

Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH
Spelle

**Optimierung im Exakt-Feldhäcksler zur
Energiereduzierung bei der Zerkleinerung und zur
Qualitätssicherung des Häckselgutes**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter den AZ: 23326 von der

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. J. Horstmann (KRONE)
Prof. Dr. H. Auernhammer (TUM)
Dipl.-Ing. (FH) M. Gallmeier (TUM)
Dipl.-Ing. R. Ostermeier (TUM)

Juli 2007

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	23326	Referat	21/0	Fördersumme	125.000,00 €
Antragstitel	Optimierung im Exakt-Feldhäcksler zur Energiereduzierung bei der Zerkleinerung und zur Qualitätssicherung des Häckselgutes				
Stichworte	Energie; Abgas; Verfahren				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
20 Monate	26.08.05	26.04.07	1		
Zwischenberichte:	alle 6 Monate Kurzbericht				
Bewilligungsempfänger	Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH Heinrich-Krone-Str. 10 48480 Spelle			Tel	05977/935-0
				Fax	05977/935319
				Projektleitung Dr.-Ing. Horstmann	
				Bearbeiter	
Kooperationspartner	Technische Universität München, Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Der Feldhäcksler hat sich in den vergangenen Jahren zur Schlüsselmaschine in der Silagekurzgutkette entwickelt. Bei zunehmenden Motorleistungen treten jedoch zwei Probleme in den Vordergrund: Zum einen verringern sich durch die weitgehend starre Kopplung der angetriebenen Bauteile im Häcksler die Wirkungsgrade und führen zu einem überhöhten Energiebedarf mit negativen ökonomischen und ökologischen Effekten. Zum anderen kann die geforderte gleichmäßige Häcksellänge ohne Überlängen nicht mehr garantiert werden, weil objektiv arbeitende Hilfsmittel zur Erkennung der Messerschärfe und zur ständigen Nachstellung der Gegenschneide fehlen. Als Problemlösungen bieten sich an: Entwicklungen im Bereich elektrischer Antriebstechnik ermöglichen entkoppelbare Lösungsansätze bei gesteigerten Wirkungsgraden. Deren Eignung für den mobilen Einsatz in Erntemaschinen soll vergleichend zur konventionellen Technik bewertet und die möglichen Potentiale quantifiziert werden (Teilziel 1). Für garantiert gleichbleibende Häcksellängen soll ein neuer und vielversprechender Ansatz über „intelligente Wälzlager“ versucht werden. Diese sollen mit ihren sensorischen Möglichkeiten zur Erkennung nachlassender Messerschärfe und schlecht eingestellter Gegenschneiden herangezogen werden. Zudem ist zu untersuchen, inwieweit die Belastungssignale aus den Vorpressewalzen und der Häckseltrommel das Antriebsstrangmanagement positiv beeinflussen können (Teilziel 2).

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Eine Aufgliederung der beiden Teilziele in je drei Versuchseinheiten erlaubt eine parallele Bearbeitung:

- Teilziel 1:**
- I-I Entwicklung eines diesel-elektrisch betriebenen Maiseerntevorsatzes als Grundlage für eine vergleichende Bewertung hydraulisch-mechanischer und elektrischer Antriebssysteme
 - I-II Feldversuche als Grundlage für Prüfstandsversuche zur Ermittlung typischer Antriebsbelastungen zur Steuerung des Prüfstandes und Validierung der Prüfstandsversuche
 - I-III Prüfstandsversuche zur reproduzierbaren Ermittlung der Triebstrangwirkungsgrade und Bewertung des hydraulisch-mechanischen und elektrischen Vorsatzantriebes
- Teilziel 2:**
- II-I Grundlegende Prüfstandsversuche zur Messgrößenbereitstellung für Steuerungs- und Regelungsprozesse und Zustandsüberwachung
 - II-II Feldversuche zur Messgrößenbereitstellung für Steuerungs- und Regelungsprozesse, Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) und Betriebsdatendokumentation
 - II-III Signalcharakterisierung und systemtheoretische Bewertung

Ergebnisse und Diskussion

Auf Basis von in Feldversuchen gewonnenen Lastkollektiven der hydraulischen Antriebe wurde ein diesel-elektrischer Antriebsstrang für Vorsatz und Einzug eines selbstfahrenden Feldhäckslers aufgebaut und in eine Serienmaschine vollständig integriert. Zur Bewertung des Wirkungsgradverhaltens wurden Vorsatz und Einzug gleichzeitig über den Leistungsmesswagen der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft dynamisch belastet. Wobei diese Belastungszyklen die typischen Lastschwankungen mit Lastniveau und Gradient und Wechselwirkungen zwischen beiden Baugruppen statistisch nachbilden.

Diese Prüfstandsversuche zu stationären und dynamischen Betriebspunkten zeigen deutliche Wirkungsgradunterschiede zwischen dem serienmäßig hydraulischen und dem neuen elektrischen Triebstrang auf. Der Einsatz elektrischer Baugruppenantriebe würde den Wirkungsgrad in der Leistungsübertragung von ca. 70 % auf 85 % unter Volllast bei typischen Einsatzbedingungen erhöhen. Im Teillastbereich vergrößert sich der Vorteil weiter auf über 25 %, da die elektrische Leistungsübertragung ein wesentlich geringere Lastabhängigkeit aufweist als die hydraulische.

Allerdings liegt der Schlüssel für einen Serieneinsatz der elektrischen Antriebe in mobilen Arbeitsmaschinen in der Optimierung der Elektromaschinen hinsichtlich Leistungsgewicht. Im Projekt wurden Antriebe mit einem Leistungsgewicht von ca. 6 kg/kW verbaut, hochspezialisierte Lösungen erreichen hingegen die Vorgabe der hydraulischen Komponenten von ca. 1 kg/kW. Die Funktionssicherheit wurde in Feldversuchen 2006 beim Ernten von über 100 ha Silomais unter Beweis gestellt.

Im Bereich des „Intelligenten Kugellagers“ konnten mit dem entworfenen und gebauten Prüfstand die grundsätzlichen Untersuchungen zur Eignung der „Intelligenten Wälzlager“ für landtechnischen Einsatz erfolgreich durchgeführt werden. Das steady state - Verhalten der untersuchten Konfigurationen kann durchaus positiv eingeschätzt werden. Sowohl Radialkraft und Lastwinkel als auch Drehzahl sind durch lineare Abhängigkeit einfach zu kalibrieren und mit hoher Grundgenauigkeit von $\pm 1\%$ zu erfassen. Auf seiten des dynamischen Verhaltens hingegen zeigen die verwendeten Prototypen noch gravierende Einschränkungen. Bisherige Einschwingzeiten von 6 bis 40 s stellen die Nutzung für landtechnische Regelungsaufgaben in Frage, allerdings zeigt die Auswertung von Rohsignalen auf, dass auch im Bereich von Millisekunden Verhältnisse abgebildet werden können. Bedingt durch die verspätete Verfügbarkeit und wenig ausgeprägte Robustheit der Prototypen war der geplante Feldeinsatz während der Erntekampagne 2006 nicht möglich.

Die derzeit verfügbaren aufbereiteten Sensordaten ermöglichen bereits eine Zustandsüberwachung als Grundlage für ein Teleservice-Konzept oder Betriebsdokumentation jeweils basierend auf Temperatur, Unwucht und mittlerer Radiallast. Mittels Softwareadaption ist auch die Einstellung der Gegenschneide realisierbar. Als kritisch wird hingegen die Auswertung des Radiallastsignals zur Detektion von Lastschwankungen für die dynamischen Ansteuerung der Baugruppen eingestuft. Gleiches gilt für den Einsatz als Sensor zur Ertragsermittlung. Selbst mit dem jetzigen Dynamikbereich beim Lastwinkel erscheinen leichte Lastwinkelverschiebungen durch unscharfe Messer bzw. nicht optimal eingestellter Gegenschneide auswertbar. Hier handelt es sich um eine kontinuierlich anwachsende bzw. konstante Verschiebung von einem idealen Ausgangswert, der relativ zum optimalen Wert bestimmt werden kann.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- Gallmeier, M., Auernhammer, H.: Test cycles for dynamic testing and simulation of agricultural equipment. Proceedings of the CIGR World Congress, Bonn, 2006
- Gallmeier, M., Auernhammer, H.: Bewertung stufenloser Antriebssysteme in Arbeitsmaschinen. Workshop VDMA & TH Karlsruhe „Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen“, Karlsruhe, 2007
- Gallmeier, M.: Elektrische Baugruppenantriebe – eine Alternative zur Hydraulik?. Landtechnik SH(1/07), 2007
- Gallmeier, M., Auernhammer, H.: Hydraulic and electric drivelines for mobile working machines. Proceedings of the Conference Agricultural Engineering 07, Hannover, 2007
- Ostermeier, R., Auernhammer, H.: „Intelligent Bearing“ – a New Sensor for Agricultural Engineering Applications. Proceedings of the Conference Agricultural Engineering 07, Hannover, 2007
- Präsentation der Ergebnisse bei der Agritechnika 2007 am Stand des Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik der TU München

Fazit

Elektrische Antriebe ermöglichen eine dynamische Baugruppenversorgung bei wesentlich gesteigertem Wirkungsgrad als die bisher serienmäßige Hydraulik. Handlungsbedarf um Serienreife zu erlangen besteht allerdings im Bereich des Leistungsgewicht. Dahingehend optimierte Lösungen zeigen die Machbarkeit auf. Auf Seiten des „Intelligenten Wälzlagers“ zeigt sich interessantes Potential für eine landtechnische Anwendung, wenn die aufgezeigten Defizite bei der Weiterentwicklung berücksichtigt und bewältigt werden. Aber bereits mit der jetzigen Ausbaustufe und leichten Softwareadaptionen würde ein Feldtesteinsatz Sinn machen. Zusammenfassend scheint eine Verbrauchssenkung um 15 % auf obigen Ansätzen basierend realisierbar

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG	4
1 EINLEITUNG	6
2 UMWELTRELEVANZ	8
3 ZIELSETZUNG UND AUFGABENSTELLUNG	10
4 METHODE UND MATERIAL	12
4.1 TEILZIEL I „EFFIZIENZSTEIGERUNG DURCH ELEKTRISCHEN ANTRIEBE“	12
4.1.1 <i>Geplante Vorgehensweise</i>	12
4.1.2 <i>Probleme und Änderung des Arbeitsplans</i>	15
4.1.3 <i>Ermittlung aggregatstypischer Belastungsdaten</i>	15
4.1.4 <i>Diesel-elektrisches Antriebssystem</i>	17
4.1.5 <i>Prüfstandsversuche zur Analyse des Wirkungsgradverhaltens</i>	19
4.2 TEILZIEL II „INTELLIGENTE WÄLZLAGER“	26
4.2.1 <i>Geplante Vorgehensweise</i>	26
4.2.2 <i>Probleme und Änderung des Arbeitsplans</i>	29
4.2.3 <i>Das intelligente Wälzlager</i>	31
4.2.4 <i>Prüfstand und Messwerterfassungssystem</i>	33
4.2.5 <i>Messwerterfassung, -auswertung und Datenanalyse</i>	36
4.2.6 <i>Versuchsdurchführung</i>	38
5 ERGEBNISSE	40
5.1 TEILZIEL I „EFFIZIENZSTEIGERUNG DURCH ELEKTRISCHEN ANTRIEBE“	40
5.1.1 <i>Aggregatstypische Belastungsdaten der hydraulischen Baugruppenantriebe</i>	40
5.1.2 <i>Wirkungsgrad unter stationären Bedingungen</i>	41
5.1.3 <i>Wirkungsgrad während typisch dynamischer Belastung</i>	46
5.1.4 <i>Leistungsgewicht und Bauvolumen im Vergleich</i>	48
5.2 TEILZIEL II „INTELLIGENTE WÄLZLAGER“	49
5.2.1 <i>Prüfstandinbetriebnahme und Zuverlässigkeit</i>	49
5.2.2 <i>Messung der Rohsignale</i>	51
5.2.3 <i>Messungen zur Bestimmung der Transferfunktion (Steady State)</i>	52
5.2.4 <i>Messungen zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens</i>	56
6 DISKUSSION	58
7 LITERATUR	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hydraulischer Serienantriebsstrang und Messstellen zur Dokumentation der Belastungen	16
Abbildung 2: Übersicht elektrischer Antriebsstrang ohne Kühlsystem.....	18
Abbildung 3: Versuchsaufbau mit Feldhäcksler und DLG-Zugleistungsmesswagen	20
Abbildung 4: Messgrößen hydraulischerAntriebsstrang	22
Abbildung 5: Messpunkte Elektrischer Triebstrang.....	23
Abbildung 6: "Intelligentes Wälzlager" (oben), eingebaut (unten)	32
Abbildung 7: Prüfstand mit Messwerterfassungssystem	34
Abbildung 8: Abmessungen Prüfstand	34
Abbildung 9: Systemdiagramm - Prüfstand mit Messwerterfassungssystem.....	36
Abbildung 10: Flussdiagramm - Datenauswertung und -analyse	37
Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der Belastung an hydraulischem Vorsatz und Einzug	40
Abbildung 12: Wirkungsgradverhalten von hydraulischem Einzugsmotor und Pumpen bei stufenweiser Erhöhung des Lastmoments an Einzug und Vorsatz (Dieselmotordrehzahl = 1750 1/min, theoretische Häcksellänge = 8 mm).....	42
Abbildung 13: Wirkungsgrad hydraulischer Einzugsmotor bei unterschiedlichen Dieselmotor-drehzahlen (theoretische Häcksellänge = 8 mm)	43
Abbildung 14: Wirkungsgrad hydraulische Leistungsversorgung bei unterschiedlichen Dieselmotordrehzahlen (theoretische Häcksellänge = 8 mm).....	44
Abbildung 15: Wirkungsgradverhalten von elektrischem Einzugsmotor und Generator bei stufenweiser Erhöhung des Lastmoments an Einzug und Vorsatz (Dieselmotordrehzahl = 1750 1/min, theoretische Häcksellänge = 8 mm).....	45
Abbildung 16: Wirkungsgrad elektrischer Einzugsmotor bei unterschiedlichen Dieselmotordrehzahlen (theoretische Häcksellänge = 8 mm).....	45
Abbildung 17: Wirkungsgrad elektrische Leistungsversorgung (Generator und Gleichrichterbrücke) bei unterschiedlichen Dieselmotordrehzahlen (theoretische Häcksellänge = 8 mm).....	46
Abbildung 18: Wirkungsgrad hydraulischer und elektrischer Einzugsmotor bei dynamischer Belastung mit unterschiedlichen Lastniveaus.....	47
Abbildung 19: Wirkungsgrad hydraulische und elektrische Leistungsbereitstellung bei dynamischer Belastung mit unterschiedlichen Lastniveaus.....	48
Abbildung 20: Phasen des Prüfstandlaufverhaltens (RPM kontinuierlich an- und absteigend)	50
Abbildung 21: Messung zur Bestimmung der Transferfunktion (Steady State).....	52
Abbildung 22: Ermittlung der steady state Intervalle	53
Abbildung 23: Steady state Messungen – Transfer-Funktion Radialkraft.....	55
Abbildung 24: Steady state Messungen – Transfer-Funktion Lastwinkel	55
Abbildung 25: Messungen zur Systemantwort auf Sprungfunktions-Stimulus.....	56
Abbildung 26: Bestimmung der Einschwingzeiten für Radialkraft (links) und Lastwinkel (rechts)	57

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

A/D	<u>A</u> nalog/ <u>D</u> igital
AP	<u>A</u> rbeitspaket
ASIC	<u>A</u> pplication <u>S</u> pecific <u>I</u> ntegrated <u>C</u> ircuit (Anwendungsspezifische Integrierte Schaltung)
CAN	<u>C</u> ontroller <u>A</u> rea <u>N</u> etwork
CANalyzer	Software von Vektor Informatik für CAN
DLG	<u>D</u> eutsche <u>L</u> andwirtschafts- <u>G</u> esellschaft e.V.
DMS	<u>D</u> ehnmessstreifen
DSP	<u>D</u> igital <u>S</u> ignal <u>P</u> rocessor
ECU	<u>E</u> lectronic <u>C</u> ontrol <u>U</u> nit
FAG	Marke der Schöffler KG
FIR	<u>F</u> inite <u>I</u> mpulse <u>R</u> esponse
GPS	<u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem
I_{eff}	Effektivstrom
IIR	<u>I</u> nfinite <u>I</u> mpulse <u>R</u> esponse
IT-System	IT-System im Sinne der Elektrotechnik: Elektrisches Netz ohne Erdverbindung (z.B. Sternpunkt)
MSR	Messen, Steuern, Regeln
PSM	<u>P</u> ermanenterregte <u>S</u> ynchron <u>M</u> aschine
Pt-100	Auf der Widerstandsänderung von Platin basierender Temperaturfühler
RPM	Drehgeschwindigkeit (<u>R</u> evolutions <u>P</u> er <u>M</u> inute)
SCILAB	Open Source MatLab
U_{eff}	Effektivspannung
USB	<u>U</u> niversal <u>S</u> erial <u>B</u> us
V AC	Spannung Wechselfeldanteil
V DC	Spannung Gleichspannungsanteil
ZES	<u>Z</u> immer <u>E</u> lectronic <u>S</u> ystems GmbH

Zusammenfassung

Zur Reduzierung des Energiebedarfs in der Silagebereitung mit Exaktfeldhäckslern wurden im Projekt zwei Ansätze verfolgt. Zum einen wird dazu die Eignung von Elektrischen Baugruppenantrieben bewertet. Zum anderen wird versucht, ein „Intelligentes Kugellager“ zur Optimierung von Schnittprozess und Maschinenführung zu nutzen.

Um die Eignung elektrischer Antriebe abschätzen zu können, wurden in Feldversuchen typische Lastkollektive für den hydraulischen Vorsatz und Einzugsantrieb gewonnenen. Danach wurden in einer Serienmaschine diese durch einen diesel-elektrischen Antriebsstrang ersetzt und in die Maschinensteuerung integriert. Zur Bewertung des Wirkungsgradverhaltens wurden anschließend beide Antriebs-Baugruppen am Prüfstand dynamisch belastet, und dabei die typischen Lastniveaus, deren Gradienten und die Wechselwirkungen zwischen beiden Baugruppen statistisch nachgebildet. Die Prüfstandsversuche zeigen, dass der Einsatz elektrischer Baugruppenantriebe den Wirkungsgrad der Leistungsübertragung von ca. 70% auf etwa 85% unter Vollast bei typischen Einsatzbedingungen erhöhen kann. Im Teillastbereich erhöht sich der Vorteil sogar um über 25%, da die elektrische Leistungsübertragung eine geringere Lastabhängigkeit aufweist als die hydraulische. Allerdings muss für den Serieneinsatz der elektrischen Antriebe in mobilen Arbeitsmaschinen die Optimierung der Elektromaschinen hinsichtlich Leistungsgewicht weiter voran getrieben werden. Im Projekt wurden noch elektrische Antriebe mit einem Leistungsgewicht von ca. 6 kg/kW verbaut, während angepasste Lösungen schon die Vorgaben der hydraulischen Komponenten von ca. 1 kg/kW. Die Funktionssicherheit der elektrischen Antriebe wurde 2006 beim Ernten von über 100 ha Silomais unter Beweis gestellt.

Im Bereich des „Intelligenten Kugellagers“ konnten mit dem dafür konstruierten Prüfstand die grundsätzlichen Untersuchungen zur Eignung „Intelligenter Wälzlager“ für den landtechnischen Einsatz erfolgreich durchgeführt werden. Das steady state - Verhalten der untersuchten Konfigurationen kann positiv bewertet werden. Auf Seiten des dynamischen Verhaltens hingegen zeigen die verwendeten Prototypen noch gravierende Einschränkungen, verursacht durch Einschwingzeiten von 6 bis 40 s. Die Auswertung von Rohsignalen zeigt aber, dass auch Verhältnisse im Bereich von Millisekunden abgebildet werden könnten. Die derzeit verfügbaren Sensordaten ermöglichen schon jetzt eine Zustandsüberwachung als Grundlage für Teleservice und/oder Dokumentation basierend auf Temperatur, Unwucht und mittlerer Radiallast. Mittels Softwareadaption ist auch die Einstellung der Gegenschneide realisierbar. Als noch schwierig wird hingegen die Auswertung des Radiallastsignals zur Detektion von Lastschwankungen für die dynamischen Ansteuerung der Baugruppen eingestuft. Gleiches gilt für den Einsatz als Sensor zur Ertragsermittlung.

Das Projekt wurde durch die Maschinenfabrik Bernard Krone beantragt und in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik der Technischen Universität München bearbeitet. Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) hat das Vorhaben unter dem Aktenzeichen 23326 gefördert.

1 Einleitung

Zur kostengünstigen Versorgung der Rinder mit qualitativ hochwertiger Silage aus Gras und Mais hat sich der Feldhäcksler in den vergangenen Jahren zur Schlüsselmaschine in der Erntekette entwickelt. Er ermöglicht mit seiner hohen Häckselleistung die schnellstmögliche Befüllung der Silos und schafft damit die Voraussetzungen für hohe Silagequalitäten und geringe Verluste. Aus ökonomischen Gründen erfolgt der Einsatz zunehmend überbetrieblich mit einer Tendenz zu größeren Einheiten. Dabei sind jedoch zunehmend zwei Probleme zu beobachten: Zum einen verringern sich durch die weitgehend starre Kopplung der angetriebenen Bauteile im Häcksler die Wirkungsgrade und führen zu einem überhöhten Energiebedarf mit negativen ökonomischen und ökologischen Auswirkungen. Zum anderen kann die aus qualitativen Gründen geforderte gleichmäßige Häcksellänge ohne Überlängen nicht mehr garantiert werden, weil dazu objektiv arbeitende Hilfsmittel zur Erkennung der Messerschärfe und zur ständigen Nachstellung der Gegenschneide fehlen.

Zur Problemlösung wurden im vorgesehenen Forschungsvorhaben folgende Ansätze aufgegriffen:

Für die Reduzierung des Energieverbrauchs müssen die Gesamtwirkungsgrade der Antriebsstränge der Maschine gesteigert und so die möglichen Potentiale von etwa 10% ausgeschöpft werden. Darüber hinaus bietet sich durch Drehzahlentkopplung des Antriebsstrangs vom Betriebspunkt der Primärquelle (heute Verbrennungsmotor, zukünftig Brennstoffzelle) eine zusätzliche Steigerung des Wirkungsgrades an, welche durch Neuentwicklungen im Bereich elektrischer Antriebe und Leistungselektronik weitere 20% ermöglichen könnte. Deren Eignung muss jedoch vorab für den mobilen Einsatz in Erntemaschinen ermittelt und vergleichend zur konventionellen Technik bewertet werden. Zudem sollen durch Automatisierung auf Basis geeigneter Sensorik ungünstige Betriebszustände bei den einzelnen Arbeitsagregaten vermieden und so weiterer Kraftstoff eingespart werden.

Für garantiert gleichbleibende Häcksellängen soll ein neuer und vielversprechender Ansatz über „intelligente Wälzlager“ versucht werden. Diese sollen mit ihren sensorischen Möglichkeiten zur Erkennung stumpfer Häckslertrummelmesser und falsch eingestellter Gegenschneiden herangezogen werden. Durch eine ständige Zustandserfassung und einen automatisierten Schleif- und Gegenschneidennachstellvorgang wäre es dann möglich, die derzeit in der Praxis zu beobachtende Leistungszunahme von bis zu 300% bei stumpfer werdenden Messern mit zu großem Messerspalt weitgehend zu eliminieren.

Zudem eröffnen die Informationen von „Intelligenten Wälzlager“ in der Trommel und in den Vorpresswalzen drei weitere Optimierungsansätze:

In einer ständigen Überwachung der Lagerzustände kann ein „Condition Monitoring“ aufgebaut werden. Dieses würde erstmals vorbeugende Wartungen und Teiletausch ermöglichen. Außerdem könnte es Hinweise für noch mögliche Laufzeiten bei sich abzeichnenden Schäden geben und so insgesamt die Ausfall- und Stillstandszeiten der Maschine wesentlich verringern.

Über die Belastungssignale aus den Vorpresswalzen und der Häckseltrommel kann das Antriebsstrangmanagement positiv beeinflusst und die Motorsteuerung in diesen Regelalgorithmus einbezogen werden.

Schließlich können die Signale der Vorpresswalzen in Verbindung mit einer Ortung zur Ertragskartierung herangezogen werden. Dadurch würde ein derzeit noch fehlendes Glied im Precision Farming geschlossen und die teilflächenspezifischen Bewirtschaftung auch auf die Futterflächen ausgedehnt werden. Zugleich würde damit die Dokumentation für betriebswirtschaftliche und volkswirtschaftliche Belange geschaffen.

2 Umweltrelevanz

Betrachtet man die Leistungsaufteilung am selbstfahrenden Feldhäcksler, so fließen über 70% der Energie in den Häcksel- und Aufbereitungsprozess, etwa 10% in den Fahrtrieb und der Rest in die Erntematerial zuführenden Prozesse (aufnehmen/schneiden, zusammenführen, vorpressen) [GF01]. Optimierungspotentiale hinsichtlich des Energieeinsatzes sind in der Antriebsstruktur der Maschinen durch Steigerung der hydraulischen Strangwirkungsgrade (Leistungsanteil ca. 30%) und durch Drehzahlentkopplung aller Antriebe gegeben. Dabei stellt die Entkopplung des Arbeitspunktes des Verbrennungsmotors vom Gesamtantriebsstrang eine Kraftstoffeinsparung zwischen 8% und 20% in Aussicht, die jedoch abhängig ist von den tolerierbaren Einbußen der Aktordynamik [FH04].

Untersuchungen zu den Strangwirkungsgraden hydraulischer Arbeitsaggregate selbstfahrender Rübenroder zeigen unter Last Wirkungsgrade im Bereich von 25% bis 64% (bisher unveröffentlichte Arbeiten des Kooperationspartners). Der Wirkungsgrad hydrostatischer Fahrtriebe wird auf ca. 70% beziffert [BK02]. Ausschlaggebend für diese sehr unbefriedigende Situation sind Verluste in der Leistungsübertragung, schlechte Wirkungsgrade im Teillastbetrieb und bei den Arbeitsaggregaten häufig serielle Antriebsstrukturen.

Elektrische Antriebe zeigen diesbezüglich den Vorteil durch dezentrale und aggregatsspezifische Leistungselektronik unabhängig voneinander dimensioniert werden zu können. Für einen elektrischen Fahrtriebsstrang wurde für die serielle Bauweise ein Wirkungsgrad im Bestpunkt von 75%, für einen elektrisch leistungsverzweigten Triebstrang sogar von 82% in Aussicht gestellt [Bar01]. Der Einsatz von Synchronmotoren mit hochwertigen Eisenwerkstoffen anstelle von Asynchronmotoren, wie in [Bar01] verwendet, lässt eine weitere Steigerung erwarten.

Wie oben aufgezeigt steht zur optimalen Nutzung der eingesetzten Prozessenergie und zur Erzielung bester Häckselgutqualität die Baugruppe Häckseltrommel im Mittelpunkt des Interesses. Mehr als 50% der Motorleistung dienen allein dem Antrieb des Häckselaggregates unter Idealbedingungen mit scharfen Messern und optimalem Gegenschneidenabstand.

Jede Abweichung vom Idealzustand führt zur Erhöhung des Energiebedarfes. Setzt man z.B. den Energiebedarf bei scharfen Messern und einem Spalt von 0.2 mm zu 100% an, so bewirken unscharfe Messer einen erhöhten Energiebedarf von 200%. Erhöht sich zudem der Spaltabstand auf 0.4 mm, dann ergibt sich daraus eine weitere Steigerung des Energiebedarfes auf 300% [Cav99]. Energiebedarfsabschätzungen in ähnlicher Größenordnung wurden bereits in frühen Forschungsarbeiten [Kro67][Kro93], [IF75] aufgezeigt und in neueren praktischen und theoretischen Untersuchungen bestätigt [Hei00].

Zudem wird dabei eine Qualitätseinbuße aufgrund eines Überganges vom reinen Schneiden hin zum (Ab)Reißen des Häckselguts verursacht. In neueren Feldhäckslerbaureihen wird deshalb der Schleifvorgang automatisiert, wobei jedoch auch weiterhin der Zeitpunkt des Schleifvorgangs vom Fahrer ausgelöst werden muss. Beim Schleifvorgang selbst bestimmt in der Praxis der Fahrer nach Gehör, Leistungsreserven des Motors oder nach Sichtprobe des Häckselguts den Zeitpunkt des Schleifens und der Schleifdauer. So überraschen Untersuchungsergebnisse auch nicht, dass während des Ernteeinsatzes durch die Fahrer ein unzureichendes Schleifen der Messer stattfindet und der zunehmende Schleifzeitbedarf bei länger eingesetzten Messern in der Praxis nicht berücksichtigt wird [NM99].

Im Hinblick auf die Häcksellängenqualität wird von [Wag05] ein Qualitätssicherungssystem aus siliertechnischer Sicht vorgeschlagen. Darin werden innerhalb der Verfahrensketten kritische Lenkungspunkte lokalisiert und ein neuer Qualitätsparameter „Langzeitstabilität“ eingeführt. Exemplarisch wurde dies für den wichtigen Faktor der theoretischen Schnittlänge auf die Verdichtbarkeit gezeigt. Je geringer die Überlängenfraktion bei Häckselgut und die theoretische Häcksellänge ist, um so geringer ist die Elastizität und um so höher die erreichbare Dichte. Dabei ist der Einfluss der theoretischen Schnittlänge kausal über die erzielte Dichte mit der aeroben Stabilität zum Zeitpunkt der Auslagerung verkettet. Die Regelkreise, die sich punktuell aus den Untersuchungen ableiten lassen, eröffnen die Möglichkeit, einen Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen der Technik in der Erntekette und der daraus erzielbaren Qualität herzustellen.

3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Die Zielsetzung des Vorhabens ist die Entwicklung einer neuen Systemtechnik zur Verringerung des Primärenergieaufwandes um etwa 15 % (von derzeit etwa 115 l/h auf 100 l/h Diesel) und von neuen technischen Möglichkeiten zur Qualitätssicherung beim Häckselvorgang. Für diese Aufgaben sollen im Vorhaben die erforderlichen Informationen zu neuartigen Sensoren erfasst und die daraus abgeleiteten Stellgrößen über eine angepasste und zugleich zukunftsweisende Aktorik seitens der Baugruppenantriebe umgesetzt werden.

Im **ersten Teilziel (TZ I)** müssen dafür die Potentiale neuer Entwicklungen im Bereich der elektrischen Antriebstechnik und Leistungselektronik quantifiziert werden. Dies soll vergleichend für die bisherige und die neue Triebstrangarchitektur unter gleichen Anforderungen erfolgen. Wichtige Kriterien sind dafür der Triebstrangwirkungsgrad und das genutzte Leistungsgewicht. Für letzteres wird die Masse des jeweiligen Antriebstrangs zur real genutzten mechanischen Leistung in Bezug gesetzt. Der Vergleich der Strangwirkungsgrade kann aufgrund der Forderung nach Reproduzierbarkeit nur anhand von Prüfstandsversuchen erfolgen. Dabei werden die in der Maschine integrierten Baugruppen über eine hydraulische Lastbremse mit ihrem typischen Lastzyklus beaufschlagt. Im Ergebnis können dann die Wandlungsverluste in den hydraulischen und elektrischen Motoren und die Verluste in der Leistungsübertragung und Steuerung im Gesamtstrang erfasst werden. In Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner muss dafür ein Mäiserntevorsatz von hydraulischem auf elektrischem Antrieb umgerüstet werden. Versorgungssysteme zur Ansteuerung, Leistungseinspeisung und Flüssigkühlung von Motoren und Leistungselektronik sind zu dimensionieren. Für die Bereitstellung elektrischer Leistung im mobilen Einsatz muss ein diesel-elektrisches System aufgebaut und in die bestehende Maschine integriert werden. Die erforderlichen Referenzdaten zur definierten Beanspruchung der Baugruppen sind durch Messungen am bestehenden Hydrauliksystem beispielhaft für den gewählten Vorsatzantrieb im Feldversuch zu gewinnen. Diese realen Daten bilden die Grundlage zur Regelung der Lastbremse im vergleichenden Prüfstandsversuch für das hydraulische und das elektrische System.

Damit die in der Analyse ermittelten Potentiale aus der Entkopplung und dem optimierten Triebstrangmanagement umgesetzt werden können, müssen Sensorsignale aus der aktuellen Last an den Arbeitsaggregaten zur dynamischen Ansteuerung der Baugruppenantriebe gewonnen werden. Dazu werden im **zweiten Teilziel (TZ II)** die neuen Möglichkeiten zur kontinuierlichen Betriebsgrößenüberwachung ausgewählter materialfördernder und -verarbeitender Systemeinheiten eines Exakt-Feldhäckslers untersucht. Erstmals kommen dafür „intelligente Wälzlager“ [Her04] zum Einsatz. Die Untersuchungen sollen das grundsätzliche Anwendungspotential dieser Technologie hinsichtlich der Messgrößenbereitstellung (Signalmuster, Parameterquantifizierung) für eine Optimierung des Häckseltrommelbetriebes aufzeigen. Zugleich sollen die Versuche aktiv zur

Weiterentwicklung und Adaption dieser neuen Sensortechnik an die spezifischen Einsatzbedingungen in mobilen landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen beitragen. Darüber hinaus wird versucht werden, mit nur einer Sensortechnologie auch die Ertragsermittlung in das System zu integrieren.

Für dieses Vorhaben erbringt die kontinuierliche Erfassung der Messgrößen Drehzahl, Drehrichtung, Radialkraft, Axialkraft, Kraftrichtung, Unwucht, Stoßimpulse und Temperatur in „intelligenten Wälzlagern“ einzigartige Möglichkeiten. Direkt an der Häckseltrommel kann damit die im Betrieb nachlassende Messerschärfe erfasst werden. Gleichzeitig wird es möglich sein, die exakte Einstellung der Gegenschneide zu erfassen und in einen automatisierten Regelkreis einzubeziehen. Darüber hinaus können die Signale der Wälzlager die Lastschwankungen an der Häckseltrommel abbilden (Eingangsgröße für Teilziel 1) und sie erlauben gezielte Hinweise auf eine vorbeugende Maschinenwartung.

Die dargelegte Ausgangssituation zeigt den Handlungsbedarf zur weiteren Optimierung der Häckseltechnologie im Sinne einer umweltgerechten Grünfüttererzeugung mit zwei sich ergänzenden und unterstützenden Ansatzpunkten. Dies sind zum einen die Minderung des Primärenergieaufwandes auf der Kosten- und Umweltseite und zum anderen die Steigerung der Futterqualität, charakterisiert durch gleichbleibend exakte Häcksellängen für den Qualitätsfaktor "Langzeitstabilität".

4 Methode und Material

Die Potentiale beider Projektansätze werden reproduzierbar basierend auf Prüfstandsuntersuchungen erarbeitet. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

4.1 Teilziel I „Effizienzsteigerung durch elektrischen Antriebe“

4.1.1 Geplante Vorgehensweise

Zur Quantifizierung der möglichen Kraftstoffersparnis durch den Einsatz neuer Antriebstechnik werden vorhandene und zukünftig mögliche Antriebsstrukturen verglichen. Die methodischen Ansätze und Arbeiten sind drei Projektphasen zugeordnet:

- I-I Entwicklung eines diesel-elektrisch betriebenen Mäiserntevorsatzes als Grundlage für eine vergleichende Bewertung hydraulisch-mechanischer und elektrischer Antriebssysteme mit 6 Arbeitspaketen (AP)
- I-II Feldversuche zur Ermittlung typischer Antriebsbelastungen zur Steuerung des Prüfstandes und Validierung der Prüfstandsversuche mit 5 Arbeitspaketen
- I-III Prüfstandsversuche zur reproduzierbaren Ermittlung der Triebstrangwirkungsgrade und Bewertung des hydraulisch-mechanischen und elektrischen Vorsatzantriebe mit 3 Arbeitspaketen

I-I Entwicklung eines diesel-elektrischen Prototyps mit elektrischem Mäiserntevorsatz

Die entscheidenden Parameter für die Bewertung der hydraulisch-mechanischen und der elektrischen Antriebslösung sind Wirkungsgrad und Leistungsgewicht. Um die Gesamtantriebsstränge vollständig bewerten zu können, müssen beide verfügbar sein. Die Entwicklung eines diesel-elektrischen Prototypsystems ist deshalb Grundlage des Vergleichs und gliedert sich in folgende Arbeitspakete:

AP 1: Bewertung unterschiedlicher Lösungsvarianten anhand eines Lasten- und Pflichtenheftes (*Sept. 2005*):

- zentraler elektrischer Antrieb als direkter Ersatz des heutigen hydraulischen Antriebs direkt am Häcksler verbaut,
- dezentrale elektrische Antriebsstruktur mit direkten Baugruppenantrieben
- Mischformen aus zentralem und dezentralen Baugruppenantrieben

AP 2: Um die Integration des Antriebskonzepts zu ermöglichen sind unterschiedliche konstruktive Änderungen an der bestehenden Maschine und dem Vorsatzgerät notwendig. Diese wurden sowohl für den Vorsatz als auch den maschinenseitigen Generator durch den Kooperationspartner erarbeitet (*Okt. – Dez. 2005*).

AP 3: Seitens des Antragstellers werden die Ergebnisse in einem Prototyp umgesetzt (*Dez. 2005 – Juni 2006*).

AP 4: Die erste Phase der Inbetriebnahme des elektrischen Mäiserntevorsatzes soll am stationären Netz erfolgen, um Wechselwirkungen zwischen Motor und Generator durch Spannungsschwankungen im Zwischenkreis zu vermeiden (*März - April 2006*).

AP 5: Grundlage für die Installation und Inbetriebnahme des Gesamtantriebsstrangs im selbstfahrenden Feldhäcksler ist ein Schutzkonzept gegen elektrischen Schlag und gefährliche Körperströme, welches auf Basis DIN VDE 0100, Teil 410 durch den Kooperationspartner erarbeitet wird (*Okt. 2005 – Juni 2006*).

AP 6: Das diesel-elektrische Gesamtsystem und dessen netzunabhängige Inbetriebnahme werden im Zeitraum *Juli bis Sept. 2006* realisiert.

I-II Feldversuche als Grundlage zur Ermittlung der Wirkungsgrade der Antriebsstränge

Im Feldversuch sind wesentliche Parameter nicht wiederholbar und deshalb ein Vergleich nur mit entsprechend hohem Messaufwand und vielen Wiederholungen statistisch abzusichern. Deshalb soll der Vergleich anhand reproduzierbarer Prüfstandsversuche erfolgen, deren Realitätsbezug durch baugruppentypische Belastungsverläufe gewährleistet wird. Diese sind im Vorfeld durch Feldversuche und Feldmessungen zu gewinnen.

AP 7: Der Kooperationspartner baut dazu im Vorfeld ein Messsystem in einen Feldhäcksler mit hydraulisch-mechanischem Antrieb auf, welches die realen Belastungen durch Aufwuchs, variable Materialparameter, Fahrgeschwindigkeit und Maschinenparametrierung erfassen kann (*August 2005*).

AP 8: In Feldversuchen werden alle zu- und abgeführten Leistungen der Aggregate der hydraulischen Kreises Vorsatz und Einzug erfasst und bilanziert, um typische Belastungsmuster zu erkennen (*September – Oktober 2005*).

AP 9: Auf Basis der Lastmuster sind durch den Kooperationspartner standardisierte Prüfzyklen zu erstellen (*Nov. 2005 – Januar 2006*). Das erforderliche „Know-how“ ist auf Seiten des Kooperationspartners vorhanden.

AP 10: Ausgehend vom Verteilergetriebe am Verbrennungsmotor ermöglicht die Modellierung der Leistungsverteilung eine Abschätzung, welche Wirkungsgradsteigerung am Verbrennungsmotor durch Entkopplung einzelner Aggregate möglich ist. Aufschluss darüber geben die im Feldversuch gemessenen Drehzahl- und Lastschwankungen an den Baugruppenantrieben, die derzeit durch die übersetzungsstarrten Antriebe direkt auf den Dieselmotor übertragen werden. Auf Basis dieser Aggregatslastdaten wird in Verknüpfung mit dem Wirkungsgradkennfeld des Motors der Wirkungsgradverlauf bei schwankender Drehzahl und Last simuliert (*Juni– August 2006*).

AP 11: Die Prüfstandsdaten des elektrischen Antriebsstrangs bedürfen einer Bestätigung im Feldversuch und die neue Technologie einer Erprobung unter rauen Einsatzbedingungen (*September 2006*). Das Messsystem wurde dazu um die Möglichkeit elektrischer Leistungsmessung erweitert.

I-III Prüfstandsversuche zur Bestimmung der Triebstrangwirkungsgrade

AP 12: Für die Bestimmung des Gesamtwirkungsgrades der Leistungsübertragung im Antriebsstrang müssen die eingespeiste und die genutzten Leistungen erfasst werden. Dazu werden die Antriebe im Mäseerntevorsatz an die Lastbremse eines geeigneten Prüfstandes gekoppelt (*Juli – August 2006*). Die Regelung der dynamischen Belastung wird durch den Prüfstand bereitgestellt. Die Leistungsbilanzierung basiert auf Messung der mechanisch eingespeisten und genutzten Leistung mittels Drehmomentmessnaben. Der Antrieb des Vorsatzgerätes erfolgt über den Häcksler selbst, um den gesamten Antriebsstrang in der Messung abzudecken. Dazu muss im hydraulisch-mechanischen System die hydraulische Leistung der Pumpe und im diesel-elektrischen Prototypen die elektrisch eingespeiste Leistung des Generators erfasst werden. Der Dieselmotor als Primärquelle ist beiden Systemen gemein und deshalb an dieser Stelle nicht relevant.

AP 13: Die Durchführung der Prüfstandsversuche ist für den Zeitraum von *Okt. 2006 bis Jan. 2007* geplant.

AP 14: Die Datenauswertung der Prüfstandsversuche erfolgt „offline“ in den darauffolgenden Monaten (*Jan. – Feb. 2007*). Abschließend werden der konventionelle hydraulisch-mechanische und der elektrische Antriebsstrang hinsichtlich charakterisierender Parameter wie Wirkungsgrad, Leistungsgewicht und kinematischer Freiheitsgrade bewertet.

4.1.2 Probleme und Änderung des Arbeitsplans

I-I Entwicklung eines diesel-elektrischen Prototyps mit elektrischem Mäiserntevorsatz

AP 4: Eine Inbetriebnahme der Antriebsmaschinen für Kollektorkette und Einzug am stationären Netz war aus zeitlichen Gründen nicht möglich. Diese erfolgte direkt generatorbetrieben, da die Antriebsmaschinen erst im Juli und August 2006 geliefert werden konnten und schon im September eingesetzt werden sollten.

I-II Feldversuche als Grundlage zur Ermittlung der Wirkungsgrade der Antriebsstränge

AP 10: Bedingt durch die Probleme im Teilprojekt II war es nicht möglich den Leistungsbedarf der Häckseltrommel als Hauptverbraucher der Maschine zu quantifizieren. Damit fehlt die Datengrundlage, um die Lastschwankungen am Dieselmotor bestimmen zu können.

I-III Prüfstandsversuche zur Bestimmung der Triebstrangwirkungsgrade

AP 13: Als geeignet für die Durchführung der Prüfstandsversuche mit stationärer und dynamische Belastung von zwei parallelen Schnittstellen konnte nur der Zugleistungsmesswagen des DLG-Testzentrums in Groß-Umstadt identifiziert werden (alternative Systeme in xx, yy, zz schieden aus xx Gründen aus). Dieser ist allerdings für die Prüfung von Traktoren entwickelt und besitzt deshalb nur eine mechanische und eine weiter hydraulische Schnittstelle. Die Entwicklung eines Pumpenaggregates zur Wandlung der mechanischen Schnittstelle des Einzugsmotors auf eine hydraulische und die andauernde Auslastung des Prüfstandes haben zu einer Verzögerung der Prüfstandsversuche geführt. Ein Abschluss war erst im Mai 2007 möglich.

4.1.3 Ermittlung aggregatstypischer Belastungsdaten

Als Referenz wurden für den Vergleich die Antriebe der Baugruppen des Vorsatzgerätes und des in der Verarbeitungskette folgenden Einzuges ausgewählt. Im Projektverlauf sind diese beispielhaft auf ein diesel-elektrisches Antriebssystem umgerüstet worden. In Feldversuchen wurden dazu für beide Antriebsstränge typische Betriebspunkte aufgezeichnet. Nachfolgend wird der hydraulische Serienantriebsstrang beschrieben und daraus der für die Erfassung von Lastkollektiven notwendige Messaufbau abgeleitet.

4.1.3.1 Hydraulischer Serienantrieb und Messaufbau

Beide Baugruppen werden je über eine verstellbare Axialkolbenpumpe in einem geschlossenen Kreis betrieben. Die Leckageströme beider Kreise werden über eine gemeinsame Speisepumpe ersetzt. Die Pumpen sind als Pumpenturm am übersetzenden Motorverteilergetriebe montiert, wobei beide hydraulische Motoren an einem gemeinsamen Untersetzungsgetriebe arbeiten, welches maschinenseitig hinter der Vorderachse verbaut ist. Die Leistungsübertragung hin zum Einzug erfolgt über eine einzelne Gelenkwelle. Auf der Seite des Vorsatzes wird die Antriebsleistung auf die zwei Teilarbeitsbreiten mittels eines Kegelradgetriebes aufgeteilt und durch mehrere Gelenkwellen an die beiden Vorsatzwinkelgetriebe übertragen. Dies reduziert die Drehzahl zum Antrieb der Kollektorkette, welche die Pflanzen schneidet und an der Fahrzeuglängsachse zusammenführt. Abbildung 1 verdeutlicht schematisch den Aufbau des hydraulischen Serienantriebsstrangs.

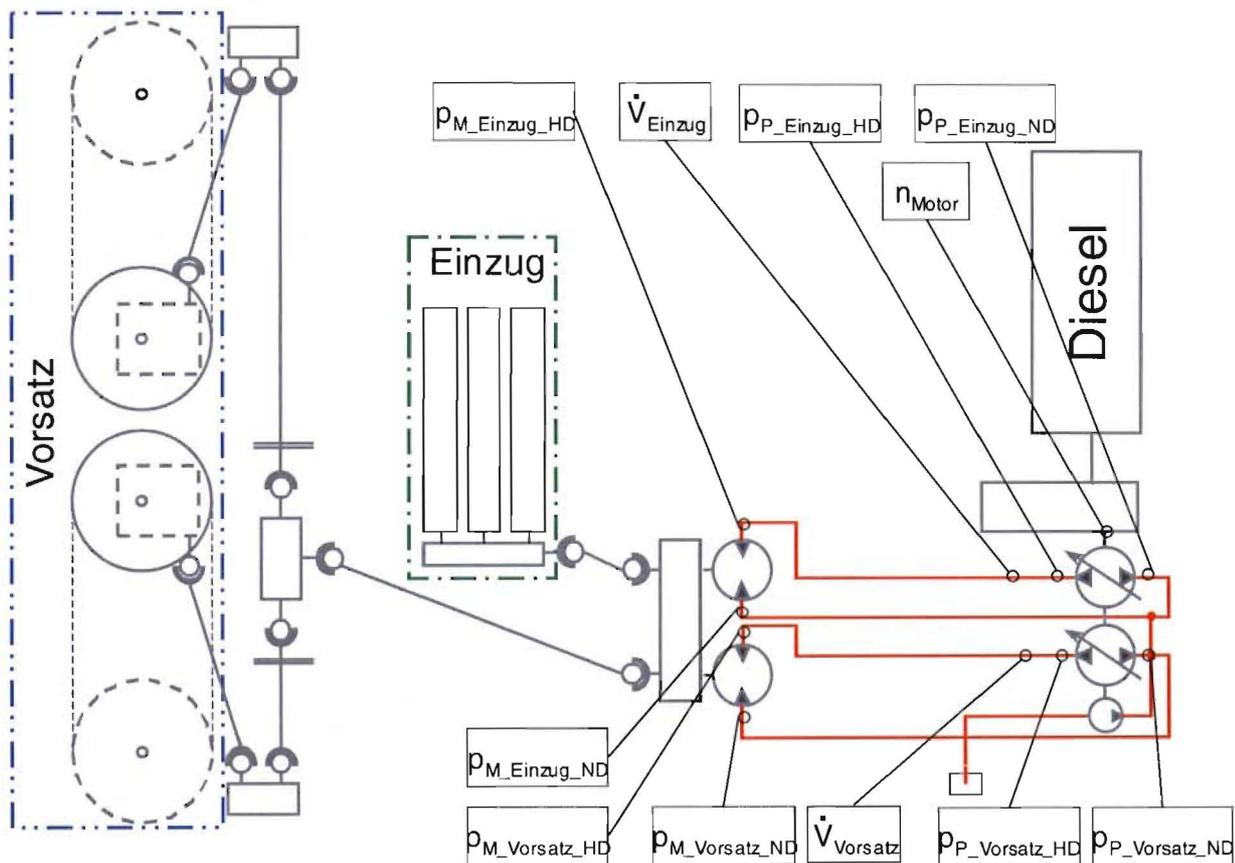


Abbildung 1: Hydraulischer Serienantriebsstrang mit Messstellen zur Erfassung der Belastungen

Zum Schutz des Häckselaggregates vor metallischen Fremdkörpern ist der Einzugsmotor mit einer hydraulischen Schnellstop-Funktion ausgestattet. Dabei schaltet ein Metaldetektor über ein Vorsteuerventil den Ölstrom auf Umlauf und bremst den Motor über ein Druckbegrenzungsventil bis zum Stillstand. Dies verhindert Schäden, welche durch die Aufnahme von Fremdkörpern an der Häckseltrommel und am Trommelboden entstehen würden.

Die Steuerung der Drehzahlen der beiden Motoren erfolgt durch eine Sollwertvorgabe des Fahrers für die Häcksellänge am Bedienterminal, welche die Ausschwenkung der Pumpen festlegt. Die Aussteuerung erfolgt entlang einer Rampenfunktion. So wird das Verhältnis zwischen Trommeldrehzahl und Vorschub der Einzugwalzen fixiert, welches die theoretische Häcksellänge bestimmt. Die Drehzahl des Vorsatzgerätes wird dabei proportional zur Einzugsdrehzahl gesteuert. Eine Drückung der Dieselmotordrehzahl und der damit drehzahlsteif verbundenen Trommel wird automatisch durch die ebenfalls geminderte Antriebsdrehzahl bei gleichbleibender Ausschwenkung der Pumpen kompensiert.

Als Basis für die Auslegung des diesel-elektrischen Prototypantriebssystems und zur Generierung typischer Belastungszyklen wurden in einer Serienmaschine (Big X V8) die Belastungen im Feldeinsatz im Herbst 2005 gemessen. Dazu wurden vorab beide Pumpen und beide Motoren zur Druckdifferenzbestimmung jeweils hochdruckseitig und niederdruckseitig mit Druckmessensoren ausgerüstet und jeweils pumpenausgangsseitig eine Turbinendurchflusssonde zur Volumenstrommessung eingebaut. Die Speisepumpe konnte nicht differenziert betrachtet werden, weil diese als Kompaktaggregat in den Pumpenturm integriert ist und die Ölführung innenliegend erfolgt.

Diese erfassten Daten repräsentieren drei verschiedene Fahrer und den Einsatz bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen. Zudem sind darin unterschiedliche Betriebe mit unterschiedlichen Schlägen und Sorten und eine unterschiedliche Abfuhrlogistik enthalten.

Die genannten Leistungsdaten wurden in Verbindung mit einem GPS Signal zur Georeferenzierung über einen Messverstärker der Firma CAESAR Datensysteme mit einer Abtastrate von über 30 Hz auf einem Notebook in einem proprietären Format gespeichert.

4.1.4 Diesel-elektrisches Antriebssystem

Die Belastungsdaten aus dem Feldversuch 2005 wurden genutzt, um als Alternative zur Hydraulik ein diesel-elektrisches Pendant zu dimensionieren. Zudem wurde angestrebt, bei der Umsetzung des elektrischen Antriebsstranges eine möglichst starke Integration in die Serienmaschine mit vorhandenen Bauräumen und Komponenten zu nutzen und zugleich die volle Funktionalität und Bedienbarkeit zu erhalten. Zur Versorgung des elektrischen Triebstranges wurde dazu der Pumpenturm der Hydraulik am Motorverteilergetriebe direkt durch einen permanenterregten Synchrongenerator ersetzt. Dazu wurde nur der getriebeseitige Flansch geändert (das Übersetzungsverhältnis wurde beibehalten), um eine schnelle Austauschbarkeit für die späteren Prüfstandsversuche zu gewährleisten. Die elektrische Maschine für den Einzug ersetzt direkt dessen hydraulisches Gegenstück am Untersetzungsgetriebe hinter der Vorderachse. Im Gegensatz dazu konnten die Gelenkwellen im Triebstrang des Vorsatzgerätes entfallen. Dafür wurde in jeder Teilarbeitsbreite je eine Antriebsmaschine mit Reduziergetriebe direkt am Winkelgetriebe des Kettenrades positioniert.

Generator, Motoren, Gleichrichterbrücke und Wechselrichter sind wassergekühlt ausgeführt. Einen Überblick über das Antriebssystem gibt Abbildung 2.

- | | | |
|------------------------|--|--|
| 1. PSM Generator | 4. Zwischenkreiskondensatoren
& Bremswiderstand | 7. Motoreinheit
inklusive Umrichter |
| 2. Leistungsschalter | 5. Schutz und Steuerung | 8. Reduziergetriebe |
| 3. Diodengleichrichter | 6. Zwischenkreis (400 – 750 V DC) | |

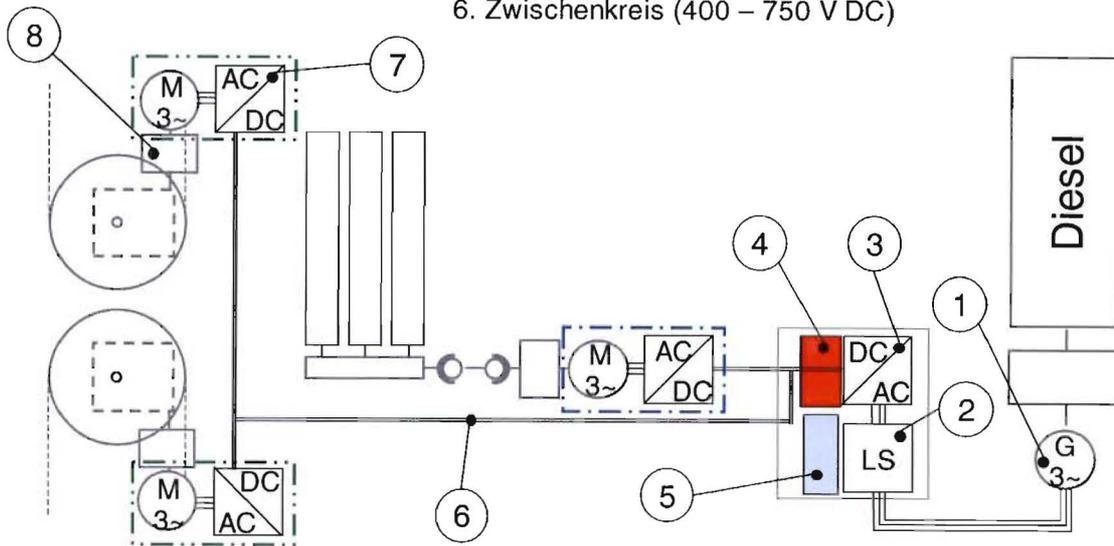


Abbildung 2: Übersicht elektrischer Antriebsstrang ohne Kühlsystem

Elektrische Maschinen & Leistungsübertragung

Für die Speisung des Zwischenkreises wird ein unregelter permanenterregter Synchrongenerator mit einer Eckleistung von ca. 100 kW eingesetzt. Die ausgangsseitige 3-phasige Drehstromleistung speist über eine ungesteuerte Diodengleichrichterbrücke den ausgedehnten Gleichspannungszwischenkreis. Dies hat Schwankungen der Zwischenkreisspannung zwischen 400 und 750 V DC zur Folge, weil die Ausgangsspannung des Generators proportional zu seiner Drehzahl und zusätzlich abhängig von dessen Belastung ist. Transienten der Zwischenkreisspannung werden über zusätzliche Zwischenkreiskondensatoren gedämpft.

Als Antriebsmaschinen kamen drei wassergekühlte Reluktanzmotoren mit in den Klemmkästen integrierten Wechselrichtern zum Einsatz. Als Einzugsmotor wurde eine elektrische Maschine mit einer Eckleistung von 47 kW und im Vorsatzgerät zwei Maschinen mit je 19,8 kW installiert. Bedingt durch die Spannungsabhängigkeit der erzielbaren Leistung der Motoren ist es notwendig, für den gesamten auftretenden Spannungsbereich Nennpunkte zu definieren. Als vorteilhaft erweist sich hier, dass mit zunehmender Dieselmotordrücke, also sinkender Spannung im Zwischenkreis, die geforderten Nenndrehzahlen ebenfalls sinken. Dies beschränkt die Anforderungen an den Generator hinsichtlich des bereitzustellenden Stromes bei sinkender Drehzahl.

Die Bauform des Reluktanzmotors ist wegen ihres einfachen und dadurch robusten und kostengünstigen Aufbau gewählt worden, auch wenn dafür geringe Einbußen im

Wirkungsgrad zu erwarten sind. Grund dafür ist die über die Anschlussklemmen zuzuführende Erregungsblindleistung. Die Vorteile sind begründet im einfachen Aufbau des Rotors mit ausgeprägten Polen der ohne Wicklungen auskommt. (Rotor wie in SWR Motor [DC05]).

Notwendige Peripheriesysteme

Die zulässigen Temperaturen der eingesetzten Elektromotoren und insbesondere der Leistungshalbleiter erfordert eine Kühlmittelvorlauftemperatur von unter 50°C, um die geforderte Lebensdauer zu gewährleisten. Deshalb wurde im Prototyp ein zweiter Kühlkreislauf mit elektrischer Kühlmittelpumpe und Kühler installiert. In aktuellen Projekten sind bereits Prototypen für eine Kühlmitteltemperatur zwischen 105 °C und 120 °C verfügbar [MS05]. Somit steht die Möglichkeit zur serienmäßigen Kühlung über den Motorkühlkreislauf bevor.

Zum Schutz von Maschine, Betriebsmitteln und Personen ist zum Schutz gegen elektrischen Schlag unter Fehlerbedingungen (gemäß DIN VDE 0100-410) ein Isolationswächter installiert, welcher über Gleich- und Wechselrichter hinweg Isolationsfehler in Bezug auf die Fahrzeugmasse detektieren kann. Dieser trennt im Fehlerfall zuerst den Generator vom Zwischenkreis. Besteht der Fehler weiterhin, wird die Maschine stillgelegt. Dazu ist das elektrische Netz als vollständig isoliertes IT-System (frz. Isolè Terrè) ausgeführt. Dabei stellt der einfache Fehler (z. B. eine Phase hat Kontakt zur Fahrzeugmasse) keine Gefährdung für Maschine oder Fahrer dar, weil der Stromkreis erst durch einen zweiten Fehler geschlossen wäre. Durch die dauerhafte Überwachung und Anzeige des Isolationswiderstandes bietet sich bei negativem Trend die Möglichkeit zur vorsorglichen Wartung. Dadurch bietet das IT-System eine höhere Betriebssicherheit als andere Stromversorgungssysteme.

4.1.5 Prüfstandsversuche zur Analyse des Wirkungsgradverhaltens

Mit zunehmenden Kosten für Betriebsmittel, insbesondere Kraftstoff, steigt die Bedeutung von hocheffizienten Antriebssystemen. Eine Wirkungsgradverbesserung im Triebstrang kann bei gleichbleibender Maschinenleistung den Kraftstoffverbrauch direkt reduzieren. Um die beiden alternativen Lösungen hinsichtlich ihres Wirkungsgradverhaltens während typischer Einsatzsituationen analysieren zu können, müssen diese an einen Prüfstand reproduzierbar belastet und untersucht werden. Der Feldversuch würde, bedingt durch die Heterogenität des Aufwuchses, nur die Möglichkeit einer statistischen Auswertung der Daten bieten. Eine reproduzierbare Beschickung der Maschine im Labor zur Belastung der Aggregate ist bedingt durch den enormen Durchsatz nicht realisierbar.

Um die typischen Betriebspunkte auch für den Generator am Prüfstand darstellen zu können, müssen sowohl der Einzugsmotor als auch beide Vorsatzmotoren gleichzeitig belastet werden.

Die Forderung, die im Gegensatz zu den Anwendungen in der Industrie, oft dynamischen Betriebspunkte am Prüfstand darstellen zu können, verlangt nach einem Prüfstand mit zwei dynamisch ansteuerbaren Lastbremsen im Leistungsbereich von jeweils unter 100 kW. Als einzig möglicher Kooperationspartner hat sich dafür die Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft e.V. (DLG) mit dem für Traktorentest genutzten Zugleistungsmesswagen herauskristallisiert.

4.1.5.1 Prüfstandsaufbau und Messstellen

Prüfstand: Zugleistungsmesswagen DLG-PowerMix

Der DLG Prüf-LkW ist für die zyklische Belastung von drei Leistungsschnittstellen von Traktoren konzipiert. Er ermöglicht dazu ein sekundliches Update der Sollwerte der Schnittstellen. Zur Belastung der Baugruppen wurde an die Gelenkwellschnittstelle des Prüf-LkW der Vorsatzantrieb und an die hydraulische Schnittstelle der Einzugsantrieb gekoppelt. Auf Seiten des Einzuges wurde dazu zusätzlich ein hydraulisches Pumpenaggregat aufgebaut, welches über einen geschlossenen Hydraulikkreis die Leistung des Einzugsmotors am Regelventil der Schnittstelle am Prüf-LkW umsetzt. Abbildung 3 zeigt den Prüfstandsaufbau mit Feldhäcksler, DLG-Schnittstellenmodul, Pumpenaggregat und Prüf-LkW im Überblick.

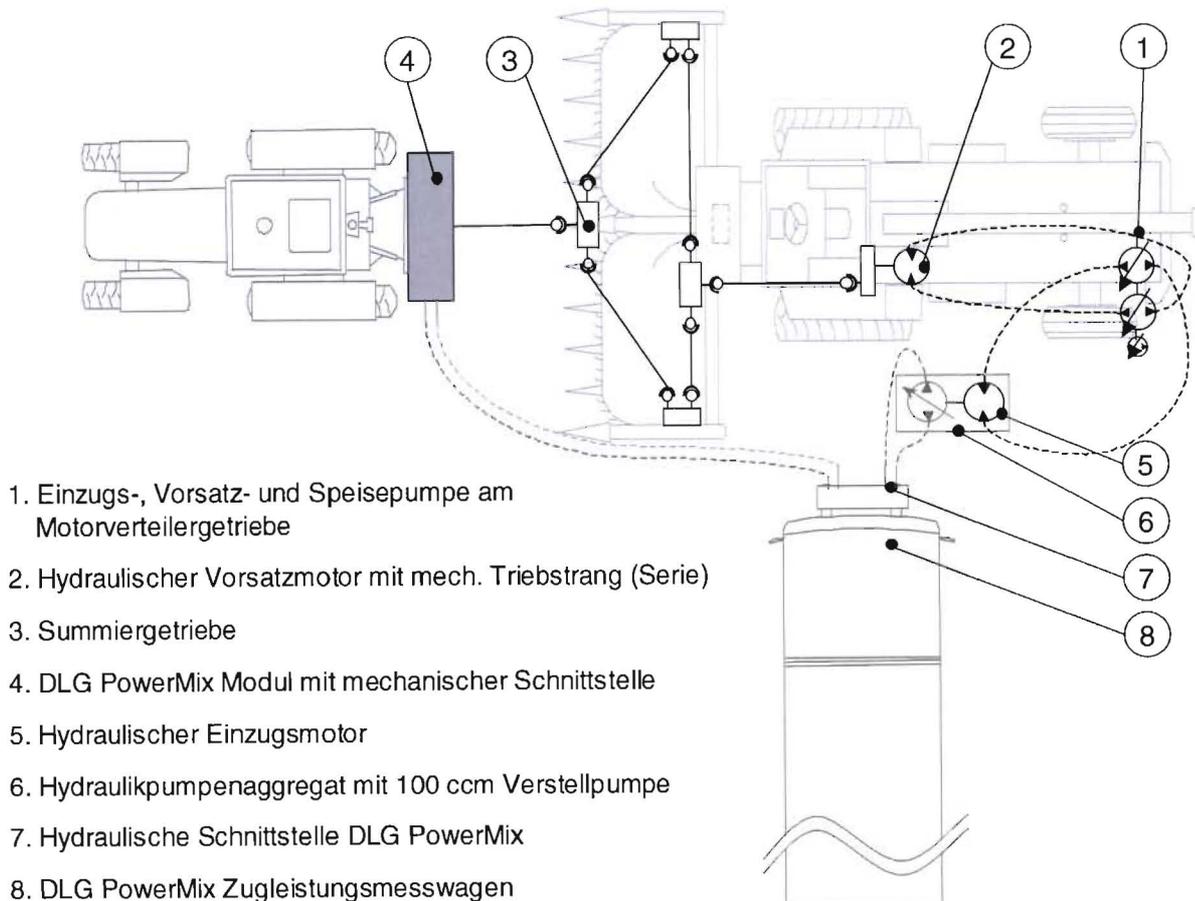


Abbildung 3: Versuchsaufbau mit Feldhäcksler und DLG-Zugleistungsmesswagen für die mechanisch-hydraulische Antriebsstrangmessung

Ungenutzt bleibt dabei die Zugleistungsmesseinrichtung des LkW.

Messgrößen hydraulischer Antriebsstrang

Die Messung des Strangwirkungsgrades beruht ausschließlich auf Messung der zugeführten und genutzten mechanischen Leistung. Dazu wurde zwischen Hydraulikpumpen und Motorverteilergetriebe ein Zwischenflansch mit Drehmomentmessnabe montiert. Diese ermöglicht das Aufzeichnen der am Pumpenturm umgesetzten mechanischen Leistung P_{ein} , erlaubt allerdings keine Differenzierung zwischen Einzug-, Vorsatz- und Speisepumpe. Die abgehende Leistung am Einzug wird direkt zwischen Einzugsantriebsmotor und belastender Hydraulikpumpe gemessen. Auf Seite des Vorsatzmotors erfolgt die Messung an der Eintriebswelle ins Kollektorwinkelgetriebe. Folglich kommt hier der Verlust durch die mechanischen Übertragungsglieder wie Gelenkwellen, Stirnrad- und Kegelradgetriebe zum Tragen. Dieser Messpunkt wurde gewählt, weil dies die gemeinsame Schnittstelle von Hydraulik und Elektrik darstellt.

Zur weiteren Detaillierung des Wandlungsverhaltens von Pumpen und Motoren wird parallel die hydraulische Leistung an Pumpen und Motoren gemessen. Damit sind exakte Aussagen zu Wandlungswirkungsgraden und Verlustursachen im Strang möglich. Die Ermittlung der hydraulischen Leistung erfolgt jeweils durch messen der Druckdifferenz an den Motoren und Pumpen und durch hochdruckseitiges messen des Förderstroms der Pumpen. Zusätzlich wird die Temperatur des Übertragungsmediums dokumentiert (siehe Abbildung 4). Damit sind Aussagen zum hydraulisch-mechanischen Wirkungsgrad eines Motors, dem Wirkungsgrad der hydraulischen Leistungsbereitstellung und dem Wirkungsgrad der Leistungsübertragung möglich.

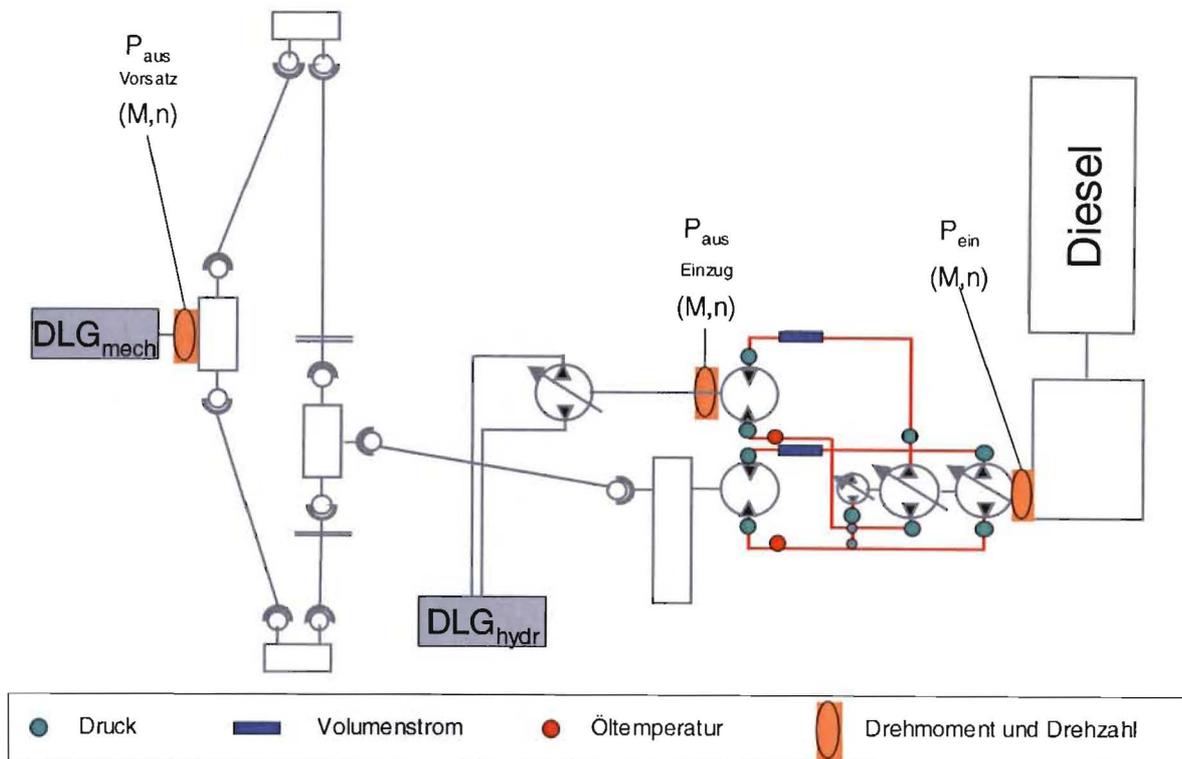


Abbildung 4: Messgrößen hydraulischer Antriebsstrang

Messgrößen elektrischer Antriebsstrang

Für die Bestimmung der Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebssystems wird die gleiche Messsystematik basierend auf den gleichen Drehmoment- und Drehzahl-Messpunkten verwendet. Zur Detaillierung von Wandlungs- und Übertragungsverlusten wird allerdings auf ein 4-kanaliges Leistungsmessgerät der Firma Zimmer Electronic Systems GmbH (ZES) zurückgegriffen. Dieses ermöglicht mit jedem Kanal eine einphasige Leistungsmessung in einem elektrischen System. Abbildung 5 zeigt die Messpunkte des ZES-Gerätes für die Ermittlung des Gesamtverhaltens und der Übertragungsverluste. Bei diesem Messaufbau wird die genutzte elektrische Leistung an den Motoren jeweils vor den Wechselrichtern im Gleichspannungszwischenkreis erfasst. Der verbleibende Kanal zeichnet parallel die Leistung des Generator über einen künstlichen Sternpunkt auf, davon ausgehend, dass diese symmetrisch über die drei Phasen übertragen wird. Um dies zu bestätigen und das Verhalten von Generator und Gleichrichterbrücke differenziert betrachten zu können, werden in einem zweiten Aufbau zum einen die drei Phasen des Generators, zum anderen die Gleichspannungsleistung am Ausgang der Gleichrichterbrücke ermittelt. In Kombination mit der mechanisch eingespeisten Leistung kann daraus ein Kennfeld für die mechanisch-elektrische Wandlung des Generators und zusätzlich die AC/DC Wandlung der Gleichrichterbrücke erarbeitet werden. Um diese Informationen auch für einen Motor verfügbar zu machen, wird in einem dritten Aufbau die DC-Leistung am Eingang des

Wechselrichters des Einzugsmotors und die 3-phasige AC-Leistung zwischen Wechselrichter und Motor ermittelt.

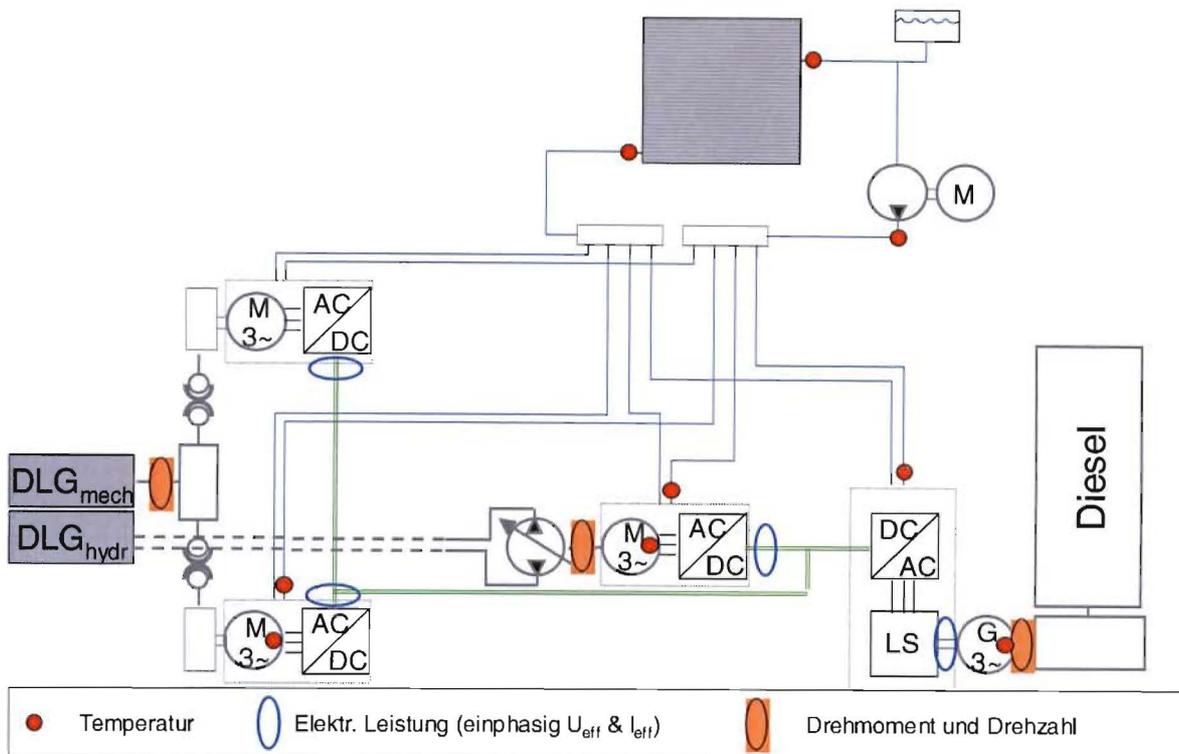


Abbildung 5: Messpunkte Elektrischer Triebstrang

Um die Notwendigkeit des Kühlsystems bewerten zu können, wird während der Leistungsbetrachtungen gleichzeitig die Kühlwasserrücklauftemperatur an allen Verbraucher gemessen. Neben Einzugsmotor, Vorsatzmotor und Generator mit Gleichrichterbrücke wird zur Bilanzierung zusätzlich die Temperatur an Kühler Vor- und Rücklauf sowie nach der Kühlmittelpumpe berücksichtigt. Während der Detaillierungsversuche wird umgestellt auf die Kühlmittel Vor- und Rücklauftemperatur des jeweiligen Aggregate. Zusätzlich wird dabei die jeweilige Temperatur in den Wicklungsköpfen über ein integriertes Pt100 protokolliert.

4.1.5.2 Versuchsplan zur Analyse des Wirkungsgradverhaltens

Als wesentliches Kriterium zur Beurteilung wurde der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs bereits herausgestellt. Als umfassende Basisinformation zu den einzelnen Aggregaten und zu den Gesamttriebsträngen wird für typische Betriebspunkte jeweils der stationäre Wirkungsgrad ermittelt. Dazu wurden beide Baugruppen parallel mit Nennmomenten zwischen 10 und 140% belastet, welche nacheinander für jeweils 30 s automatisch angefahren wurden. Das Referenzmoment als Standardbelastung der Baugruppe wurde als häufigster Betriebspunkt den Feldversuchsdaten des Jahres 2005 entnommen. Um unterschiedliche Drehzahlen und dadurch unterschiedliche Baugruppendrehzahlen abzubilden, ist dies für die theoretischen Häcksellängen von 6, 8 und 10 mm durchgeführt worden. Außerdem ist eine Differenzierung unterschiedlicher Dieselmotordrehzahl angezeigt. Zum einen hat im

hydraulischen Triebstrang eine Variation selbiger eine Anpassung der Baugruppendrehzahl zur Folge, zum anderen schwankt im elektrischen System zusätzlich die Zwischenkreisspannung. Dies hat bei gleichen Leistungen an den Baugruppen unterschiedliche Effektivströme zur Folge und ändert somit wesentliche Betriebsparameter der Elektromaschinen. Obige Variationen wurde deshalb für Dieselmotordrehzahlen zwischen 1500 und 1850 1/min mit einer Abstufung von 50 1/min untersucht.

Neben dem stationären Betriebsverhalten wurde auch das dynamische Verhalten untersucht, welches typisch ist für diese beiden Baugruppen. Dazu sind mit Hilfe einer erweiterten Monte-Carlo Methode typische Lastpunkte, Lastgradienten und Wechselwirkungen zwischen den Antriebssystemen aus den Messdaten der Feldversuche in 2005 in dynamische Prüfzyklen zur Steuerung der Lastmaschinen des Prüfstandes übertragen worden. Eine genauere Beschreibung zur Generierung der Prüfzyklen ist zu finden in Kapitel 4.1.5.3. Beide Baugruppen wurden am DLG-Zugleistungsmesswagen parallel mit den Prüfzyklen beaufschlagt, sodass auch für Pumpen und Generator eine typische Belastung gegeben ist. Auch bei den dynamischen Untersuchungen wurde Lastniveaus zwischen 60 und 130% betrachtet. Für das Lastniveau von 100% wurde zusätzlich die Variation der Dieselmotordrehzahl zwischen 1500 und 1850 1/min durchgeführt bei unterschiedlichen theoretische Häcksellänge zwischen 6, 8 und 10 mm.

4.1.5.3 Generierung typischer dynamischer Prüfzyklen

Im Vergleich zur stationären Anwendung unterscheiden sich die Belastungen in den Erntemaschinen insbesondere dadurch, dass typische dynamische Zyklen auftreten. Diese resultieren zum einen aus Verfahren, Schlag- und Bearbeitungsform, welche die zeitlichen Anteile von Arbeitsfahrt und Wende- und Stillstandszeiten bestimmen. Zum anderen sind typische Lastschwankungen an den Baugruppen bedingt, durch ungleichmäßigen Materialdurchsatz infolge von Bestandsheterogenitäten und Geschwindigkeitsschwankungen. Diese Parameter sollen im Prüfstandsversuch mit dargestellt werden, da daraus ein deutlich unterschiedliches Einsatzspektrum für die Antriebe resultiert.

Ziel ist es deshalb, dieses typisch dynamische Verhalten mit Lastniveau und Lastgradient und Abhängigkeiten zwischen Baugruppen statistisch in Testzyklen abzubilden. Dies basiert auf einer Analyse der Häufigkeitsverteilungsmatrix, welche die Wahrscheinlichkeit obiger Parameter in den gemessenen Betriebspunkten beschreibt. Der Ansatz ist als modifizierte Monte-Carlo Analyse bekannt und ist für die Automobilbranche erweitert worden, um aus Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmessdaten verschiedener Fahrer ein Fahrprofil für den Automobiltest abzuleiten. Für die oben beschriebene Aufgabenstellung ist es aber notwendig dies zu erweitern. Zum einen, um die Differenzierung unterschiedlicher Phasenabschnitte im Zyklus zu ermöglichen und zum anderen, um die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen abbilden zu können. Nur die korrekte Abbildung dieser Differenzierung

im Prüfzyklus ermöglicht eine realitätsnahe Belastung von Pumpen und Generator. Bedingt durch den statistischen Ansatz müssen aber bei der Prüfzyklengenerierung folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Die Messdatenbasis muss alle unterschiedlichen Bedingungen beinhalten, welche den zu simulierenden Parameter beeinflussen
- Die gemessenen Parameter müssen dem zu simulierenden Zyklus angepasst werden. Zur Darstellung des Belastungsverhaltens ist die Messung von Drehmoment und Drehzahl ausreichend.
- Vor Beginn der statistischen Datenaufbereitung ist es notwendig, die Messdaten in die unterschiedlichen Phasenabschnitte eines Zyklus aufzuspalten

Für die weitere Datenverarbeitung werden deshalb folgende sieben Phasenabschnitte unterschieden:

1. Baugruppen abgeschaltet
2. Beschleunigungsphase während des Anschaltens
3. Abklingen nach Anschaltbeschleunigung
4. Leerlauf
5. Arbeiten unter Last
6. Abschalten der Aggregate
7. Abklingen nach dem Abschalten

Bedeutend für die späteren Untersuchungen sind insbesondere die Leerlauf- und Lastphase, weil die Effektivität der Leistungsübertragung stark von der Auslastung des Systems abhängig ist. Die Filterung basiert auf einer sequentiell arbeitenden Filterroutine, umgesetzt in SCILAB (Open Source MATLAB), welche die Daten solange einem Phasenabschnitt zuordnet bis die Wechselkriterien für einen Phasenübergang erfüllt sind. Für diese Daten wird im Anschluss eine Häufigkeitsverteilungsmatrix mit den Dimensionen Drehmoment, Drehmomentgradient und Führungsvariable errechnet. Die Führungsvariable dient dazu, das Verhalten in Abhängigkeit zu dieser festzuhalten. Für die Beschreibung der hydraulischen Kreise Vorsatz und Einzug ist das Lastmoment am Vorsatzmotor geeignet, weil alle weiteren Baugruppen im Verarbeitungsprozess nachgeordnet sind. Zur Berechnung des Prüfmomentverlaufs wird die Häufigkeitsverteilungsmatrix in eine Summenhäufigkeitsverteilungsmatrix überführt, wobei die Aufsummierung in der Dimension des Drehmomentgradienten erfolgt. Bei bekannter Führungsgröße und bekanntem aktuellen Drehmoment beschreibt diese Matrix die Wahrscheinlichkeit, dass ein Gradient auftritt. Dies wird genutzt, um aus dem aktuellen Moment, der Führungsgröße und einer normalverteilten Zufallszahl den Drehmomentgradient aus der Matrix zu interpolieren und über folgende Iteration das zukünftige Lastmoment vorherzusagen:

$$x_i = x_{i-1} + (\delta x / \delta t) \Delta t$$

Eine genauere Beschreibung des Methodischen Ansatzes zur Generierung von typischen dynamischen Zyklen ist in [GA06] veröffentlicht.

4.2 Teilziel II „Intelligente Wälzlager“

4.2.1 Geplante Vorgehensweise

Für dieses Teilziel waren drei in sich geschlossene Versuchseinheiten vorgesehen:

- II-I Grundlegende Prüfstandsversuche zur Messgrößenbereitstellung für Steuerungs- und Regelungsprozesse und Zustandsüberwachung mit 4 Arbeitspaketen
- II-II Feldversuche zur Messgrößenbereitstellung für Steuerungs- und Regelungsprozesse, Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) und Betriebsdatendokumentation mit 4 Arbeitspaketen
- II-III Signalcharakterisierung und systemtheoretische Bewertung mit 2 Arbeitspaketen

Allerdings bedurfte es dazu einer Fremdzulieferung durch die FAG (Schäffler KG), denn das Arbeitsprogramm setzt voraus, dass FAG für die Baugruppen „Häckseltrommel“ und „Vorpresswalzen“ geeignete „Intelligente Wälzlager“ adaptiert und bereitstellt („Häckseltrommel“: April - Juni 2005; „Vorpresswalzen“: November 2005 - Januar 2006). Dies gilt für die gesamte Wälzlagereinheit mit all seiner mechanischen, messtechnischen und schnittstellentechnischen Funktionalität.

Zur Bearbeitung der Aufgabenstellung sollten in den jeweiligen Versuchseinheiten folgende Arbeitspakete abgearbeitet werden:

II-I Prüfstandsversuche

Referenzmessungen am stationärem Prüfstand sollten der Ermittlung von Signalverläufen unter definierten Einsatzbedingungen und der Entwicklung eines geeigneten Messwerterfassungssystems dienen. Diese Arbeiten sollten die Grundlage für die Erprobung im Feldversuch darstellen und wären die Ausgangsbasis zur Signalcharakterisierung.

AP 1 & AP 3: Für die vorgesehenen Untersuchungen sollten zwei unterschiedliche Prüfstandsausprägungen realisiert werden. Die jeweils erforderliche Antriebsleistung sollten dazu über einen geeigneten Traktor und eine Gelenkwelle zugeführt werden. Die Prüfstandsbaugruppen sollten Originalteile der Exakt-Feldhäckslerserie KRONE Big X sein. Beide Prüfstände sollten beim Antragsteller konstruiert und gebaut werden (AP 1: Prüfstand I „Häckslertrommel“: April - Juni 2005; AP 3: Prüfstand II „Vorpresswalzen“: November 2005 - Januar 2006). Betrieben sollten sie beim Kooperationspartner werden.

AP 2: Der Betrieb der Baugruppe „Häckseltrommel“ sollte in den Betriebsphasen Leerlauf (ohne Materialzuführung), Gegenschneidenverstellung und Messerschleifen für unterschiedliche Drehzahlen untersucht werden. In einer ersten Versuchsreihe sollte die

Trommel zentral angetrieben werden, um einen möglichst störungsfreien und belastungsfreien Betrieb analysieren und die erreichbaren Signalcharakteristika und Signalverläufe erfassen zu können (*Juli 2005*).

In einem zweiten Schritt sollte der Antrieb entsprechend der Verhältnisse im Feldhäcksler über ein Riemengetriebe erfolgen und damit eine konstruktiv bedingte Vorspannung auch im Leerlauf enthalten (*Januar - Februar 2006*). Diese Daten sollten die Referenz für die Feldversuchs-Messungen mit realem Arbeitsprozess darstellen. Die Simulation der realen Arbeitstätigkeit mittels Materialzuführung ist aufgrund der extremen Durchsatzleistung eines modernen Feldhäckslers im Aufwand nicht vertretbar und wird vom Antragsteller und den Wettbewerbern nicht durchgeführt. Vielmehr werden dazu Maschinentests direkt im Feld gefahren.

Hingegen wäre das Messerschleifen und die Gegenschneidenverstellung im Bauteiltest simulierbar und analysierbar. Die beteiligte Aktorik sollte dabei manuell bedient werden. Die Prüfstände sollten mit dieser Sonderausstattung ausgerüstet werden.

AP 4: Der Betrieb der Baugruppe „Vorpresswalzen“ sollte mit und ohne Materialzuführung für unterschiedliche Drehzahlen untersucht werden (*Januar - April 2006*). Die Baugruppe sollte dabei direkt über das serienmäßige Verteilergetriebe über die Zapfwelle des beim Kooperationspartner vorhandenen Schleppers angetrieben werden.

Der Leerlaufbetrieb sollte die Analyse eines möglichst störungs- und belastungsfreien Betriebsverhaltens ermöglichen. In einem zweiten Schritt sollten der Einheit Holzbretter verschiedener Stärke mit einheitlichem und unterschiedlichem Profil zugeführt werden. Diese Versuchsanstellung sollte die reproduzierbare Untersuchung des Verhaltens bei symmetrischer und asymmetrischer Krafteinbringung und den Einfluss unterschiedlicher Materialstärken erlauben.

II-II Feldversuche

Realistische Einsatzdaten lassen sich nur über Feldversuche und zugehörige Belastungsprofile gewinnen. Vorgesehen waren wiederholte Einsätze im „regulären Testbetrieb“ des Antragsstellers unter Mitwirkung des Kooperationspartners bei der Mais- und Grasernte.

AP 5: Dazu sollte für die Feldversuche bei der Maisernte ein Exakt-Feldhäcksler (KRONE Big X) mit „Intelligenten Wälzlagern“ für die Häckslertrommel umgerüstet werden (*August 2005*). Für die Feldversuche bei der Grasernte sollte der Feldhäcksler mit „Intelligenten Wälzlagern“ an Häckslertrommel und Vorpresswalzen ausgestattet werden (*April - Mai 2006*).

AP 6: Das in den Prüfstandsversuchen entwickelte Messwerterfassungssystem sollte für die beiden geplanten Versuchszeiträume in den vorbereiteten Feldhäcksler integriert werden (*August - September 2005; April - Mai 2006*).

AP 7: Die vorgesehenen Feldversuche in Mais sollten vor allem mit der Zielrichtung der Ermittlung von Messgrößen für eine Zustandsüberwachung und für eine optimierte

Anpassung der Motorsteuerung ans Lastprofil der Häckseltrommel durchgeführt und schrittweise weiterentwickelt werden (*September - November 2005*).

AP 8: Zusätzlich sollte beim Versuchseinsatz bei der Grasernte (*Mai - August 2006*) die Erkennung des Messerverschleißes und die Steuerung der Gegenschneidenverstellung von besonderem Interesse sein. Denn gerade der Einsatz im Gras (Anwelksilage) führt zu verstärktem Schärfeverlust der Häckseltrommelmesser und sollte so ermöglichen, das sich dadurch verändernde Betriebsverhalten zu erfassen und zu bewerten. Darauf aufbauend sollten die Wälzlagersignale als Eingangsgrößen für einen Überwachungs- und/oder Regelungsprozess dienen.

Die „Intelligenten Wälzlager“ in den Vorpresswalzen sollten Messgrößen für eine Ertragsermittlung und eine durchflussorientierte Quetschwalzensteuerung in Aussicht stellen. Alle Daten aus dem kontinuierlich arbeitenden Messwerterfassungssystem würden bisher nicht verfügbare Einsatzinformationen darstellen. Sie würden die Ausgangsbasis zu Überlegungen für die Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) bilden, um Rückschlüsse über das Potential für eine zustandsabhängige Wartung (vorbeugend) und eine Betriebsdatendokumentation ziehen zu können.

Als weitere Option war die Integration eines Positionsbestimmungssystems ((D)GPS) vorgesehen, um die Daten örtlich und zeitlich referenzieren zu können. Eine relativ einfache Zuordnung der tatsächlichen Fahrgeschwindigkeit des Häckslers und eine Erfassung ausgewählter Wälzlagerdaten in einem GIS (Geografisches Information System) wäre dadurch möglich.

II-III Signale, Messwerterfassung und -auswertung

AP 9: Das nötige Messwerterfassungssystem sollte beim Kooperationspartner entworfen und aus Kostengründen als Einzelstück realisiert werden (*April - Juli 2005*), d.h. das Messwerterfassungssystem kann entweder am stationären Prüfstand oder im Feldeinsatz betrieben werden. Gewonnene Erfahrungen bei den Prüfstands- und Feldversuchen sollten zur Weiterentwicklung und Optimierung führen (*Januar - April 2006; Juni - Juli 2006*).

FAG (Schäffler KG) spezifiziert folgende Messgrößen als Ausgangssignale seiner „Intelligenten Wälzlager“: Drehzahl, Drehrichtung, Radialkraft, Axialkraft, Kraftrichtung, Unwucht, Stoßimpulse und Temperatur.

Die Messgrößen Drehzahl, Drehrichtung, Radialkraft und Kraftrichtung lassen erwarten, dass sie als Größen für Steuerungs- und Regelungsprozesse geeignet sind. Unwucht, Stoßimpulse und Temperatur bieten aussagekräftige Informationen über den aktuellen Bauteilzustand.

Die spezifizierten Messgrößen werden von dem Wälzlager über eine CAN-Schnittstelle bereitgestellt. Das zu entwickelnde Messwerterfassungssystem sollte mit dem Sensor über ein CAN-Bussystem kommunizieren und sollte über Datenaufzeichnungs-Funktionalität mit ausreichender Speicherkapazität für Feldversuche verfügen.

AP 10: Die Verfahren der Signalanalyse sollten vom Kooperationspartner entwickelt und auf die gewonnenen Messdaten angewendet werden (*Juli - August 2005; Oktober 2005 - September 2006*). Ein Teil der Signalverarbeitung und -aufbereitung sollte online auf dem Messwerterfassungssystem erfolgen. Zeitkritische Auswerteprozesse, nachgelagerte Signalanalysen und systemtheoretische Bewertungen sollten im Offline-Verfahren in Büroumgebung durchgeführt werden. Unter Ausnutzung der Programmierfähigkeit der eingesetzten CAN Analyse- und Netzwerk-Entwicklungsumgebung sollten Aufgabenteile einer Lösung zugeführt werden. Weiterführende Signalverarbeitung und -charakterisierung sollte mit einem Mathematik-Software-Programmpaket einschließlich zusätzlicher Erweiterungs-Funktionsbibliotheken zu Statistik, Signalverarbeitung und Datenbankanbindung ausgeführt und visualisiert werden.

4.2.2 Probleme und Änderung des Arbeitsplans

Wie bereits dargelegt, war die Grundlage für eine erfolgreiche Projektdurchführung eine Fremdzulieferung durch die FAG (Schäffler KG), denn das aktuelle Arbeitsprogramm setzte voraus, dass FAG (Schäffler KG) für die Baugruppen „Häckseltrommel“ und „Vorpresswalzen“ geeignete „Intelligente Wälzlager“ adaptiert und bereitstellt.

Aufgrund technologischer Probleme kam es jedoch bei der Bereitstellung adaptierter „Intelligenter Wälzlager“ -Prototypen zu schwerwiegenden Verzögerungen und Einschränkungen, die eine Änderung des gesamten geplanten Versuchsprogramms erforderten.

Zusammenfassend sind folgende technische Einschränkungen festzuhalten:

- Nur der Wälzlager-Standardtyp NU212E.TVP2 war verfügbar. Aufgrund seiner Abmessungen und Walzkörperform (Zylinderrollen anstatt Pendelrollen) ist dieser Wälzlagertyp ohne gravierende Einschränkungen bei der Standfestigkeit und des Laufverhaltens nicht in die Big X Baugruppen „Häckseltrommel“ und „Vorpresswalzen“ integrierbar. Das zur Verfügung stehende Los war auf 4 Stück begrenzt.
- Nacheinander wurden diese 4 Prototypen eines intelligenten Wälzlagers geliefert und getestet. 3 Stück wiesen fertigungsbedingte Fehlfunktionen der Sensorik auf und waren nicht verwendbar bzw. eines nur unter Vorbehalt für Untersuchungen zum dynamischen Verhalten.
- Der 4. Wälzlager-Prototyp war geeignet, jedoch erst nach Einsatz einer anderen DSP-Software.
- Mit einem Defekt der empfindlichen Technologie musste stets gerechnet werden, eine entsprechende vorsorgende Behandlung ist jedoch nicht bekannt. So konnten mit dem 4. Wälzlager nach den steady state – Untersuchungen die vorgesehenen Messungen

zum dynamischen Verhalten nicht mehr durchgeführt werden, da mit dem Sensorsystem kein Datenaustausch mehr möglich war.

- In dem FAG vorliegenden und gelieferten Los fand eine Designänderung bei der Schnittstellenbelegung statt, die zur Folge hatte, dass der Temperatursensorwert nicht mehr ausgelesen werden konnte.

Zusammenfassend sind folgende zeitlichen Einschränkungen festzuhalten:

- Verfügbarkeit Experimentierboard-Simulation: 18.10.2005;
Nur CAN-Kommunikation
- Verfügbarkeit 1. Wälzlager-Prototyp: 15.02.2006; defekt
- Verfügbarkeit 2. Wälzlager-Prototyp: 12.04.2006; defekte Halbbrücke
- Verfügbarkeit 3. Wälzlager-Prototyp: 21.06.2006; defekt
- Verfügbarkeit 4. Wälzlager-Prototyp und DSP-Controller mit anderer Software und Funktionalität zur Aufzeichnung von Rohsignalen: 21.06.2006; nach steady state Messungen defekt ab Mitte Dez. 2006

Da der verfügbare Wälzlagertyp nicht in die vorgesehenen Feldhäcksler-Baugruppen integrierbar war, wurde das Hauptgewicht des Projektprogramms auf die Untersuchung der grundsätzlichen Anwendbarkeit dieser Technologie im landtechnischen Einsatz sowie Anregung und Begleitung bei der Weiterentwicklung gelegt. Bedingt durch die Verzögerung bei der Verfügbarkeit eines einwandfrei funktionierenden und angepassten „Intelligenten Wälzlagers“ war die Integration in den Feldhäcksler und die Erprobung im Feld in der Vegetationsphase 2006 nicht möglich und die Vegetationsphase 2007 liegt außerhalb des Projektzeitraumes. Dementsprechend wurde der Arbeitsplan folgendermaßen abgeändert und durchgeführt:

II-I Prüfstandsversuche

AP 1:

Ein stationärer Prüfstand sollte beim Kooperationspartner entworfen, gebaut und in Betrieb genommen werden. Dieser Prüfstand sollte entsprechend skaliert die Verhältnisse an der Häckslertrommel simulieren können. Dabei sollte der Betrag der Radialkraft sowie der Lastwinkel auf 0° (Kraft senkrecht nach oben), 180° (Kraft senkrecht nach unten) und eine kleine Auslenkung von ca. 10-15° einstellbar sein. Der Antrieb sollte elektrisch erfolgen.

In einem ersten Schritt sollten erste Erfahrungen mit dem Sensorsystem gewonnen werden, um Parametereinstellungen vornehmen und Festlegungen für das weitere Versuchsprogramm treffen zu können.

AP 2:

Es sollten Messreihen durchgeführt werden, welche die Bestimmung der Transferfunktion (steady state) des Sensorsystems ermöglichen.

AP 3:

Dieses Arbeitsprogramm sollte sich auf die Ermittlung des dynamischen Verhaltens konzentrieren, im Speziellen dem Antwortverhalten auf Impuls- bzw. stufenförmige Last- und Lastwinkeländerungen.

AP 4:

--

II-II Feldversuche

AP5-8 konnten nicht durchgeführt werden, da die erste mögliche Vegetationsperiode nach Verfügbarkeit eines funktionsfähigen intelligenten Wälzlagers erst der Frühling 2007 gewesen wäre, was jedoch bereits außerhalb der Projektlaufzeit bis 28.02.2007 liegt.

II-III Signale, Messwerterfassung und -auswertung

AP9 und AP10 erfolgten entsprechend der ursprünglichen Projektplanung.

Eine Integration eines Ortungssystems ist jedoch nicht erfolgt, da im Versuchszeitraum keine Feldeinsätze durchgeführt wurden.

Zusätzlich wurde jedoch die Möglichkeit der Rohsignalaufzeichnung als erweiterter Funktionsumfang implementiert und stellt somit weiterführende Möglichkeiten zur Verfügung.

4.2.3 Das „intelligente Wälzlager“

Dehnungsmessungen am stehenden Lagerring sind nach (HERING, 2004) das technologische Grundprinzip des „Intelligenten Wälzlagers“. Somit besteht die Möglichkeit, Wälzkörperkräfte zu ermitteln und die äußere Kraft aus der Vektorsumme über die Wälzkörperkräfte zu bestimmen. Beim eingesetzten Lager sind acht DMS-Sensoren gleichmäßig über den stehenden Lagerring verteilt. Nach hochauflösender A/D-Wandelung aller DMS-Messwerte werden über signalanalytische Verfahren wie mehrstufige Filterungen (Rauschunterdrückung, FIR, IIR) und Auswertung des Zeitverhaltens der Dehnungen neben dem Signalhub (Amplitude) weitere Größen, wie z.B. Drehzahl, Drehrichtung und Körperschall abgeleitet. Die DMS (Dehnungsmessstreifen)-Messtechnik, die Temperaturerfassungssensorik als auch grundlegende Signalverarbeitung ist in einem ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) realisiert. Die resultierenden Rohsignale werden anschließend in einer zweiten Stufe mittels eines DSP (Digital Signal Processor) zusätzlich

weiter bearbeitet. Die Aufgaben des DSP sind: Initialisierung und Abfrage der ASICs, Bestimmung des Kraftvektors, Unwuchtdetektion, Stoßimpulsanalyse, Temperaturberechnung, Plausibilitätsprüfungen und Datenweitergabe über die CAN-Bus Schnittstelle. Zusammenfassend gilt: der Einsatz dieser Technologie erlaubt es gleichzeitig mehrere Betriebsdaten wie Drehzahl und -richtung, Lastvektor und Stoßbeanspruchung verfügbar zu machen. Dies geschieht durch Beobachtung und Interpretation einer einzigen Messgröße, nämlich der Dehnung bestimmter Konturen am stehenden Lagerring. Die Hinzunahme der Temperaturinformation erlaubt weitere kontextabhängige Interpretationsmöglichkeiten. Bei dieser Technologieentwicklung hat FAG (Schäffler KG) großen Wert darauf gelegt, wesentliche Eigenschaften des Originallagers (Einbaumaße, Tragzahlen usw.) unverändert zu lassen (Abbildung 1).

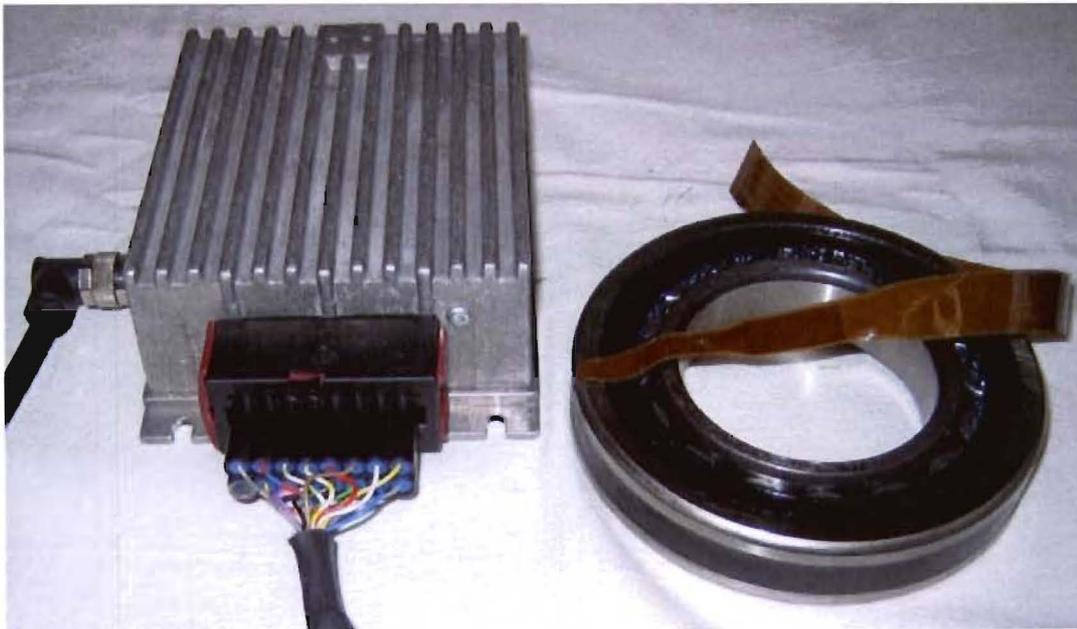


Abbildung 6: "Intelligentes Wälzlager" (oben), eingebaut (unten)

Das angebotene Leistungsvermögen der „Intelligenten Wälzlager“ ist bei (HERING, 2004) näher beschrieben.

4.2.4 Prüfstand und Messwerterfassungssystem

4.2.4.1 Prüfstand

Der gesamte Prüfstand besteht im wesentlichen aus den folgenden Hauptkomponenten:

- Aufnahme für das „Intelligente Wälzlager“
- Achse mit Häckslertrommelnachbildung (ca. 40 kg)
- Elektrischer Antrieb
- Bedienelemente (Notaus, Umdrehungsrichtung und -geschwindigkeit)
- Vier unabhängige Hebel mit jeweils Kunststofflaufrollen und einer Befestigungsvorrichtung für Gewichte zur Einbringung von Kräften auf die Achse

Abbildung 2 zeigt den Prüfstand zusätzlich mit dem Messwerterfassungssystem. Die exakten Abmessungen, der Einbauort des „Intelligenten Wälzlagers“ sowie die Krafteinleitungspunkte auf der Hauptachse dokumentiert Abbildung 3.

Die Belastung kann für jeden Hebel in diskreten ca. 10 kg Schritten von 0 – 90 kg entsprechend der aufgebrachten Gewichte verstellt werden. Die resultierenden Kräfte lassen sich über die bekannten Hebelverhältnisse und Prüfstandsgeometrie bestimmen:

- $F_{\text{Bearing}} = m_{G1} * 9,441 \text{ m/s}^2 + m_{G2} * 37,451 \text{ m/s}^2 - 196,120 \text{ N}$ (Solllastwinkel 0°)
- $F_{\text{Bearing}} = m_{G1} * 9,871 \text{ m/s}^2 + m_{G2} * 39,159 \text{ m/s}^2 + 196,120 \text{ N}$ (Solllastwinkel 180°)
- $F_{\text{Bearing}} = m_{G1} * 5,251 \text{ m/s}^2 + m_{G2} * 20,832 \text{ m/s}^2 - 196,120 \text{ N}$ (Solllastwinkel $14,85^\circ$)

(mit F_{Bearing} als im Lager wirkende Kraft; m_{G1} Masse des Gewichts an dem Motor nahen und m_{G2} dem „Intelligenten Wälzlager“ nahen Hebel.)

Eine Einstellung des Lastwinkels erfolgt durch Belastung nur der unteren Hebel (0°), nur der oberen Hebel (180°) oder mittels horizontaler Verstellung der unteren Hebel ($14,85^\circ$; (ohne Last auf den oberen Hebeln)).

Der elektrische Antrieb basiert auf einem Drehstrom-Asynchronmotor (SEW DT90L4) mit aufgebautem Frequenzumrichter und Sollwertwandlermodul. Der Motor leistet 1,5 kW bei 1400 U/min und konstantem Moment. Somit ist der Prüfstand über das U/f - Steuerverfahren (Rampenzeit = 1 s, PWM-Frequenz = 8 kHz) im Bereich von ca. 140 U/min bis 1400 U/min einstellbar.

Die grundsätzliche Bedienung wird in Abbildung 4 verdeutlicht. Über einen Hauptschalter wird der elektrische Antrieb mit der Drehstromversorgung verbunden bzw. davon getrennt und dient somit auch als Notaus. Der Motor setzt sich jedoch nur in Bewegung, wenn der Schalter „Umdrehungsrichtung“ sich nicht im neutralen Schaltzustand, sondern in den Schalterstellungen für „Im Uhrzeigersinn“ oder „Gegen Uhrzeigerzinn“ befindet. Über ein Potentiometer wird die Umdrehungsgeschwindigkeit gewählt.



Abbildung 7: Prüfstand mit Messwerfassungssystem

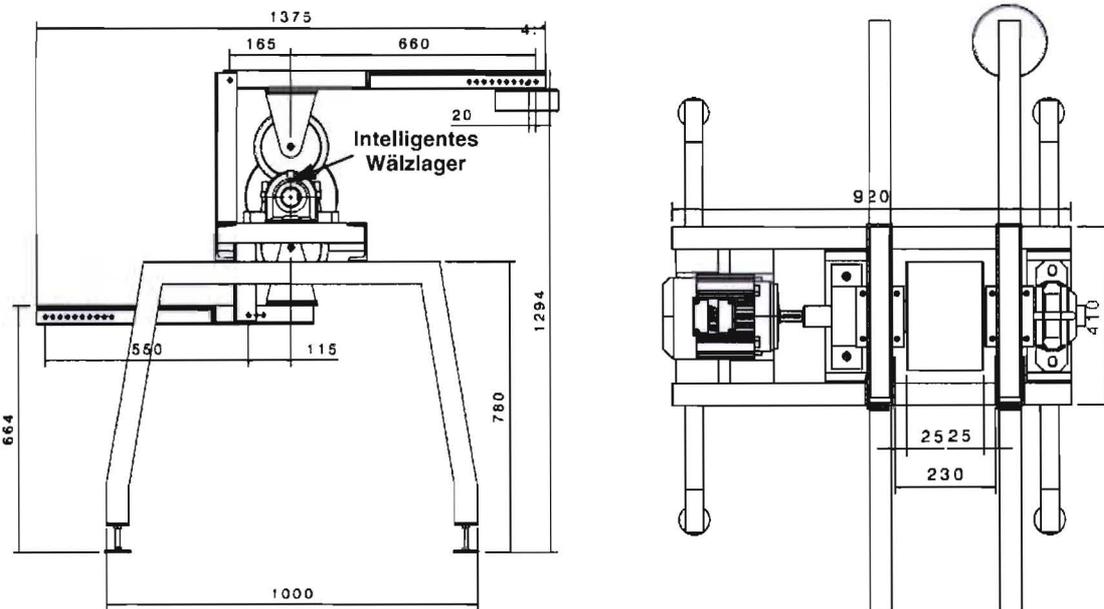


Abbildung 8: Abmessungen Prüfstand

4.2.4.2 Messwerterfassungssystem

Den Systemaufbau des Messwerterfassungssystems gibt die untere Hälfte der Abbildung 4 wieder. Grundsätzlich kommuniziert die „Intelligente Wälzlager“ DSP-ECU mit dem ASIC im Wälzlagerkörper über ein proprietäres Bussystem. Hierbei ist jedoch unbedingt festzuhalten, dass diese DSP-ECU ein Bestandteil des „Intelligenten Wälzlagers“ ist. Zusätzlich ist zwischen der DSP-ECU und dem massiven Metallkörper bzw. Kugellagergehäuses des Prüfstandes eine Vorrichtung zum Potentialausgleich erforderlich. Über seine CAN-Busschnittstelle kann das „Intelligente Wälzlager“ in MSR-Systeme integriert werden und sie wird auch für das erstellte Messwerterfassungssystem verwendet.

Zentrales Element ist ein Robust-Notebook (Kontron ReVolution) mit zwei unterschiedlichen CAN-Busschnittstellen. Einerseits kommt die aktive PCMCIA-Card CANcardXL (Vektor Informatik) zum Einsatz. Dieses Interface ist in der Lage selbst bei höchster Buslast und Busverkehr verlust- und problemfrei zu arbeiten. Andererseits findet auch ein USB-CAN-Umsetzer-Modul (RM Miachelidis) Anwendung. Dieses Modul emuliert jedoch nur eine serielle Schnittstelle (RS 232) mit 57 kBit/s und ist daher in der Leistungsfähigkeit eingeschränkt. Jedoch ist die Test- und Konfigurationssoftware von FAG nur für dieses Interface adaptiert. Als Übertragungsgeschwindigkeit der CAN-Datenübertragung wurde 250 KBit/s gewählt. Im einzelnen kam folgende Software zum Einsatz. FAG Software (Schäffler KG) (Schnittstelle USB-CAN-Konverter) dient zur Konfiguration, Steuerung und Überwachung des „Intelligenten Wälzlagers“. Des Weiteren bietet dieses Programm die Möglichkeit auch Rohsignale aufzuzeichnen, vorausgesetzt die geeignete Software ist in der DSP-ECU installiert. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Rohwerte jedes einzelnen der acht DMS-Sensoren nicht für den identischen Zeitabschnitt ermittelt werden, sondern sequentiell nacheinander. Sämtlicher CAN-Datenverkehr wurde mit dem CAN-Analyse-Programm CANalyzer (Vektor Informatik) in der Standardversion aufgezeichnet (Schnittstelle CANcardXL). Eine Online-Filterung wurde nicht implementiert, da sich die entsprechenden Datenidentifizierer beim proprietären FAG-Protokoll nur im Datenbereich der Nachrichten befinden. Eine Filterung auf dieser Ebene ist jedoch nur mit der CAPL-Programmierungsfähigkeit der CANalyzer Professional-Version möglich.

Die Referenzmessung der Umdrehungsgeschwindigkeit war nicht elektronisch in das Messwerterfassungssystem integriert, sondern wurde mit einem digitalem Tachometer ermittelt und manuell dokumentiert. Der batteriebetriebene optische Handdrehzahlmesser (Digitales Tachometer, (Horn-Elektronik Typ 430)) dient der berührungslosen Drehzahlmessung mit Hilfe einer Reflexionsmarke, die auf dem drehenden Teil angebracht wird. Der optimale Messabstand liegt zwischen 50 und 150 mm. Die Mess-Elektronik gewährleistet eine Genauigkeit von ± 1 U/min (bei 50 - 7000 U/min) bei 1 Sekunde Messzeit. Die Messung erfolgt jede Sekunde erneut, solange die Einschalttaste gedrückt wird, wobei eine Kontrolllampe durch Aufleuchten die richtige Lage des Gerätes zum Messobjekt anzeigt.

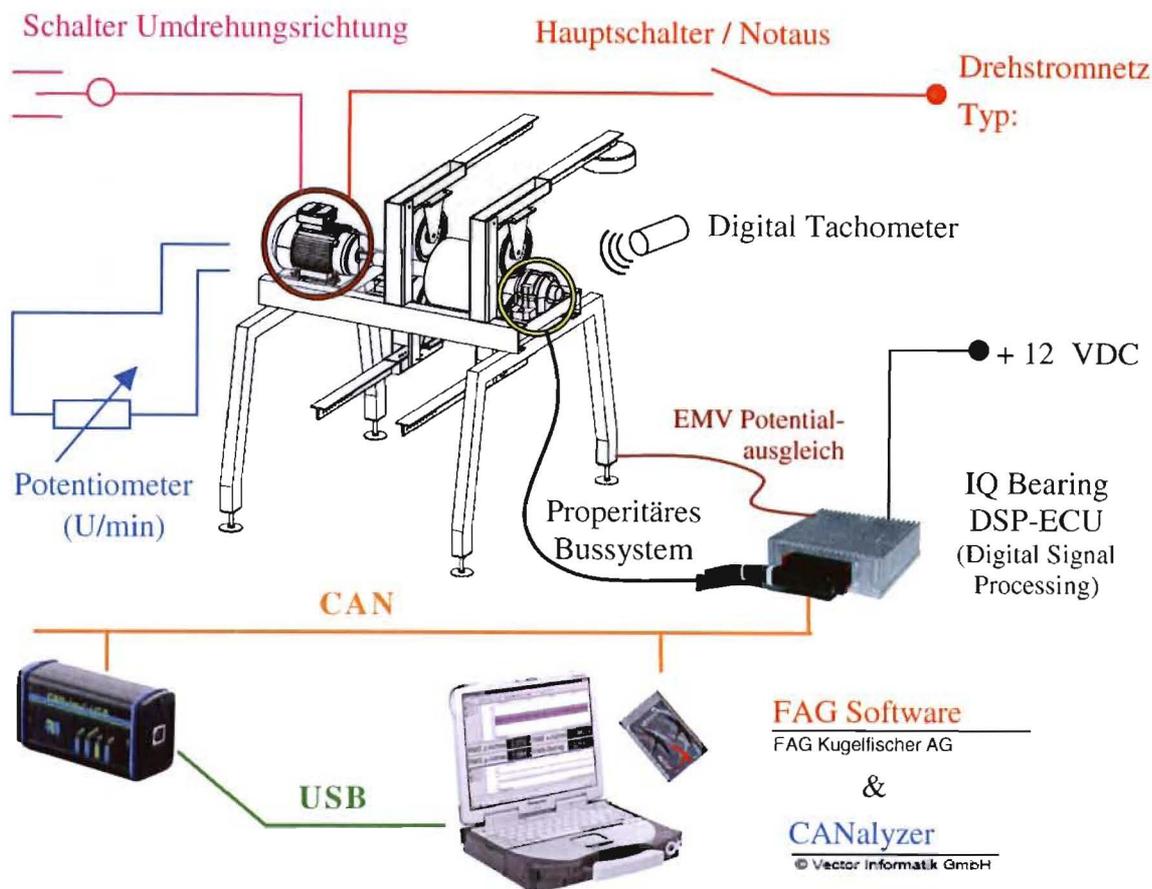


Abbildung 9: Systemdiagramm - Prüfstand mit Messwerterfassungssystem

4.2.5 Messwerterfassung, -auswertung und Datenanalyse

In Abb. 8 ändern:
„Proprietäres
Bussystem“ !!!

Zur Anwendung kommen sowohl Online- als auch Offline-Verfahren bei der Messwerterfassung, -auswertung und Datenanalyse. Abbildung 5 zeigt die Unterteilung in Online- und Offline-Verfahren, sowie die jeweilige Angabe der eingesetzten technisch-wissenschaftlichen Anwendungssoftware.

4.2.5.1 Online Verfahren

Die Rohsignale werden mittels der proprietären FAG Software aufgezeichnet. Dabei ist das Messintervall nur indirekt einstellbar, indem man die gewünschte Werteanzahl (default: 10.000) angibt. Weiterhin ist jeder einzelne DMS Sensor an- oder abwählbar. Gespeichert wird für jeden DMS Sensor eine eigene Datei im ASCII-Textformat.

Die Datenaufzeichnung des gesamten CAN-Datenverkehrs erfolgt via CANalyzer (Vektor Informatik). Es wird keine Filterung durchgeführt, der besseren Übersichtlichkeit halber im Trace-Fenster eine hexadezimale Kodierung gewählt und im ASCII Format abgespeichert.

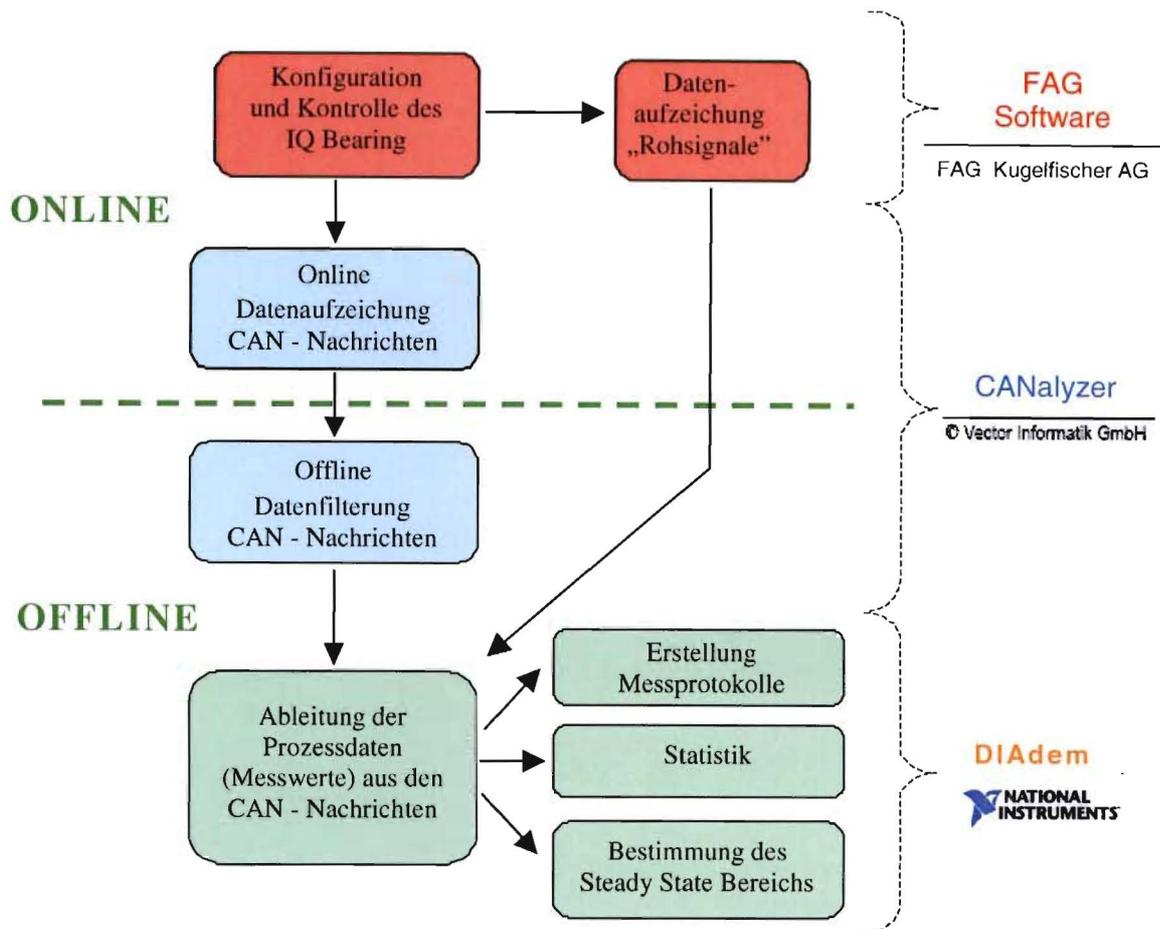


Abbildung 10: Flussdiagramm - Datenauswertung und Datenanalyse

4.2.5.2 Offline Verfahren

Auch für den ersten Teil der Offline-Verfahren kommt der CANalyzer zum Einsatz. Vor einer Weiterverarbeitung der Daten ist eine einfache Filterung und Datenkonvertierung durchzuführen, im Großen und Ganzen werden dabei vor allem Konfigurations- und Kontrollnachrichten entfernt und Formatumwandlungen durchgeführt.

Zuerst werden sämtliche Overheadinformation, die das CANalyzer-Programm online mitaufzeichnet, entfernt. Anschließend werden nur die Datentelegramme mit Ursprung Sensor (d.h. Source-Adresse „Intelligentes Wälzlager“) für die weitere Bearbeitung beibehalten. Dann muss der in hexadezimaler Form aufgezeichnete CAN-Nachrichtenstrom für die nachfolgende Datenverarbeitung in ein dezimales Format konvertiert werden.

Der wesentliche Teil der Offline-Datenanalyse und Reporterstellung wurde mit dem Programmpaket DIAdem (National Instruments) erarbeitet. Hierbei wurden die nachfolgenden Datenverarbeitungsschritte und Auswertungen durchgeführt, in Klammern ist der Durchführungsmodus angegeben:

- Ableitung der Prozessdaten (Messwerte) aus den CAN – Nachrichten; (Script)

- Zuweisung der DMS-Sensor-Rohsignale zu einer Zeitbasis; (interaktiv)
- Erstellung eines mehrseitigen Messprotokolls für jede einzelne Messung; (Script, Report-Template)
- Statistik (Mittelwerte, Varianz, Regression, Peaks); (Script)
- Bestimmung der steady state – Bereiche; (interaktiv)
- Bestimmung der Zeitintervalle bei den dynamischen Messungen; (interaktiv)
- Datenaggregation und Erstellung von 3-D-Diagrammen; (interaktiv, Report-Template)

4.2.6 Versuchsdurchführung

Steady state Messungen:

Bedingt durch die fehlende Regelung erfolgte der grundlegende Ablauf einer Steady state Messung gemäß folgender Vorgehensweise:

1. Gewichte aufbringen, dabei Motorstillstand.
2. Einstellung auf Solldrehzahl. Drehgeschwindigkeitsüberwachung mittels digitalem Tachometer und manuelle (Nach)Regelung.
3. Elektrischen Antrieb ausschalten.
4. Starten der CANalyzer Trace- und Logging-Programmfunktionen und ein kurzfristig zeitversetzter Start des elektrischen Antriebes, der dann auf die zuvor eingestellte Umdrehungsgeschwindigkeit hochläuft.
5. Ausschalten des elektrischen Antriebes nach ca. 200 sec (gemessen ab Start von 4.)
6. Stoppen der CANalyzer-Datenaufzeichnung.

Diese Prozedur wurde für alle Konfigurationen mit unterschiedlichen Gewichten, Drehzahlen und Lastwinkeln angewandt. Für die steady state Messungen wurde die Prozessdaten-Update rate auf den Default-Wert von 0.5 Hz konfiguriert. Im Unterschied dazu wird bei der Rohsignalmessung nicht über 200 sec aufgezeichnet, sondern nur solange bis für alle acht DMS-Sensoren jeweils 10.000 Messwerte (Abtaste ~ 80 kBit/s) aufgezeichnet wurden.

Messungen zum dynamischen Verhalten:

Die Systemantwort des „Intelligenten Wälzlagers“ auf eine Einheitssprungfunktion mit steigender als auch mit fallender Flanke wurde realisiert, so dass sich sowohl der Lastwinkel (Sollwertsprung: 180°) als auch gleichzeitig der Betrag der Radialkraft (Sollwertsprung 0,65 kN) schlagartig ändern. Dabei wurde folgendermaßen vorgegangen:

In einer ersten Phase wird über Gewichte (insgesamt 45 kg) an den oberen Hebeln die Kraft auf die Achse und damit das Lager aufgebracht. Auch auf den unteren Hebeln werden bereits Gewichte angebracht (insgesamt 150 kg). Über eine zusätzliche Hebevorrichtung haben die Laufrollen jedoch gerade noch keinen Kontakt zur Achse und bringen folglich keine Last auf das System auf. Durch schlagartiges Absenken der Gewichte an den unteren Hebeln lässt sich

der betragsmäßige Radialkraftsprung und die Lastwinkeländerung bewerkstelligen. Basierend auf den Erfahrungen der steady state Messungen wurden 200 sec als Zeitintervall zwischen zwei Laständerungen gewählt. Um weitgehend unabhängig von Effekten der Laständerung auf den elektrischen Antrieb zu sein, wurde eine Drehzahl von 500 1/min eingestellt. Weiterhin liegt in diesem Bereich ein sehr „rundes“ Prüfstandslaufverhalten vor. Da das Hauptinteresse bei diesem Test auf den Einschwingzeiten liegt, wurde die Updaterate auf den maximal möglichen Wert von 50 Hz erhöht, um eine ausreichende zeitliche Auflösung zu erreichen.

5 Ergebnisse

5.1 Teilziel I „Effizienzsteigerung durch elektrischen Antriebe“

5.1.1 Aggregatstypische Belastungsdaten der hydraulischen Baugruppenantriebe

Die zeitliche Betrachtung der Aggregatsbelastungen bringt einen typischen Belastungsverlauf zu Tage, mit typischen Sequenzen der in Kapitel 4.1.5.3 beschriebenen Zyklenabschnitte. Abbildung 11 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der Belastung an Einzugs- und Vorsatzmotor anhand der bestimmenden Größen Druckdifferenz und Volumenstrom auf.

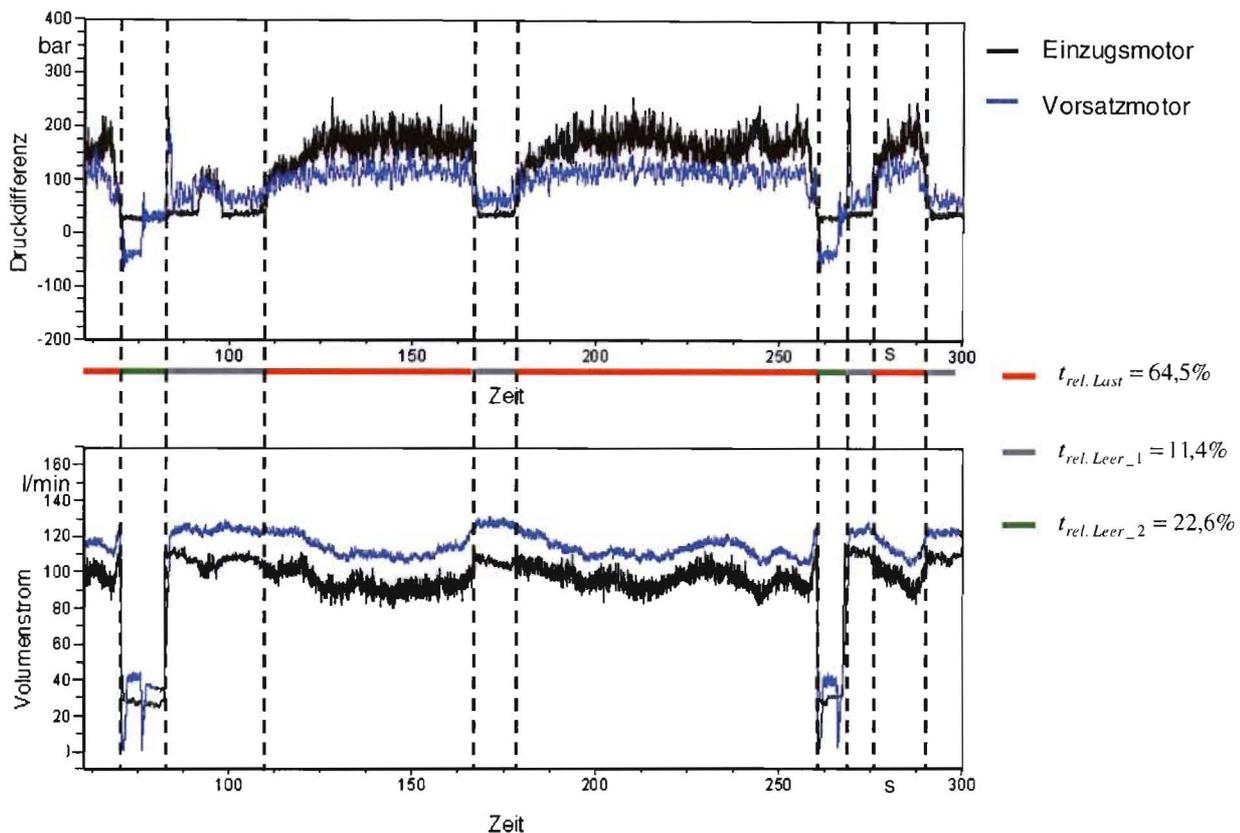


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der Belastung an hydraulischem Vorsatz und Einzug

Die wesentlichen Parameter der Baugruppenantriebe entstammen den Messdaten der Feldversuche im Herbst 2005. Deutlich erkennbar sind Belastungsspitzen jeweils beim Anschalten der Aggregate. Eine Analyse der Daten zeigt einen Zeitanteil unter Last von 64,5% auf. Die Leerlaufphasen sind nochmals zu unterscheiden in einen Zustand mit voller Drehzahl der Aggregate (Anteil 11,4%) und einen Anteil mit abgesenkter Drehzahl (Anteil 22,6%). Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den Haupteinflussgrößen. Die Angaben zur Pumpenausschwenkung und den mechanischen Leistungen sind dabei aus den hydraulischen Messgrößen ohne Berücksichtigung von Verlusten berechnet

Tabelle 1: Kennwerte hydraulischer Serienantriebsstrang

Typ	Einzug		Vorsatz	
	Pumpe	Motor	Pumpe	Motor
	Axialkolben- verstellpumpe Sauer-Danfoss 90R100	Axialkolben- konstantmotor Sauer-Danfoss 90M75	Axialkolben- verstellpumpe Sauer-Danfoss 90R55	Axialkolben- konstantmotor Sauer-Danfoss 90M55
Schluckvolumen [ccm]	100	75	55	55
Druck [bar]	0 - 320		0 - 210	
Druck am häufigsten Betriebspunkt [bar]	165		122	
Systemdruck Nominell (Hersteller) ** [bar]	420		420	
Volumenstrom [l/min]	0 - 125		0 - 144	
Volumenstrom am häufigsten Betriebspunkt [l/min]	99		117	
Ausschwenkung * [%]	36%	-	81%	-
Drehzahl * [1/min]	0 - 2910	0 - 2070	0 - 2910	0 - 2850
Drehzahl im häufigsten Arbeitspunkt * [1/min]	2690	1400	2690	2117
Nenn Drehzahl (Hersteller) ** [1/min]	3300	3600	3900	3900
Drehmoment * [Nm]	0 - 255	0 - 430	0 - 200	-40 - 160
Drehmoment im Häufigsten Arbeitspunkt * [Nm]	96	185	83	106
Leistung am häufigsten Betriebspunkt * [kW]	27,1		23,5	

* berechnete Größen

** Werksangaben Sauer-Danfoss

Beide Antriebskreise arbeiten mit typischen Systemdrücken zwischen 30 – 40% der vom Hersteller angegebenen nominellen Drücke der Aggregate und damit im optimalen Bereich des Wirkungsgradkennfeldes [SDM05]. Die geringe Ausschwenkung der Pumpe im Einzugskreis von 36% ist dadurch bedingt, dass mit der Pumpe zusätzliche Förderleistung für höhere Drehzahlen des Einzugsmotors für andere Häckselgüter vorgehalten werden muss. Für den Einsatz zur Grassilagebereitung mit Pick-Up werden Drehzahlen bis maximal 3550 1/min am Einzugsmotor gefordert, um durch höhere Vorschubgeschwindigkeit die Schnittlänge des Häckselgutes erhöhen zu können. Die geringe Ausschwenkung lässt laut Herstellerdatenblatt [SDP05] den zu erwartenden Gesamtwirkungsgrad der Pumpe um etwa 12% im Vergleich zum vollausgeschwenkten Betrieb sinken. Die Ausschwenkung der Pumpe im Vorsatzantrieb von 81% zeigt deutlich, dass nur noch geringe Drehzahlreserven vorhanden sind. Der Gesamtwirkungsgrad der Pumpe ist dadurch nur geringfügig gemindert.

5.1.2 Wirkungsgrad unter stationären Bedingungen

Bei der Betrachtung der Einzelaggregate treten deutliche Unterschiede zwischen der motorischen und generatorischen/pumpenseitigen Energiewandlung zu Tage. Auf der motorischen Seite sind die Wirkungsgrade der Wandlung annähernd identisch. Deutliche Vorteile für das elektrische System hingegen resultieren aus der wesentlich effizienteren Bereitstellung der elektrischen Leistung.

5.1.2.1 Wirkungsgrad des hydraulischen Triebstrangs unter stationärer Belastung

Für die hydraulischen Aggregate schwanken die erzielbaren hydraulisch-mechanischen Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Auslastung, der Dieselmotordrehzahlen und der Häcksellänge. Letztere haben deshalb Einfluss auf den Wirkungsgrad, weil Sie die Drehzahl

der Aggregate stellen. Abbildung 12 zeigt beispielhaft das Wirkungsgradverhalten und den Verlauf des Lastmomentes des hydraulischen Einzugsantriebes und der Pumpen bei unterschiedlichen Belastungsstufen an Einzug und Vorsatz bei einer theoretischen Häcksellänge von 8 mm und einer Dieselmotordrehzahl von 1750 1/min.

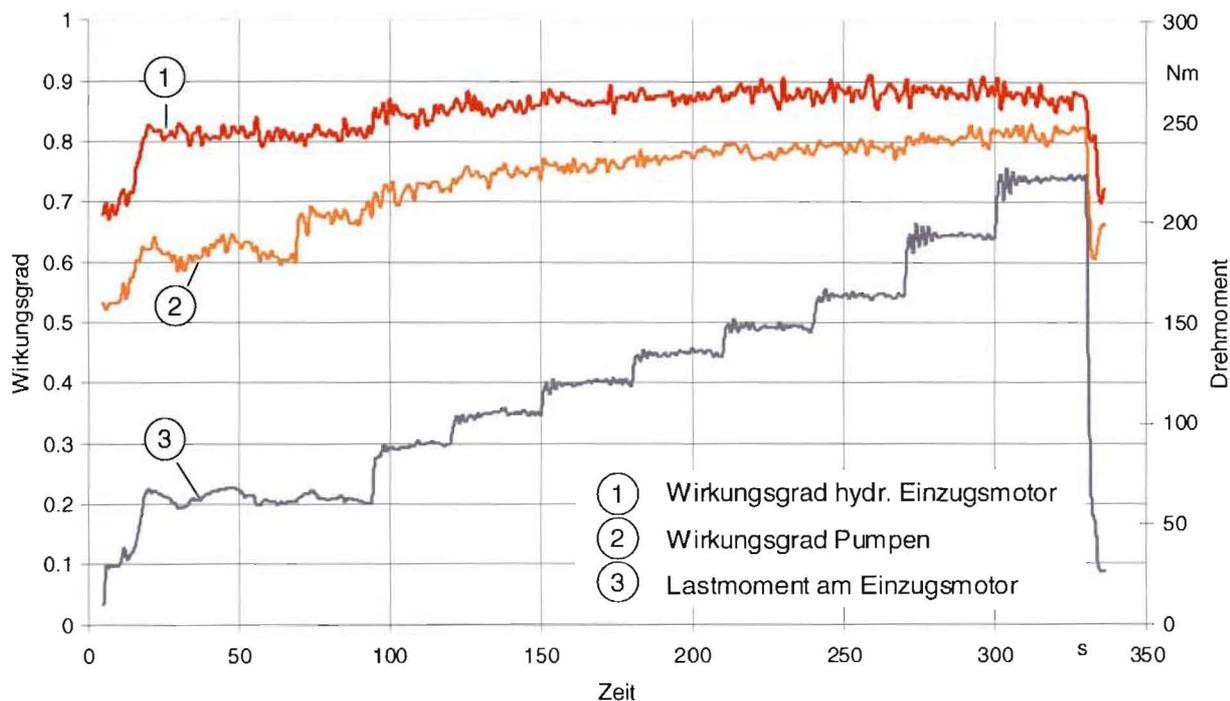


Abbildung 12: Wirkungsgradverhalten von hydraulischem Einzugsmotor und Pumpen bei stufenweiser Erhöhung des Lastmoments an Einzug und Vorsatz (Dieselmotordrehzahl = 1750 1/min, theoretische Häcksellänge = 8 mm)

Abbildung 13 zeigt die Abhängigkeit von der Dieselmotordrehzahl auf. Bei einer eingestellten Häcksellänge von 8 mm schwankt der Wirkungsgrad bei einer Auslastung von 100% zwischen 89,8% und 87,2%. Im Teillastbereich mit einer Belastung von 30% MN werden immer noch Wirkungsgrade über 81% erreicht.

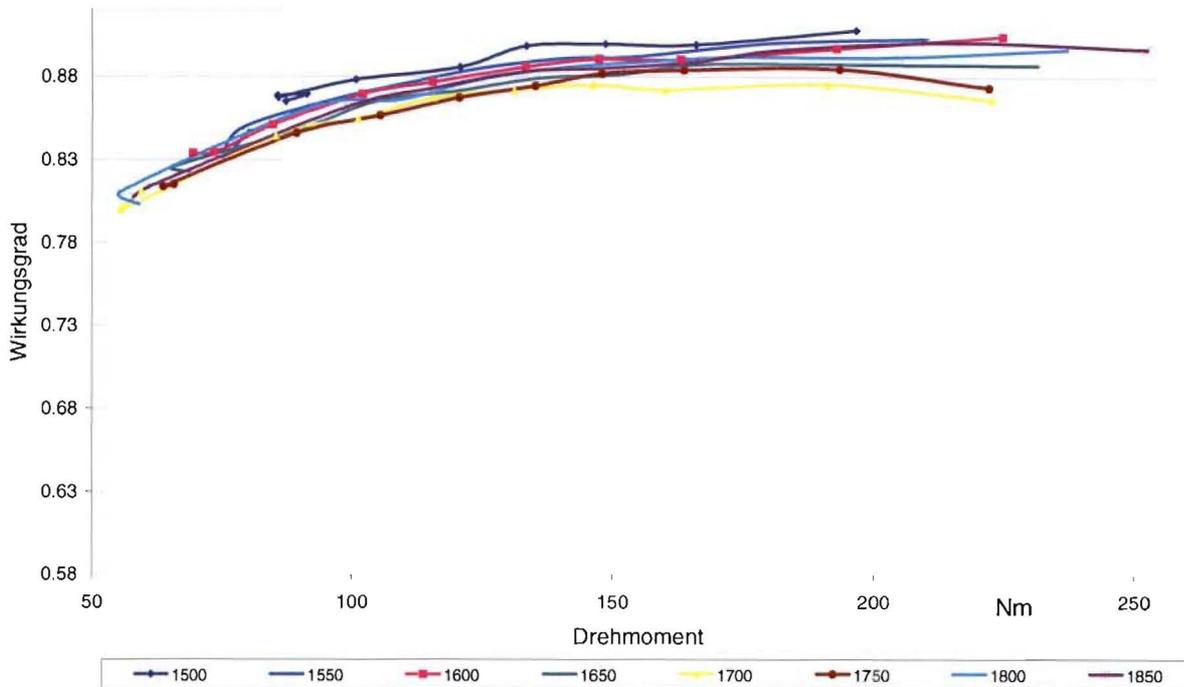


Abbildung 13: Wirkungsgrad hydraulischer Einzugsmotor bei unterschiedlichen Dieselmotordrehzahlen (theoretische Häcksellänge = 8 mm)

Auffällig ist, dass die schlechtesten Wirkungsgrade im mittleren Drehzahlbereich des Dieselmotors um 1700 1/min erreicht werden. Eine steigende Tendenz ist sowohl bei Minderung als auch Erhöhung der Dieselmotordrehzahl zu erkennen, obwohl die Drehmomentanforderungen mit Erhöhung der Dieselmotordrehzahl stetig steigen.

Für den hydraulischen Gesamtantriebsstrang resultiert damit unter Vollast ein Wirkungsgrad von kleiner 70% (im Bereich von 67-68%).

Der Wirkungsgrad der hydraulischen Pumpen (Vorsatz und Einzugpumpe nicht differenziert) variiert unter gleichen Bedingungen zwischen 78,2% und 82,5%. Stärker ausgeprägt als auf der motorischen Seite ist die Lastabhängigkeit des Pumpenwirkungsgrades. Im Teillastbereich fällt dieser bis auf knapp 63% (siehe Abbildung 14). Hier zeigt sich ein stetiges Verhalten des Wirkungsgrades in Abhängigkeit von der Dieselmotordrehzahl. Je höher die antreibende Drehzahl desto geringer der Wirkungsgrad. Das nicht monotone Verhalten der Kurve für die Dieselmotordrehzahl von 1500 1/min ist bedingt durch ein Aufschwingen durch Wechselwirkungen zwischen Einzugsmotor, Lastbremse und Zugleistungsmesswagen.

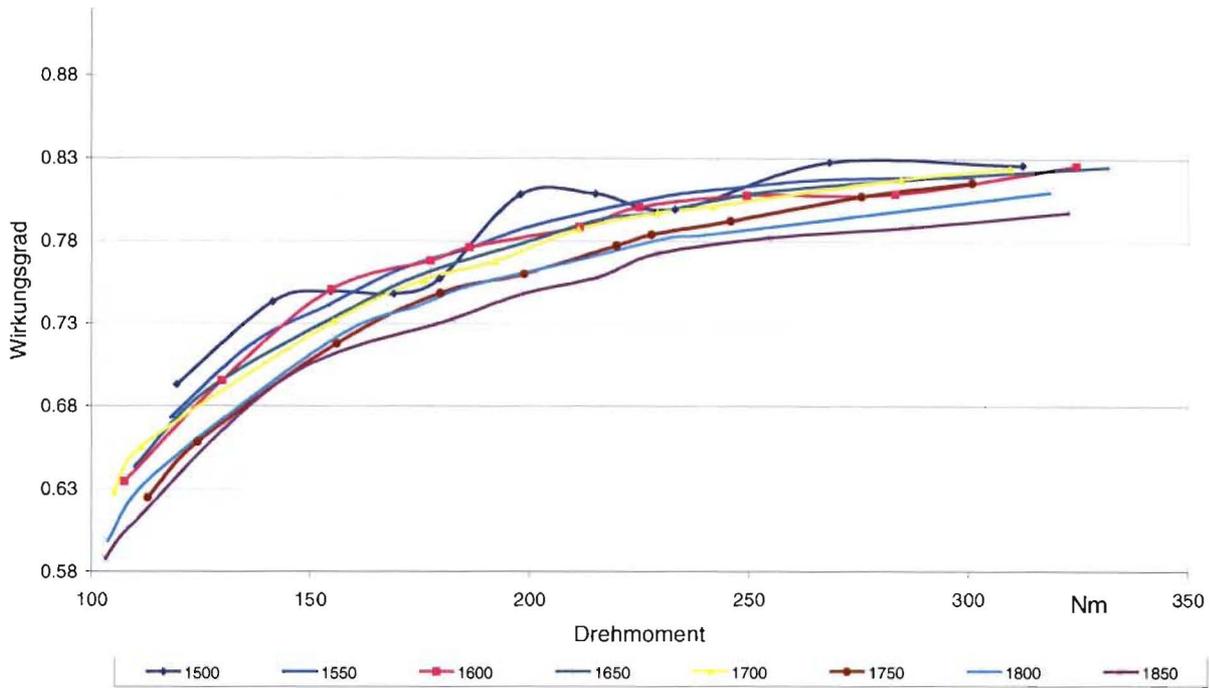


Abbildung 14: Wirkungsgrad hydraulische Leistungsversorgung bei unterschiedlichen Dieselmotordrehzahlen (theoretische Häcksellänge = 8 mm)

5.1.2.2 Wirkungsgrad des elektrischen Triebstrangs unter stationärer Belastung

Abbildung 15 spiegelt die vergleichbare Situation zu Abbildung 12 am elektrischen Antriebsstrang wieder und stellt Wirkungsgrad und Momentenverlauf an Einzugsmotor und Generator dar.

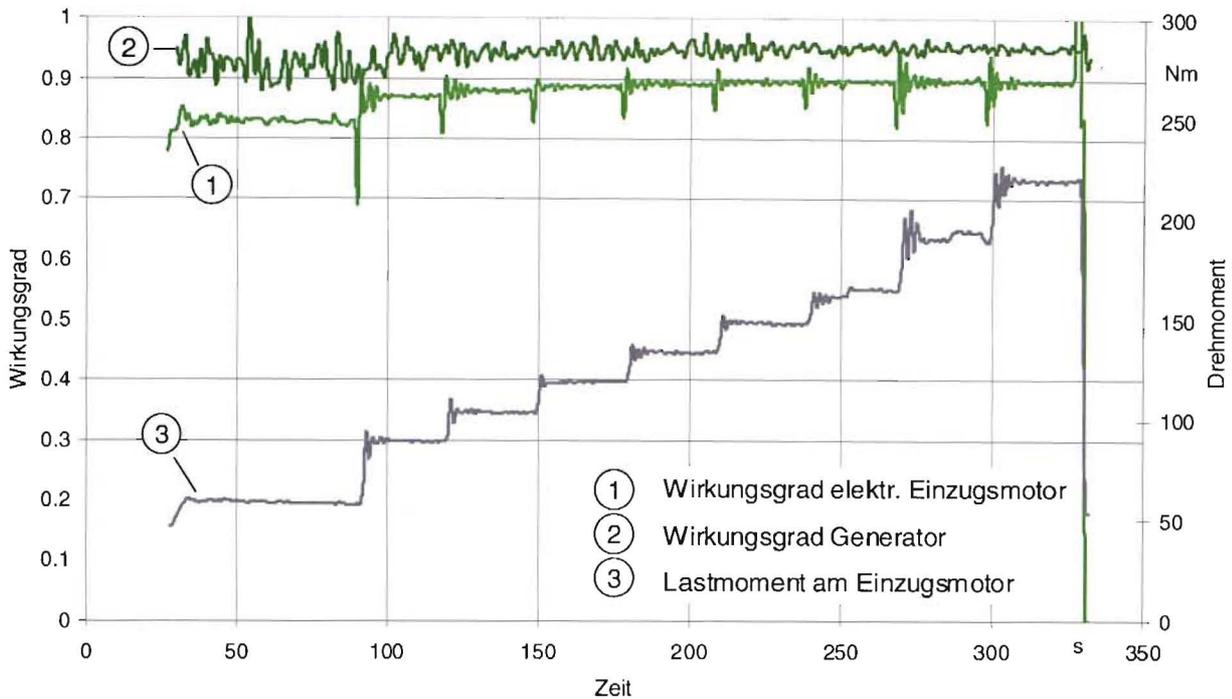


Abbildung 15: Wirkungsgradverhalten von elektrischem Einzugsmotor und Generator bei stufenweiser Erhöhung des Lastmoments an Einzug und Vorsatz (Dieselmotordrehzahl = 1750 1/min, theoretische Häcksellänge = 8 mm)

Abbildung 16 ergänzt die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Dieselmotordrehzahl. Der elektrische Einzugsantrieb schwankt dabei unter Volllast zwischen 88,1% und 90,6%. Im Teillastbereich sinken die Wirkungsgrade bis auf 80,7% ab.

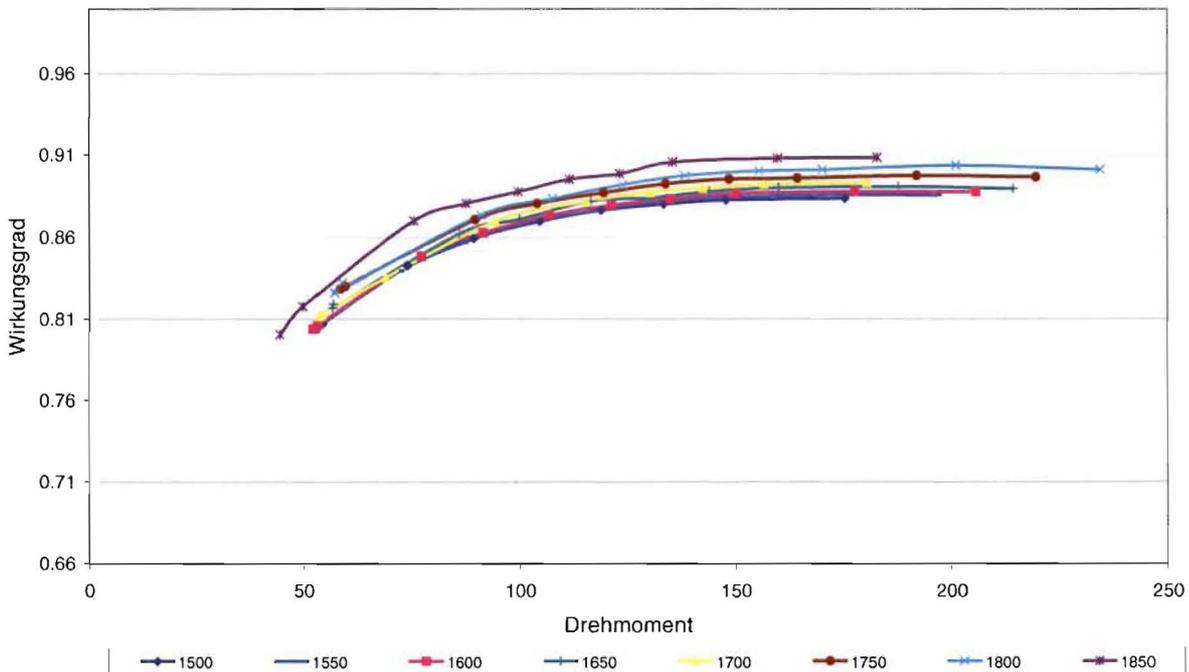


Abbildung 16: Wirkungsgrad elektrischer Einzugsmotor bei unterschiedlichen Dieselmotordrehzahlen (theoretische Häcksellänge = 8 mm)

Unter Volllast bieten Generator und Gleichrichterbrücke ca. 95% (Abbildung 17).

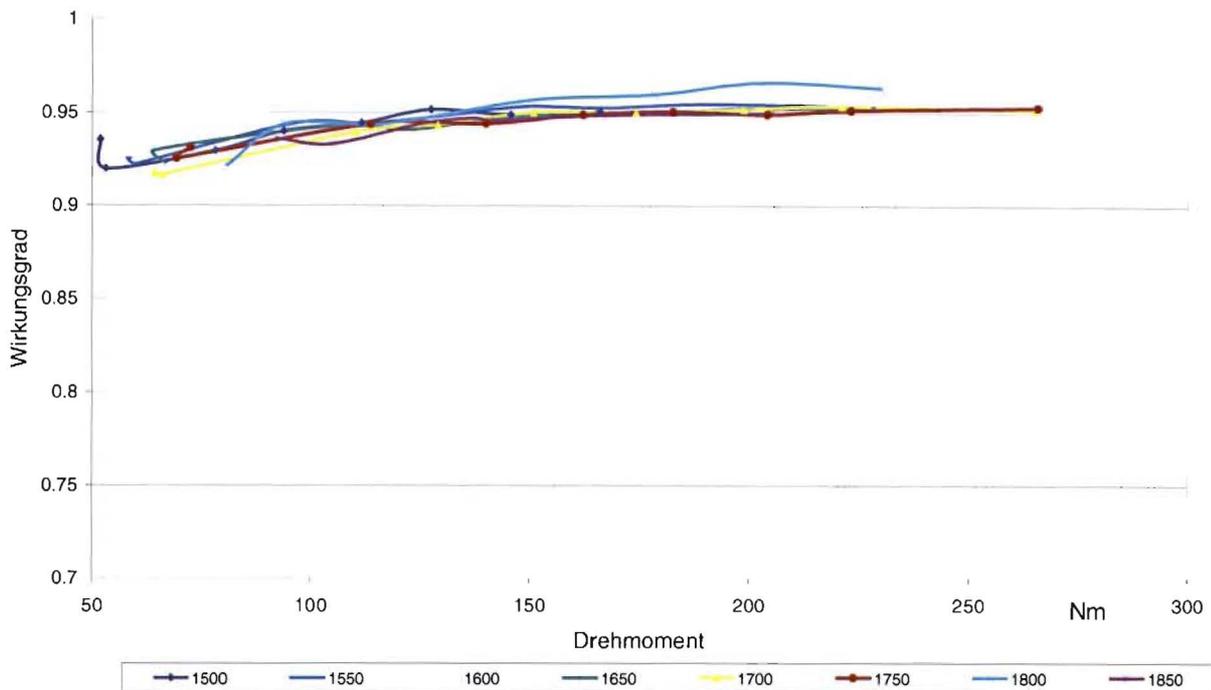


Abbildung 17: Wirkungsgrad elektrische Leistungsverorgung (Generator und Gleichrichterbrücke) bei unterschiedlichen Dieselmotordrehzahlen (theoretische Häcksellänge = 8 mm)

Augenfällig ist insbesondere der auch im Teillastbereich konstant hohe Wirkungsgrad des Generators.

Mit dem elektrischen Triebstrang sind stationäre Wirkungsgrade in der Leistungsübertragung von ca. 85% realisiert. Dies ist zum einen auf die effektivere generatorische Wandlung zum anderen aber auch auf die Einsparung mechanischer Übertragungsglieder in der Antriebskette des Vorsatzes zurückzuführen.

5.1.3 Wirkungsgrad während typisch dynamischer Belastung

Obige stationäre Wirkungsgraduntersuchungen bieten eine Möglichkeit die Ergebnisse mit anderen Quellen aus dem Bereich von Industrieanlagen zu vergleichen. Um jedoch für den Bereich der landwirtschaftlichen Applikationen eine aussagekräftige Bewertung treffen zu können, ist es notwendig die eigentlich stark dynamisch schwankenden Belastungen zu berücksichtigen. Sowohl der hydraulische als auch der elektrische Triebstrang wurden dazu mit typischen dynamischen Lastzyklen beaufschlagt, wobei in nacheinanderfolgenden Versuchsdurchgängen die durchschnittliche Nennlast der Zyklen zwischen 60% und 130% variiert worden ist. Die Teillast und Überlastzyklen sind durch Skalpierung aus dem Standardzyklus abgeleitet.

Nachfolgend sind die Ergebnisse zu den Untersuchungen an hydraulischem und elektrischem Triebstrang dargestellt.

Abbildung 18 zeigt das Wirkungsgradverhalten des hydraulischen und elektrischen Einzugs motors in Abhängigkeit von belastenden dynamischen Moment. Differenziert sind die unterschiedlichen Versuchsdurchläufe mit den Auslastungen von 60, 80, 100, 120 und 130% des durchschnittlichen Lastmoments. Die Dieselmotordrehzahl bleibt dabei bei 1750 1/min und die Häcksellänge bei 8 mm konstant. Dargestellt sind die Mittelwerte je Sekunde.

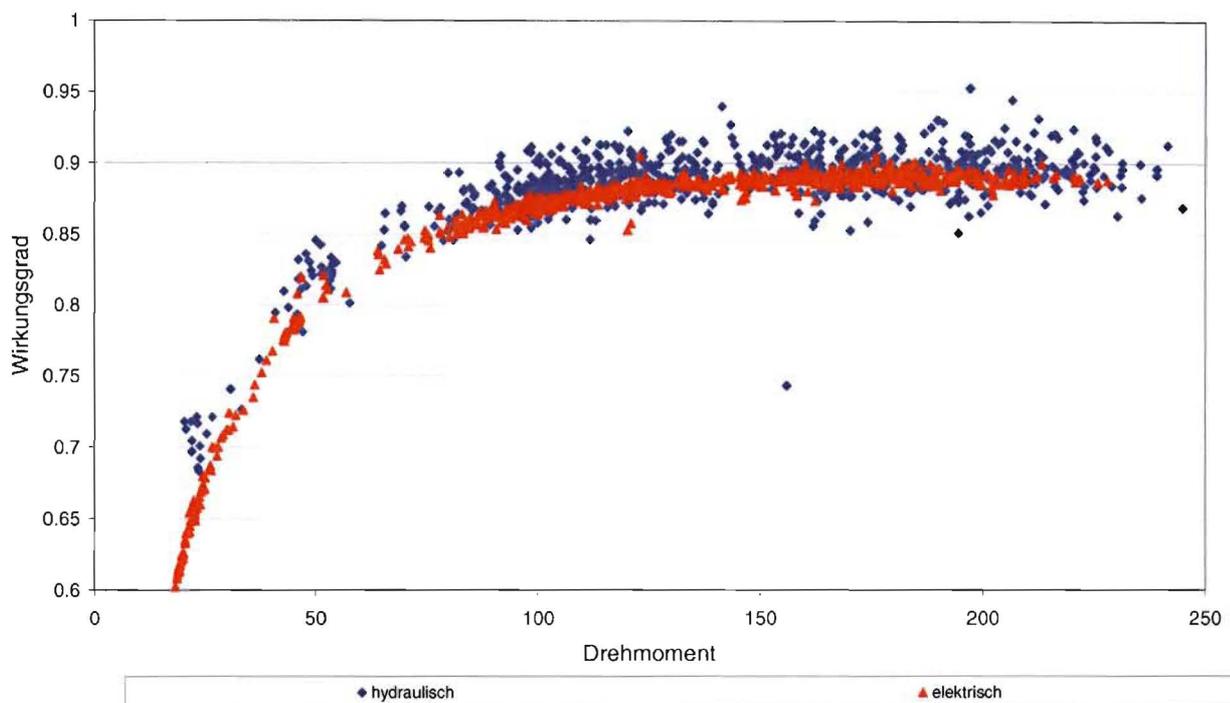


Abbildung 18: Wirkungsgrad hydraulischer und elektrischer Einzugs motor bei dynamischer Belastung mit unterschiedlichen Lastniveaus

Sowohl unter Volllast als auch unter Teillast sind die erzielbaren Wirkungsgrade vergleichbar zu den stationären Versuchen. Die Lastabhängigkeit der elektrischen Maschine inklusive Wechselrichter ist ebenso stark ausgeprägt wie die des hydraulischen Motors. Im Teillastbereich liegt der Wirkungsgrad der hydraulischen Maschine sogar um einige Prozentpunkte oberhalb des elektrischen.

Abbildung 19 zeigt die Wirkungsgrade der hydraulischen und elektrischen Leistungsbereitstellung bei dynamischer Belastung an Vorsatz und Einzug gemäß obiger Versuchsanstellungen. Der Wirkungsgrad ist dabei in Abhängigkeit des Summenlastmoments aus Vorsatz und Einzug dargestellt.

Der mittlere Pumpenwirkungsgrad zeigt die gleiche Lastabhängigkeit auf gleichem Niveau. Hier ist die Lastabhängigkeit des elektrischen Generators deutlich geringer ausgeprägt als auf Seiten der hydraulischen Pumpen. Im Teillastbereich geht die Differenz bis in einen Bereich von 45%. Auch im Volllastbereich bieten Generator mit Gleichrichterbrücke einen Vorteil

von 15%. Auffällig ist hingegen, dass auch bei einem Lastmoment von 130 % des Nennmomentes bei der Pumpe noch nicht der maximale Wirkungsgrad erreicht ist.

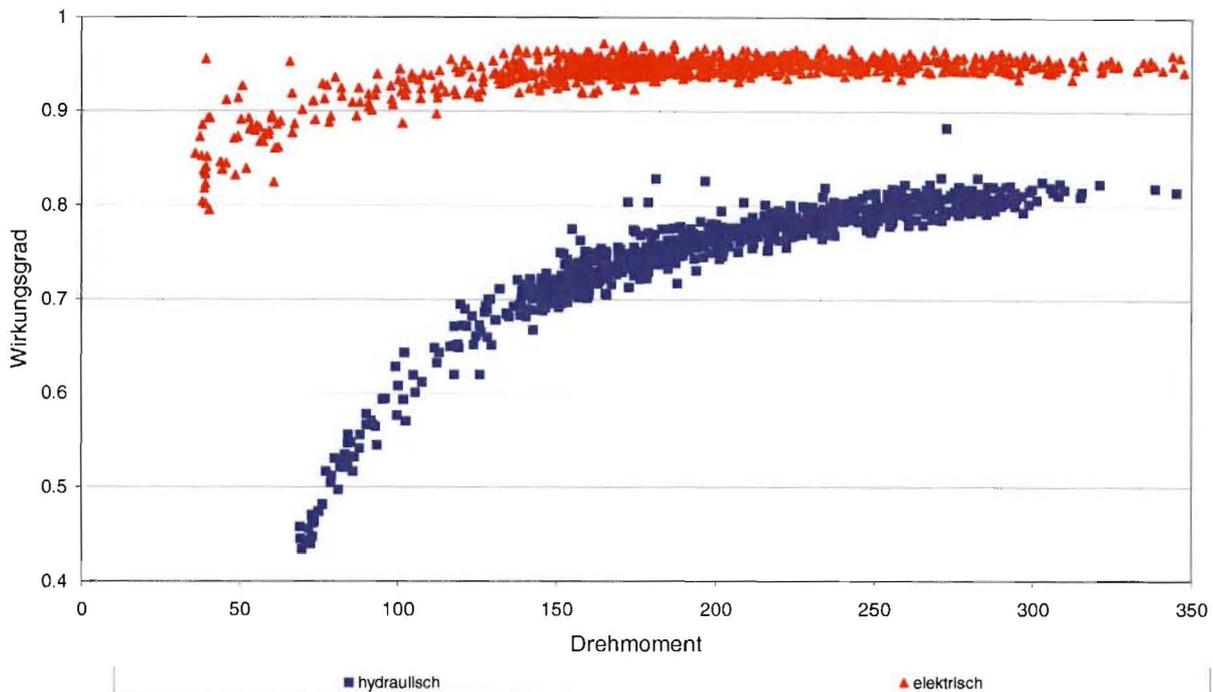


Abbildung 19: Wirkungsgrad hydraulische und elektrische Leistungsbereitstellung bei dynamischer Belastung mit unterschiedlichen Lastniveaus

Im Lastbereich zwischen 60 und 130% ist keine relatives Maximum erkennbar. Tendenziell wäre für höhere Belastungen ein höherer Wirkungsgrad zu erwarten. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass die Pumpen nicht im optimalen Betriebspunkt arbeiten. Seitens des Generators mit Gleichrichterbrücke ist ab einer Belastung von ca. 120 Nm ein konstantes Wirkungsgradniveau erreicht und wird über den gesamten Einsatzbereich gehalten.

5.1.4 Leistungsgewicht und Bauvolumen im Vergleich

Als nachteilig stellt sich das Leistungsgewicht der Elektrik der hier verwendeten Komponenten dar. Bezogen auf den häufigsten Betriebspunkt weist der hydraulische Einzugsmotor eine Leistungsgewicht von ca. 1 kg/kW auf, der elektrische inklusive Wechselrichter allerdings von 5,9 kg/kW. Das Leistungsgewicht der beiden Elektromaschinen im Vorsatz stellt sich ähnlich dar. Sinnvoll ist hier allerdings ein Gesamtvergleich beider Lösungsvarianten. Im elektrischen Triebstrang ersetzen die zwei Elektromotoren mit angeflanschem Planetengetriebe den zentralen hydraulischen Antrieb inklusive zusätzlicher mechanischer Übertragungsglieder. Für die elektrische Antriebslösung müssen dazu 8,33 kg/kW verbaut werden, für die hydraulische hingegen 11,74 kg/kW. Der Konstantmotor geht dabei mit 20,29 kg in die Bilanz ein, der mechanische Strang hingegen mit ca. 275 kg. Darin beinhaltet sind die zu ersetzenden Gelenkwellen und Getriebe.

Auf Seiten der Leistungsbereitstellung sind hingegen auch geringere Unterschiede bei den Leistungswandlern zu differenzieren. Der hydraulische Pumpenturm wiegt in Summe 121 kg, der Generator 160 kg (+32%), wobei beide die gleiche Nutzleistung erbringen.

Eine vergleichbare Situation herrscht auch beim Bauvolumen. Der verwendete elektrische Einzugsmotor benötigt ca. den 6-fachen Bauraum. Für den Vorsatzantrieb ist ein Vergleich durch die vielen mechanischen Übertragungselemente hingegen schwierig. Sowohl Einzugsmotor als auch Vorsatzmotoren und Generator sind aber bereits im Prototyp vollständig in die Konstruktion der Maschine integriert.

5.2 Teilziel II „Intelligente Wälzlager“

5.2.1 Prüfstandinbetriebnahme und Zuverlässigkeit

Unter Nutzung der Rohsignalaufzeichnungs-Funktionalität konnte die korrekte Konfiguration des „Intelligenten Wälzlagers“ bestimmt bzw. überprüft werden. Dabei handelte es sich vor allem um die Parameter Verstärkung (gewählt: Faktor 5) und „Hubfreeze“-Wert (gewählt: Wert 10). Generell funktionierte die CAN-Kommunikation einwandfrei. Nach Abschluss der steady state Messreihen (mehr als 100 Betriebsstunden) war jedoch die Kommunikation zwischen dem ASIC im Wälzlagerkörper und der DSP-ECU unterbrochen. Der Grad der Schädigung kann vom Projektbearbeiter nicht beurteilt werden. Daher war es erforderlich für die Ermittlung des dynamischen Verhaltens auf den anderen verfügbaren Prototypen zurückzugreifen, obgleich dieser einen bekannten Defekt an einen seiner acht DMS-Sensoren aufwies. Offensichtlich erkennbare Auswirkung waren höhere Unwucht-Messwerte. Es sollte jedoch unbedingt positiv vermerkt werden, dass der Multisensor-Ansatz zur Erhöhung der (Gesamt)Sensorsystem-Robustheit hinsichtlich fehlerhafter Einzelsignale beiträgt und ein Betrieb aufrecht erhalten werden kann, natürlich mit gewissen Einschränkungen der erzielbaren Genauigkeit. Obgleich es sich bei den Belastungsrollen um eigens ausgewählte Schnelllauf-Sonderausführungen handelte, wiesen sie mehr oder weniger einen leicht unrunder Lauf auf. Dies hatte in bestimmten Drehzahlbereichen starke Resonanzschwingungen zur Folge. Der Versuch der Unwuchtreduktion allein durch Auswuchten der Rollen zu begegnen, führte zu keiner merklichen Verbesserung. Erfolg brachte erst das Abdrehen der Kunststoffauflflächen. Die Unwucht konnte merkbar verringert werden, eine befürchtete Laufflächenablösung ist nicht eingetreten. Nach mehreren Belastungsläufen oder bei minutenlangem Stillstand mit starker Belastung nimmt die Unwucht/Höhenschlag der Rollen wieder zu. Daher wurden die Rollen zweimal abgedreht, für erneute Messreihen müssten die Rollen ersetzt werden.

Abbildung 20 zeigt die grundsätzlichen Phasen des Prüfstandslaufverhalten, wenn bei gleichbleibender Radialkraft und Lastwinkel (4,4 kN; 0°) die Drehzahl an- und absteigend geändert wird. Die Messergebnisse stammen allesamt von dem „Intelligenten Wälzlager“.

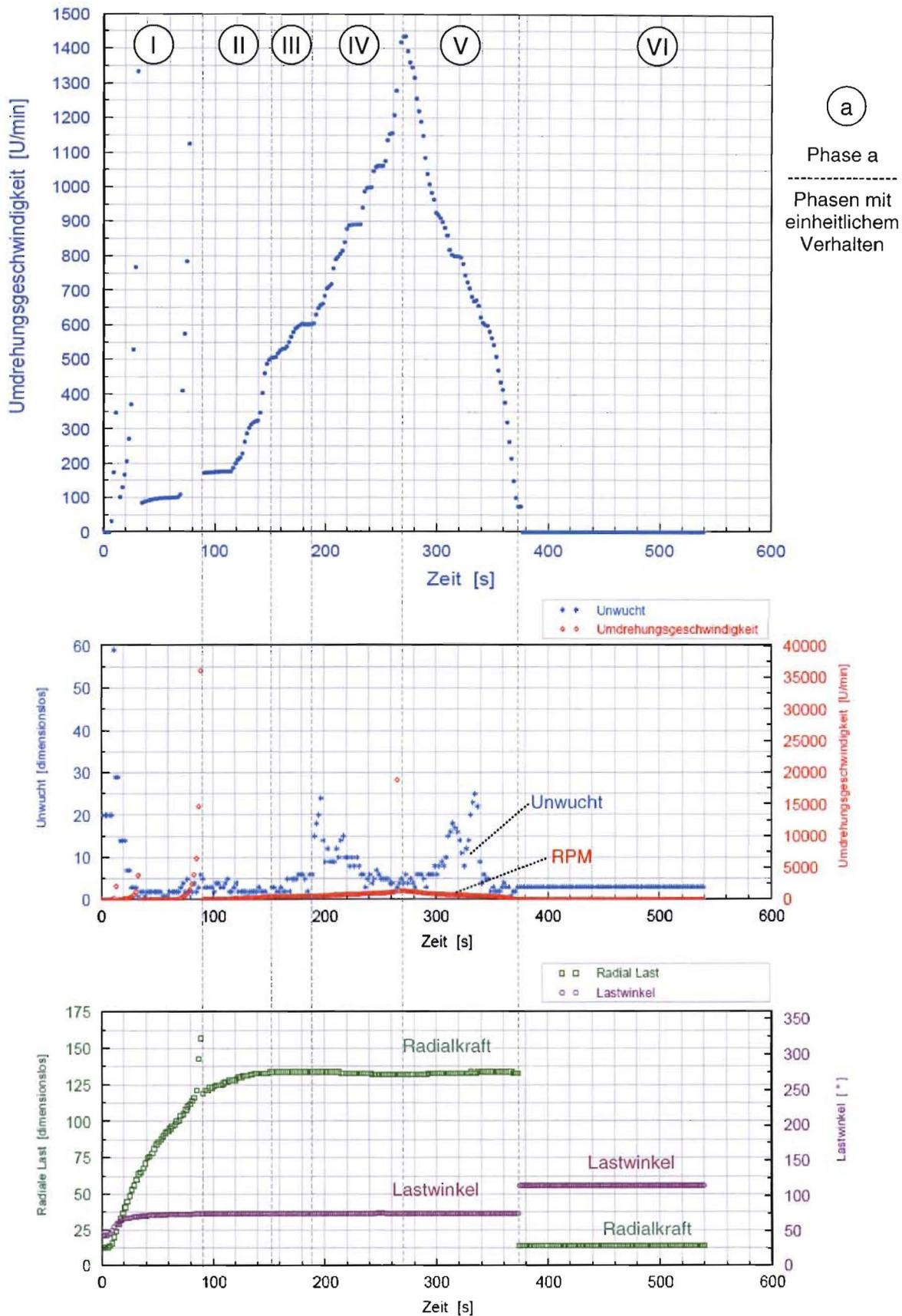


Abbildung 20: Phasen des Prüfstandlaufverhaltens (RPM kontinuierlich an- und absteigend)

Die Drehzahländerung erfolgt dabei manuell mittels des Potentiometer und ist nur ein grobe Näherung einer ansteigenden und dann wieder abfallenden Rampenfunktion. Die Belastung wirkt dabei senkrecht von unten. Es lassen sich sechs charakteristische Phasen unterscheiden. In der Phase I beginnt der Motor die Kombination Achse und Trommelnachbildung auf die Minimaldrehzahl von etwa 125 1/min zu beschleunigen. Während dieser Phase fallen die starken Ausreißer der durch das „Intelligente Wälzlager“ ermittelten Drehzahl auf und die lange Einschwingzeit des Radialkraft-Messwertes trotz stets gleichbleibender Belastung. Auch die hohen Unwuchtwerte bei einem subjektiv ruhigen Laufverhalten am Anfang lassen vermuten, dass es sich um Ausreißer handelt. Ab etwa 80 Sekunden ist die Hochlaufphase des Prüfstandes abgeschlossen und alle Messwerte außer der Radialkraft haben den eingeschwungenen Zustand (steady state) erreicht und gehen somit in die Phase II eines stabilen Laufverhaltens über. In Phase III, bei etwa 150 Sekunden ist auch der Radialkraft-Messwert eingeschwungen und ein etwas vibrierender Lauf kündigt sich bereits an. In der Phase IV bei 650 1/min wird die Eigenschwingung sehr störend. Die Unwuchtmesswerte geben dies wieder. Die Ursache für diese starken Resonanzschwingungen des Prüfstandes wurden bereits am Anfang dieses Kapitels erläutert. Diese Phase mit den starken Resonanzschwingungen erstreckt sich von 650 – 850 1/min. Bis zum Ende der Phase IV wurden die Drehzahlen von 800 kontinuierlich auf 1400 1/min erhöht, um dann in Phase V wieder langsam nach unten geregelt zu werden. Das Resonanzverhalten zeigt im entsprechenden Drehzahlbereich analog zur Phase IV wieder die starken Unwuchtwerte. Nach 375 Sekunden (Phase VI) wurde der Motor abgeschaltet. Dabei zeigt sich, dass die Messwerte bei Drehzahl 0 1/min erwartungsgemäß kein sinnvolles Ergebnis ergeben, obwohl sich die Belastung und der Lastwinkel nicht geändert haben.

5.2.2 Messung der Rohsignale

Abbildung 21 zeigt den Verlauf der Rohsignale an drei der acht über den äußeren Lagerring gleich verteilten DMS-Sensoren. Es wurden jeweils 10.000 Messwerte für jeden DMS Sensor bei gleicher Belastungssituation am „Intelligenten Wälzlager“ aufgezeichnet.

DMS 1 und DMS 2 zeigen einen periodischen (Sinus bzw. Dreieck) Signalverlauf mit gleicher Frequenz, jedoch einer unterschiedlichen Amplitude. DMS 7 weist einen stets konstanten Wert auf, der erst bei höherer Auflösung der Hochwertachse „normales“ Rauschen wiedergibt. Die Unterschiede der Amplitude (ca. 200 bei DMS 1 zu ca. 375 bei DMS 2) des aufmodulierten Signals erklären sich durch unterschiedliche Belastung an unterschiedlichen Stellen im Lager und sind ja gerade das Grundprinzip für die Arbeitsweise des „Intelligenten Wälzlagers“. Weiter verdeutlicht wird das durch die Messwerte des DMS 7, der außer Rauschen keine Nutzsignalamplitude aufweist. Erklärbar ist dies, da DMS 7 genau gegenüber zu DMS 1 und DMS 2 positioniert ist und die Last in der vorliegenden Betriebssituation

eindeutig in Richtung dieser beiden Sensor zeigt, d.h. an der Stelle des DMS 7 Sensors ist das Lager nahezu unbelastet.

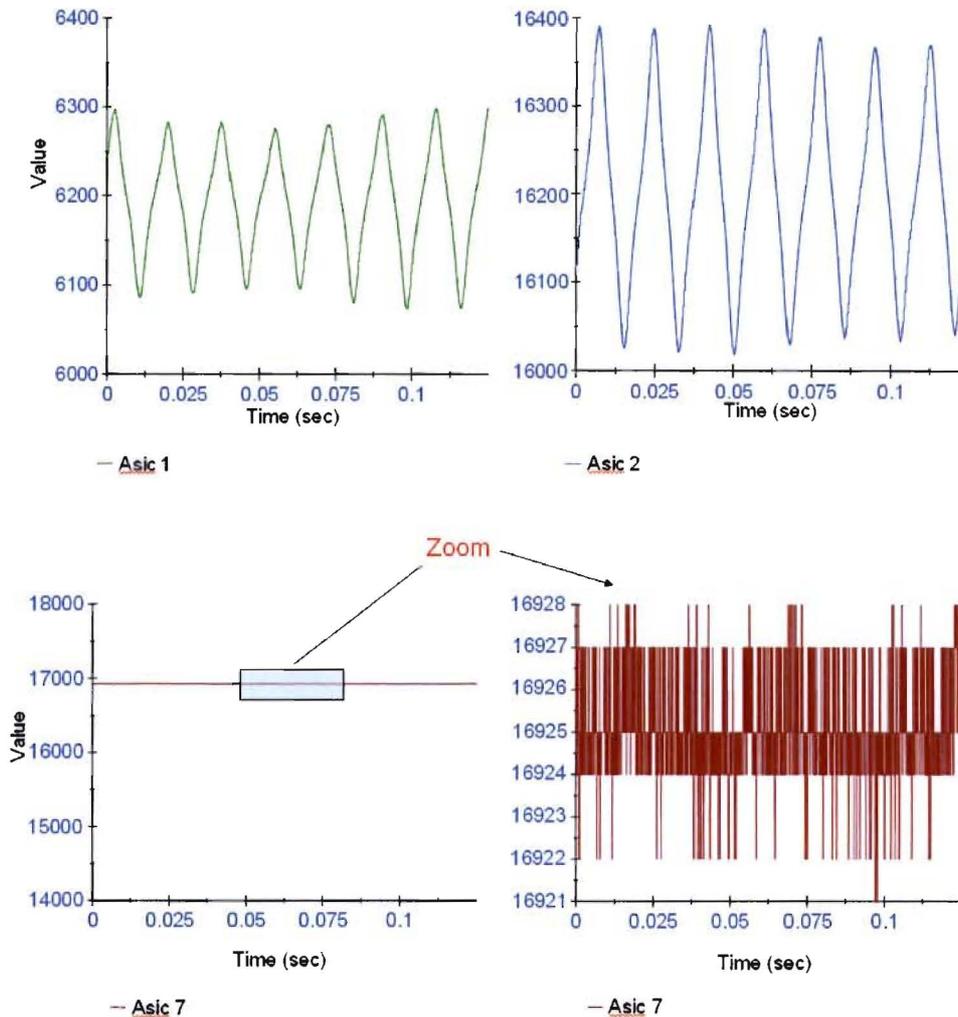


Abbildung 21: Messung zur Bestimmung der Transferfunktion (Steady State)

5.2.3 Messungen zur Bestimmung der Transferfunktion (Steady State)

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Phasencharakterisierung wurden folgende Messreihen durchgeführt:

- „Steady state“ - Messungen bei Lastwinkel 0° für die diskreten Drehzahlen von 150-500 1/min (Schrittweite 50 1/min) bei zehn unterschiedlichen Belastungsstufen; Diese Messungen wurden sowohl einmal für verrechnete Sensordaten, als auch ein weiteres Mal für Rohsignalaufzeichnung durchgeführt.
- „Steady state“ - Messungen bei Lastwinkel 0° für die diskreten Drehzahlen 600, 900-1400 1/min (Schrittweite 100 1/min) bei drei unterschiedlichen Belastungsstufen;

- „Steady state“ - Messungen bei Lastwinkel 180° für die diskreten Drehzahlen von 150-500 1/min (Schrittweite 50 1/min) bei zehn unterschiedlichen Belastungsstufen;
- „Steady state“ - Messungen bei Lastwinkel $14,85^\circ$ für die diskreten Drehzahlen von 150-500 1/min (Schrittweite 50 1/min) bei zehn unterschiedlichen Belastungsstufen durchgeführt. Die Rohsignalaufzeichnung wurde in zusätzlichen Messungen mit drei Belastungs- und zwei Umdrehungsgeschwindigkeitsstufen durchgeführt.
- „Steady state“ - Messungen bei Lastwinkel $14,85^\circ$ für die diskreten Drehzahlen 600-1400 1/min (Schrittweite 100 1/min) bei fünf unterschiedlichen Belastungsstufen;

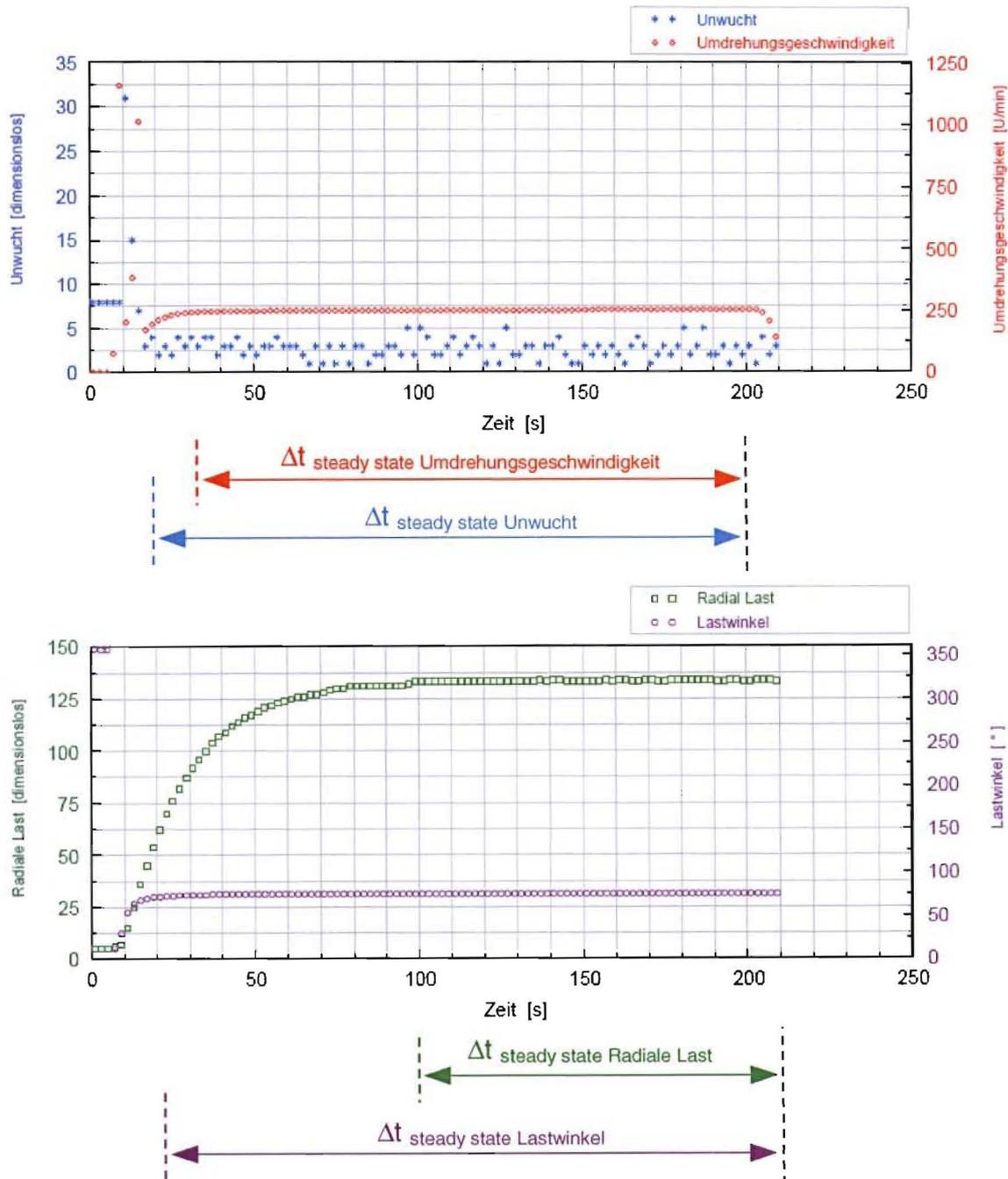


Abbildung 22: Ermittlung der steady state Intervalle

Tabelle 2: Statistische Kenngrößen - Min., Max., steady state

	Min.	Max.	Mittelwert steady state	Standardab- weichung steady state	Bereich Δt steady state
Drehzahl	0 U/min	1157 U/min	250,7 U/min	1,7 U/min	[60 s 200 s]
Radialkraft	5	134	133.340	0.479	[100 s 200 s]
Lastwinkel	13°	358°	74.965°	0.186°	[30 s 200 s]
Unwucht	1	31	2.659	1.064	[30 s 200 s]

Konfiguration: Wälzlager: SN IV
 Messfrequenz: 0,5 Hz
 Umdrehungsgeschwindigkeit: 250 U/min
 Gewicht an unteren Hebeln: 194,7 kg
 Lastwinkel-Vorgabe: 0°

Führt man obiges Verfahren für alle Messreihen mit den unterschiedlichen Konfigurationen durch, so ergeben sich zusammengefasst folgende Ergebnisse.

In Abbildung 23 ist die mit dem „Intelligenten Wälzlager“ gemessene Radialkraft in Abhängigkeit der Umdrehungsgeschwindigkeit und dem Betrag der anliegenden Last, die dabei senkrecht nach oben wirkte (Lastwinkel 0°) dargestellt. Dabei sind steady state Radialkräfte und Lastwinkel Mittelwerte, gemittelt über mehr als 100 Sekunden (Standardabweichung: <1% des Mittelwertes). Für anliegende Radialkräfte innerhalb der Spezifikation, d.h. größer als 0.5 kN, erlaubt eine nahezu lineare Abhängigkeit von F_{gemessen} ($F_{\text{anliegend}}$, RPM) im Bereich von 150 1/min bis 1400 1/min eine einfache Umrechnung der dimensionslosen Radialkraft-Messwerte in eine entsprechende Kraft.

Die zugehörige Bestimmung der Lastwinkel (Abbildung 24) legt ebenfalls ein lineares Verhalten offen. Für die gemessenen Werte im Drehzahlbereich von 150 1/min bis 500 1/min sowie dem Bereich betragsmäßig anliegender Radialkraft ≤ 0.5 kN fällt auf, dass sie um 185° höher liegen als die restlichen Werte. Die Erklärung dafür liegt auf der Hand, denn die Belastung, hervorgerufen durch das Gewicht der Trommel, überwiegt gegenüber der entgegengesetzt wirkenden Kraft, hervorgerufen durch das Eigengewicht der unteren Hebelarme. Messreihen mit dieser Art von Belastung wurden für höhere Umdrehungsgeschwindigkeiten übersprungen. Der Unterschied zwischen der vordefinierten 0° Position des Wälzlagers und der realen Einbauposition hat einen gemessenen Lastwinkel von 75° entgegen der erwarteten 0° zur Folge. Somit ist dieser Wert für den gesamten Messbereich ein rein linearer Offset.

Entsprechende Messreihen für die beiden anderen Konfigurationen mit Lastwinkel-Sollwerten von 14.85° und 180° zeigen für Radialkraft und gemessenen Lastwinkel nahezu identische Zusammenhänge. Selbstverständlich ist mit nur drei Varianten eine umfassende

Schlussfolgerung hinsichtlich einer Linearität bezüglich unterschiedlicher Lastwinkel-Sollwerte nicht zulässig, auch wenn die durchgeführten Messergebnisse das stark vermuten lassen.

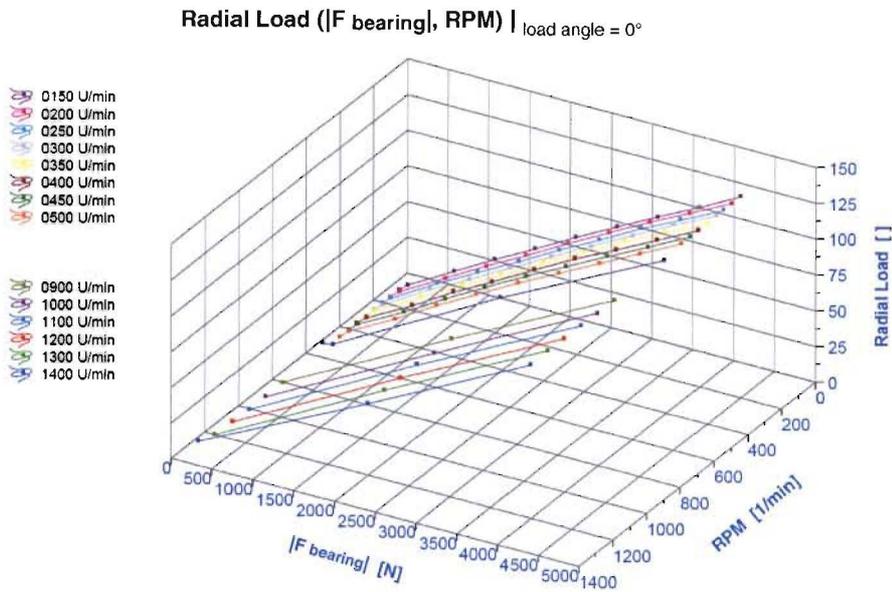


Abbildung 23: Steady state Messungen – Transfer-Funktion Radialkraft

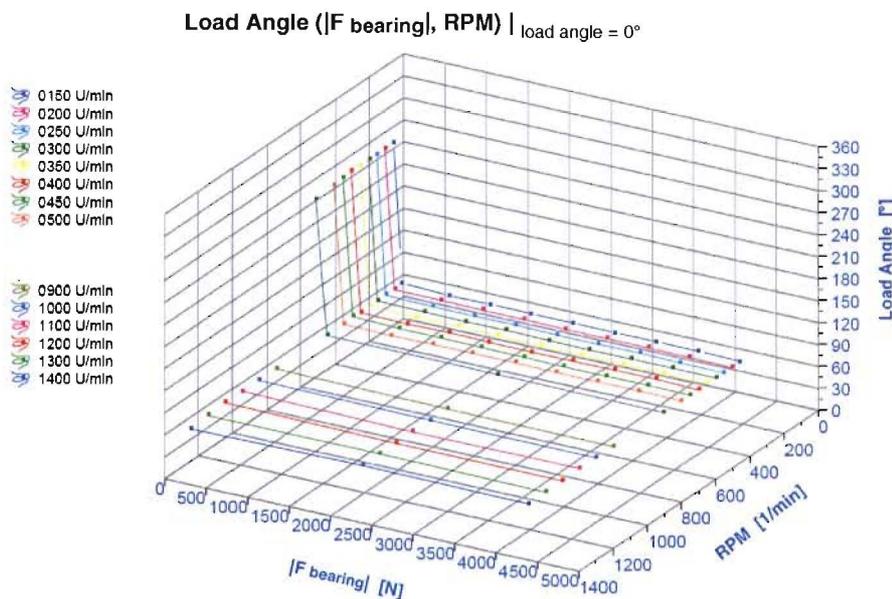


Abbildung 24: Steady state Messungen – Transfer-Funktion Lastwinkel

Die fehlenden Messwerte für den Umdrehungsgeschwindigkeits-Bereich von 600 1/min bis 800 1/min sind bedingt durch die Anfangsschwierigkeiten mit den starken Resonanzschwingungen. Daher wurde dieser Bereich nur für die ersten Tests zur Charakterisierung unterschiedlicher Phasen des Prüfstandsbetriebsverhaltens verwendet. Der sich ergebende Unwucht-Effekt wurde vom „Intelligenten Wälzlager“ eindeutig detektiert

(Siehe Kapitel „Prüfstandinbetriebnahme und Zuverlässigkeit“). Grundsätzlich decken sich die subjektiven Eindrücke über das Laufverhalten des Lagers und des Teststandes sehr gut mit den Unwucht-Messwerten. Da jedoch kein Referenz-Messsystem im Prüfstand vorgesehen und vorhanden war, lässt sich eine objektive Aussage und Bewertung nicht treffen und anstellen.

Von den Ausreißern (Abbildung 22) in jeder Anlauf-Phase abgesehen, bewegen sich die Abweichungen der mit dem digitalen Tachometer gemessenen und den mittels des „Intelligenten Wälzlagers“ ermittelten Umdrehungsgeschwindigkeitsmesswerten innerhalb des Fehlerintervalls von $\pm 1\%$.

5.2.4 Messungen zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens

Die Systemantwort des „Intelligenten Wälzlagers“ auf eine Sprungfunktion für den Lastwinkel (Sollwertsprung: 180°) and gleichzeitig des Betrages der Radialkraft (Sollwertsprung: 0,65 kN) ist in Abbildung 25 abgebildet.

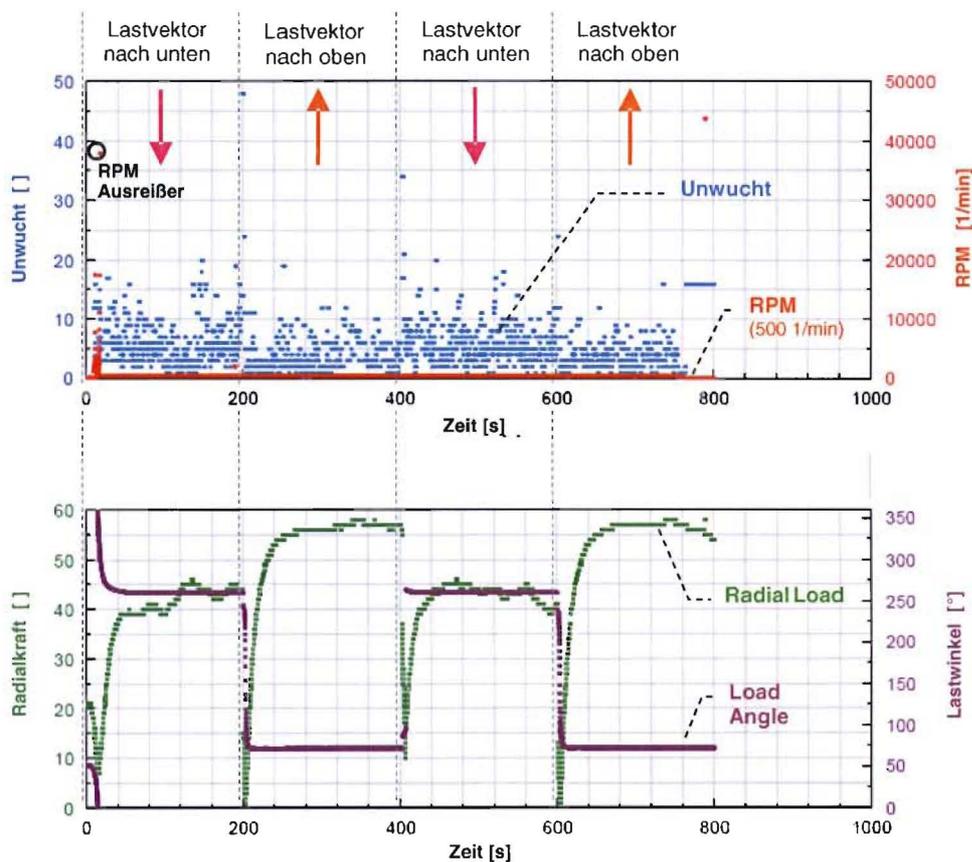


Abbildung 25: Messungen zur Systemantwort auf Sprungfunktions-Stimulus

Die ersten 50 Sekunden stehen im Zusammenhang mit der Prüfstandstands-Anlaufphase und sollen hier nicht weiter diskutiert werden. Von vorrangigem Interesse sind die abrupten Veränderungen des Lastvektors bei den Zeitpunkten 200, 400 und 600 Sekunden. Das steady

state Verhalten der Radialkraft lässt Einiges zu Wünschen übrig, kann aber durch die vorliegende Schädigung des eingesetzten Wälzlager-Prototypen (siehe Kapitel „Probleme und Änderung des Arbeitsplans“) einfach erklärt werden. Es ist jedoch vollkommen ausreichend um die grundsätzlichen dynamischen Effekte zu untersuchen und deckt sich mit den Erfahrungen zum dynamischen Verhalten, die mit dem vollständig funktionierenden Prototyp während der anderen Messreihen gemacht wurden. Der Einfluss auf den Lastwinkel hingegen hält sich in engen Grenzen und hat seinen Grund höchstwahrscheinlich in der laut Spezifikation wesentlich niedrigeren Auflösung für diesen Messwert.

Es ist offensichtlich, dass die Systemantwort einem wohl definierten System erster Ordnung entspricht. Die Einschwingzeiten für den Betrag der Radialkraft und für den Lastwinkel differieren aber stark. So existiert ein eingeschwungener Messwert für den Lastwinkel bereits nach 6 Sekunden während dies für die Radialkraft mehr als 40 Sekunden in Anspruch nimmt (Abbildung 26). Gleiches gilt sowohl für steigende wie auch fallende Flanke. Dies legt die stark eingeschränkte Eignung für eine Prozessregelung in der aktuellen Entwicklungsstufe klar offen. Jedoch versprechen durchgeführte Analysen der Rohsignalmessungen ausreichend Potential zur Erreichung einer Echtzeitfähigkeit nach Adaptierung der Signalverarbeitungssoftware an bestimmte Anwendungen (wobei möglicherweise dies die Eignung für andere Anwendungsfälle verringert).

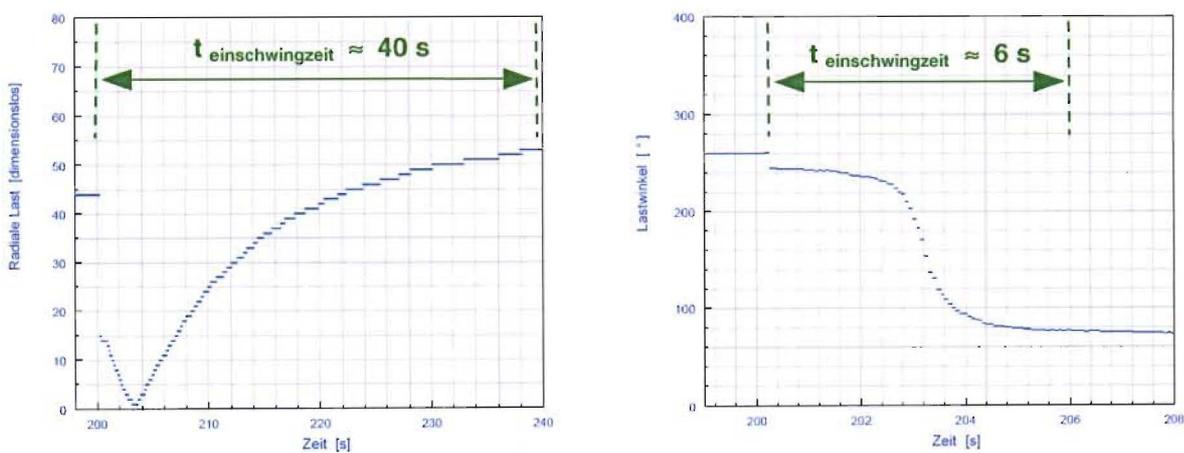


Abbildung 26: Bestimmung der Einschwingzeiten für Radialkraft (links) und Lastwinkel (rechts)

6 Diskussion

Beide Ansätze in den Teilprojekten bestätigen die Umsetzbarkeit des gesteckten Zieles einer Kraftstoffeinsparung von 15 %.

Als Grundlage für die Quantifizierung möglicher Wirkungsgradsteigerungen durch Einsatz elektrischer Antriebstechnik ist es gelungen, innerhalb von 12 Monaten einen funktionsfähigen elektrischen Prototyp-Antriebsstrang in einen Feldhäcksler zu integrieren. Die konstruktive Anpassungen der Grundmaschine und der Ansteuerung der hydraulischen Pumpen haben eine vollständige Integration in die Serienmaschine ohne Einschränkungen der Funktion oder Bedienung ermöglicht (**Bilder im Anhang**). Die Dimensionierung der elektrischen Baugruppen basierend auf Leistungsmessungen an hydraulischen Baugruppen in Feldversuchen 2005 und der Systemansatz mit dezentraler Leistungselektronik an den Motoren wurde in Ernteversuchen 2006 validiert. Dabei wurde die Funktion des Prototyps beim Beernten von mehr als 100 ha Silomais bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen unter Beweis gestellt.

Für die reproduzierbare Quantifizierung der Wirkungsgradvorteile wurden Feldversuche als ungeeignet erachtet. Die Prüfung sollte anhand von Prüfstandsversuchen umgesetzt werden. Im Verlauf des Projektes kristallisierte sich dabei heraus, dass nur der DLG Zugleistungsmesswagen der Prüfstelle in Groß-Umstadt die geforderten Spezifikationen hinsichtlich dynamischer Belastung zweier Baugruppen mit jeweils 0 – 50 kW reproduzierbar darstellen kann. Der an die Schnittstellen angepasste Versuchsaufbau ermöglicht es beide betrachteten Baugruppen mit den diesen zueignen typisch dynamischen Lastzyklen unabhängig zu beaufschlagen und die dabei umgesetzten Leistungen (mechanisch, hydraulisch, elektrisch) vollständig zu erfassen. Die gleichzeitige Belastung beider Baugruppen ermöglicht dabei erst eine Aussage zum Wirkungsgrad des gemeinsamen Generators. Zu beachten ist dabei, dass es ohne Belastung der Häckseltrommel als Hauptverbraucher nicht gelingt den Dieselmotor auszulasten und unter typischer Drückung zu betreiben. Um dies berücksichtigen zu können wurden durch Messungen bei manuell eingestellten diskreten Drehzahl-niveaus zwischen Nenndrehzahl und geringster möglicher Drehzahl (maximal mögliche Drückung) zusätzliche Stützstellen für ein aussagekräftiges Wirkungsgradkennfeld erarbeitet.

Die daraus resultierenden Kennfelder für die hydraulische und elektrische Leistungsübertragung weisen dabei einen deutlichen Wirkungsgradvorteil unter Vollast von 15% zugunsten der elektrischen Antriebe aus. Der im Teillastbereich noch stärker ausgeprägte Vorteil ist insbesondere für andere Anwendungen mit größeren Teillastanteilen wie zum Beispiel selbstfahrenden Rübenrodern von Bedeutung. Das hier gemessene Wirkungsgradniveau von gut 70% im geschlossenen hydraulischen System bietet dahingehend noch Verbesserungspotenzial die Betriebspunkte der Pumpen günstiger zu

wählen. Nach Einschätzungen der Autoren wäre damit eine Steigerung auf gut 75 % darstellbar. Allerdings wäre die Funktion bei der Grassilageernte mit wesentlich höheren Drehzahlen nicht mehr gegeben. Der gewählte Aufbau mit teurem aber hocheffizientem permanenterregtem Generator und passiver Gleichrichterbrücke stellt hinsichtlich der Wirkungsgrade den aktuellen Stand der Forschung dar. Der variable Zwischenkreis erhöht aber die Anforderungen an die Motorwechselrichter was sich auch im Wirkungsgrad zeigt. Der Ersatz der wegen Ihrer Robustheit gewählten Reluktanzmaschinen durch ebenfalls permanenterregte Maschinen würde eine geringfügige Verbesserung ermöglichen.

Legt man die Leistungsanteile der Baugruppen nach [GF01] zugrunde entfallen 30% auf hydraulische Baugruppenantriebe. Diese zu ersetzen würde bei einer mittleren Auslastung von 80% eine Kraftstoffeinsparung von 6% ermöglichen. Das gesamte Potenzial wäre allerdings bei vollständig hydraulisch angetriebenen Maschinen wie zum Beispiel selbstfahrenden Rübenrodern zu erschließen.

Um eine Serienreife zu erlangen ist, vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussion um Bodenschadverdichtungen, besonderes Augenmerk auf das Leistungsgewicht zu richten. Die Optimierbarkeit ist durch diverse Projekte unter Beweis gestellt worden, allerdings sind für den mobilen Einsatz noch keine Serienprodukte seitens der elektrischen Antriebstechnik verfügbar.

Im Bereich des „Intelligenten Kugellagers“ konnten mit dem entworfenen und gebauten Prüfstand die grundsätzlichen Untersuchungen zur Eignung der „Intelligenten Wälzlager“ für landtechnischen Einsatz erfolgreich durchgeführt werden. Natürlich könnten bisher manuell durchgeführte Funktionen weiter automatisiert werden und für die Unwuchtmessungen ein Referenzmesssystem mit integriert werden. Des Weiteren sollten noch mehr Möglichkeiten für unterschiedliche Lastwinkel geschaffen werden. Für derartige Maßnahmen steigt der technische und finanzielle Aufwand jedoch überproportional an und dürfte vor allem nur für den Hersteller dieses Sensors Sinn machen. Das entwickelte Messwerterfassungssystem und die anschließende Signalverarbeitung und -analyse hat sich bewährt und lässt sich flexibel an die Fragestellungen anpassen. Zusätzlich wurde es gegenüber der Antragsstellung um die Funktionalität der Rohsignalaufzeichnung erweitert. Auch ein Einsatz im Feldtest wäre, wie in der ursprünglichen Zielsetzung vorgesehen, möglich.

Das steady state - Verhalten der untersuchten Konfigurationen kann durchaus positiv eingeschätzt werden. Die linearen Abhängigkeiten der Radialkraft und des Lastwinkels in Abhängigkeit der anliegenden Belastung und Umdrehungsgeschwindigkeit erlauben eine einfache Kalibrierung und Weiterverarbeitung in Messwerterfassungs- und Steuerungs- und Regelungssystemen. Auch die Umdrehungsgeschwindigkeit wird mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ erfasst. Jedoch sind die statischen Eigenschaften eines Sensors nur die eine Seite, auch sein dynamisches Verhalten muss auf die jeweilige Aufgabenstellung abgestimmt sein. Und gerade hier zeigt das „Intelligente Wälzlager“ noch gravierende Einschränkungen, um für die

landtechnische Anwendung empfohlen werden zu können. Einschwingzeiten im Bereich von 6 bis 40 Sekunden sind für hochdynamische Lastschwankungen und Regelungsaufgaben nicht geeignet. Jedoch eröffnet ein Blick auf die Rohsignalmessungen das grundsätzliche Potential, auch im ms - Bereich reagieren bzw. die Verhältnisse abbilden zu können.

Somit ist auch ein zweites Ziel erfüllt, dass dem Hersteller wertvolle Hinweise and Anregungen zur Weiterentwicklung des Sensorsystems gegeben werden konnten, um ein für die ursprüngliche Zielsetzung hilfreiches neues Sensorsystem zur Steigerung der Energieeffizienz im Exakt-Feldhäcksler bereitstellen zu können.

Unglücklicherweise ist die Robustheit der eingesetzten Sensortechnologie noch nicht ausreichend. Gerade vor dem Hintergrund, dass das eigentliche Ziel der Einsatz unter härtesten Erntebedingungen ist, haben die Probleme bereits in reiner Laborumgebung noch einen großen Verbesserungsbedarf offengelegt. Dabei muss aber auch stets bedacht werden, dass es sich bei den eingesetzten Lagern um Forschungsprototypen und nicht um Vor- bzw. Serienprodukte handelt. Des Weiteren lassen die Messergebnisse auf die wünschenswerte Eigenschaft schließen, dass das Multisensor-Prinzip zur Erhöhung der Robustheit des (Gesamt)Sensors hinsichtlich einzelner fehlerhafter DMS-Sensoren beiträgt. Die implementierte Signalverarbeitungshardware stellte sicherlich noch genügend Rechnerleistung bereit, um zusätzlich zu den Messwerten auch noch Qualitäts- und/bzw. Plausibilitätsinformationen zu liefern.

Es wird bedauert, dass aufgrund der verspäteten Verfügbarkeit kein Feldeinsatz möglich war, denn mit gewisser Adaptionsleistung hätten bereits mit der aktuellen Prototyp-Version Teile der ursprünglichen Zielsetzung untersucht werden können.

Vorausgesetzt die Interfacebelegung erlaubt wieder Zugriff auf den Temperatursensor, zusammen mit den Unwuchtwerten, den mittleren Drehzahlen und der mittleren Radiallast ließe sich bereits jetzt die Betriebsdokumentation, (die ja keine Auflösung im ms-Bereich benötigt), und die (vorbeugende) Zustandsüberwachung realisieren. Eine Verbindung mit Georeferenzierung und Integration in Teleservice-Konzepte bietet sich als logische Fortführung an.

Die angedachte Automatisierung der Gegenschneidenzustellung sollte mit einer Softwareadaption machbar sein. Das Sensorsystem ist durchaus in der Lage „Berührungen“ der Messertrommel und der Gegenschneide im ms-Bereich zu detektieren. Schwieriger erscheint momentan die Situation bei dem dynamischen Verhalten der Radialkraft. Die langen Einschwingzeiten sind teilweise Resultat von Filterparametrierungen und statistischer Methoden der Signalverarbeitung mit dem vorrangigen Ziel hoher Messwertgenauigkeit für Einsatzfälle, die sich in ihrer Dynamik von der landtechnischen Anwendung unterscheiden. Ausgangspunkt für eine Adaption wäre somit eine Definition der noch ausreichenden Genauigkeit bei verbesserter Dynamik. Erst dann erscheint das Ziel, Lastschwankungen an der Messertrommel und an den Vorpresswalzen zu erfassen und dem Teilziel I für Regelungsaufgaben zur Verfügung zu stellen, erreichbar. Gleiches gilt für den Einsatz als

Sensorik für die Ertragsermittlung in den Vorpresswalzen, wenngleich man hier aufgrund des sowieso integrierenden Verfahrens wahrscheinlich auch mit einem 2 Hz Dynamikbereich auskommen könnte.

Selbst mit dem jetzigen Dynamikbereich beim Lastwinkel könnte die Hypothese einer leichten Lastwinkelverschiebung bei unschärferen Messern bzw. nicht optimal eingestelltem Abstand Gegenschneide zur Messertrommel untersucht werden, da es sich hierbei um eine kontinuierlich anwachsende bzw. konstante Verschiebung von einem idealen Ausgangswert aus handelt, der auch relativ zu Anfang eines Ernteeinsatzes bestimmt werden kann. Gerade bei der Herausforderung, stets mit optimalen Schnitt/Häckselbedingungen zu arbeiten, liegt ja großes Optimierungspotential für Energieeffizienz und Häckselgutlänge.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass das „Intelligente Wälzlager“ ein hoch interessantes Potential für eine landtechnische Anwendung besitzt, wenn die aufgezeigten Defizite bei der Weiterentwicklung berücksichtigt und bewältigt werden. Aber bereits mit der jetzigen Ausbaustufe und leichten Softwareadaptionen würde ein Feldtesteinsatz sehr viel Sinn machen. Jedoch darf auf keinen Fall außer Acht gelassen werden, dass die eingesetzten „Intelligenten Wälzlager“ nur Prototypen aus einem Forschungsprojekt waren und eine Serienversion nicht verfügbar ist, da dafür laut Schäffler KG noch technologische und kommerzielle Hürden zu meistern sind.

7 Literatur

- [Bar01] BARUCKI, T.: *Auslegung und Optimierung eines Elektroantriebes für Traktoren*. Landtechnik 56 (2001), SH. 2, S. 436 - 442, 2001
- [BK02] BERNHARD, B., KUTZBACH, H.D.: *Alternative Konzepte für den Mähdrescherfahrantrieb*. In: Tagung Landtechnik 2002, S. 93 – 97: VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2002
- [Cav99] CAVALCHINI, A.G.: *Forage Crops in Machines for Crop Production*, In: CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Volume III Plant Production Engineering, 1999, ASAE, St. Joseph, S.376 - 380
- [DC05] DE DONCKER, R.; FIEDLER J.O; FUENGWARODSAKUL N.H.; BAUER, St. und CARSTENSEN, CH.: *State of the art of Switched Reluctance Drives for Hybrid and Electric Vehicles*. Proceedings of 5th International Power Electronics Conference IPEC05, Niigata, Japan, 2005.
- [FH04] FORCHE, J., HARMS, H.-H.: *Management hydraulischer Antriebe in mobilen Arbeitsmaschinen*. Landtechnik 59 (2004), H. 3, S. 138 – 139, 2004
- [GA06] GALLMEIER, M., AUERNHAMMER, H.: *Test cycles for dynamic testing and simulation of agricultural equipment*. In: Proceedings of the CIGR World Congress Agricultural Engineering for a better World, Bonn, Germany, 2006
- [GF01] GARBERS, H., FRERICHS, L.: *Leistungs- und Technologieentwicklung von selbstfahrenden Feldhäckslern*. Landtechnik 56 (2001), H. 6, S. 394 – 395, 2001
- [Hei00] HEINRICH, A.: *Häckselmesser und Gegenschneide eines Feldhäckslers*. Landtechnik 55 (2000), H. 6, S. 440 - 441
- [Her04] HERING, J.: *Das "intelligente" Wälzlager - Technologie, Vorteile, Applikationen*. In: Begleit-CD zum Praktiker-Seminar: MobilTron, 13/14.10.2004, Mannheim, Sensor-Technik Wiedemann GmbH, 2004
- [IF75] IGE, M.T., FINNER, M.F.: *Effects and Interactions between Factors Affecting the Shearing Characteristics of Forage Harvesters*. Transactions of the ASAE 18 (1975), S. 1011-1016
- [Kro67] KROMER, K.-H.: *Untersuchungen am Trommelfeldhäcksler unter besonderer Berücksichtigung der Materialförderung in und nach Schneid-Wurf-Trommeln*. KTBL-Berichte über Landtechnik, Nr. 114, Frankfurt, 1967.
- [Kro93] KROMER, K.-H.: *Zerkleinerung von Mais in Trommelschneidwerken*. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 14, Nr.60, Düsseldorf, 1993
- [MS06] MÄRZ, M.; PÖCH, M.; SCHIMANECK, E.; SCHLETZ, A.: *Mechatronic Integration into the Hybrid Powertrain – The Thermal Challenge*, APE-Conference, Paris, Frankreich 2006
- [NM99] NEUHAUSER, H., WILD, K., MITTERLEITNER, J.: *Standfestigkeit von Häckseltrommelmessern*. Landtechnik 54 (1999), H. 5, S. 294 – 295, 1999
- [SDM05] Sauer-Danfoss: *Technische Information Axialkolbenmotoren Baureihe 90*, Technische Dokumentation DKMH.PN.343.A1.03 520L0953 10/2005
- [SDP05] Sauer-Danfoss: *Technische Information Axialkolbenverstellpumpen Baureihe 90*, Technische Dokumentation DKMH.PN.342.A1.03 520L0952 10/2005

[Wag05]

WAGNER, A.: *Qualitätsmanagement bei der Futterernte, Einflüsse der Erntetechnik auf den Qualitätsparameter „Langzeitstabilität“ von Silagen*. Habilitationsschrift (vorlegt der Landwirtschaftlichen Fakultät, Universität Bonn), Bonn, 2005

Anhang

