen Abstand der Messwerte fest:

```
if(e_EmkStatMode == e_SET)
{
    if(EmkStatCounter >= EmkStatCounterGrenze)
    {
        ramwrite(AngleSensorEl - AngleEMF);
        EmkStatCounter=0;
        EmkStatSpeicherCounter++;
    }
    EmkStatCounter++;
    if(EmkStatSpeicherCounter > EmkStatSpeicherCounterGrenze)
    {
        e_EmkStatMode = e_CLEAR;
        EmkStatSpeicherCounter = 0;
    }
}
```

Statistikmessung des Hochlaufs, `InfStatHochlaufGrenze` legt die Anzahl der Zyklen fest in der die PWM aktiv ist und entspricht der Hochlaufzeit, `InfStatAuslaufGrenze` legt die Dauer zum Austrudeln des Motors fest, nach dem Hochfahren wird der Drehzahlwert `InfStatAuslaufGrenze` ins RAM gespeichert (siehe oben), `InfStatSpeicherGrenze` legt das Ende der Messreihe fest:

```
if(e_InfStatMode == e_SET)
{
    if(InfStatCounter < InfStatHochlaufGrenze && InfStatCounter >= 0)
    {
        e_EnableRun=e_SET;
    }
}
```

```
else if(InfStatCounter == InfStatHochlaufGrenze)
{
    e_EnableRun=e_CLEAR;
    ramwrite(OmegaEstimate);
    InfStatSpeicher++;
}
else if(InfStatCounter > InfStatAuslaufGrenze)
    InfStatCounter=0;

    InfStatCounter++;
}
if(InfStatSpeicher>InfStatSpeicherGrenze)
{
    e_InfStatMode = e_CLEAR;
    InfStatSpeicher=0;
    InfStatCounter=0;
}
```

## F Umrichterdaten

### F.1 Kenndaten

In Tabelle F.1 finden sich die wichtigsten Daten zum Umrichter, in Tabelle F.2 die Hardware-Sicherheitsvorkehrungen.

Eingangsspannung Netzbetrieb	3x400 V AC
Maximale Zwischenkreisspannung	680 V DC (565 V + 20 %)
Maximaler Phasenstrom	60 A peak
Überspannungskategorie I	2500 V
Abmessungen	200 x 400 mm
Kühlung	aktiv, flüssig
Temperatursensoreingänge	2
digitale Ausgänge	4x, 12 V, max. 150 mA, High Active
digitale Eingänge	4x, 12 V
analoge Ausgänge	3x, 0-5 V DC, max. 10 mA
analoge Eingänge	3x, 0-5 V DC
sonst. Schnittstellen	CAN 2.0B, RS232 (inkl. Boot Enable)

**Tab. F.1:** Grunddaten Umrichter

Art	Grenze (default)
Überspannung	variabel (> 680 V)
Unterspannung	variabel (< 50 V)
Überstrom	variabel (> 80 A)

**Tab. F.2:** Sicherheitsaspekte

## F.2 Komponenten

Informationen zu den wichtigsten Komponenten werden kurz gelistet:

- Prozessor: Fa. Texas Instruments, TMS320F2808  
CPU mit 100 Mhz, 64 kB Speicher (+16 kB Flash), 4 SPI, 2 SCI, 2 CAN, 3x 32-Bit Timer, 16x 12-Bit ADC, 16 PMW Ausgänge
- Leistungsmodul: Fa. FUJI, 6MBI150U4B-120  
IGBT-Modul 150 A 1200 V
- Stromwandler: Fa. LEM, HC2F100-SN CLIPS bis 250 A, Hall-Effekt
- Öl-Luftkühler: Fa. Hainzel Industriesysteme, HP5-1, 12V  
bis 3 kW Kühlleistung (Umgebungstemperatur: 40°C, Kühlmedium: Öl, Öltemperatur: 70°C)
- Isolationswächter: Fa. Bender, ISOMETER IRDH375  
Isolationsüberwachung für ungeerdete Systeme AC, AC/DC 0-793 V, DC 0-650 V, Ansprechwert: 1 kOhm oder 10 MOhm
- Bremschopper: Fa. Lenze, EMB9352-E  
Bis 765 V mit 19 kW Leistung auf Dauer und 32 kW Spitze

## F.3 Schnittstellen



**Abb. F.1:** Schnittstellen des Umrichters

In Tabelle F.3 sind die Schnittstellen der vier Anschlüsse laut Abbildung F.1 mit kurzer Beschreibung gelistet.

Stecker	Pin	Belegung
1	1	KL 31 (GND)
	2	KL 15 (Zündung)
	3	CAN_H
	4	CAN_L
	5	KL 30 (BAT)
	6	n.c.
	7	BOOT_EN
	8	GND
2	1	MOT_TSENS 2
	2	MOT_TSENS 1
	3	Analog-Out 3 (tbd) 0-5 V DC max. 10 mA
	4	n.c.
	5	n.c.
	6	GND
	7	RS232-RX
	8	RS232-TX
3	1	Analog IN (reserve) 0-5 V DC
	2	Analog IN (Drehmoment) 0-5 V DC
	3	Analog IN (Drehzahl) 0-5 V DC
	4	Digital IN (reserve) 12 V DC
	5	Digital IN (Betriebsmode) 12 V DC
	6	Digital IN (Drehrichtung) 12 V DC
	7	Digital IN (Freigabe) 12 V DC
	8	GND
4	1	Digital OUT (reserve) 12 V DC max. 150mA
	2	Digital OUT (reserve) 12 V DC max. 150mA
	3	Digital OUT (Motor EIN) 12 V DC max. 150mA
	4	n.c.
	5	n.c.
	6	Digital OUT (Störung) 12 V DC max. 150mA
	7	Analog OUT (Drehzahl) 0-5 V DC max. 10mA
	8	Analog OUT (Motorstrom) 0-5 V DC max. 10mA

**Tab. F.3:** Schnittstellen des Umrichters

## G Einstellungen Industriemrichter

### G.1 Simoreg DC Master

In Tabelle G.1 sind die wichtigsten Parameter des Siemens Simoreg DC Master (6RA70) für den Prüfstandsbetrieb aufgelistet. Dieser wurde sowohl als Regler für die Antriebsmaschine (Simulation Zapfwelle am Traktor) als auch als Regler für die Lastmaschine (Simulation Feld als Leistungsabnehmer) benutzt.

Die grundsätzliche Einstellung der Drehzahlregelung kann auf Momentregelung geändert werden. Als Eingang kann dafür sowohl das Bediengerät als auch ein analoger Eingang dienen. Die Feinheit der Sollwertänderung eines Tastendruckes kann über das Motorpoti eingestellt werden. Kommt es im Betrieb mit Momentregler zur Abschaltung des Prüflings dreht die Lastmaschine hoch, bzw. bremst zuerst und dreht in die andere Drehrichtung hoch. Mit einer Sicherheitsroutine schaltet die Lastmaschine ab einer Drehzahlgrenze auf einen anderen Momentsollwert, ist dieser Null schaltet die Maschine ab. Für ein Umsetzen der Parameter muss eine Parameterfreigabe erteilt werden. Umfangreichere Beschreibungen aller Parameter sind der Bedienungsanleitung zu entnehmen.

Parameter, Beschreibung	Wert	Default
<i>Parameterfreigabe</i>		
P051 Schlüsselparameter	40 Parameter freigeben	0
	26 Optimierungslauf für Drehzahlregler	0
<i>Sollwerte über Analogeingang</i>		
P438 Quelle Standardsollwert	11 Analogeingang (15,16)	208
P625 Quelle Drehzahlsollwert	11 Analogeingang (15,16)	170
P500 Quelle Momentsollwert Folgebetrieb	11 Analogeingang (15,16)	170
P607 Quelle Momentensollwert Leitantrieb	11 Analogeingang (15,16)	148
P655 Erste Quelle f. das Steuerwort	2100 EIN/AUS am Bediengerät	1
<i>Moment/Drehzahl</i>		
P084 Momentregelung	2 I-Regler	1
P084 Drehzahlregelung	1 n-Regler	1
P227 Drehzahlregler Statik	3 3 % Abweichung zulässig	0
P236 Dynamik des Drehzahlregelkreises	10 10 % Dynamik, wenig 'giftig'	40
P171 pos. Momentgrenze Anlagenstromgrenze in Moment- richtung I	5 in Prozent von P100 (Bemessungs-Ankerstrom des Mo- tors)	100
P171 neg. Momentgrenze Anlagenstromgrenze in Moment- richtung II	-5 in Prozent von P100 (Bemessungs-Ankerstrom des Mo- tors)	-100

<i>Sicherheitsabschaltung</i>		
P694 Aktiv	1 Aktiv Ab P184 werden P182 & P183 aktiv	0
P182 Obere Momentgrenze	0 Oberes Sollmoment wenn aktiv	100
P183 Untere Momentgrenze	0 Unteres Sollmoment wenn aktiv	-100
P184 Ausschaltgrenze % v. P108 Nenndrehzahl	- Drehzahlgrenze für Momentwertum- schaltung	-
<i>Ausschalten</i>		
P654 Auswahl für Einschalten und Stillsetzen	2100 Ein/Aus von Bediengerät	2100
P655 AUS2 aktiv Motor trudelt aus	2100 Ein/Aus von Bediengerät	1
<i>Motorpoti</i>		
P462 Hochlauf	15 Sekunden auf Taster für 0 auf 100	30
P463 Rücklauf	15 Sekunden auf Taster für 100 auf 0	30
P465 Faktor 60	1 Zeit mal 60 (sek->min)	0

**Tab. G.1:** Die wichtigsten Parameter am DC Master

## G.2 Refu RPCS600

In Tabelle G.2 sind die wichtigsten Parameter des REFU Elektronik RPCS600 Umrichter aufgelistet. Passwort „Refu“ im „RPCSTune“, die Kontroll- und Bediensoftware an einem PC (Windows), Verbindung mit dem Umrichter über die RS232 Schnittstelle (1 Stop-Bit, even, Baudrate je nach Einstellung im Umrichter). Defaultwerte sind jene Werte die vom Projektpartner Pöttinger voreingestellt waren, inklusive einer Parametrierung auf Schabmüller Prototyp. Nach erstem Anschluss des Prüflings ist die richtige Drehrichtung zu überprüfen (Phasenanschluss) sowie ein Geberoptimierlauf durchzuführen (Lagegeberabgleich).

Parameter, Beschreibung	Wert	Default
<i>Setup</i>		
P073 Vorgabe EIN/AUS	Klemmen Nur Klemmbrücke ermöglicht einschalten	PC + Klemmen
P050.3 Betriebsfreigabe	1731 logisch EIN	1714
P189 Betriebsart	Geberoptimierlauf für Geberoptimierung nach Installation	Stromgeregelt
P100 Motortyp	1 Synchronmaschine	1
P130 Geberauswahl	0 Resolver	0
<i>Betrieb</i>		
P050.0 Einschalten - Flanke 0->1	1701 1 senden (Einschaltflanke)	1700
P050.7 Störquittierung - Flanke 0->1	1701 1 senden (Quittierungsflanke)	1700
P265 Solldrehzahl	0-100 Solldrehzahl in Prozent	80
<i>Sicherheitsvorkehrungen Prüfstand</i>		
P367 Momentbegrenzung	0 kein Rückspeisen möglich	-199
P307 Quelle Linkslauf	Drehrichtung zu Lastmaschine beachten	1700
P395 n-max Störung	5500 Abschaltgrenze Drehzahlmaximung	8000
<i>Regler, Normierung</i>		

P112 Nennstrom	25 Nennstrom laut Typenschild	25
P374 Stromnormierung	60 Normierung Sollwert inkl. Überlast	60
P335 n-Regler Kp1	Proportionalanteil	0,8
P336 n-Regler Tn1	Nachstellzeit	1000
<i>Drehzahlregelung</i>		
P264 Auswahl Hauptsoll	1701 Festwert als Vorgabe	1701
P280 Hochlaufzeit	Zeit für Hochlaufgeber	x
P067 Vorzeichenumkehr Sollwert	Drehrichtungswechsel	x
P303 pos. Sollwertbegrenzung	Obere Grenze	x
P304 neg. Sollwertbegrenzung	Untere Grenze	x
<i>Momentregelung</i>		
P361 Auswahl Msoll	Festwert	x
P578 Umschalter Msollquelle	1701 Msoll Zusatz aktiv	1700
P579 Quelle Msoll	1858 Msoll Zusatz	1642
P363 Normierung Msoll Zusatz	100 Prozent	100
P362 Msoll Zusatz	Sollvorgabe Moment (zu P374)	x

Tab. G.2: Die wichtigsten Parameter am Refu-Umrichter



---

## Literatur

- [AEF0611] AEF - Agricultural Industrie Electronics Foundation, AEF gründet Projekt Gruppe Nr. 7: „Elektrische Antriebe“, Pressemitteilung 09/06/2011, Frankfurt/Main, 2011  
Available also online at 2011[http://www.aef-online.org/fileadmin/MEDIA/downloads/member\\_100\\_D.pdf](http://www.aef-online.org/fileadmin/MEDIA/downloads/member_100_D.pdf) - 28.1.2013
- [AEF1211] AEF - Agricultural Industrie Electronics Foundation, AEF-Broschüre: Think ISOBUS, Frankfurt/Main, 2011  
Available also online at [http://www.aef-online.org/fileadmin/MEDIA/downloads/AEF\\_brochure\\_2012\\_D.pdf](http://www.aef-online.org/fileadmin/MEDIA/downloads/AEF_brochure_2012_D.pdf) - 28.1.2013
- [Ama09] Fa. Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG, Broschüre GO - Neuheiten zur Agritechnica 2009, Seiten 26-29,  
Available also online at <http://info.amazone.de/DisplayInfo.aspx?id=13961> - 21.4.2013
- [Aum08] W. Aumer, M. Lindner, M. Geißler, T. Herlitzius, Elektrischer Traktor: Vision oder Zukunft, in: Landtechnik, 1/2008, S.14-15, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt, 2008
- [Aum10] W. Aumer, Funktionsintegration eines elektrischen Antriebes in eine Dreschtrommel, in: Landtechnik, 3/2010, S.194-197, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt, 2010
- [Aut11] Fa. Autogazette, Audi Q7 4.2 TDI Fahrbericht  
Available online at <http://www.autogazette.de/fahrbericht/Audi/Q7%204,2%20TDI/30347.html> - 22.3.2011
- [Bas02] R. van Basshuysen, F. Schäfer, Handbuch Verbrennungsmotoren, 2. Auflage, Verlag Vieweg, 2002
- [BLT13] Mit freundlicher Genehmigung der BLT Wieselburg, 2013
- [Böh11] A. Böhrnsen, Rigitrac EWD 120: Vier E-Motoren treiben die Räder an, in: Profi, 12/2011, S.158-159, Landwirtschaftsverlag, Münster, 2011, ISSN 0937-1583
- [Buc12] R. Buczolits, Aufbau und messtechnische Beurteilung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine für Rohrantriebe, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe, 2012
- [Bun10] E. Buning, Electric drives in agricultural machinery - approach from the tractor side, 21st EIMA International, 13-14.11.2010, Bologna

- 
- [Dah04] L. Dahlen, Vehicle Engineering for a better environment, Vorlesungsskriptum, Technische Hochschule Stockholm, 2004
- [Dem04] W. Demtröder, Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik, 3. Auflage, Springer Verlag, 2004, 3-540-20210-2
- [Dem06] W. Demtröder, Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme, 4. Auflage, Springer, 2006, 3-540-26034-X
- [Dem10] F. Demmelmayr, A. Eilenberger, M. Schroedl, Sensorless electric traction drive with 500 Nm outer rotor permanent magnet synchronous machine, International Conference on Electrical Machines (ICEM), 6.-8.9.2010, Rome, Italia, 2010
- [Dem11a] F. Demmelmayr, M. Susic, M. Schroedl, Sensorless Control at High Starting Torque of a 4000 Nm Traction Drive With Permanent Magnet Synchronous Machine, European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Birmingham, UK, 2011
- [Dem11b] F. Demmelmayr, M. Troyer, M. Schroedl, Advantages of PM-machines Compared to Induction Machines in Terms of Efficiency and Sensorless Control in Traction Applications, 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 7-10.11.2011, Melbourne, 2011
- [Dem11c] F. Demmelmayr, M. Schrödl, A. Eilenberger, Sensorloser Betrieb von PM-Außenläufermaschinen mit konzentrierten Wicklungen, in: OVE Elektrotechnik & Informationstechnik, e&i Heft 3.2011, 128/3: S.68–74, Springer Verlag, Wien, 2011
- [Eil11] A. Eilenberger, Permanent Magnet Synchronous Machines With Tooth Coils For Sensorless Control Including Overload Range, Dissertation, Technische Universität Wien, 2011
- [Fay00] G. Fay, Farmall Tractors in the 1950s, MBI Publishing Company, Osceola (WI), USA, 2000, 0-7603-0762-8
- [Fel03] P. Fellmeth, Reibungslose Kommunikation zwischen Traktor und Anbaugeräten, in: Elektronik Automotive - Ausgabe 6/2003, S.65-60, WEKA Fachmedien, Haar, 2003
- [Fis01] R. Fischer, Elektrische Maschinen, Carla Hanser Verlag, Esslingen, 2001
- [Gal09] M. Gallmeier, Vergleichende Untersuchungen an hydraulischen und elektrischen Baugruppenantrieben für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen, Dissertation, Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik, TU München, 2009

- 
- [Gar02] B. Gardner, American Agriculture in the Twentieth Century: How It Flourished and What It Cost, Verlag Harvard University Press, 2002, 978-0-6740-0748-2
- [Gei10] M. Geißler, W. Aumer, M. Lindner, T. Herlitzius, Elektrifizierter Radnabenantrieb im Traktor, 68. Internationale Tagung Landtechnik 2010, VDI-Berichte Nr. 2111, S. 363 – 370, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2010.
- [Gro07] H. Grohe, G. Russ, Otto- und Dieselmotoren, 14. Auflage, Vogel Buchverlag, 2007, 978-3-8343-3078-9
- [Gsc08] R. Gscheidle, Tabellenbuch Kraftfahrzeugtechnik, 16. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, 2008
- [Han11] C. Hangweirer, Nachbildung der Lastcharakteristik von Landmaschinen und Ersatz des mechanischen Antriebs durch PM-Synchronmaschinen, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe, 2011
- [Hei10] S. Heinzmann, Die visuelle Biografie Ferdinand Porsche 1875-1951: heinzmann collection Berühmte Erfinder, Verlag tredition, 2010, 978-3-8685-0913-7
- [HGH11] A. Heidenreich, S. Gabler, J. U. Hopf, Kleines 1x1 der Normung - Ein praxisorientierter Leitfaden für KMU, Verlag ERGO Industrie-Verlag, Berlin, 2011
- [Hor07] J. Horstmann, H. Auernhammer, M. Gallmeier, R. Ostermeier, Optimierung im Exakt-Feldhäcksler zur Energiereduzierung bei der Zerkleinerung und zur Qualitätssicherung des Häckselgutes - Abschlussbericht der Technischen Universität München über ein Entwicklungsprojekt der Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Technischen Universität München, 2007
- [ISO11a] International Organization for Standardization - ISO, 2012, International Harmonized Stage Code  
Available online at [http://www.iso.org/iso/stage\\_codes.pdf](http://www.iso.org/iso/stage_codes.pdf) - 1.7.2012
- [ISO11b] International Organization for Standardization - ISO, 2012, List of Abbreviations  
Available online at [http://www.iso.org/iso/support/faqs/faqs\\_list\\_abbreviations.htm](http://www.iso.org/iso/support/faqs/faqs_list_abbreviations.htm) - 14.4.2012
- [ISO12] International Organization for Standardization - ISO, 2012, Stages of the Development of International Standards

---

Available online at [http://www.iso.org/iso/standards\\_development/processes\\_and\\_procedures/stages\\_description.htm](http://www.iso.org/iso/standards_development/processes_and_procedures/stages_description.htm) - 14.4.2012

- [Iza09] M. Izaak, Optimierung des Übergangs zwischen INFORM und EMK basierter sensorloser Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen, Dissertation, Technische Universität Wien, 2009
- [Kal12] G. Kalteis, Sensorloser Betrieb von permanentmagneterregten Synchronmaschinen mit Sinus- und Blockkommutierung bis Stillstand, Dissertation, Technische Universität Wien, 2012
- [Kar12a] J. Karner, H. Prankl, F. Kogler, Electric Drives in Agricultural Machinery, CiGR-AgEng, Valencia, Spanien, 8.-12.7.2012
- [Kar12b] J. Karner, H. Prankl, F. Kogler, Erwartungshaltung der österreichischen Landtechnik-Industrie hinsichtlich elektrischer Antriebe. VDI-Berichte Nr. 2173, VDI-MEG Land.TECHNIK, 06./07.11.2012, Karlsruhe, 2012
- [Kla09] L. Klancher, R. Leffingwell, Legendary Farmall Tractors, Voyageur Press, 2009, 978-0-7603-3536-9
- [Kog09] F. Kogler, Optimierung Elektrischer Antriebe, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2009
- [Kog12] F. Kogler, J. Heissenberger, M. Schrödl, M. Hofinger, J. Karner, H. Prankl, G. Kalteis, E. Prandt-Stritzko, Optimierung einer Mäher-Aufbereiterwelle durch einen elektrischen Antrieb, in: Landtechnik - Agricultural Engineering, 6/2012, S.425-428, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt, Deutschland, 2012
- [Köh11] E. Köhler, R. Flierl, Verbrennungsmotoren - Motormechnik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors, 6. Auflage, Verlag Vieweg+Teubner, 2011
- [Kve10] Fa. Kverneland, Presseaussendung 1.4.2010: Elektrischer Antrieb GEOseed® eröffnet völlig neue Möglichkeiten, Kverneland Group, Kverneland, Norway, 2010  
Available online at <http://de.kvernelandgroup.com/News-und-Medien/Neuigkeiten/Archiv-2010/GEOseed> - 2.2.2013
- [Lef99] R. Leffingwell, International Harvester Tractors, MBI Publishing Company, Osceola (WI), USA, 1999, 0-7603-0423-8

- [Mat08] H. J. Matthies, K. T. Renius, Einführung in die Ölhydraulik, 6. Auflage, Verlag Vieweg+Teubner, 2008
- [Moe11] M. Möhrer, Landwirtschaftliche Geräte mit elektrischen Antrieben – Anforderungen an die traktorseitige Technik, VDI-MEG Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik, Wieselburg, 05.-06.07.2011
- [Moh11] M. Mohr, Vergleich zwischen Elektrifizierung und Hybridisierung bei Traktoren, VDI-MEG Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik, Wieselburg, 05.-06.07.2011  
Available also online at [http://www.bl.t.bmlfuw.gv.at/vero/veranst/056\\_Elektrische\\_Antriebe\\_in\\_der\\_Landtechnik/Vortraege/05\\_Mohr/20110705\\_Praesentation\\_Elektroantriebe\\_Mohr.pdf](http://www.bl.t.bmlfuw.gv.at/vero/veranst/056_Elektrische_Antriebe_in_der_Landtechnik/Vortraege/05_Mohr/20110705_Praesentation_Elektroantriebe_Mohr.pdf) - 30.1.2013
- [MuP05] G. Müller, B. Ponick, Grundlagen elektrischer Maschinen, 9. Auflage, Verlag WILEY-VCH, Weinheim, 2006, 978-3-527-40524-4
- [Nau] D. Naunin, et. al., Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge, 4. Auflage, Expert Verlag, Renningen, 2007, 978-3-8169-2625-2
- [NeH09] Fa. New Holland, Produktinformation: New Holland NH2™ Hydrogen Powered Tractor, New Holland Brand Communications, Turin, Italy, 2009  
Available also online at [http://www.thecleanenergyleader.com/filemanager/cms\\_newholland/images/NH2\\_detail/NH2\\_90014\\_INB.pdf](http://www.thecleanenergyleader.com/filemanager/cms_newholland/images/NH2_detail/NH2_90014_INB.pdf) - 1.2.2013
- [NeH11] Fa. New Holland, Presseaussendung 15.11.2011: New Holland presents the first NH2™ hydrogen powered tractor ready to go into service on a farm , CNH Global N. V., Amsterdam, Niederlande, 2009  
Available online at [http://agriculture.newholland.com/uk/en/WNH/news/Pages/2011\\_NH2\\_news.aspx](http://agriculture.newholland.com/uk/en/WNH/news/Pages/2011_NH2_news.aspx) - 1.2.2013
- [Neu10] H. Neudorfer, Elektrofahrzeuge und Bahnen, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe, 2010
- [Poc11] Fa. Poclain Hydrauliks, MW14 Hydraulikmotoren  
Available online at <http://www.poclain-hydraulics.com/portals/0/technical%20catalogs/A05697S.pdf> - 22.3.2011
- [Poe13] Fa. Pöttinger, Pressefoto: Eurocat ED Detailansicht  
Available online at [http://www.poettinger.at/de/presse\\_bild/94/eurocat-ed-detailansicht/](http://www.poettinger.at/de/presse_bild/94/eurocat-ed-detailansicht/) - 10.4.2013

- 
- [Pra10] H. Prankl, M. Nadlinger, F. Demmelmayr, M. Schrödl, T. Colle, G. Kalteis: Mobile Electric Power Supply for Agricultural Machinery and Implements, International Conference on Agricultural Engineering - AgEng 2010, 6.-8.9.2010, Clermont-Ferrand, France, 2010
- [Pra11] H. Prankl, M. Nadlinger, F. Demmelmayr, M. Schrödl, T. Colle, G. Kalteis: Multi-Functional PTO Generator for Mobile Electric Power Supply of Agricultural Machinery, VDI-MEG Land.TECHNIK - AgEng 2011, 11.-12.11.2011, S. 7-13, Hannover, Deutschland, 2011
- [Rau10] N. Rauch, Experiences and visions of an implement manufacturer, 21st EIMA International, 13-14.11.2010, Bologna
- [Rem11] Fa. Remy Electric Motors, Remy HVH250 Series Electric Motors Available online at [http://www.remyinc.com/docs/HVH250\\_r3\\_Sept\\_2010.pdf](http://www.remyinc.com/docs/HVH250_r3_Sept_2010.pdf) - 21.3.2011
- [Rie05] U.-H. Rieder, Optimierung der sensorlosen Regelung von permanentmagneterregten Aussenläufer-Synchronmaschinen, Dissertation, Technische Universität Wien, 2005
- [Rob03] E. Robeischl, Optimierung der sensorlosen Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen und Anwendung in einem kosteneffizienten Positionierantrieb, Dissertation, Technische Universität Wien, 2003
- [Rus37] Two-Way Electric Plow in Use in Soviet Russia, Science Newsletter Vol.32 #863, 23.10.1937, Washington D.C., USA, 1937, ISSN 0036-8423
- [Sch88] M. Schrödl, Detection of the rotor position of a permanent magnet synchronous machine at standstill, International Conference on Electrical Machines, ICEM, 1988
- [Sch92] M. Schrödl: Sensorless Control of AC Machines, Habilitationsschrift, VDI-Verlag, VII, Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 21 Elektrotechnik, Nr. 117, 1992, ISBN 3-18-141721-1
- [Sch96] M. Schrödl, Sensorless Control of AC Machines at Low Speed and Standstill based on the "INFORM" Method, 31. IEEE-IAS Meeting, San Diego, USA, Band 1, S.270–277, 1996
- [Sch98] M. Schrödl, Elektrische Antriebe und Maschinen, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe, 1998

- 
- [Sch00] M. Schrödl, Drehstromantriebe mit Mikrorechnern, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe, 2000
- [Sch09] M. Schrödl, A. Eilenberger, F. Demmelmayr, Effizienter, kurzschlussfester Direktantrieb mit Außenläufer-PSM für geberlosen Betrieb einschließlich Stillstand und Überlast, Internationaler VDE-ETG-Kongress 27.-28.10.2009, Düsseldorf, 2009
- [Sei09] R. Seiffert, Die Ära Gottlieb Daimlers: Neue Perspektiven zur Frühgeschichte des Automobils und seiner Technik, Vieweg + Teubner research, Verlag Springer, 2009, 978-3-5319-1889-1
- [Smi11] B. Schmid, Elektrischer Radantrieb, in: Bauernzeitung - Die Grüne, 21/2011, S.31-33, Schweizer Agrarmedien GmbH, Bern, 2011
- [Srä09] D. Schrägle, Hybridantrieb für mobile Arbeitsmaschinen mit 750-VDC-bordnetz für Zusatzaggregate und Anbaugeräte, in: Power World, 03/2009, S.30-31, Verlag Techtex, Budenheim, 2009, ISSN 1860-0913
- [Sta11] V. Staudt, VDI-MEG Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik, Wieselburg, 05.-06.07.2011  
Available also online at [http://www.blt.bmlfuv.gv.at/vero/veranst/056\\_Elektrische\\_Antriebe\\_in\\_der\\_Landtechnik/Vortraege/12\\_Staudt/Spezifikation\\_Steckdose\\_Wieselburg\\_2011\\_07.pdf](http://www.blt.bmlfuv.gv.at/vero/veranst/056_Elektrische_Antriebe_in_der_Landtechnik/Vortraege/12_Staudt/Spezifikation_Steckdose_Wieselburg_2011_07.pdf) - 28.1.2013
- [Spe62] C. Spence, Early Uses of Electricity in American Agriculture, in: Technology and Culture, Vol. 3, No. 2 (Spring, 1962), pp. 142-160, The Johns Hopkins University Press on behalf of the Society for the History of Technology, 1962
- [Thi12] P. Thiebes, Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Band 10, Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen, KIT Scientific Publishing, 2012, 978-3-8664-808-7
- [Upd00] K. Updike, International Harvester Tractors 1955-1985, MBI Publishing Company, St. Paul (MN), USA, 2000, 978-0-7603-0682-6
- [Vog96] K. Vogt, Berechnung elektrischer Maschinen, Verlag VCH, 1996, 3-527-28391-9



## Abbildungsverzeichnis

1.1	Projektlogo . . . . .	2
2.1	Gepflanztes Logo mit GPS-Unterstützung . . . . .	6
2.2	Schnittstelle eines modernen Traktors . . . . .	7
3.1	Lohner-Porsche, 1899 . . . . .	8
3.2	Radnabenmotor nach Porsche . . . . .	9
3.3	Moderner Radnabenmotor . . . . .	9
3.4	Elektrischer selbstfahrender Pflug, 1973 . . . . .	10
3.5	IHC Farmall mit seitlich montiertem Electrall . . . . .	11
3.6	John Deere E-Premium . . . . .	12
3.7	Rigitrac . . . . .	12
4.1	Einteilung der Elektromotoren nach Anspeisung . . . . .	14
4.2	ASM Rotoraufbau, Stabformen . . . . .	17
4.3	Leistungsverluste der ASM . . . . .	18
4.4	Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl . .	19
4.5	Momentenkennlinie Generator- und Motorbetrieb . . . . .	20
4.6	Momentenkennlinien bei Änderung von Frequenz und Strangspannung . . . . .	21
4.7	Kennlinien der ASM . . . . .	21
4.8	Drehmomentenbildung bei der ASM . . . . .	22
4.9	ASM Regelschema . . . . .	23
4.10	PSM Rotoraufbau, Magnetanordnung . . . . .	25
4.11	PSM Vergleich eines Innenläufers und Außenläufers . . . . .	25
4.12	Leistungsverluste der PSM . . . . .	26
4.13	Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl . .	27
4.14	Kennlinien der PSM . . . . .	28
4.15	Drehmomentenbildung bei der PSM . . . . .	28
4.16	PSM Regelschema . . . . .	29
4.17	Die vier Takte einer VKM . . . . .	31
4.18	Querschnitt eines Zylinders des Dieselmotors . . . . .	32
4.19	Piezoinspritzdüse eines Zylinders des Dieselmotors . . . . .	32
4.20	Zustandsänderung im Seiliger-Prozess . . . . .	33
4.21	Zustandsänderung eines abgasturboaufgeladenen Motors . . . . .	34
4.22	Kennlinien der VKM . . . . .	35
4.23	Leistungsverluste einer VKM . . . . .	35
4.24	Verbrauchskennliniefeld PKW Dieselmotor . . . . .	36
4.25	Blockschaubild zur Leistungsübertragung in hydraulischen Systemen	37
4.26	Antrieb eines Hydrozylinders . . . . .	38
4.27	Antrieb eines Hydromotors . . . . .	38
4.28	Schema einer Hebevorrichtung mit Pump- und Hubzylinder . . . . .	39
4.29	Schema einer Pumpe mit rotierendem Verdränger . . . . .	39
4.30	Hydraulikmotor - Anlaufdrehmomentverhalten über Druckdifferenz	40

---

4.31	Förderstrom einer Hydraulikkolbenpumpe . . . . .	40
4.32	Muschelkurve einer Axialkolbenpumpe . . . . .	41
4.33	Vergleich der Wirkungsgrade von hydraulischen und elektrischen Antrieben . . . . .	45
5.1	International Harmonized Stage Codes . . . . .	52
6.1	Gruppeneinteilung der Hersteller . . . . .	68
7.1	Isobus Technolgieübersicht . . . . .	69
7.2	Isobus Komponenten . . . . .	70
7.3	AEF Pinbelegung . . . . .	72
7.4	Schnittstellenvorschlag der AEF . . . . .	72
7.5	Gesteckte Verbindung . . . . .	73
7.6	Gleichspannungsschnittstelle . . . . .	73
7.7	Wechselspannungsschnittstelle . . . . .	74
7.8	Kombinierte Schnittstelle . . . . .	75
8.1	MELA Antriebseinheit . . . . .	76
8.2	Terra+ Antriebseinheit . . . . .	76
8.3	E-Premium Schematik . . . . .	77
8.4	Belarus 3023 . . . . .	77
8.5	Rigitrac Radnabe mit Reifen . . . . .	78
8.6	Rigitrac Fahrwerk mit vier Radnabenmotoren . . . . .	78
8.7	Amazone UX eSpray Schema . . . . .	79
8.8	CNH NH2 . . . . .	79
8.9	Rauch Düngerstreuer . . . . .	79
8.10	Rauch Düngerstreuer Antrieb . . . . .	79
8.11	Rauch - Streufeld . . . . .	79
8.12	Dreschtrommel - Schema des Antriebs . . . . .	80
8.13	Mähdrescher - Schema von Vorsatz und Einzug . . . . .	81
8.14	Übersicht hybridisierter Arbeitsmaschinen . . . . .	82
9.1	Bediengerät - Grafische Anzeige mit Touchscreen . . . . .	85
9.2	Zapfwellengenerator - Konstruktionsskizze . . . . .	86
9.3	Skizze des Generators . . . . .	87
9.4	Flussdichten eins Stator-Rotor-Ausschnittes . . . . .	88
9.5	Rotor und Stator im Querschnitt . . . . .	88
9.6	Radiale Sicht auf Rotor . . . . .	89
9.7	Schema der Elektronik mit Generator . . . . .	89
9.8	Umrichtereinheit . . . . .	90
9.9	Verschiedene Ansichten des Zapfwellengenerators . . . . .	91
9.10	Schema des ZWG mit Sicherheitseinrichtungen . . . . .	92
9.11	Anzeige des im ZWG eingebauten Isolationswächters . . . . .	93
9.12	Zapfwellengenerator Kenndaten . . . . .	94
9.13	Stromanstiegsmessung zur Induktivitätsbestimmung . . . . .	94
9.14	Eingangseitiges Regelschema des ZWG . . . . .	98
9.15	Betriebsbereiche des ZWG . . . . .	100

---

10.1	Kreiselschwader . . . . .	101
11.1	Aufbereiterwelle . . . . .	102
11.2	Rohrmotor einer Aufbereiterwelle . . . . .	103
11.3	Mähwerk mit Industrieelektrokomponenten . . . . .	104
12.1	Skizze eines Traktors mit Grubber . . . . .	105
12.2	Die umgebaute Grubberwalze . . . . .	106
13.1	Messaufbau – Verschiedene Variationen eines Messablaufs . . . . .	109
13.2	ZWG am Prüfstand . . . . .	110
13.3	Motor am Prüfstand . . . . .	111
13.4	Skizze des Aufbereiterwellenprüfstandes . . . . .	111
13.5	Temperatursensoren am Stator . . . . .	113
13.6	Temperatursensoren am Rotor . . . . .	113
13.7	Infrarottemperaturmessung am Rotor . . . . .	114
14.1	Statortemperatur . . . . .	115
14.2	Leistungsverlauf am Lastwiderstand . . . . .	116
14.3	Temperaturen des Zapfwellengenerators . . . . .	117
14.4	Hochsetzbetrieb im Leerlauf . . . . .	118
14.5	Verkoppelungsschwingungen beim Hochsetzen . . . . .	119
14.6	Lastaufschaltung . . . . .	120
14.7	Lastabwurf mit Bremschopperbetrieb . . . . .	121
14.8	Muschelkurve des Generators . . . . .	122
14.9	Muschelkurve des Generators . . . . .	123
14.10	Treppenverlauf bei Leistungsänderung am 3x400 V-Ausgang . . . . .	124
14.11	Ein- und Ausschalten kleiner Lasten . . . . .	126
14.12	Ein- und Ausschalten hoher Lasten . . . . .	127
14.13	Signalqualität unter verschiedenen Lasten . . . . .	128
14.14	Treppenverlauf bei Leistungsänderung am 1x230 V-Ausgang . . . . .	129
14.15	Ein- und Ausschalten von halber Last und Nennlast . . . . .	130
14.16	Signalqualität unter verschiedenen Lasten . . . . .	131
14.17	ASM Betrieb . . . . .	132
14.18	Verkettete Spannung beim Einschalten und Hochfahren einer ASM . . . . .	133
14.19	Resonanzen im ZWG Betrieb mit Getriebemotor . . . . .	134
14.20	Systemverhalten bei dynamischer Betriebspunktänderung . . . . .	135
15.1	Erwärmungslauf . . . . .	136
15.2	Muschelkurve der Aufbereiterwelle . . . . .	137
15.3	Lastprofil der Aufbereiterwelle . . . . .	138
15.4	Momentenkennlinie des Getriebemotors . . . . .	139
15.5	Verschiedene Belastungen bei Nenndrehzahl im EMK-Betrieb . . . . .	140
15.6	Lastprofil eines Kreiselschwaders . . . . .	140
15.7	Einschaltvorgang bei verschiedenen Drehzahlen . . . . .	141
15.8	Muschelkurve des Getriebemotors . . . . .	142
15.9	Momentenkennlinie des getriebelosen Motors . . . . .	143
15.10	Verschiedene Belastungen bei Nenndrehzahl im EMK-Betrieb . . . . .	144

---

15.11	Muschelkurve des getriebelosen Motors mit HTD Umrichter . . .	145
15.12	Muschelkurve des getriebelosen Motors mit Refu Umrichter . . .	145
16.1	Regelungsabschnitte beim Startvorgang . . . . .	148
16.2	Sektorumschalten bei Erreichen der Kommutierungsschwelle . . .	149
16.3	Getriebemotor - Hochlaufversuche . . . . .	150
16.4	Getriebemotor - INFORM-Hochlauf . . . . .	151
16.5	Getriebemotor - Hochlaufstatistik . . . . .	152
16.6	INFORM-Statistikvergleich - Getriebemotor . . . . .	153
16.7	Rückdrehen durch Massenträgheit bei Hochlauf . . . . .	154
16.8	Lagegebervergleich - Getriebemotor . . . . .	155
16.9	Getriebemotor - EMK-Winkelfehlerstatistik . . . . .	156
16.10	EMK-Vergleich - Getriebemotor . . . . .	157
16.11	Getriebeloser Motor - Hochlaufversuche mit Last . . . . .	158
16.12	Getriebeloser Motor - Hochlaufversuche ohne Last . . . . .	159
16.13	Getriebeloser Motor - INFORM-Hochlauf mit Last . . . . .	159
16.14	Getriebeloser Motor - Hochlaufstatistik mit Last . . . . .	161
16.15	INFORM-Statistikvergleich - getriebeloser Motor mit Last . . . . .	162
16.16	Getriebeloser Motor - INFORM-Hochlauf ohne Last . . . . .	162
16.17	Getriebeloser Motor - Hochlaufstatistik ohne Last . . . . .	163
16.18	INFORM-Statistikvergleich - getriebeloser Motor ohne Last . . . . .	164
16.19	Lagegebervergleich - getriebeloser Motor . . . . .	165
16.20	Getriebeloser Motor - EMK-Winkelfehlerstatistik . . . . .	166
16.21	EMK-Vergleich - getriebeloser Motor . . . . .	167
16.22	Vergleich verschiedener INFORM-Umschaltkriterien . . . . .	168
17.1	Gesamtpaket im Feldeinsatz . . . . .	169
17.2	Blick in den Schaltschrank mit Umrichter und Messgeräten . . . . .	170
17.3	Verlauf von Leistung, Drehzahl und Fahrgeschwindigkeit des Feld- versuches . . . . .	171
17.4	Wirkungsgradverlauf . . . . .	172
17.5	Hochlaufvergleich . . . . .	173
C.1	Rohrmotor am Prüfstand . . . . .	204
C.2	Rohrmotor Kenndaten . . . . .	204
C.3	Induktivitätsmessung im Rohrmotor . . . . .	205
C.4	Typenschild SEW . . . . .	207
C.5	Getriebemotor am Prüfstand . . . . .	207
C.6	Getriebemotor Kenndaten . . . . .	208
C.7	Induktivitätsmessung im Getriebemotor . . . . .	208
C.8	Typenschild Schabmüller . . . . .	210
C.9	Getriebeloser Motor am Prüfstand . . . . .	210
C.10	Getriebeloser Motor Kenndaten . . . . .	211
C.11	Induktivitätsmessung im getriebelosen Motor . . . . .	211
D.1	Messwelle . . . . .	212
D.2	Zapfwellengleichstrommaschine . . . . .	213

D.3	Lastmaschine . . . . .	213
D.4	Simoreg-Umrichter . . . . .	214
D.5	Refu-Umrichter . . . . .	214
D.6	Drehmomentmessung an der Pendelmaschine . . . . .	215
D.7	Funkttemperaturmessung . . . . .	216
D.8	Infrarottemperaturmessung . . . . .	216
F.1	Schnittstellen des Umrichters . . . . .	221



## Tabellenverzeichnis

4.1	Gegenüberstellung der Eigenschaften von ASM und PSM . . . . .	30
4.2	Vergleich der Antriebe . . . . .	42
C.1	Kenndaten des Zapfwellengenerators . . . . .	202
C.2	Kenndaten des Rohrmotors . . . . .	203
C.3	Kenndaten des Getriebemotors . . . . .	206
C.4	Kenndaten des getriebelosen Motors . . . . .	209
F.1	Grunddaten Umrichter . . . . .	220
F.2	Sicherheitsaspekte . . . . .	220
F.3	Schnittstellen des Umrichters . . . . .	222
G.1	Die wichtigsten Parameter am DC Master . . . . .	225
G.2	Die wichtigsten Parameter am Refu-Umrichter . . . . .	227



## Nomenklatur

### Abkürzungen

AEF	Agricultural Industry Electronics Foundation
ASM	Asynchronmaschine
CNH	Case New Holland
COMET	Competence Centers for Excellent Technologies
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EMK	Elektromotorische Kraft (back-EMF)
EN	European Norm
FEM	Finite Elemente Methode
GSM	Gleichstrommaschine
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
IHC	International Harvester Company
Inform	Indirekte Flussermittlung durch Online Reaktanzmessung
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunication Union
JTAG	Joint Test Action Group
oe	oesterreichs energie
ON	Österreichische Norm
ONR	ON-Regel
PSM, PMSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine
PFM	Pulsfrequenzmodulation
PWM	Pulsweitenmodulation
SC	Sub Committee
SM	Synchronmaschine
SVB	Sozialversicherungsanstalt der Bauern
TC	Technical Committee
TI	Texas Instruments
TR	Technical Report
UV	Ultraviolett
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
VCD	Gleichspannung
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WSM	Wechselstrommaschine

---

ZWG Zapfwellengenerator

### Formelzeichen

$A$	Fläche
$B$	magnetische Flussdichte
$F$	Kraft
$f$	Frequenz
$I, i$	Effektivwert des Stroms, bezogener Strom
$k$	beliebiger Faktor
$L, l$	Induktivität, bezogene Induktivität
$l$	Länge
$M, m$	Moment, bezogenes Moment
$n$	Drehzahl
$P, p$	Leistung, bezogene Leistung
$p$	Druck, Polpaarzahl
$Q$	Volumenstrom
$R, r$	Widerstand, bezogener Widerstand
$s$	Weg, Schlupf
$T, t$	Zeit, bezogene Zeit
$U, u$	Effektivwert der Spannung, normierte Spannung
$v$	Geschwindigkeit
$X$	Reaktanz
$\delta$	Länge
$\Omega, \omega$	Winkelgeschwindigkeit, bezogene Winkelgeschwindigkeit
$\Phi$	magnetischer Fluss
$\Psi, \psi$	Verkettungsfluss, bezogener Verkettungsfluss
$\eta$	Wirkungsgrad
$\sigma$	Streukoeffizienten
$j$	$\sqrt{-1}$
$X, \underline{X}$	Skalar, Vektor in komplexer Ebene (Realteil, Imaginärteil)

### Indizes

act	actual, Istwert
ab	abgeführt
Cu	Kupfer
d	d-Anteil des rotorfesten dq-Koordinatensystems
DC	Zwischenkreis, DC Link

---

elek.	elektrisch
F	Feldversuch
Fe	Eisen
g	Grenze
ges	Gesamt
H	Hysterese
hm	hydraulisch-mechanisch
hydr.	hydraulisch
K	Kipp
L	Laborversuch
M	Magnete (Rotor)
mech.	mechanisch
N	Nenn
q	q-Anteil des rotorfesten dq-Koordinatensystems
R	Reibung, Rotor
ref	reference, Sollwert
rot.	rotatorisch
S	Stator
th	thermisch
trans.	translatorisch
vol	volumetrisch
W	Wirbelstrom
zu	zugeführt
$\alpha$	$\alpha$ -Anteil des statorfesten $\alpha\beta$ -Koordinatensystems
$\beta$	$\beta$ -Anteil des statorfesten $\alpha\beta$ -Koordinatensystems
$\sigma$	Streuung



## Curriculum Vitae



### Angaben zur Person

Name	Florian Erich Hermann Kogler
Geboren	16.08.1982, Klagenfurt
Nationalität	Österreich
Adresse	Ossiacher Zeile 30/22, A-9500 Villach

### Ausbildung

2009 - 1013	Doktoratsstudium der Elektrotechnik, TU Wien
2003 – 2009	Diplomstudium der Technischen Physik, TU Wien
1997 – 2002	HTBLuVA Villach, Abteilung EDV und Organisation
1993 - 1997	BG Perau, Villach
1989 - 1993	VS Völkendorf, Villach

### Berufserfahrung und Praktika

seit 2009	Projektassistent, Inst. f. Energiesysteme und Elekt. Antriebe, TU Wien
seit 2008	Vorträge und Experimente zu Physik Arge Physikmobil, Wien
2007 - 2009	Kraftwerksführungen, Donaukraftwerk Freudenu, Wien
2005 - 2009	Tutor, Institut für Festkörperphysik, TU Wien

- 
- 2007           Praktikum bei SEZ AG Villach  
                   Prozessentwicklung
- 2005 - 2007   Mitarbeit und Organisation bei den Konferenzen  
                   ICU'07, VCI'07, EUCAS '05
- 2003 - 2005   Praktika bei Infineon Villach  
                   Prozesstechniken, Prozessstatistiken, Qualitätssicherung

### Publikationen

- 2013  
 accepted       F. Kogler, J. Heissenberger, et. al., PTO Generator driven electrical components for various agricultural usage, LAND.TECHNIK – AgEng 2013, 8.-9.11.2013, Hannover, Deutschland
- 2013  
 accepted       J. Heissenberger, F. Kogler, et. al., Development of an integrated tubular electric drive for rotating shafts in agricultural applications, LAND.TECHNIK – AgEng 2013, 8.-9.11.2013, Hannover, Deutschland
- 2012           F. Kogler, J. Heissenberger, M. Schrödl, M. Hofinger, J. Karner, H. Prankl, G. Kalteis, E. Prandt-Stritzko, Optimierung einer Mäher-Aufbereiterwelle durch einen elektrischen Antrieb, in: Landtechnik - Agricultural Engineering, 6/2012, S.425-428, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt, Deutschland
- 2012           J. Karner, H. Prankl, F. Kogler, Electric Drives in Agricultural Machinery, CiGR AgEng, Valencia, Spanien, 8.-12.7.2012
- 2012           J. Karner, H. Prankl, F. Kogler, Erwartungshaltung der österreichischen Landtechnik-Industrie hinsichtlich elektrischer Antriebe. VDI-Berichte Nr. 2173, VDI-MEG Land.Technik, 06./07.11.2012, Karlsruhe
- 2009           F. Kogler, Optimierung Elektrischer Antriebe, Diplomarbeit, Technische Universität Wien
- 2009           A. Eilenberger, J. Heissenberger, F. Kogler, M. Schroedl, Comparison of outer rotor PMSM with different pitch factors of  $q=1/2$  and  $q=1/4$  at same rotor geometry, IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami.



Elektrische Antriebe in der Landtechnik  
Florian Erich Hermann Kogler  
TU Wien, 2013

