

Karlsruher Schriftenreihe
Fahrzeugsystemtechnik

Christian Schwab

**Beitrag zu einer universellen
Baggerschnittstelle zur Übertragung
elektrischer und hydraulischer Leistung
sowie elektronischer Signale für
komplexe Anbaugeräte**



Scientific
Publishing

Christian Schwab

**Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur
Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung
sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
Band 27**

Herausgeber

FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den eigenständigen Lehrstühlen für Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbautechnologie und Mobile Arbeitsmaschinen

Eine Übersicht über aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

**Beitrag zu einer universellen
Baggerschnittstelle zur Übertragung
elektrischer und hydraulischer Leistung
sowie elektronischer Signale für
komplexe Anbaugeräte**

von
Christian Schwab

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Maschinenbau, 2014

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2014

ISSN 1869-6058

ISBN 978-3-7315-0281-4

DOI: 10.5445/KSP/1000043578

Vorwort des Herausgebers

Hydraulische Mobilbagger entwickeln sich immer mehr zu Universalgeräten, die neben der Erdbewegung vielfältige Aufgaben auf einer Baustelle verrichten. Hierzu können unterschiedliche Anbaugeräte an dem Ausleger eines Baggers angebaut werden. Teilweise können sehr komplexe Geräte adaptiert werden, wie z.B. Holzerntemaschinen, Betonfräsen oder Rohrschweißgeräte. Eine einheitliche Schnittstelle, insbesondere zur Bedienung komplexer Geräte, wie Sie z.B. als ISOBUS bei Traktoren bekannt ist, steht heute nicht zur Verfügung. Die Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik leistet Beiträge zur Entwicklung zukünftiger Fahrzeugkonzepte. Für die Fahrzeuggattungen Pkw, Nfz, Mobile Arbeitsmaschinen und Bahnfahrzeuge werden in der Schriftenreihe Forschungsarbeiten vorgestellt, die Fahrzeugtechnik auf vier Ebenen beleuchten: das Fahrzeug als komplexes mechatronisches System, die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, das Fahrzeug im Verkehr und Infrastruktur sowie das Fahrzeug in Gesellschaft und Umwelt. Im Band 27 wird eine universell einsetzbare Schnittstelle für Bagger vorgeschlagen, mit der insbesondere komplexe Anbaugeräte gesteuert werden können. Insbesondere die Verwendung eines standardisierten Bediengerätes im Bagger steht im Fokus der Arbeit. Hierzu schlägt Herr Schwab zunächst den Aufbau einer solchen Schnittstelle vor und zeigt die Möglichkeit einer elektrischen, elektronischen und hydraulischen Leistungsübertragung. Am Beispiel einer Rohrschweißmaschine, deren Aufbau er in seiner Arbeit ebenfalls erläutert, validiert er die Schnittstelle. Schlussendlich zeigt er durch Verwendung der Schnittstelle mögliche Steigerungen der Energieeffizienz der angebauten Systeme. Diese sind dadurch bedingt, dass durch eine automatische Steuerung die Lasten des Anbaugerätes bekannt sind und

so die Arbeitspumpe im Bagger von der Steuerung des Anbaugeräts vorausschauend angesteuert werden kann.

Karlsruhe,
im September 2014

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

**Beitrag zu einer universellen
Baggerschnittstelle zur Übertragung
hydraulischer und elektrischer Leistung
und elektronischer Signale für komplexe
Anbaugeräte**

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christian Schwab

Tag der mündlichen Prüfung:

29. September 2014

Hauptreferent:

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (MOBIMA) des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer für die Übernahme des Hauptreferats und die wissenschaftliche Anleitung bei der Erstellung meiner Dissertation.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes (Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, KIT) danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Fidlín (Institut für Technische Mechanik, KIT) danke für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich danke meinen Kollegen für die gute Zusammenarbeit und gemeinsame Zeit am Lehrstuhl sowie meinen Studenten für die Unterstützung in meinen Projekten.

Mein persönlicher Dank gilt meinen Eltern, die mich auch in turbulenten Zeiten unterstützt und gefördert haben, sowie meiner Frau für ihre Unterstützung und ihre Geduld während meiner Arbeit.

Karlsruhe,
im Oktober 2014

Christian Schwab

Kurzfassung

Bagger sind vielseitig einsetzbare Baumaschinen, die mit entsprechenden Anbaugeräten eine Vielzahl von Arbeitsaufgaben erfüllen können. Diese reichen von einfachen Grab- und Reißprozessen bis hin zu komplizierten Aufgaben wie dem Ausstechen von Bäumen samt Wurzelballen.

Wird die Anzahl der hydraulischen Funktionen des Anbaugeräts jedoch zu groß, oder erfordern sie eine genaue Regelung, so ist eine direkte Ansteuerung über die Bedienelemente des Baggers nicht mehr möglich. Ein zusätzliches Steuermodul wird notwendig.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Steuerungssystem für Baggeranbaugeräte entworfen, welches die Steuerung und Regelung komplexer Anbaugeräte erlaubt und darüber hinaus im Stande ist, auch in die Steuerung des Baggers einzugreifen. Durch die beabsichtigte freie Programmierbarkeit sind zusätzliche Funktionen, wie Protokollierung und Dokumentation des Arbeitsprozesses, möglich. Darüber hinaus ist das Steuerungssystem so leistungsfähig, dass bisherige Steuerungs- und Assistenzsysteme des Baggers auf ihm laufen. Dadurch wird die Anzahl der Anzeigeelemente reduziert und die Übersichtlichkeit der Fahrerkabine gesteigert. Die Anbaugerätesteuerung ist in der Lage, dem Bagger mitzuteilen, welche Anforderungen gestellt werden, so dass der Bagger sich darauf einstellen kann. Neben dieser Schutzfunktion für das Anbaugerät besteht auch die Möglichkeit, Kraftstoff einzusparen, wenn das Anbaugerät bei Inaktivität oder reduzierter Leistungsaufnahme die hydraulische Versorgung des Baggers beeinflusst.

Eine mögliche Beispielanwendung für das Steuerungssystem ist ein Rohrschweißgerät, mit dem durch Reibschweißen Kunststoffrohre aus HDPE¹

¹Polyethylen hoher Dichte

für den Leitungsbau auf der Baustelle verschweißt werden sollen. Das Gerät erfordert eine vergleichsweise hohe Anzahl hydraulischer Funktionen, die für die Einhaltung der Prozessgüte teilweise exakt geregelt werden müssen.

Auf Basis des Rohrschweißgeräts wurde ein Simulationsmodell des Hydrauliksystems erstellt, das anhand der Messdaten eines Referenzschweißzyklus des Rohrschweißgeräts validiert wurde. Mit dem Modell wurde simulativ untersucht, welche Energieeinsparpotentiale für verschiedene gängige Hydrauliksysteme auf dem Bagger durch den Einsatz einer intelligenten Steuerung mit Zugriff auf die Baggersteuerung gegeben sind. Die Ergebnisse zeigen, dass je nach Kenntnis über den aktuellen Bedarf des Anbaugeräts und der gewählten Druckeinstellung bis zu 19 Prozent der benötigten hydraulischen Energie für eine Referenzschweißung im Vergleich zu einem gängigen Load-Sensing-System eingespart werden kann.

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation	1
1.1 Vorüberlegungen und Zweck einer universellen Schnittstelle für Baggeranbaugeräte	1
1.2 Wissenschaftliche Zielsetzung	3
1.3 Struktur und Inhalt	4
2 Stand der Technik	5
2.1 Wichtige Definitionen	5
2.1.1 System	5
2.1.2 Steuerung und Regelung	6
2.2 Bagger	8
2.3 Hydrauliksysteme in Baggern	15
2.3.1 Prinzipieller Aufbau	15
2.3.2 Varianten hydraulischer Schaltungen	19
2.4 Elektrische Systeme von Baggern	27
2.5 Elektronische Systeme von Baggern	27
2.6 Anbaugerätesteuerung	30
2.7 Anbaugerätesteuerung in der Landwirtschaft	31
3 Konzept der Anbaugerätesteuerung und Schnittstelle	33
3.1 Anbaugeräte und deren Klassifizierung	33
3.2 Schwierigkeiten beim Einsatz von Anbaugeräten	38
3.3 Allgemeine Anforderungen an die Steuerung und die Schnittstelle	40
3.4 Struktur der Anbaugerätesteuerung und Schnittstelle	41

3.4.1	Konzept zur Anbindung an den Bagger	44
3.4.2	Konzept zur Datenübertragung, Kommunikation und Hardware	45
3.5	Protokollierung und Dokumentation	48
3.6	Standardisierung	49
4	Beispielanwendungen	53
4.1	Ausgewählte Beispielanwendungen	53
4.2	Mobile Reibschweißmaschine	59
4.2.1	Reibschweißen von Kunststoffrohren	59
4.2.2	Konzept and Entwurf	63
4.2.3	Konstruktion	64
4.2.4	Hydraulisches System	65
4.2.5	Steuerung	69
4.2.6	Validierung des Konzepts am Beispiel der Reib- schweißmaschine	70
5	Potentiale der Anbaugerätesteuerung	73
5.1	Vorteile der neuen Steuerung für das System Rohrschweiß- gerät	79
5.2	Untersuchung der Einsparpotentiale für das Rohrschweiß- gerät	80
5.2.1	Aufbau und Validierung des Simulationsmodells	81
5.2.2	Simulativer Vergleich	84
6	Zusammenfassung	97
A	Appendix	101
A.1	Detaillierte Darstellung des Simulationsmodells	101

1. Motivation

1.1. Vorüberlegungen und Zweck einer universellen Schnittstelle für Baggeranbaugeräte

Bagger sind vielseitig einsetzbare Maschinen mit hoher Geländegängigkeit und Standsicherheit. Durch die zahlreichen Freiheitsgrade des Auslegers und den auf dem Unterwagen montierten beliebig drehbaren Oberwagen, sind diese Geräte in der Lage, auch komplizierte Bewegungen der Anbaugeräte auf kleinem Raum durchzuführen. Dies erlaubt es, mit dem Bagger verschiedenste Arbeiten zu verrichten, sofern geeignete Anbaugeräte zur Verfügung stehen.

Neben passiven Anbaugeräten wie Schaufeln, Haken, Reißzähnen etc. gibt es eine Vielzahl spezialisierter Anbaugeräte, die zusätzliche hydraulische Funktionen aufweisen, so dass mit ihnen ein umfangreiches Aufgabenspektrum zu bewältigen ist. Beispiele hierfür sind Greifer, Scheren, Meißel etc.. Die hydraulischen Zusatzfunktionen der Anbaugeräte werden direkt über zusätzliche Bedienelemente wie Pedale, Hebel und Knöpfe im Fahrerhaus gesteuert. Je nach Baggerhersteller liegt die Anzahl bei drei bis vier installierten hydraulischen Kreisläufen für zusätzliche Funktionen, wobei einige Kreisläufe doppeltwirkend sein können.

Die Anzahl zusätzlich installierter hydraulischer Kreisläufe kann theoretisch beliebig hoch sein. Zum Einen gibt es nur wenige Anbaugeräte, die mehr als drei bis vier Funktionen aufweisen, und zum Anderen wird die Bedienbarkeit zunehmend schwieriger.

Für Anbaugeräte, die mehr hydraulische Funktionen besitzen, wird ein anderer Lösungsansatz bevorzugt: So wird meist nur noch ein Kreislauf für

die Speisung des gesamten Anbaugeräts verwendet. Dieses besitzt eine eigene hydraulische Steuerung, über den die einzelnen Funktionen gespeist werden. Dies erfordert wiederum eine zusätzliche elektronische Steuerkonsole auf dem Bagger, die der Anbaugerätehersteller mitliefert.

Sollen mehrere Anbaugeräte mit zusätzlichen Steuerkonsolen auf einem Bagger verwendet werden, so wird die Installation der Steuerkonsolen im Fahrerhaus schnell unübersichtlich. Auch werden die Sicht und die Bewegungsfreiheit des Fahrers eingeschränkt und somit die Betriebssicherheit der Maschine vermindert.

In dem Fall ist auch der Anschluss des Anbaugeräts an einen anderen Bagger ohne größeren Aufwand nicht möglich, da die benötigten Installationen auf anderen Maschinen in der Regel nicht vorhanden sind. Dies schränkt den Einsatz von Anbaugeräten ein.

Der Lösungsansatz dieser Arbeit für dieses Problem sieht vor, eine standardisierte Schnittstelle auf dem Bagger zu schaffen, um Anbaugeräte hierüber zu steuern, zu überwachen und zu regeln. Diese Aufgabe soll ein auf dem Bagger installierter Rechner übernehmen, der über ein BUS-System mit dem Anbaugerät kommuniziert. Ebenfalls möglich ist eine Kommunikation mit dem Bagger, so dass relevante Funktionen des Trägergeräts gesteuert werden können. So kann die Arbeitssicherheit gesteigert und der Arbeitsprozess optimiert werden.

Im Idealfall erfolgt nach der Anbindung des Anbaugeräts an den Bagger und der Verbindung der Leitungen lediglich noch die Installation der zugehörigen Steuerungssoftware. Eventuell sinnvolle Anpassungen der Bagger-einstellungen könnten automatisiert erfolgen, sofern die Baggersteuerung diese Funktion unterstützt (Plug & Play). In diesem Fall könnte das Anbaugerät auch direkt Befehle an den Bagger senden, beispielsweise das Zu- oder Abschalten der Hydraulikversorgung oder das Unterbinden bestimmter Bewegungen. Ein intelligentes System steigert so die Sicherheit und die Effizienz des Arbeitsprozesses und kann auch dazu dienen, den Kraftstoffverbrauch zu senken.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Grundlagen hierzu erarbeitet, die Möglichkeiten zur Gestaltung eines Standards beschrieben und Potentiale zur Energieeinsparung anhand einer Beispielanwendung untersucht.

1.2. Wissenschaftliche Zielsetzung

Wie im vorangehenden Abschnitt 1.1 dargestellt, hat eine elektronische Schnittstelle zur Ansteuerung von Baggeranbaugeräten Vorteile. Derzeit ist eine solche Lösung jedoch auch in der Wissenschaft nicht vorhanden, weshalb diesbezüglich eine Forschungslücke besteht. Die vorliegende Arbeit widmet sich deshalb der Fragestellung, durch welche systemtechnischen Lösungen die Bedienung und Ansteuerung von Baggeranbaugeräten bezüglich der Kriterien Bedienbarkeit, Komplexität, Funktionsumfang und Betriebsstrategie verbessert werden können. Um die Forschungslücke zu schließen, wird zunächst der strukturelle Rahmen erarbeitet, um die Potentiale der elektronischen Anbaugerätesteuerung beurteilen zu können. Hierzu werden die generellen Anforderungen an eine universelle Schnittstelle abgeleitet und ein Lösungsvorschlag für diese entwickelt. Hierbei besteht der wissenschaftliche Anspruch darin, dass die Einsatzgebiete für Bagger sehr vielfältig sind und damit eine Vielzahl unterschiedlicher und individueller Anforderungen an die Schnittstelle entstehen. Daher müssen aus den individuellen Eigenschaften generell gültige Anforderungen abgeleitet werden.

Der daraus entstehende Lösungsansatz wird im letzten Schritt anhand einer Beispielanwendung bezüglich Funktionsumfang und Betriebsstrategie verifiziert. Das Kriterium Betriebsstrategie beinhaltet dabei auch die Themen Energieeffizienz und Ressourceneinsatz.

1.3. Struktur und Inhalt

Diese Arbeit erforscht eine Schnittstelle zur Steuerung komplexer Anbaugeräte auf Baggern. Nach der Darlegung der Motivation wird in Kapitel 2 der aktuelle Stand der Technik bezüglich Bagger, ihrer Baggerhydraulik und Baggeranbaugeräten erörtert. Kapitel 3 behandelt ausführlich die Details der technischen Umsetzung am hydraulischen, elektrischen und elektronischen System und die Möglichkeiten der Einflussnahme der Anbaugerätesteuerung auf die Baggersteuerung.

Kapitel 4 beschreibt verschiedene Beispielanwendungen für die vorgeschlagene Schnittstelle, wobei die Anwendung mit einer mobilen Reibschweißmaschine als Anbaugerät besonders detailliert dargestellt wird, um hiermit die erarbeitete Baggerschnittstelle zu validieren.

Die Möglichkeiten einer Energieeinsparung durch den Einsatz einer intelligenten Anbaugerätesteuerung sowie weitere Einsatzpotentiale werden in Kapitel 5 untersucht.

Kapitel 6 fasst die Ergebnisse zusammen und beinhaltet Ansatzpunkte für weitere Arbeiten zu diesem Thema.

2. Stand der Technik

2.1. Wichtige Definitionen

2.1.1. System

Im Rahmen dieser Arbeit wird häufig der Begriff *System* verwendet. VDE IEV 151-11-27 beschreibt ein System als „Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente, die in einem bestimmten Zusammenhang als Ganzes gesehen und als von ihrer Umgebung abgegrenzt betrachtet werden“ und merkt an: „Ein System wird im Allgemeinen hinsichtlich seiner Zielsetzung, zum Beispiel der Ausführung einer bestimmten Funktion, definiert.“

Diese Definition aus der Elektrotechnik ist so allgemein verfasst, dass sie auch auf andere in Beziehung stehende Elemente aus anderen Fachbereichen gilt, beispielsweise für mechanische, mechatronische oder biologische Systeme. Darüber hinaus wird eine weitere Definition des Begriffs *System* aus dem Bereich der Regelungstechnik verwendet: „Als *dynamisches System* wird eine Funktionseinheit bezeichnet, deren wichtigsten Kenngrößen sich zeitlich ändern und die deshalb als Funktion der Zeit dargestellt werden“ ((Lunze 2006), S. 2).

Beiden Definitionen gemein ist, dass ein System über Ein- und Ausgangsgrößen mit anderen Systemen oder der Umwelt in Wechselwirkung steht. Die Ein- und Ausgangsgrößen können aus Informationen, Energie oder Stoffen bestehen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden auch verbundene Systeme, die gemeinsam eine Funktion erfüllen, als System bezeichnet. Die Abgrenzungen werden, sofern sie aus dem Kontext nicht eindeutig hervorgehen, beschrieben.

2.1.2. Steuerung und Regelung

Steuerung

In der Regelungstechnik werden die Begriffe Steuerung und Regelung klar unterschieden. Eine Steuerung ist ein zumeist elektronisches System mit der Aufgabe, technische Vorgänge zu steuern. Der Begriff *steuern* wird nach DIN IEC 60050-351, Abschnitt 26-02 wie folgt definiert:

„Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere variable Größen als Eingangsgrößen andere variable Größen als Ausgangsgrößen auf Grund der dem System eigenen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen.“ Angemerkt wird in dem Zusammenhang an gleicher Stelle:

„Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsweg oder ein geschlossener Wirkungsweg, bei dem die durch die Eingangsgrößen beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken.“

Abbildung 2.1 zeigt schematisch die Struktur der offenen Signalkette einer Steuerung. Aus der Eingangsgröße wird die Stellgröße gebildet, die auf die Steuerstrecke wirkt und ein bestimmtes Verhalten bewirkt. Eine Rückkopplung ist nicht vorgesehen, so dass Störgrößen nicht ausgeglichen werden können.

Regelung

Eine Regelung ist ein zumeist elektronisches System mit der Aufgabe, technische Vorgänge zu regeln. Der Begriff *regeln* ist in DIN IEC 60050-351, Abschnitt 26-01 definiert als: „Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße, erfasst, mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird“. Als Anmerkung ist genannt: „Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.“

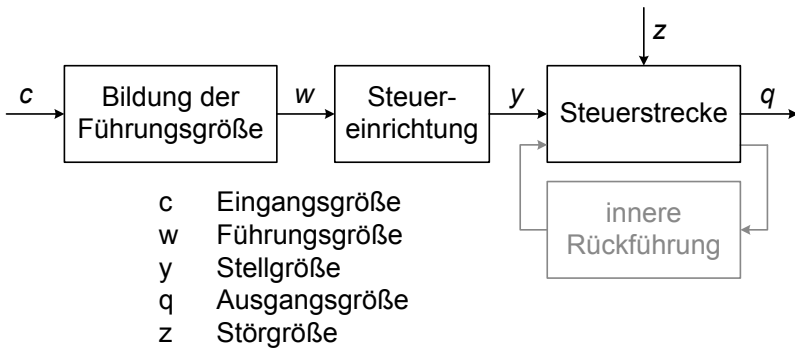


Abb. 2.1.: Struktur der offenen Steuerkette (in Anlehnung an DIN EN 60027, Anhang A)

Abbildung 2.2 zeigt die Struktur eines geschlossenen Regelkreises. Kennzeichnend für den Regelkreis ist der Vergleich der Führungsgröße mit der Rückführgröße, so dass lediglich die Regelabweichung auf das Regelglied wirkt. Das Regelglied gibt entsprechend der Regelabweichung die Stellgröße vor, die auf die Regelstrecke wirkt. Durch die Rückführung des Signals nach der Regelstrecke können Störgrößen ausgeregelt werden.

In dieser Arbeit wird der Begriff *Steuerung* mehrdeutig verwendet. Neben der vorangehenden Definition aus der Regelungstechnik werden die elektronischen Bagger- und Anbaugerätesteuerungsrechner ebenfalls kurz *Steuerung* oder auch *Steuerungssystem* bezeichnet, da dies dem Sprachgebrauch in der Fachliteratur entspricht. Dies gilt auch für den Fall, dass das System in erster Linie Regelungsaufgaben erfüllt. Die Verwendung des Begriffs wird aus dem Kontext klar hervorgehen. Bei Verwechslungsgefahr wird explizit darauf hingewiesen.

2.2. Bagger

Bagger sind geländegängige Maschinen zum Verrichten von vielseitigen Arbeitsaufgaben auf Baustellen. Je nach Einsatzgebiet werden Bagger in

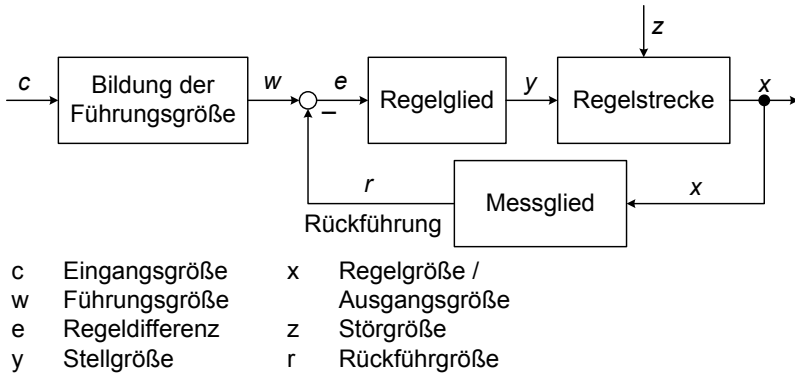


Abb. 2.2.: Struktur eines geschlossenen Regelkreises (in Anlehnung an DIN EN 60027, Anhang A)

Größen von 1-2 Tonnen bis hin zu mehreren hundert Tonnen Einsatzgewicht gebaut. Neben den klassischen Baggerbauformen werden Bagger für spezielle Anwendungen in Sonderbauformen hergestellt.

Der verbreitetste Einsatz liegt im Lösen, Lockern und Einbauen von Erdreich und Umschlagen von losen bis steinigen Materialien mit dem Löffel. Darüber hinaus können Bagger durch die Montage von zusätzlichen Anbaugeräten spezielle, teils sehr komplexe Tätigkeiten ausführen.

Aufbau

Im Allgemeinen bestehen Bagger aus einem Fahrgestell, genannt Unterwagen, mit Kettenantrieb (Kettenbagger) oder Gummibereifung (Mobilbagger) und einem zumeist endlos um seine Hochachse drehbaren Oberwagen. Am Oberwagen angebracht ist die Arbeitsausrüstung, bestehend aus einem mehrfach unterteilten Auslegerarm, an dessen Ende der Löffelstiel und daran die bewegliche Anbaugeräteaufnahme zur Montage der Anbaugeräte montiert sind. Die Arbeitsausrüstung ist grundsätzlich in der vertikalen Längsebene des Oberwagens in hohem Maß beweglich.

Der Unterwagen ist nicht selten mit einem Räumschild ausgerüstet. Mobilbagger können zur Erhöhung der Standsicherheit mit zusätzlichen Stützen ausgerüstet werden, um die Kippgefahr auf den relativ weichen Reifen zu reduzieren. Das Fahrgestell der Mobilbagger verfügt in der Regel über zwei Achsen. Die wichtigsten Vorteile der Gummibereifung gegenüber Kettenlaufwerken ist die höhere Transportgeschwindigkeit und die höhere Straßentauglichkeit, wobei Fahrzeuge ohne Gummiauflagen auf den Ketten Straßen nicht befahren dürfen, da diese den Belag stark schädigen können. Die Gummibereifung beschränkt jedoch die Baggergröße, da die zulässige Fahrzeuggesamtmasse und die Achslast auf öffentlichen Straßen in vielen Ländern gesetzlich begrenzt sind (siehe z.B. §34 StVZO). Mobilbagger können auch mit zusätzlichen Gleisrädern ausgerüstet werden, so dass sie auch auf Schienen fahren und Gleisarbeiten verrichten können.

Kettenbagger sind aufgrund ihrer geringeren Geschwindigkeiten weniger mobil, besitzen aber meist eine höhere Standsicherheit als nicht abgestützte Mobilbagger. Kleine Bagger laufen meist auf Gummibandlaufwerken. Größere Maschinen werden mit verschiedenen Kettenvarianten angeboten. So sind Ketten je nach geplantem Einsatz unterschiedlich breit und unterschiedlich profiliert. Auch Ketten mit straßenschonenden Gummiauflagen sind am Markt verfügbar.

Mobilbagger sind heute in Gewichtsklassen von ca. 4 bis etwa 30 Tonnen erhältlich (Cohrs (2012), Liebherr (2013)). Die größten Kettenbagger erreichen Gesamtgewichte von über tausend Tonnen.

Der Oberwagen ist über einen Drehkranz mit dem Unterwagen verbunden und trägt den Antrieb, die Arbeitsausrüstung und die Fahrerkabine. Am Heck des Oberwagens befindet sich das Gegengewicht. Für begrenzte Platzverhältnisse wurden Kompaktbagger entwickelt, deren Gegengewichte weniger weit nach hinten herausragen. Für die Tragfähigkeit des Baggers ist ein weit ausragendes Gegengewicht günstiger, für die dynamischen Eigenschaften des Drehantriebs dagegen ist ein nahe der Drehachse befindliches Gegengewicht vorteilhaft. Um die Vorteile beider Varianten zu ver-

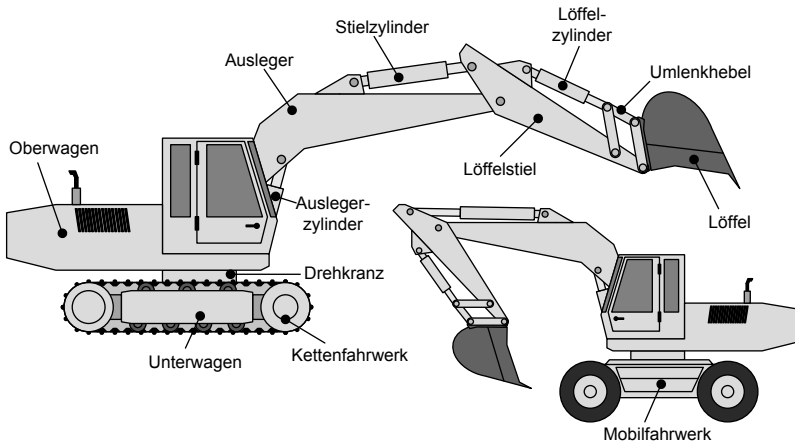


Abb. 2.3.: Grundlegender Aufbau eines Baggers

einen, existieren Lösungen, die das Gegengewicht verstellbar zu machen, um dies bei Bedarf weiter auszufahren. Dies führt zu geringeren Gesamtgewichten und besseren dynamischen Eigenschaften (Rabsahl (1994)).

Die Arbeitsausrüstung besteht aus einem ggf. mit Knickgelenken unterteilten Ausleger, dem Löffelstiel und dem Anbaugerät. Für Einsätze bei begrenzter Arbeitshöhe sind zweifach geteilte Ausleger erhältlich. Für speziellere Anwendungen sind seitlich drehbare und auch knickbare Ausleger auf dem Markt. Durch die zahlreichen Freiheitsgrade und hohen Beweglichkeiten der Gelenke ist es möglich, in einem näherungsweise toroidförmigen Bereich um den Standort des Baggers verschiedene Aufgaben auszuüben. Auch Arbeiten im Erdreich unterhalb des Baggers sind möglich. **Abbildung 2.3** zeigt den Aufbau eines Ketten- und eines Mobilbaggers.

Durch verlängerte Ausleger können bei verringerter Tragfähigkeit erhöhte Reichweiten erzielt werden, wodurch Arbeiten an erhöhten oder tiefer liegenden Stellen ermöglicht werden. Grundsätzlich gilt, je länger der Ausleger, desto höher ist die Reichweite, aber desto geringer ist die Tragfähigkeit des Baggers.

Am Ende des Auslegers ist eine Aufnahme der Werkzeuge angebracht. Zum schnellen Wechsel des Werkzeugs werden Schnellwechsler montiert, mit denen der Werkzeugtausch zeitsparend erfolgen kann. Einige Schnellwechsler kuppeln automatisch die Leitungen für hydraulisch angetriebene Werkzeuge an.

Das Fahrerhaus ist - mit Ausnahme von bestimmten Umschlagbaggern - fest am Oberwagen montiert.

Üblicherweise wird ein Dieselmotor als Energiequelle genutzt. Für spezielle Einsätze sind jedoch auch Elektrobagger erhältlich, meist jedoch für den (quasi-) stationären Einsatz. Die Leistungsübertragung von der Energiequelle auf die Abtriebe erfolgt hydrostatisch, wobei die Bewegung der Arbeitsausrüstung durch Hydraulikzylinder und die rotatorischen Bewegungen wie Fahren und Schwenken des Oberwagens durch hydraulische Rotationsmotoren realisiert wird (siehe Abschnitt 2.3).

Durch die hohe Beweglichkeit und Leistungsdichte sowie die Möglichkeit verschiedene Anbaugeräte zu montieren ist der Bagger als Trägergerät vielseitig einsetzbar.

Die großen Baggerhersteller haben in den vergangenen Jahren Hybridbagger vorgestellt, die mit zusätzlichen elektrischen Systemen ausgestattet sind, um Energie zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben. Der höhere Investitionsaufwand soll sich durch niedrigere Energiekosten rechnen. Beispiele hierfür sind der Komatsu PC200-8 Hybridbagger (siehe Tsuji & Teranaka (2008)), der Hitachi ZH200 (siehe Hitachi (2012)), der Caterpillar 336E H (siehe Caterpillar (2013)), oder der Liebherr 9XX mit elektrischer und hydraulischer Energierückgewinnung (siehe Pierrat (2013)). Die Art der Energiegewinnung und -speicherung hat auf die Steuerung von Anbau-

geräten keinen Einfluss, da sich die Hybridsysteme nur auf die Hauptfunktionen des Baggers beziehen.

Bauformen von Baggern

Die verbreitetste Bauform stellen Bagger mit Tieflöffel dar. Bei dieser Bauweise zieht der Bagger beim Graben die Schaufel zu sich hin. Dem gegenüber stehen Bagger mit Hochlöffel, bei denen der Löffel nach vorne geöffnet ist und zur Aufnahme von Material nach vorne geschoben wird (**Abbildung 2.4**). Die Kinematik des Hochlöffels erlaubt zusammen mit einem Klapplöffel höhere Abwurfhöhen. Nachteilig ist eine schlechtere Sicht auf den Arbeitsbereich. Daher kommen Bagger mit Hochlöffel zumeist im Tagebau zum Einsatz. Hochlöffelbagger arbeiten üblicherweise auf und oberhalb der Standfläche, Tieflöffelbagger dagegen zumeist unterhalb der Standfläche.

Bei vielen Sonderbauformen wird der Unterwagen durch einen anderen Unterbau ersetzt. Ein Schwimmbagger sitzt anstatt auf einem Unterwagen auf einem Ponton. Im Gleisbau sitzt der Oberwagen auf einem „Schienenfahrgestell“. Für den stationären Einsatz kann der Oberwagen auf Säulen oder Brückenkonstruktionen montiert werden. Speziell im stationären Einsatz wird häufig der Dieselmotor durch einen Elektromotor ersetzt, um Emissionen, Geräusche und Aufwand bei der Dieselversorgung zu senken. Für Einsätze auf engen Baustellen kommen Kompaktbagger zum Einsatz, bei denen das Gegengewicht wesentlich näher an der Drehachse des Oberwagens liegt, um den Überstand des Hecks zu minimieren.

Speziell für den Einsatz in unwegsamem Gelände, das für den Einsatz von Rädern und Ketten ungeeignet ist, wurden Schreitbagger entwickelt (vgl. König (2011)). Diese stehen auf mehrfach verstellbaren Stützen, die nacheinander bewegt werden. Somit kann der Bagger in schwerem Gelände „laufen“. Eine besondere Bauform des Schreitbaggers kommt im Tagebau

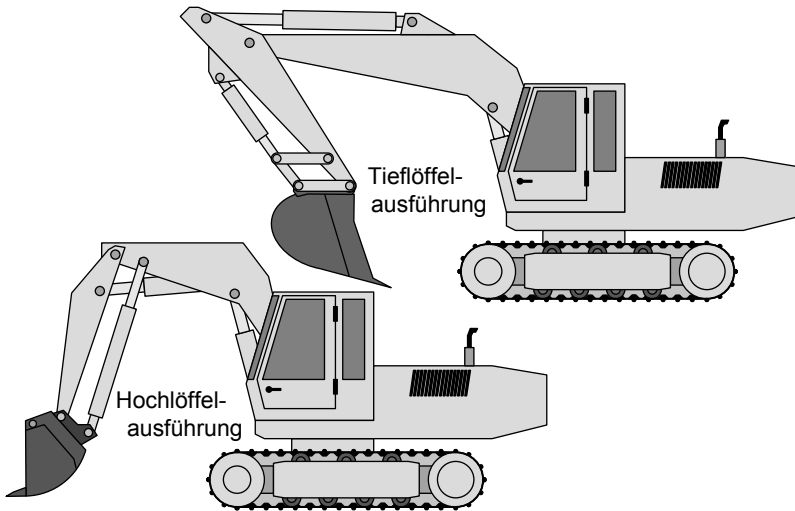


Abb. 2.4.: Vergleich Hoch- und Tieflöffelbagger

zum Einsatz. Bei sehr schweren Baggern kommen hier statt Raupenfahrwerken große Platten zum Einsatz, die nacheinander gehoben und vorwärts bewegt werden. So schiebt sich der Bagger nach und nach vorwärts.

Vor der Verbreitung der Hydraulik wurden Baggerausleger mittels Seilen über Winden bewegt. Durch die starke Verbreitung der Hydraulik werden Bagger heute zumeist hydraulisch bewegt. Für spezielle Anwendungen werden Seilbagger aber nach wie vor gebaut. Beim Graben tiefer Schächte, z.B. für Stützwände, werden Seilbagger sehr häufig eingesetzt (vgl. Hudelmaier (2009)). Auch im Tagebau kommen Seilbagger von mehreren hundert Tonnen zum Einsatz. Der größte Seilbagger war der Big Muskie der Fa. Bucyrus mit etwa 13.000 Tonnen Gewicht.

In Cohrs (2004) werden auch kontinuierlich arbeitende Erdbewegungsmaschinen wie Fräslader und Schaufelradbagger ebenfalls zu den Baggern gezählt. Der Vorteil dieser Fahrzeuge ist die im Vergleich deutlich größere Umschlagsleistung, da diese quasi kontinuierlich über ein Förderband abladen, wodurch Leerwege gespart werden. Im Tagebau kommen Schaufel-

radbagger zum Einsatz, welche über 14.000 Tonnen schwer sind und täglich 240.000 m^3 Material bewegen.

2.3. Hydrauliksysteme in Baggern

2.3.1. Prinzipieller Aufbau

Die gängige Standardbauform des Baggers ist der Hydraulikbagger. Bei diesen Arbeitsmaschinen erfolgt die Leistungsübertragung im Fahrtriebstrang und der Arbeitsausrüstung hydrostatisch, d.h über ein unter Druck stehendes Fluid, dessen statischer Druck auf Wirkflächen Kräfte ausübt und diese durch die Strömung des Fluids in Bewegung setzt. Mit der Hydrostatik können, im Gegensatz zu elektrischen und mechanischen Antrieben, einfach Linearbewegungen mit sehr hohen Kräften erzeugt werden. Außerdem sind die Komponenten des Hydrauliksystems durch den Einsatz flexibler Schlauchleitungen variabel platzierbar. Dies sind die Hauptgründe für den Einsatz der Hydraulik in Baggern. Die Vorteile überwiegen so sehr, dass heute Alternativen zum hydraulischen Antrieb nur dort eingesetzt werden, wo der Hydraulikbagger ungeeignet wäre, z.B. beim Ausheben in großer Tiefe mit Hydroseilbaggern.

Abbildung 2.5 zeigt den beispielhaften, stark vereinfachten Aufbau des Hydrauliksystems eines 55J Raupenbaggers der Firma IHI der 5-6 Tonnen Klasse. Das Hydrauliksystem entspricht der üblichen Bauweise für Bagger dieser Klasse. Der Bagger verfügt über drei Pumpen für die Hauptfunktionen, eine weitere Pumpe stellt den Druck und den Volumenstrom für die hydraulische Vorsteuerung zur Verfügung. Zwei Pumpen übernehmen die Speisung der Hauptfunktionen der Arbeitsausrüstung sowie die Speisung der beiden Fahrmotoren. Die dritte Pumpe speist den Schwenkantrieb des Oberwagens, den Schwenkzylinder des Auslegers und die Nebenfunktion Heben und Senken des Schilds.

Die Pumpen 1 und 2 versorgen primär die ihnen zugewiesenen Funktionen (P1 Fahren rechts, Löffel, Löffelstiel; P2 Fahren links und Ausleger)

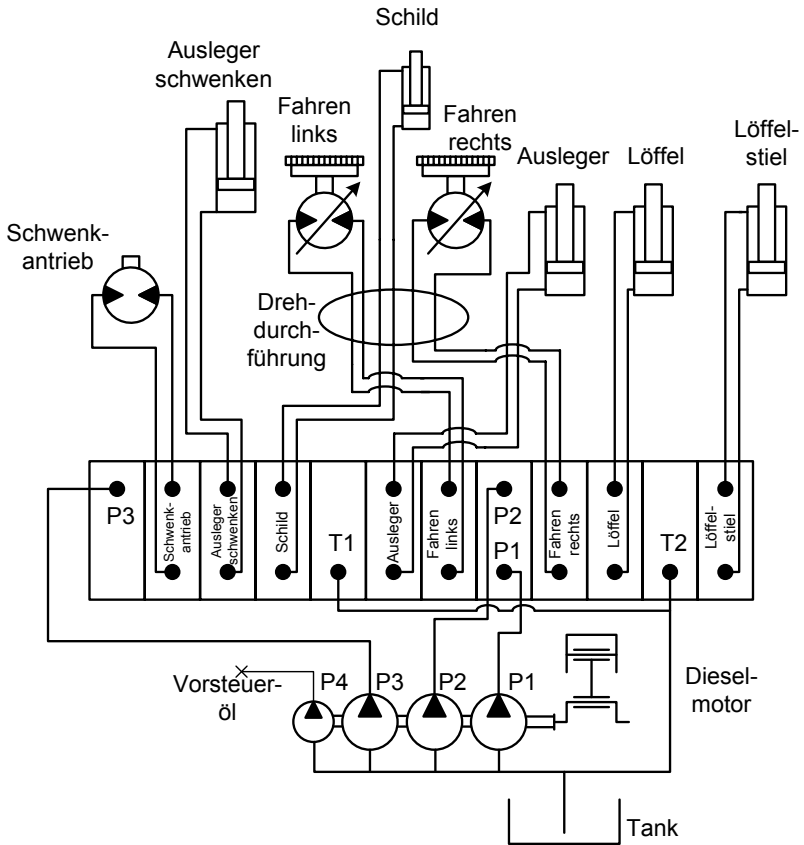


Abb. 2.5.: Stark vereinfachter, beispielhafter Aufbau des Hydrauliksystems eines Baggers Typ IHI 55J (in Anlehnung an den Hydraulikschaltplan des Reparaturhandbuchs IHI 55J)

ohne gegenseitige Beeinflussung. Bei vielen Baggern werden die Volumenströme der beiden Pumpen bei Bedarf zusammengeführt, so dass einzelne Bewegungen schneller ausgeführt werden können. Eine Prioritätsschaltung sorgt dafür, dass bei gleichzeitiger Betätigung mehrerer Verbraucher die sicherheitskritischen Verbraucher bevorzugt mit Öl versorgt werden.

Zwar ist es möglich, alle Antriebe über eine entsprechend dimensionierte Pumpe anzutreiben, energetisch sinnvoll ist dies jedoch nicht. Viele Funktionen werden gleichzeitig genutzt, die benötigten Drücke variieren jedoch teils erheblich. Durch die notwendige Abdrosselung würde auf diese Weise viel der bereitgestellten Energie für den Arbeitsprozess verloren gehen. Daher kommen selbst in kleinen Baggern für die hydraulischen Hauptfunktionen bereits zwei bis drei Pumpen zum Einsatz, wie am Beispiel aus Abbildung 2.5 gezeigt wurde. Bei Großgeräten wird jede hydraulische Hauptfunktion von einer eigenen Pumpe gespeist (Späth & Holländer (2008)).

Hinzu kommen Zusatz- und Hilfspumpen für die hydraulische Vorsteuerung oder Nebenfunktionen. Die Fahrfunktion ist im Vergleich zur Arbeitsfunktion auch bei Mobilbaggern von untergeordneter Rolle, so dass in der Regel die Hydraulikmotoren für die Fahrfunktion über die Pumpen der Arbeitsfunktion gespeist werden.

Das Hydrauliksystem spielt eine essentielle Rolle für den Betrieb des Baggers. Es überträgt, steuert und regelt den Leistungsfluss und ist für die Bedienbarkeit und den Komfort des Baggers wesentlich. Die Wirtschaftlichkeit der Maschine wird ebenfalls durch die Anschaffungskosten und den Wirkungsgrad des Hydrauliksystems maßgeblich beeinflusst. Die Hersteller betreiben daher einen großen Aufwand, um die Systeme bezüglich Bedienbarkeit, Funktion (-umfang) und Energieeffizienz zu optimieren.

Je nach Baggergröße, -einsatz und Ermessen der Entwicklungsingenieure sehen die Lösungen der Hersteller unterschiedlich aus. Eine detaillierte Darstellung der verschiedenen Varianten hydraulischer Schaltungen ist in Abschnitt 2.3.2 dargestellt.

2.3.2. Varianten hydraulischer Schaltungen

Nachdem in Abbildung 2.5 einen Überblick über das gesamte Hydrauliksystem eines Baggers gegeben wurde, werden im Folgenden mögliche Schaltungsvarianten für die Arbeitshydraulik eines Baggers vorgestellt. Der Fahrtrieb wird hier nicht weiter betrachtet, da dieser für diese Arbeit von untergeordneter Bedeutung ist.

Für die Funktionserfüllung, das dynamische Verhalten, die Bedienbarkeit und die Energieeffizienz ist das Pumpenverhalten und die Ventilstruktur von hoher Bedeutung. Aus wirtschaftlichen und technologischen Gründen kommen verschiedene Prinzipien der Schaltungsstruktur in Baggern zum Einsatz.

Allen Schaltungen gemein ist, dass eine Pumpe den Volumenstrom bereitstellt. Der Druck stellt sich daraufhin lastabhängig ein. Dies kann über eine Pumpe mit konstantem oder variablem Verdrängungsvolumen erfolgen. Man spricht hier von Konstant- und Verstellpumpen. Durch die Variation der Drehzahl ist der Volumenstrom zusätzlich beeinflussbar. Der bereitgestellte Volumenstrom wird über Ventile auf die Verbraucher verteilt und entsprechend der Fahrervorgabe eingestellt.

Konstantstromsystem

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Ventilschaltungen mit offener oder geschlossener Mittelstellung (vgl. **Abbildung 2.6**). Bei Ventilen mit offener Mittelstellung (Open-Center) fließt der von der Pumpe bereitge-

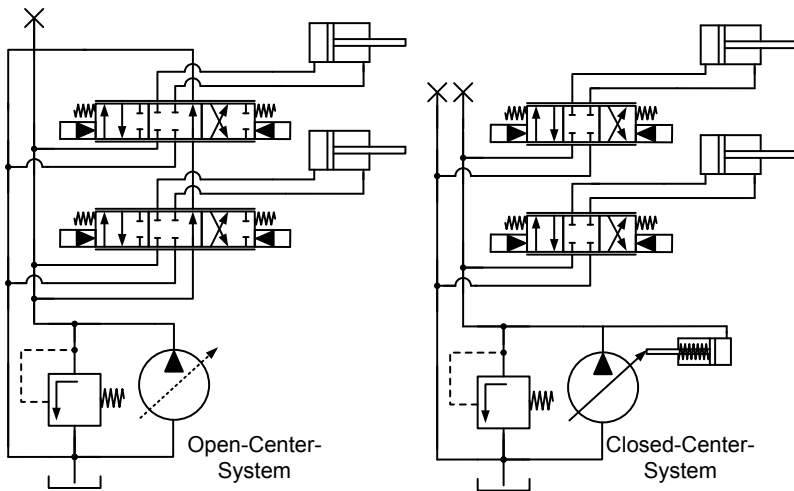


Abb. 2.6.: Prinzip hydraulischer Schaltungen mit offener (links) und geschlossener Mittelstellung (rechts)

stellte Ölstrom möglichst verlustfrei in den Tank zurück, sofern keine Verbraucher aktiv sind. Beim Betätigen des Ventilschiebers wird der Umlauf verschlossen und gleichzeitig die Kanäle zwischen Pumpe und Verbraucher und zwischen Verbraucher und Tank geöffnet. Durch das Abdrosseln des Umlaufs baut sich im System ein Druck auf, der auf den Verbraucher wirkt und diesen in Bewegung setzt. Wird nicht der gesamte Volumenstrom für den Verbraucher benötigt, wird dieser über ein Druckbegrenzungsventil zum Tank abgeführt.

Beim Einsatz einer Konstantpumpe spricht man von einem Konstantstromsystem. Bei diesen Systemen sind die Verluste im Teillastbereich vergleichsweise hoch, weswegen sie eher bei kleineren Baggern zum Einsatz kommen. Bei Verwendung einer Verstellpumpe können die Verluste deutlich reduziert werden.

Konstantdrucksysteme

Konstantdrucksysteme mit geschlossener Mittelstellung (Closed Center) wie in Abbildung 2.6 rechts stellen einen vorher eingestellten Druck zur Verfügung. Durch den Einsatz einer Verstellpumpe mit Druckregler wird nur der Volumenstrom von der Pumpe bereitgestellt, der vom Verbraucher angefordert wird und zur Aufrechterhaltung des Systemdrucks benötigt wird (Leckageausgleich). Dennoch sind die Verluste bei diesem System vergleichsweise hoch, da durch die hohen Systemdrücke die Leckage nicht zu vernachlässigen ist und im Teillastbereich die Drosselverluste hoch sind. Da beim Bagger der Zeitanteil nahe des maximalen Systemdrucks vergleichsweise gering ist, werden solche Systeme für die Arbeitshydraulik von Baggern nicht eingesetzt (Späth & Holländer (2008)).

Load-Sensing-Systeme

Um die Verluste möglichst gering zu halten, wurden Systeme mit lastdruckabhängiger Veränderung des Pumpendrucks entwickelt. Solche Hydrauliksysteme werden Load-Sensing-Systeme (LS-Systeme) genannt (Will u. a. (2007)).

Der Verbraucherdruck, bzw. bei gleichzeitiger Betätigung mehrerer Verbraucher der höchste Verbraucherdruck, wird über eine zur Tank- und Hochdruckleitung zusätzliche Lastmeldeleitung an den Load-Sensing-Regler übermittelt. Dieser regelt den Pumpenausgangsdruck auf den benötigten Druck zuzüglich einer für die Regelfunktion notwendigen LS-Druckdifferenz ein. Durch die Anpassung des Systemdrucks an den tatsächlich benötigten Druck können Verluste vor allem im Teillastbereich reduziert werden. **Abbildung 2.7** zeigt den prinzipiellen Aufbau eines LS-Systems.

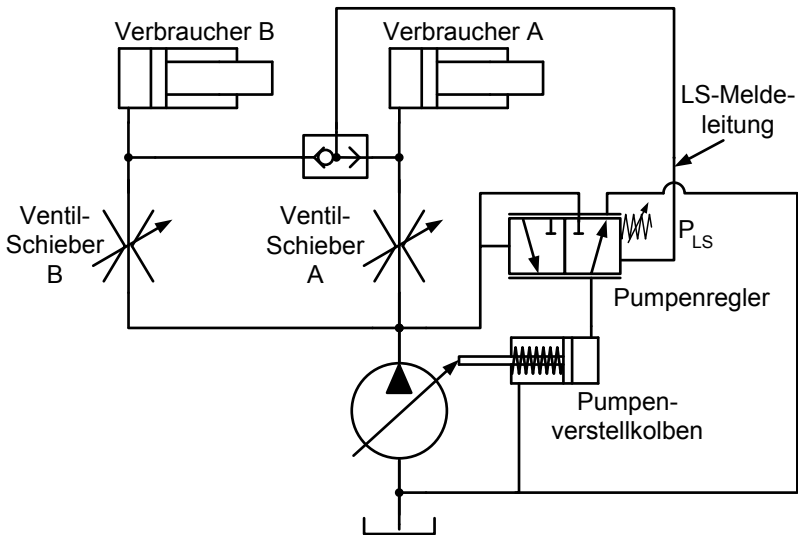


Abb. 2.7.: Prinzipieller Aufbau eines Load-Sensing-Systems mit 2 Verbrauchern

Bei Verwendung eines wie zuvor beschriebenen LS-Systems käme es durch den stark variablen Versorgungsdruck der Pumpe bei gleichzeitiger Betätigung mehrerer Verbraucher zu unerwünschten Geschwindigkeitsveränderungen, da der Volumenstrom über ein Ventil bei konstanter Ventilauslenkung maßgeblich von der Druckdifferenz abhängt. Dies würde vor allem beim Zuschalten weiterer Verbraucher zu raschen teils sprunghaften Geschwindigkeitsänderungen der Verbraucher und somit zu einem Sicherheits- und Komfortproblem führen. Um diese Problematik zu umgehen, wurden zwei verschiedene LS-Systeme entwickelt: Das LS-System mit vorgeschalteter Druckwaage und das LS-System mit nachgeschalteter Druckwaage.

Bei Systemen mit vorgeschalteter Druckwaage (**Abbildung 2.8**) verfügt jedes LS-Ventil über eine eigene Druckwaage, die eine konstante Druckdifferenz über das Ventil einstellt, unabhängig vom tatsächlich anliegenden Pumpendruck. Durch die konstante Druckdifferenz über das LS-Ventil

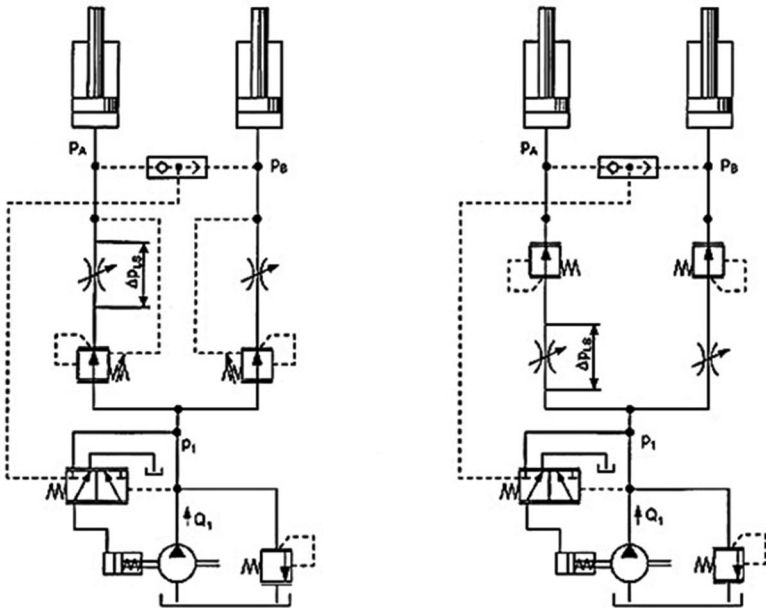


Abb. 2.8.: Schaltungsprinzip Load-Sensing-System mit vorgeschalteter (links) und nachgeschalteter Druckwaage (rechts), (HAWE-Hydraulik (2014))

ist gewährleistet, dass die Verbrauchergeschwindigkeit im Normalbetrieb vom Öffnungsquerschnitt, nicht jedoch vom anliegenden Pumpendruck bestimmt wird.

Nachteilig wirkt sich dieses Schaltungsprinzip aus, wenn die Pumpe den angeforderten Volumenstrom nicht mehr darstellen kann. Bei Unterversorgung kann der für den Betrieb der (des) höchstbelasteten Verbraucher(s) benötigte Druck nicht mehr aufrecht erhalten werden, woraus eine Geschwindigkeitsreduktion oder gar der Stillstand dieses Verbrauchers resultiert (Backé (1997)).

Um die Auswirkungen einer Unterversorgung des Systems zu reduzieren, wurde das LS-System mit nachgeschalteter Druckwaage entwickelt (Abbildung 2.8). An jeder Druckwaage liegt einerseits der höchste Verbraucher-

druck an und andererseits der Druck nach dem Ventilschieber des Proportionalventils der jeweiligen Sektion. Dadurch wird erreicht, dass die Volumenstromaufteilung proportional zu den Öffnungsquerschnitten ist. Auch im Fall der Unterversorgung wird das Verhältnis beibehalten, jedoch die Geschwindigkeit aller Verbraucher proportional reduziert. Die Maschine arbeitet dabei zwar langsamer, der geforderte Bewegungsablauf bleibt jedoch aufrechterhalten (Rexroth (2012)).

Bei der Versorgung mehrerer Verbraucher mit stark unterschiedlichem Druck- und Volumenstrombedarf über eine Pumpe entstehen jedoch deutliche Verluste.

Systeme mit Volumenstrombedarfssteuerung

Sind die Verbraucher des Hydrauliksystems genau bekannt, werden neben Load-Sensing-Systemen auch Volumenstrombedarfssteuerungen eingesetzt (Späth & Holländer (2008)). Eine detaillierte Darstellung von Volumenbedarfsstromsystemen liefern Fedde (2007), Djurovic (2007) und Fintel (2010). Volumenbedarfsstromsysteme sind Systeme mit offener Mittelstellung. Sie unterscheiden sich von den Konstantstromsystemen durch den Einsatz einer Verstellpumpe. Die Systeme sind im Vergleich zu LS-System relativ einfach aufgebaut, da keine Sektionsdruckwaagen und Lastmeldeleitungen erforderlich sind.

Bei den Volumenbedarfsstromsystemen werden zwei unterschiedliche Prinzipien der Pumpenregelung unterschieden: Das Positive- und das Negative-Control-Prinzip.

Abbildung 2.9 zeigt beide Pumpenverstellprinzipien von Volumenstrombedarfssystemen. Bei Systemen mit Positive-Control wird der Vorsteuerdruck, der für die Betätigung der Hauptventilschieber benötigt wird, auf den Verstellkolben der Pumpe geleitet. Je höher der Vorsteuerdruck, desto

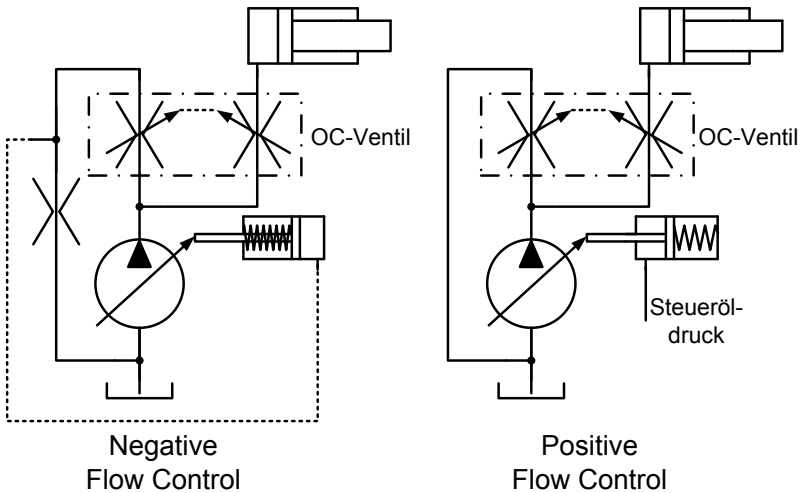


Abb. 2.9.: Prinzip Negative und Positive Flow Control

weiter schwenkt die Pumpe aus. Eine Rückkopplung ist nicht vorgesehen, es handelt sich also um eine reine Steuerung und nicht um eine Regelung. Daraus ist ersichtlich, dass hierzu eine genaue Kenntnis der Verbraucher wichtig ist, da bei zu starker Pumpenauslenkung der Pumpendruck zu hoch wird und dieser über ein Druckbegrenzungsventil zum Tank abgedrosselt werden muss, bzw. im umgekehrten Fall die geforderten Verbrauchergeschwindigkeiten nicht erreicht werden und bei Betätigung mehrerer Verbraucher der (die) Höchstbelastete(n) stehen bleiben kann (können). Systeme mit Negative-Control verfügen über eine Messblende in der Rückleitung vom Ventilblock zum Tank. Der Rücklaufdruck vor der Messblende wirkt auf den Pumpenverstellkolben. Bei Betätigung eines Verbrauchers wird der Neutralumlauf des Open-Center-Systems abgedrosselt und der sich aufbauende Druck zum Verbraucher geleitet. Durch den reduzierten Rücklaufvolumenstrom fällt der Druck an der Messstelle, wodurch die Pumpe weiter ausschwenkt und den geförderten Volumenstrom erhöht. Nach Ende der Betätigung oder beim Absenken des Verbrauchers erhöht

sich der Volumenstrom zum Tank wieder, der Druck vor der Messblende steigt und die Pumpe schwenkt zurück.

Vorsteuerung

In dieser Variante werden die Ventilschieber durch äußere Krafteinwirkung aus ihrer Neutralstellung ausgelenkt und lenken so den von der Pumpe geförderten Volumenstrom zu den Verbrauchern. In Baggern kommen hierzu zwei verschiedene Lösungen zum Einsatz: Die elektrische und die hydraulische Vorsteuerung.

Bei der elektrischen Vorsteuerung wird die Auslenkung der Bedienhebel von einer Elektronik gemessen und ein entsprechender elektrischer Strom an einen Elektromagnet geleitet, so dass dieser den Ventilschieber dem Fahrerwunsch entsprechend auslenkt.

Bei der hydraulischen Vorsteuerung verfügt das Hydrauliksystem über einen zusätzlichen Niederdruckkreislauf. Der Niederdruck wird zu den Bedienhebeln im Fahrerhaus geleitet. Durch Auslenkung wird der Neutralumlauf zum Tank aufgestaut und zu der jeweiligen Vorsteuerleitung geleitet. Der Druck wirkt auf die Steuerfläche am Ventilschieber und drückt diesen entsprechend dem Fahrerwunsch aus der Neutralstellung.

2.4. Elektrische Systeme von Baggern

Die elektrische Versorgungsspannung erfolgt über einen Akkumulator, welcher während des Betriebs von dem am Dieselmotor betriebenen Generator geladen wird. Minibagger verfügen in der Regel über 12 Volt Bordspannung, größere Bagger dagegen über 24 Volt Bordspannung. Bei großen Maschinen können höhere Spannungen zum Einsatz kommen, um die nötige elektrische Leistung zum Start der großen Dieselmotoren bereitzustellen. Die Bordspannung von 24 Volt wird üblicherweise durch die Reihenschal-

tion zweier 12 Volt Bleiakumulatoren realisiert. Durch den Spannungsabgriff nur eines Akkus ist auf einfache Weise zusätzlich ein 12 Volt Bordnetz realisiert. Besondere Anforderungen an das elektrische System stellt der Bagger im Vergleich zu anderen mobilen Arbeitsmaschinen und Nutzfahrzeugen nicht. Die elektrische Leistungsaufnahme von Anbaugeräten ist, sofern überhaupt notwendig, vergleichsweise gering und dient nur zur Versorgung ihrer Steuerung. Auch hier werden keine besonderen Anforderungen gestellt.

2.5. Elektronische Systeme von Baggern

Elektronische Bauteile sind schon seit einigen Jahren aus Baggern nicht mehr wegzudenken. Die Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit, das Umweltverhalten und der Komfort werden mit elektronischen Systemen maßgeblich verbessert. Es kommen eine Vielzahl elektronischer Steuergeräte für einzelne Teilsysteme zum Einsatz, wie z.B. für den Dieselmotor, hydraulische Pumpen und Motoren, Komfortfunktionen etc.. In der Regel ist die Baggerhydraulik vorgesteuert, d.h. dass zwischen Bedienhebel und Ventilbetätigung am Hydraulikblock die Signalübertragung über einen Zwischenkreis erfolgt. Dies geschah früher und zum Teil auch heute noch durch eine hydraulische Vorsteuerung (siehe Abschnitt 2.3). Heute wird häufig und zunehmend die elektrische Vorsteuerung eingesetzt. Hierbei werden die Signale der Bedienhebel und Taster elektrisch ermittelt und durch ein oder mehrere Steuergeräte in ein elektrisches Ausgangssignal zur Bestromung der Ventilmagnete umgewandelt. Der Ventilmagnet betätigt den Ventilschieber der Vorgabe entsprechend. Im Gegensatz zur hydraulischen Vorsteuerung kann mit der elektronischen Ansteuerung beispielsweise das Ansprechverhalten, die Verstärkung und die maximale Geschwindigkeit der Verbraucher durch den Fahrer unkompliziert angepasst werden. So kann zwischen einer feinfühligem Ansteuerung für genaues Positionieren

und einer raschen Ansteuerung für den Materialumschlag oft stufenlos das gewünschte Steuerprofil ausgewählt werden.

Für die Ansteuerung von Anbaugeräten werden Drücke und Volumenströme über die Elektronik des Baggers parametrisiert, um einerseits das Gerät mit der für einen reibungslosen Arbeitsbetrieb notwendigen hydraulischen Leistung zu versorgen und es andererseits vor Überlast zu sichern.

Zur Steuerung und Überwachung des Baggers und des Anbaugeräts haben die Baggerhersteller in den letzten Jahren elektronische Systeme entwickelt, die über zusätzliche Funktionen verfügen. So hat Liebherr das LiDAT (Plus) entwickelt, ein Datenübertragungs- und Ortungssystem für den Einsatz auf verschiedenen Maschinentypen zur Erfassung von Maschinendaten, der Maschinenanalyse, des Fuhrpark- und Flottenmanagements und zum Service (Liebherr (2010)). Darüber hinaus können die Bagger mit einer Anbaugerätesteuerung ausgestattet werden, die bis zu zehn Anbaugeräte erkennt und die für jedes Gerät individuell eingespeicherten Parameter für die Hydraulik automatisch einstellt.

Oilquick bietet das Werkzeugidentsystem „ToolControl“ in Verbindung mit einem Schnellwechsler an. Das System erkennt bis zu 99 verschiedene Werkzeuge, stellt Druck und Volumenstrom ein und erfasst die Werkzeuglaufzeiten (Rixner (2009)).

Das System MultiPro von Caterpillar verfügt über ein berührungsempfindliches Display und kann neben der automatischen Einstellung der Parameter für bis zu zehn Anbaugeräte (DBB (2012)) auch die Videodarstellung einer Rückfahrkamera übernehmen.

Neben den Angeboten der Baggerhersteller gibt es auch zahlreiche Lösungen von Fremdanbietern. So bietet Topcon ein Messsystem zur Installation auf dem Bagger an, mit dessen Hilfe der Baggerführer die Soll- und die Istposition für Höhe und Neigung des Löffels sehen und vergleichen kann. So können Flächen- und Grabvorgaben während des Arbeitsprozesses leichter eingehalten werden. Zusätzlich ist eine Laservermessung und eine GPS-Überwachung möglich (TOPCON (2010)).

Ein neues Konzept der Maschinenbedienung kommt mit nur noch einem Bedienhebel aus, der über deutlich mehr Freiheitsgrade verfügt als bisherige Hebel. Neben rechts, links, vor, zurück sind zusätzlich aufwärts, abwärts, Drehung links und Drehung rechts sowie das Kippen nach links und rechts als Bewegung des Bedienhebels vorgesehen. Dies ermöglicht eine intuitivere Maschinensteuerung, da die Bewegung der Hand die Bewegung des Löffels widerspiegelt und weniger abstrakt als die bisherige Zweibedienhebellösung ist. Die Bedienung eines Tiltrotators ist in den Freiheitsgraden bereits berücksichtigt. Eine solche Lösung erfordert jedoch ein nennenswertes Eingreifen in das Steuerungssystem des Baggers (Kreso (2012)).

2.6. Anbaugerätesteuerung

Heute werden die meisten Anbaugeräte auf Grund ihrer überschaubaren Funktionsanzahl und deren Anforderung an die Ansteuergenauigkeit über die Bedienelemente des Baggers direkt betätigt. Dies bietet den Vorteil, dass die Bedienelemente für den Maschinenführer leicht zugänglich und feinfühlig zu bedienen sind. Diese Ansteuerung reicht für die gängigen Anbaugeräte wie Schaufeln, Greifer, Fräsen etc. aus.

Bei komplexeren Anbaugeräten mit vielen verschiedenen Funktionen oder hohen Anforderungen an die Regelung der Antriebe oder exakter Positionierung kommen elektronische Steuerungseinheiten zum Einsatz. Diese befinden sich im Lieferumfang des Anbaugeräts und werden entweder als handgeführtes Bedienteil oder als Konsole zur nachträglichen Installation in der Fahrerkabine des Baggers konzipiert. Beiden Varianten gemein ist der auf das Anbaugerät begrenzte Einsatz. Eine Verwendung für andere Anbaugeräte ist nicht möglich.

Für einfache Anwendungen mit vielen hydraulischen Verbrauchern kommen auch einfache elektrische Steuerungen zum Einsatz, bei denen die Funktionen lediglich ein- oder ausgeschaltet werden.

2.7. Anbaugerätesteuerung in der Landwirtschaft

In der Landwirtschaft ist eine zentrale Schnittstelle zur Steuerung komplexerer Anbaugeräte heute quasi Standard. Hier hat sich der ISOBUS nach ISO-Norm 11783 mittlerweile durchgesetzt. „Wesentliches Ziel war dem Anwender die Möglichkeit zur Verfügung zu stellen, mit nur noch einem Bedien-Terminal in der Traktorkabine eine herstellerübergreifende Steuerung und Bedienung von Anbaugeräten zu ermöglichen“ (Hieronymus u. a. (2008)). Die Einführung eines einheitlichen Standards war jedoch anfangs mit Problemen verbunden, da einige Hersteller bereits eigene Lösungen auf dem Markt hatten und Lösungen verschiedener Hersteller nicht zueinander kompatibel waren. Seit sich die Hersteller 2003 auf einen gemeinsamen Standard verständigt haben (vgl. Hieronymus u. a. (2008)), setzt sich der ISOBUS immer weiter durch und ist heute auch abseits der Landwirtschaft, beispielsweise in der Kommunaltechnik, auf dem Vormarsch (vgl. Jungmann & Seiler (2008)). Zwar unterscheiden sich die Anforderungen an den ISOBUS in der Kommunaltechnik von denen in der Landwirtschaft, so dass beide Systeme nicht kompatibel zu einander sind, aber es zeigt sich dennoch, dass solche Systeme zukünftig gefragt und zunehmend erforderlich werden.

3. Konzept der Anbaugerätesteuerung und Schnittstelle

3.1. Anbaugeräte und deren Klassifizierung

Durch den Einsatz von spezialisierten Anbaugeräten wird ein Bagger zu einer universell einsetzbaren Maschine und erlaubt es dem Fahrer, auch komplexe Arbeiten durchzuführen.

Für die Anbindung stehen unterschiedliche Anbauräume zur Verfügung, die jedoch noch wenig standardisiert sind. So unterscheiden sich die Anbindungsgeometrien je nach Baggergröße und Hersteller, so dass Anbaugeräte am Ausleger entweder individuell oder mit einem Adapter angebunden werden müssen. In der Regel werden Anbaugeräte am Ausleger montiert. In einigen Fällen werden diese aber auch am Unterwagen montiert, wie beispielsweise Drehbohrgeräte.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Klassifizierung von Anbaugeräten erstellt, bei der Anbaugeräte nach der Anzahl ihrer hydraulischen Funktionen geordnet werden (**Abbildung 3.1**). Diese Einteilung wurde gewählt, da die Anzahl der vom Bagger ansteuerbaren Anbaugerätefunktionen begrenzt ist und Bagger mit unterschiedlicher Anzahl an Hydraulikkreisläufen für Anbaugeräte ausgestattet sind.

Die einzelnen Gruppen werden im Folgenden näher erläutert und mit Beispielen belegt.

Die erste Gruppe bilden die passiven Anbaugeräte ohne Hydraulikfunktion. Diese sind beispielsweise Löffel, Lasthaken oder Reißzahn. Je nach Einsatzzweck kommen verschiedene Löffel mit unterschiedlich gestalte-

Baggeranbaugeräte

Klassierung nach Anzahl d. hydraulischen Funktionen

passiv	1 hydr. Funktion	1 hydr. Fkt bidirektional	2 hydr. Funktionen	3+ hydr. Funktionen
Löffel	Brecherlöffel	Schere	Tiltrotator	Rohrschweißmaschine *
Lasthaken	Bohrer (einfach)	Greifer	<u>Kombinationen:</u>	Rohrbettfertiger **
Reißzahn	Hydraulikhammer	Rotator	- Greifer mit	Rückbaufräse ***
Rechen	Fräse	Swingotilt	Rotator	Harvesterkopf
...	Anbauverdichter	Umschlaggreifer	- Schaufel mit	Baumverpflanzter (damcon)
	Tiltrotator	...
			- Schere mit	
			Rotator	
			...	

* AiF Forschungsprojekt KF2076604
 ** AiF Forschungsprojekt KF2076605
 *** BMBF Forschungsprojekt 02S8659

Abb. 3.1.: Klassierung Baggeranbaugeräte

ten Schneidkanten, Größen und Formen zum Einsatz (siehe Kunze u. a. (2002)). Lasthaken werden zum Heben und Bewegen von hängenden Lasten eingesetzt. Häufig ist ein Lasthaken auch bereits am Löffel angeschweißt. Reißzähne werden zum Lösen fester Untergründe verwendet, die allein mit dem Löffel nicht oder nicht wirtschaftlich aufgebrochen werden können (vgl. Eymer (2006)).

Darüber hinaus existiert eine Vielzahl an Anbaugeräten, die über zusätzliche aktive hydraulische Funktionen verfügen. Die hydraulischen Funktionen können einfach- und zweifachwirkend (bidirektional) sein. Einfachwirkende Funktionen benötigen nur eine Strömungsrichtung des Hydrauliköls. So kommen beispielsweise viele rotatorische Antriebe in Anbaugeräten mit einer festen Arbeitsrichtung aus. Dies ist bei Fräsen oder Mischerlöffeln der Fall. Anbaugeräte wie Scheren, Greifer oder Rotatoren verfügen ebenfalls nur über eine hydraulische Funktion, bei der jedoch der Ölfluss umkehrbar sein muss. Ein Greifer muss nicht nur greifen, sondern auch wieder loslassen können. Mehrere einfachwirkende Funktionen können über eine gemeinsame Rücklaufleitung verfügen, wodurch die Anzahl der zu verlegenden Schläuche reduziert werden kann. Bei zweifachwirkenden

den Funktionen ist dies nicht möglich.

In Abbildung 3.1 wird bei Anbaugeräten mit einer hydraulischen Funktion zwischen einfach- und zweifachwirkenden Funktionen zur Verdeutlichung unterschieden. Bei Anbaugeräten mit mehr als zwei Funktionen wird darauf zu Gunsten der Übersichtlichkeit verzichtet.

Geräte wie Rotator, Schwenkeinrichtung (Swingotilt) und Tiltrotatoren (zwei zweifachwirkende hydraulische Funktionen) werden hier ebenfalls zu den Anbaugeräten gezählt, obwohl ohne ein weiteres Anbaugerät mit ihnen direkt keine Arbeiten verrichtet werden können. Sie belegen aber Hydraulikkreise, die für andere Funktionen dadurch nicht mehr zur Verfügung stehen. Rotatoren und Schwenkeinrichtungen erweitern die Anzahl der Bewegungsfreiheitsgrade und ermöglichen viele Bewegungen des Anbaugeräts erst. Sie tragen daher zur Produktivitätssteigerung bei.

Eine Sonderstellung nehmen hydraulische Schnellwechsler ein. Sie stellen eine Schnittstelle zum Anbaugerät dar. Schnellwechsler ermöglichen, Anbaugeräte mit reduziertem Arbeits- und Zeitaufwand zu wechseln, wodurch die Produktivität des Baggers gesteigert wird, da Zeitaufwände für manuelle Wechsel entfallen (Seifried (2011)). Schnellwechsler sind auch mit automatisierter Hydraulikkopplung erhältlich, sowie auch als Einheit in Kombination mit Rotatoren und Tiltrotatoren ((Cohrs u. a. 2003), (Cohrs u. a. 2005)). Trotz der Vorteile werden Sie hier nicht zu den Anbaugeräten gezählt, da sie am Arbeitsprozess im Gegensatz zu Rotatoren oder Schwenkeinrichtungen nicht aktiv beteiligt sind.

Die Anbaugeräte der Gruppe mit zwei hydraulischen Funktionen sind meist Kombinationen aus passiven Anbaugeräten oder Anbaugeräten mit einer hydraulischen Funktion und Rotatoren oder Schwenkeinrichtungen. Dies ist beispielsweise bei einem Greifer mit Rotator der Fall. Dieser verfügt über zwei hydraulische doppeltwirkende Funktionen und wird somit in die vierte Gruppe (Abbildung 3.1) eingeordnet. Zur Ansteuerung werden vier Hydraulikleitungen zum Anbaugerät und vier Bedienfunktionen im direkten Arbeitsbereich des Maschinenführers benötigt.

Beim zusätzlichen Einsatz eines hydraulisch verriegelbaren Schnellwechslers werden weitere Leitungen benötigt. Hier ist es auch möglich, dass Rotator und Schnellwechsler über den gleichen Hydraulikkreis betätigt werden, es ist dann jedoch eine Umschaltung der Hydraulikversorgung nötig. Dies geschieht im einfachsten Fall mit zwei Drei-Wege-Ventilen, kann jedoch auch über ein elektrisch oder hydraulisch angesteuertes Ventil erfolgen.

Darüber hinaus gibt es einige Anbaugeräte mit einer Vielzahl an Funktionen, die über den Bagger nicht mehr einzeln bedient werden können. Solche Geräte verwenden den Bagger lediglich als Trägergerät und Druckversorgung und besitzen eigene Ventilblöcke. Ein zusätzliches Steuergerät und Bedienelemente werden in der Kabine montiert. Hierbei kann es sich in einfachen Fällen um eine Konsole mit zusätzlichen Tasten und Hebeln handeln (Ballenstecher, Damcon (2011)). Speziell für den Forsteinsatz umgerüstete Bagger tragen einen Harvesterkopf, zu dessen Steuerung und zur Datenverarbeitung umfangreiche Bedienelemente und Elektronik im Bagger installiert wird.

Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsprojekte weisen darauf hin, dass Bagger zukünftig für hochspezialisierte Anwendungen eingesetzt werden. Im Rahmen eines BMBF-Projekts wird aktuell ein Baggeranbaugerät zur definierten, schichtweisen Abtragung von Stahlbeton entwickelt. Hierbei ist eine präzise Führung des Werkzeugs entscheidend, um die Abtragsstärke exakt einzuhalten. Die entsprechende Regelung und die Bedienung des Geräts erfordern eine leistungsfähige Elektronik (Weidemann u. a. (2011)). Ein weiteres bisher nicht veröffentlichtes Forschungsprojekt befasst sich mit der Entwicklung eines Anbaugeräts zur Herstellung eines Rohrbetts (Förderkennzeichen KF2076605HF1, ZiM/AiF). Hierbei wird ein angepasstes Stahlprofil vibrierend durch das vorbereitete Rohrbett geführt. Die exakte Führung des Anbaugeräts erfolgt mit Hilfe eines Lasers. Auch hier ist eine leistungsfähige Elektronik zur Ansteuerung des Anbaugeräts erforderlich.

Im Rahmen eines weiteren Forschungsprojekts wird ein Baggeranbaugerät entwickelt, um Kunststoffrohre aus HDPE mittels Reibschweißen neben bzw. im Graben zu verbinden. Drehzahl, Anpressdrücke und Verfahrswege müssen innerhalb enger Toleranzen geregelt werden, um die Qualität der Schweißnaht zu gewährleisten (siehe Kapitel 4). Die dazu nötige Ablaufsteuerung mit komplexen Regelstrukturen und die Datenspeicherung zur Dokumentation des Arbeitsprozesses ist mit den üblichen Ansteuermöglichkeiten auf heutigen Baggern nicht darstellbar. Daher muss auch für dieses Anbaugerät eine eigene Steuerhardware im Fahrerstand installiert werden.

In der Forstwirtschaft bieten einige Firmen an, Bagger von Kunden soweit um- und auszurüsten, dass sie als Trägermaschine für Harvesterköpfe geeignet sind. Hierbei sind neben der mechanischen und hydraulischen Anbindung des Harvesterkopfes an den Bagger Eingriffe in die Baggerhydraulik sowie die Installation des benötigten Steuerrechners notwendig. Unter anderem bietet die Firma Kesla aus Finnland eine solche Umrüstung an (Kesla Oyj Finnland (2014)). Diese Umrüstungen könnten bezüglich der Steuerungshardware durch eine universelle Anbaugerätesteuerung auf dem Bagger vereinfacht werden.

An der Universität Kaiserslautern werden im Fachbereich Informatik Forschungsarbeiten für die Erstellung des autonomen Mobilbaggers THOR durchgeführt, um zukünftig Arbeiten auf Baustellen automatisiert durchführen zu können (Juhasz u. a. (2012)). Auch in diesem Fall ist das in dieser Arbeit vorgestellte Steuerungssystem vorteilhaft, denn es ist denkbar, dessen Eingabe- und Anzeigeräte mit der autonomen Baggersteuerung zu verbinden und so Synergien zu nutzen.

Es lässt sich festhalten, dass Bagger durch die Ausrüstung mit spezialisierten Anbaugeräten heute eine Vielzahl unterschiedlicher Aufgaben erledigen. Dies steigert die Auslastung der Maschine und somit deren Wirtschaftlichkeit. Zusätzlich können dadurch auch Kosten eingespart werden, wenn der Bagger Aufgaben erfüllt, für die sonst eigene Anlagen aufgestellt

oder weitere Maschinen eingesetzt werden müssen (vgl. Cohrs u. a. (2008), Baupraxiszeitung (2013), Kotte (2000)).

3.2. Schwierigkeiten beim Einsatz von Anbaugeräten

Der Bagger eignet sich durch seine zahlreichen Freiheitsgrade, Anschlussmöglichkeiten, Tragfähigkeit und Standsicherheit für viele Aufgaben auf der Baustelle. Bereits heute werden Bagger teilweise mit einer Vielzahl an Anbaugeräten ausgestattet. So werden teilweise Spezialmaschinen eingespart und die Wirtschaftlichkeit des Baggers durch Reduzierung der Leerzeiten gesteigert (vgl. Rixner (2009)). Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Einsatz ist der schnelle Wechsel der Anbaugeräte. Für die mechanische und hydraulische Anbindung existieren gute Lösungen am Markt, mit denen der Anbaugerätewechsel binnen weniger Sekunden möglich ist. Benötigt das Anbaugerät dagegen noch eine elektrische Spannungsversorgung oder eine Datenleitung, muss der Fahrer diese Verbindung zur Zeit fast immer manuell herstellen. Schnellwechsler mit elektrischen Kuppungen sind erst seit kurzem auf dem Markt und noch wenig verbreitet. Weiterhin existiert kein einheitliches elektronisches Steuerungssystem für Anbaugeräte, die nicht ohne Zusatzelektronik auskommen. Benötigt ein Anbaugerät zusätzliche Elektronik, so muss diese vom Anbaugerätehersteller mitgeliefert und beim Anwender auf dem Bagger installiert werden. Damit ist ein Wechsel des Trägergeräts nicht ohne Weiteres möglich, wodurch im Pannenfall nicht einfach ein anderer Bagger für die Aufgabe eingesetzt werden kann. Auch für den wirtschaftlichen Einsatz von speziellen Anbaugeräten bei Fuhrparkbetreibern ist dies von Nachteil, da solche Anbaugeräte zumeist an eine Trägermaschine gebunden sind, um nicht mehrere Maschinen auf den Einsatz eines Anbaugeräts speziell auszurüsten. Beim Einsatz mehrerer Anbaugeräte mit eigener Steuerung können die zusätzlichen Bedien- und Anzeigeelemente die Sicht des Fahrers einschrän-

ken. Um Synergieeffekte beim Einsatz mehrerer Anbaugeräte mit zusätzlicher elektronischer Steuerung auch herstellerübergreifend zu nutzen, bedarf es einer frühzeitigen Definition der wichtigsten Parameter, Schnittstellen und Strukturen. Hierzu soll die vorliegende Arbeit einen wichtigen Beitrag leisten.

Die zu Grunde liegende Idee ist es, ein einheitliches Steuerungssystem zu entwerfen, das zukünftig auf dem Bagger zur Steuerung intelligenter Anbaugeräte und als Funktionsschnittstelle zwischen Anbaugerät und Bagger dienen soll. Hiermit sollen Anbaugerät und Bagger miteinander kommunizieren und ideal aufeinander abgestimmt werden können, um die Funktionalität, Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Energieeffizienz zu erhöhen. Durch eine Standardisierung ist es möglich, herstellerübergreifend mit dem gleichen System zu arbeiten. Dies spart Installationsaufwand und erleichtert die Austauschbarkeit des Trägergeräts. Durch die Option der Kommunikation zwischen Anbaugerät und Bagger besteht die Möglichkeit, dass das Anbaugerät auf den Bagger direkt Einfluss nehmen kann. Dies ist im einfachsten Fall eine automatische Anpassung von Volumenstrom und Druck und könnte bishin zur Kontrolle über die Bewegungsfunktionen gehen.

In der Landwirtschaft wurde vor kurzem eine Schnittstelle geschaffen, bei der das Anbaugerät auf elektronischem Weg über den ISOBUS dem Traktor mitteilt, welche Anforderungen es an die Hydraulikversorgung durch den Traktor stellt. Hierbei handelt es sich um das System „Tractor-Implement-Automation“ von John Deere (von Hoyningen-Huene & Baldinger (2010)). In dem Rahmen erfolgte auch eine umfangreiche Sicherheitsbetrachtung, die für die Umsetzung der Anbaugerätesteuerung in die Praxis Beachtung finden sollte.

Im Folgenden werden die Anforderungen und Möglichkeiten detailliert ausgearbeitet.

3.3. Allgemeine Anforderungen an die Steuerung und die Schnittstelle

Die Anforderungen an die zukünftige, universelle Schnittstelle und Anbaugerätesteuerung sind vielfältig. Zum Einen müssen aktuelle Anforderungen erfüllt werden, zum Anderen müssen aber auch zukünftige Anforderungen abgeschätzt werden, weswegen eine gewisse Leistungs- und Funktionsreserve vorzuhalten ist. Erweiterungen im Funktionsumfang müssen realisierbar sein, ohne jedoch durch die Aktualisierung der Schnittstelle die Kompatibilität zu vorherigen Versionen zu verlieren. Des Weiteren ist eine herstellerübergreifende Lösung anzustreben, um den Entwicklungsaufwand möglichst gering zu halten und die Austauschbarkeit der Anbaugeräte bei Verwendung verschiedener Bagger zu ermöglichen.

Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung ist die Sicherheit für den Bagger, das Anbaugerät und den Menschen. Hierzu sind verschiedene Ansätze möglich und zu kombinieren. Das Anbaugerät muss in der Lage sein, sich vor zu hohen Drücken und Volumenströmen zu schützen. In der Regel ist dies mit hydraulischen Sicherheitseinrichtungen möglich und entspricht dem Stand der Technik. Idealerweise wird das Anbaugerät aber gar nicht mit zu hohen Drücken beaufschlagt. Über die Steuerung besteht die Möglichkeit, dem Bagger die beiden Parameter der Hydraulikversorgung mitzuteilen. Die Anforderung wird also dem Arbeitsprozess angepasst.

Der Bagger verfügt über eine entsprechende Lastbegrenzung, so dass dieser vor Schäden durch falsche Anforderungen an die Hydraulik durch das Anbaugerät geschützt ist. Zusätzlich ist es denkbar, dass die Baggersteuerung der Anbaugerätesteuerung vorab die Leistungsgrenze des Baggers mitteilt, um eine eventuell mögliche Unterversorgung zu vermeiden.

3.4. Struktur der Anbaugerätesteuerung und Schnittstelle

Zentrales Element ist die elektronische Steuerung mit Anzeige- und Eingabedisplay, auf dem die zum Anbaugerät zugehörige Software installiert wird. An die Steuerung können je nach Funktionsumfang und -bedarf des Anbaugeräts weitere Geräte angeschlossen werden (siehe **Abbildung 3.2**). Eine BUS-/Datenleitung zum Anbaugerät vervollständigt das minimale Steuerungssystem für elektronisch gesteuerte Anbaugeräte, d.h. es sind alle für den Basisbetrieb notwendigen Anbindungen vorhanden. Eine Anbindung an die Baggersteuerung ist für den Betrieb des Anbaugeräts nicht zwingend notwendig. Über die Anzeige mit berührungsempfindlichem Display sind bereits softwareseitig alle Funktionen zum Betrieb des Anbaugeräts verfügbar. Über dieses Display sind primär Parametrisierungen und Einstellungen vorzunehmen. Sicherheitskritische Vorgänge dagegen sind über einen entsprechenden Taster auszuführen, um die Gefahr von Fehlbedienungen z.B. durch das Verfehlen einer Schaltfläche bei einer unerwarteten Bewegung der Maschine zu vermeiden. Das System kann zwischen Anbaugerätesteuerung und Anbaugerät durch schaltbare Hydraulik- und Elektrikverbindungen erweitert werden.

Auf der Bedienerseite werden bei Bedarf weitere Eingabegeräte wie Bedienhebel und Tastatur angeschlossen. Werden die Geräte mittels USB angeschlossen, können aufgrund technischer Restriktionen maximal 127 Geräte gleichzeitig angeschlossen werden. Bei FireWire (IEEE 1394) liegt die technische Grenze immerhin noch bei 63 Geräten gleichzeitig. Bei beiden Varianten ist die technische Grenze weit oberhalb dessen, was im Einsatz zu erwarten ist und stellen so für die Anwendung auf dem Bagger keine Beschränkung dar. Durch die Verwendung eines Funk-Dongles sind auch kabellose Lösungen möglich, die mehr Flexibilität bieten und störende Kabel vermeiden. An einer zugänglichen Stelle ist eine Schnittstelle für Datenspeicher vorzusehen, um Software zu installieren und Protokoll Daten von der Steuerung auf externe Systeme zu überspielen. Bis zu diesem Punkt

3. Konzept der Anbaugerätesteuerung und Schnittstelle

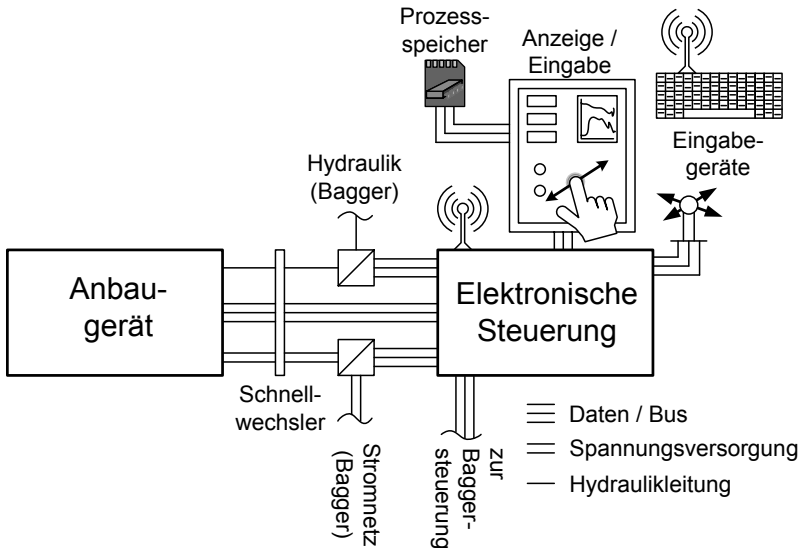


Abb. 3.2.: Konzeptdarstellung der Anbaugerätesteuerung mit Peripheriegeräten und Schnittstelle

ist die Anbaugerätesteuerung auf jedem Bagger nachrüstbar. Der Eingriff in das System Bagger ist minimal und beschränkt sich auf eine elektrische Anbindung, die Verlegung einiger Leitungen bis zum Anbaugerät und einer Zuschaltfunktion für die Zusatzhydraulik für einen Kreis.

Eine zusätzliche Schnittstelle zur Baggersteuerung ermöglicht es, Anforderungen des Anbaugeräts direkt an den Bagger zu senden, so dass die Baggersteuerung die notwendigen Einstellungen vornimmt. Die Anforderungen sind beispielsweise eine Druck- und / oder Volumestromeinstellung auf einen für den Arbeitsprozess idealen Wert oder eine Sperrung von Funktionen der Arbeitskinematik, falls beispielsweise eine ungewollte oder falsche Bewegung des Anbaugeräts zu Beschädigungen führt oder der Arbeitsprozess nachteilig beeinflusst werden kann. Dies setzt voraus, dass der Bagger diese Funktionalität grundsätzlich bieten kann und der Hersteller eine entsprechende Schnittstelle zur Verfügung stellt.

Zwischen Anbaugerätesteuerung und Anbaugerät erfolgt die Kommunikation über einen BUS, dessen Befehle und Datenstrukturen frei programmierbar sind. Da die Steuerung und Software auf der zentralen Elektronik läuft, die im Bagger installiert ist, benötigt das Anbaugerät lediglich eine Leistungselektronik zur Ansteuerung der Funktionen und zur Übertragung von eventuell anfallenden Sensordaten über den BUS.

Wird die Anbaugerätesteuerung auf Basis eines mobiltauglichen Industrierechners aufgebaut und mit einem entsprechend tauglichen Betriebssystem ausgestattet, besteht für den Anbaugerätehersteller eine große Freiheit bezüglich der Softwareerstellung und Gestaltung. Über eine Software-schnittstelle kann er auf einen Satz standardisierter Steuerungsbefehle des Baggers zugreifen, sofern diese Möglichkeit baggerseitig besteht.

3.4.1. Konzept zur Anbindung an den Bagger

Werden die Anbaugeräte an einem Bagger regelmäßig gewechselt, so kommen Schnellwechseladapter zum Einsatz. Diese erlauben das rasche Trennen und Verbinden von Anbaugeräten. Das automatisierte Koppeln der hydraulischen Leitungen ist bei heutigen Schnellwechslern Stand der Technik. Im Gegensatz dazu sind elektrische Anschlüsse für die Spannungsversorgung und Datenübertragung zum Anbaugerät heute auf dem Bagger kein Standard und sind nur sehr vereinzelt anzutreffen. Hier ist eine robuste, schmutz- und wasserdichte Steckverbindung notwendig. Entsprechende Steckverbinder sind auf dem Markt erhältlich, jedoch fehlt ihnen die Möglichkeit der automatischen Kopplung beim Einsatz des Schnellwechslers. Diese könnte von den Herstellern von Schnellwechslersystem auch in den Schnellwechsler integriert werden, so dass die elektrische Anbindung auch hier automatisch funktioniert.

Die Rechereinheit und das Anzeige- und Eingabeelement benötigen Bau-raum auf dem Bagger. Während der Rechner frei platziert werden kann, sollte das Anzeigeelement im Sichtbereich des Fahrers liegen. Erfolgt die

Installation des Systems nicht werkseitig beim Baggerhersteller, sondern soll nachträglich erfolgen, z.B. auf älteren oder Bestandsmaschinen, sind für die Montage am Markt entsprechende universelle Halterungen erhältlich (z.B. die der Fa. RAM Mounting Systems, Inc.), die bei Verwendung eines entsprechenden Adapters die sichere Installation des Displays im Fahrerstand ermöglichen.

3.4.2. Konzept zur Datenübertragung, Kommunikation und Hardware

Die Kommunikation der Steuerung erfolgt einerseits mit dem Anbaugerät und andererseits mit dem Bagger, sofern diese Funktionen baggerseitig verfügbar sind. Die Kommunikation mit dem Anbaugerät erfolgt über einen Daten-BUS. Hier werden je nach Menge der zu übertragenden Daten hohe Anforderungen an die Übertragungsrate gestellt. Werden neben den Steuerungssignalen auch Sensordaten über den BUS übertragen, muss gewährleistet sein, dass die BUS-Auslastung nicht zu groß wird, so dass sicherheitskritische Befehle zuverlässig und ohne unzulässig hohe Verzögerungen übertragen werden können. Es bietet sich daher an, zwei BUS-Kanäle zur Kommunikation mit dem Anbaugerät vorzusehen. Somit kann ein Kanal für die Übertragung hochpriorisierter Nachrichten genutzt werden, während der zweite Kanal für die Übertragung von niedriger priorisierten Daten genutzt werden kann. Mit dieser Aufteilung ist gewährleistet, dass der BUS für prozesskritische Parameter möglichst freigehalten und nicht mit niedrig priorisierten BUS-Meldungen belastet wird. Die Aufteilung der Daten auf die beiden Kanäle ist freigestellt, die Verwendung optional.

Die Kommunikation mit dem Bagger setzt voraus, dass der Bagger einerseits überhaupt die Funktionalität besitzt, Steuerungsbefehle über einen BUS oder eine elektronische Schnittstelle entgegenzunehmen und ande-

Versorgungsbefehle	Bewegungsbefehle
Hydraulik ein/aus	Fahrtrieb sperren/freigeben
Druck Minimum	Schwenken sperren/freigeben
Druck Maximum	Ausleger sperren/freigeben
Druck soll	Löffel sperren/freigeben
Vol.-Strom Minimum	Gehe zu Koordinate
Vol.-Strom Maximum	Gehe zu Winkel Anbaugerät
Vol.-Strom Soll	Folge Bahnkurve
El. Versorgung ein/aus	

Tab. 3.1.: Befehlsübersicht von der Anbaugerätesteuerung an die Baggersteuerung

rerseits die Freischaltung der Funktion durch den Maschinenhersteller. Ist beides der Fall, werden standardisierte Steuerbefehle zur Ansteuerung dieser Funktionen verwendet, um den Bagger auf die Einsatzbedingungen abzustimmen und entsprechende Einstellungen automatisiert vorzunehmen. Diese sind beispielsweise das Zu- und Abschalten der Hydraulik, das Einstellen von Druck und Volumenstrom oder das Sperren der Bewegungsfunktion, zum Schutz des Anbaugeräts vor Beschädigungen durch falsche Bewegungen des Baggers. An dieser Stelle sind für spätere Funktionserweiterungen noch zusätzliche Befehle vorzuhalten, wie beispielsweise die Bewegungssteuerung des Baggers zur automatisierten Bewegungsführung. Eine Aufstellung der vorgesehenen Befehle ist in **Tabelle 3.1** gegeben, wobei die Befehle zur Bewegungssteuerung des Baggers voraussichtlich in ihrer Umsetzung noch eine Weile auf sich warten lassen werden, da hier noch rechtliche und sicherheitstechnische Bedenken bestehen.

Wird ein mobiltauglicher Industrierechner als Steuerungscomputer verwendet (vgl. Kapitel 3.4), stehen standardisierte Schnittstellen wie USB, IEEE 1394 (FireWire), RS232 (serielle Schnittstelle), WLAN, Bluetooth, RJ45 und andere Standards zur Verfügung, die für den Anschluss von Peripherie und die Funktionserweiterung genutzt werden können. Dies kann auch genutzt werden, um mittels Speicherkarten und / oder USB-Speichermedien

Software zu installieren, zu aktualisieren oder Prozessdaten zur Protokollierung von der Steuerung auf externe Systeme zu übertragen. Durch die Orientierung am PC-Standard stehen Anschlussmöglichkeiten für GPS-Geräte und Mobilfunksysteme (GPRS¹, UMTS², LTE³) zur Verfügung. Über WLAN oder Bluetooth können umfangreiche Baustellennetzwerke erstellt werden. Ebenfalls besteht die Möglichkeit Tastaturen, Bedienelemente oder sonstige Eingabehardware anzuschließen.

Die Erfahrung zeigt, dass in der Vergangenheit die Aufrüstbarkeit auf leistungsfähigere Systeme durch den auf dem PC-Standard basierenden Systemaufbau quasi gewährleistet war, da zumeist eine Abwärtskompatibilität vorherrschte.

An die Datenübertragung und Kommunikation zwischen Anbaugerät und Steuercomputer werden darüber hinaus folgende Anforderungen gestellt:

- Eindeutigkeit der Steuerbefehle
- Fehlersicherheit und Fehlertoleranz
- Standardisierung der Befehle
- Freizügigkeit der Programmgestaltung
- Bandbreite der Datenübertragung
- Geschwindigkeit der Datenübertragung
- Sicherheit der Datenübertragung
- Verwendbarkeit und Kompatibilität
- Erweiterbarkeit zur Anpassung an zukünftige Anforderungen
- Akzeptanz bei Bagger- und Anbaugeräteherstellern

Durch die Installation der Steuerung auf dem Bagger bedarf es auf dem Anbaugerät nur einer Elektronik, welche die über das BUS-System empfangenen Befehle an die Aktoren weiterleitet und die Sensordaten über den BUS zur Steuerung sendet. Dadurch wird der Einsatz von empfindlicher

¹General Packet Radio Service

²Universal Mobile Telecommunications System

³Long Term Evolution

Elektronik im Bereich der höchsten Beanspruchung auf ein Minimum reduziert. Bei Verwendung von BUS-fähigen Aktoren und Sensoren kann auf die Leistungselektronik verzichtet werden, da die Sensoren und Aktoren die Befehle direkt aus dem BUS lesen und Daten über den BUS senden können.

Allen Teilsystemen gemein sind gewisse Anforderungen an die Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einflüsse, die der mobile Einsatz fordert. Diese sind u.a.:

- Beständigkeit gegen Schmutz und Feuchtigkeit
- Unempfindlichkeit gegen Stöße und Erschütterungen
- Schlagfestigkeit
- Temperatur- und Wetterbeständigkeit
- EMV-Verträglichkeit

Die Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einflüsse ist auch in anderen Bereichen gefordert, so dass deren Erfüllung mit am Markt verfügbaren Komponenten erreicht werden kann.

3.5. Protokollierung und Dokumentation

Die automatisierte elektronische Aufzeichnung von Daten zur Protokollierung zur späteren Auswertung und zur Einhaltung eventueller Nachweispflichten gewinnt zunehmend an Bedeutung. Aber auch für Service- und Wartungszwecke sind aufgezeichnete Daten hilfreich. Die Aufzeichnung von Mess- und Protokolldaten ist mit dem vorgestellten System automatisiert lösbar. Durch die Anschlussmöglichkeit von Speicherkarten oder USB-Speichermedien sind auch große Datenmengen aufzeichnenbar. Möglich ist auch eine Speicherung auf dem internen Speicher, sofern sichergestellt ist, dass hier ein bestimmtes Volumenkontingent nicht überschritten wird, beziehungsweise alte Daten auch wieder gelöscht werden. Die Datenübertragung könnte in diesem Fall auch drahtlos auf andere Geräte zur

Speicherung in einer Datenbank erfolgen.

Systeme zur Dokumentation und auch zur Steuerung des Arbeitsprozesses sind in der Landwirtschaft seit einiger Zeit in der Entwicklung und werden mittlerweile zunehmend eingesetzt. Man spricht hier von „Precision Farming“ oder auch Smart-Farming (vgl. Hörner & Griepentrog (2012)). Hierbei werden Informationen über die zu bearbeitenden Flächen aus verschiedenen Quellen zusammengetragen und ausgewertet, so dass diese Daten für die präzisere Ausführung des Arbeitsprozesses genutzt werden können. So werden zum Beispiel bei der Getreideernte vom Mähdescher Ertragskartierungen erstellt, mit deren Hilfe Düngemittelbedarfe ermittelt werden, wodurch das gezielte Düngen von Teilflächen ermöglicht wird. Im Baustellenbetrieb könnten solche Daten beispielsweise die Bodenbeschaffenheit, Höhenprofil oder der Lageplan von Leitungen beinhalten. Hierbei ist anzumerken, dass der Verlauf von Leitungen zwar in entsprechendem Kartenwerk ersichtlich ist, eine informationstechnische Berücksichtigung ist dagegen nicht üblich, obwohl diese eine Erhöhung der Sicherheit für Leitungen, Bagger und Mensch bedingen würde.

3.6. Standardisierung

Die Schnittstelle bietet in der vorgestellten Struktur grundsätzlich eine sehr breite Gestaltungsmöglichkeit für die Realisierung der Steuerungs- und Regelungsfunktionen und des Bedienkonzepts. Dies ist vorteilhaft, da so individuell auf die Anforderungen des jeweiligen Anbaugeräts eingegangen werden kann und auch die Bedienstruktur entsprechend gestaltet werden kann. Trotz der Freiheiten sind Rahmenbedingungen einzuhalten, um die Kompatibilität sicherzustellen und eine negative Beeinflussung verschiedener Funktionen zu verhindern. Auch muss durch einzuhaltende Regeln gewährleistet sein, dass es zu keinen kritischen und unsicheren Zuständen kommen kann.

Hierzu sind zunächst die Grundlagen zu definieren. Es bietet sich an, auf

bestehenden Regelwerken ähnlicher Themen Bezug zu nehmen und auf Ihnen aufzubauen. Ausgehend vom OSI-Layer-Modell, das als Referenzsystem für die Datenübertragung von Kommunikationsmodellen dient, haben sich verschiedene BUS-Systeme entwickelt, wie beispielsweise das CAN-BUS- oder das ISOBUS-System. Eine breite Anwendung findet das CAN-BUS-System, geregelt u.a. in der ISO Norm 11519, das ursprünglich für den Einsatz im Automobil entwickelt wurde, mittlerweile auch in mobilen Arbeitsmaschinen und stationären Anlagen. Ebenfalls auf dem OSI-Layer-Modell basiert der ISOBUS, der u.a. in der ISO-Norm 11783 definiert ist und in der Land- und Kommunaltechnik Anwendung findet. Beiden BUS-Systemen gemein ist, dass sie bereits weit verbreitet eingesetzt werden und somit auch eine Vielzahl an Komponenten entwickelt wurden, die mit diesen Standards arbeiten können. Weiterhin liegen bereits umfangreiche Erfahrungen in der Anwendung und Programmierung vor. Daher ist es naheliegend, auf einem der beiden BUS-Systeme als Grundarchitektur aufzubauen.

Bei der Architektur der Baggersteuerung findet ebenfalls das Normenwerk DIN EN 61508 Anwendung. Hierin sind Verfahren beschrieben, um systematische Fehler bei der Entwicklung von E/E/PE-Systemen⁴ zu vermeiden und Fehlerzustände im Betrieb zu erkennen und zu umgehen, bzw. die Folgen abzuwenden. Man spricht hierbei von funktionaler Sicherheit.

Das System wird um so vielfältiger und flexibler einsetzbar, je genauer die Schnittstellen und Funktionen definiert sind. Nur so ist gewährleistet, dass alle Gerätehersteller den gleichen Standard verwenden und das System problemlos funktioniert. Gleichzeitig muss das System upgrade- und updatefähig sein, um späteren Leistungs- und Funktionsanforderungen gerecht zu werden.

Eine Abwärtskompatibilität muss ebenfalls gewährleistet sein. Die Kompatibilität ist jedoch nicht selbstverständlich und erfordert trotz Normung einen unter Umständen nennenswerten Aufwand (vgl. Hieronymus u. a.

⁴E/E/PE: elektrische, elektronische und programmierbar elektronische Systemen

(2008) und Holtmann & Hühne (2012)).

Neben der Standardisierung des Kommunikationsprotokolls und der Begrifflichkeiten sind weitere Standards zu definieren. So ist die Datenrate der BUS-Verbindung festzulegen. Da dies primär die Kommunikation zwischen Steuerung und Anbaugerät betrifft, sind hier anpassbare Übertragungsgeschwindigkeiten denkbar. Bei Verwendung von zwei Kanälen (vgl. Abschnitt 3.4.2) können auch unterschiedliche Datenraten realisiert werden.

Für die Systemstabilität und akzeptable Reaktionszeit des Systems ist es erforderlich, die Auslastung des Rechners, des Speichers und des BUS zu begrenzen, da bei zu hoher Auslastung Verzögerungen in der Abarbeitung entstehen können. Zusätzlich ist eine Priorisierung sinnvoll, um zeitkritische Prozesse bevorzugt abzuarbeiten.

Für die Kommunikation zwischen Anbaugerätesteuerung und Bagger sind die Befehle strikt vorzugeben. Da diese direkten Einfluss auf die Funktionen des Baggers ausüben und bei Fehlbedienung sicherheitskritische Zustände nicht auszuschließen sind, ist hier ein vorgegebener Standard unverzichtbar (vgl. Tabelle 3.1, Abschnitt 3.4.2). Umgekehrt muss die Kommunikation ebenfalls standardisiert sein, damit die Steuerung darüber informiert wird, ob der Bagger die Befehle ausgeführt hat und im Falle von Positionsvorgaben weiß, welche Position der Bagger einnimmt. Das Vorgehen über einen einheitlichen Standard hat den Vorteil, dass der Anbaugerätehersteller nur eine Softwarevariante erstellen muss und die Kompatibilität mit dem Bagger herstellerübergreifend auf dem Steuerungscomputer bereits implementiert ist.

Die grafische Darstellung wird bei der Erstellung der Steuerungssoftware des Anbaugeräts vom Programmierer festgelegt. Sie soll logisch und auf das Anbaugerät und den Arbeitsprozess abgestimmt gestaltet sein, so dass die Bedienung möglichst intuitiv erscheint. Dazu gehört, dass sinnhafte Symbole und eindeutige Terminologien verwendet werden, um Fehlbedienungen zu vermeiden. Gestaltungsrichtlinien sind einschlägigen Regel-

werken zu entnehmen und bedürfen an dieser Stelle keiner weiteren Anpassung.

Bei der Gestaltung der Schnittstelle und zur Erstellung der Software sollten nur die Eigenschaften verbindlich standardisiert werden, die zur Sicherstellung eines fehlerfreien Betriebs notwendig sind. Die darauf aufbauende Gestaltung der Software und des Systemaufbaus der Anbaugeräte sollte dagegen frei möglich sein, um den verschiedenen Anforderungen der Hersteller und ihrer Geräte möglichst gerecht zu werden.

4. Beispielanwendungen

4.1. Ausgewählte Beispielanwendungen

Die Grundlage für das Konzept der neuen Schnittstelle ist die Notwendigkeit, komplexe Anbaugeräte, die nicht mehr über die üblichen Steuermöglichkeiten des Baggers bedient werden können, über eine standardisierte, auf dem Bagger installierte elektronische Steuerung zu betreiben. Die meisten Anbaugeräte, die heute auf dem Markt sind, benötigen nur selten mehr als 2 Kreisläufe. Für die Bedienung von Schwenk- und Tilteinrichtungen ist die Betätigung über die Bedienhebel obligatorisch, da diese Bewegungen im Einsatz sehr häufig benutzt werden. Dem gegenüber stehen aktuelle Entwicklungen von Baggeranbaugeräten, die eine exakte Regelung einzelner Funktionen erfordern, die der Bagger nicht darstellen kann. Eine computergestützte Regelung ist für den Einsatz unabdingbar. Die zunehmende Tendenz, den Bagger als universelles Trägergerät und mobile Hydraulikversorgung auf der Baustelle einzusetzen (vgl. Abschnitt 3.1), bestätigt die zukünftige Notwendigkeit einer solchen Schnittstelle.

Im Folgenden werden einige Entwicklungen von Anbaugeräten vorgestellt, die als Beispielanwendungen dienen sollen:

- Rohrschweißgerät
- Rohrbettfertiger
- Kraftwerkfräse
- Ballenstecher
- Holzvollernteraggregate.

Rohrschweißgerät

Im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojekts wird ein Baggeranbaugerät entwickelt, mit dem zwei Kunststoffrohre aus HDPE auf der Baustelle mittels Reibschweißverfahren verbunden werden sollen. Hierzu sind zahlreiche Hydraulikfunktionen erforderlich, die teilweise für die exakte Prozessführung in eng tolerierten Grenzen geregelt werden müssen. Dieses Anbaugerät stellt die Hauptbeispielanwendung dar und wird in Abschnitt 4.2.1 detailliert behandelt.

Rohrbettfertiger

Im Rahmen eines weiteren aktuellen Forschungsprojekts (Baldinger (2011)) wird ein Anbaugerät für die automatisierte Herstellung des Rohrbetts für den Leitungsbau entwickelt. Konventionell wird derzeit die Bodenschicht für die Aufnahme der Rohrleitung im Graben aufgeschüttet, verdichtet und nivelliert (vgl. **Abbildung 4.1**). Nach Einlage der Rohrleitung wird der seitlich unter dem Rohr befindliche Hohlraum zugeschüttet und von der Seite verdichtet. Das Verdichten ist fehleranfällig, jedoch wichtig, da bei fehlender seitlicher Abstützung die Belastbarkeit der Rohre durch äußere Kräfte verringert wird. Der Forschungsansatz besteht hier in der Entwicklung eines Anbaugeräts, das aus einer dem Rohrdurchmesser angepassten profilierten Rüttelplatte mit mehreren hydraulischen Freiheitsgraden zur Feinausrichtung besteht. Die Rüttelplatte wird entlang einer vorgegebenen virtuellen Linie durch den Graben bewegt und so das Rohrbett halbrund verdichtet, so dass eine nachträgliche Verdichtung des Hohlraums, auch Zwickel genannt, nicht mehr notwendig ist. Für die exakte Führung wird das Anbaugerät mit einem Lageerkennungssystem ausgerüstet. Mit den ermittelten Daten berechnet die elektronische Steuerung die notwendige Korrektur und stellt durch feinfühligere Hydraulikaktuatoren Neigung, Verdrehwinkel und Höhe des Anbaugeräts ein. Der Aufwand

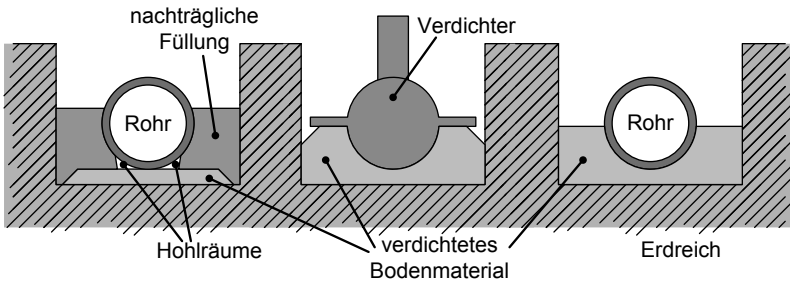


Abb. 4.1.: Prinzip Rohrbettfertiger: mögliche Hohlräume bei konventioneller Verfüllung (links), Verdichtungsprozess (Mitte), neues Rohrbett (rechts)

für die elektronische Steuerung ist nicht unwesentlich. Ein Display für die Visualisierung der für den Arbeitsprozess maßgeblichen Einstellungen erleichtert die Parametrierung.

Gerät zur Abtragung von Stahlbeton (Kraftwerkfräse)

Ebenfalls in der Entwicklung ist ein Anbaugerät zur definierten Abtragung der Oberfläche von Stahlbeton für den Rückbau der Reaktorgebäude von Kernkraftwerken, da in der Regel nur die oberste Schicht kontaminiert ist. Aufgrund der hohen Kosten und der ungeklärten Frage nach der Endlagerung ist es notwendig, die Menge an radioaktivem Abfall gering zu halten, was eine genaue Prozessführung erfordert.

Im Wesentlichen besteht das Anbaugerät aus einem Rahmen, der mittels eines Baggers oder eines ähnlichen Manipulators an die abzutragende Wand gepresst wird und einer darin befindlichen Fräsapparatur (**Abbildung 4.2**).



Abb. 4.2.: Anbaugerät zur definierten Abtragung von Stahlbeton

Die Fräse wird entlang vorgegebener Bahnen mit definierter Abtragungstiefe innerhalb des Rahmens geführt und trägt eine vorgegebene Fläche ab. Neben der Prozessführung ist die Wahl eines geeigneten Werkzeugs, das sowohl Stahl als auch Beton abträgt, Schwerpunkt des Projekts (Weidemann u. a. (2011), Reinhardt u. a. (2011)).

Ballenstecher

Sollen kleinere und mittelgroße Bäume verpflanzt werden, kommen Ballenstecher zum Einsatz, die einen Baum samt Wurzelballen aus dem Boden stechen können. Hierzu wird ein Trägergestell um den Baum herum geschlossen und reihum die Ausstechwerkzeuge in Form stabiler, gekrümm-

ter Bleche ins Erdreich geschoben. Das Trägerfahrzeug, beispielsweise ein Bagger, Radlader oder Traktor, hebt dann den ausgestochenen Baum samt Wurzelballen aus dem Erdreich und transportiert diesen ab (Damcon (2011)). Auch hier sind zahlreiche hydraulische Funktionen nacheinander abzuarbeiten. Im Unterschied zu den zuvor genannten Anbaugeräten könnte dies auch ohne elektronische Steuerung erfolgen. Da allerdings zahlreiche Funktionen auszuführen sind, die oft von der Hydraulik des Trägergeräts einzeln nicht ansteuerbar sind, ist ein zusätzliches Bedienfeld notwendig.

Holzvollernteraggregate

Der Einsatz von Holzvollernteraggregaten an speziell für den Forsteinsatz ausgerüsteten Baggern ist weit verbreitet. Hierzu werden die Bagger an die Erfordernisse im Forst entsprechend umgebaut und erhalten zusätzliche Steuerelemente und Anzeigen in der Fahrerkabine. Aufgrund der komplexen Vorgänge im Arbeitsprozess und der Online-Auswertung der Messdaten zur Holzvermessung, sowie der großen Anzahl an Funktionen kommen diese Anbaugeräte nicht ohne eigene Steuerung und zahlreiche Bedienelemente aus (Schwab & Föllner (2013)). Daher ist der Einsatz eines Vollernteraggregats an einem nicht speziell ausgerüsteten Bagger, wenn überhaupt, nur mit Einschränkungen möglich. Auch hier stellt die Anbaugerätesteuerung eine Alternative zum spezifischen Steuergerät des Vollernteraggregats dar. Die benötigten Bedienelemente können beispielsweise durch Tastenfelder realisiert werden.

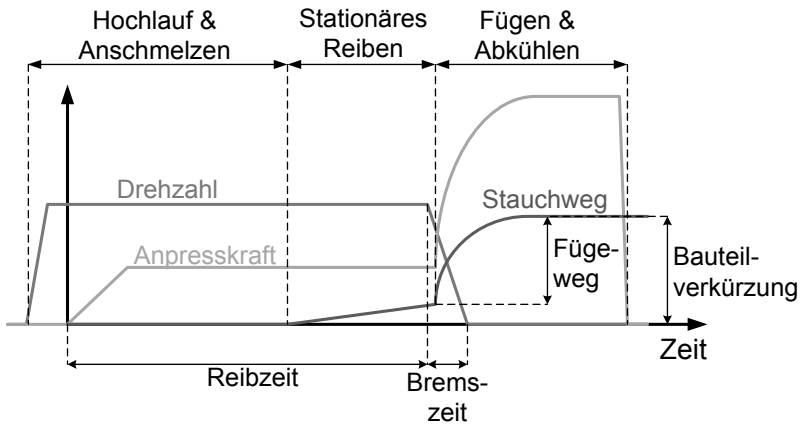


Abb. 4.3.: Übersicht über den Reibschweißprozess und die wichtigsten Prozessgrößen

4.2. Mobile Reibschweißmaschine

4.2.1. Reibschweißen von Kunststoffrohren

In dieser Arbeit stellt die Reibschweißmaschine die Hauptbeispielanwendung für die Anbaugerätesteuerung dar und wird im Folgenden ausführlich beschrieben. Die Hauptfunktion der Maschine ist das Verbinden zweier Kunststoffrohre und eines Verbindungsstücks mittels Reibschweißen.

Abbildung 4.3 zeigt die Einteilung des Reibschweißprozesses in einzelne Phasen und den Verlauf der Hauptprozessgrößen. Nach dem Einspannen der Fügeteile wird die Spindel auf Soll Drehzahl beschleunigt (Rotationsreibschweißen). Gleich darauf werden die Fügeteile aufeinandergespresst und unter definierter Kraft und Geschwindigkeit so lange gerieben, bis die Plastifizierung beginnt (Hochlauf- & Anschmelzphase). Sobald die Plastifizierung erfolgt, bildet sich zwischen den Bauteilen eine viskose Schicht und das Material wird nach außen verdrängt. Das zum Antrieb der Spindel benötigte Drehmoment verändert sich in dieser Phase nicht wesentlich (sta-

tionäre Reibphase). Gegen Ende der stationären Reibphase wird die Spindel zügig bis zum Stillstand abgebremst. Während des Abbremsens kann bereits eine erhöhte Anpresskraft aufgebracht werden, wodurch mehr Material aus dem Fügebereich verdrängt wird. Mit dem Beginn der erhöhten Fügekraft wird die letzte Phase, die Füge- und Abkühlphase, eingeleitet. Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen ist beim Schweißen von Kunststoffen eine Fügekraft unerlässlich, damit sich die Polymerketten ineinander haken können (Uebbing (1998)).

Eine ausreichende Abkühlphase ist essentiell. Es ist vor dem Entlasten und Bewegung der zusammengefügteten Teile so lange zu warten, bis das Gefüge der Polymerketten stabil genug ist, um die mechanische Belastung bei Freigabe der Füge­teile zu tragen. Eine verfrühte Belastung der Teile führt zu qualitativ minderwertigen Schweißverbindungen, auch wenn die Schädigung von außen nicht immer sichtbar ist.

Die Wulstbildung um die Schweißnaht ist fertigungstechnisch nicht zu umgehen. Mit ihr werden außerdem Schmutzpartikel und Fremdstoffe aus dem Fügebereich herausgeführt. Der Wulst kann nachträglich abgetragen werden oder die Geometrie der Füge­teile kann so gestaltet werden, dass die Wulstbildung die Funktionalität nicht beeinflusst.

Die beim Reibschweißen aufzubringende Anpresskraft und die Reibgeschwindigkeit sind in einem breiten Toleranzbereich einstellbar, wenn die Reibzeit entsprechend gewählt wird. So kann beispielsweise die Anpresskraft reduziert werden, wenn dafür schneller und / oder länger gerieben wird. Je nach Wahl der Parameter verändert sich auch die Reibdauer (vgl. **Abbildung 4.4**). Allerdings ist es ratsam, sich beim Schweißprozess auf bestimmte Prozessparameter festzulegen, um den Prozess möglichst wirtschaftlich und automatisiert ablaufen zu lassen. Auch ist die automatische Detektion eines Abbruchkriteriums auf einer solchen Maschine nur mit entsprechendem Mehraufwand möglich. Daher ist es empfehlenswert, sich auf einen Parametersatz aus Anpresskraft, Reibgeschwindigkeit und Reibzeit festzulegen, der vergleichsweise leicht zu überwachen ist. Dieses Vorgehen

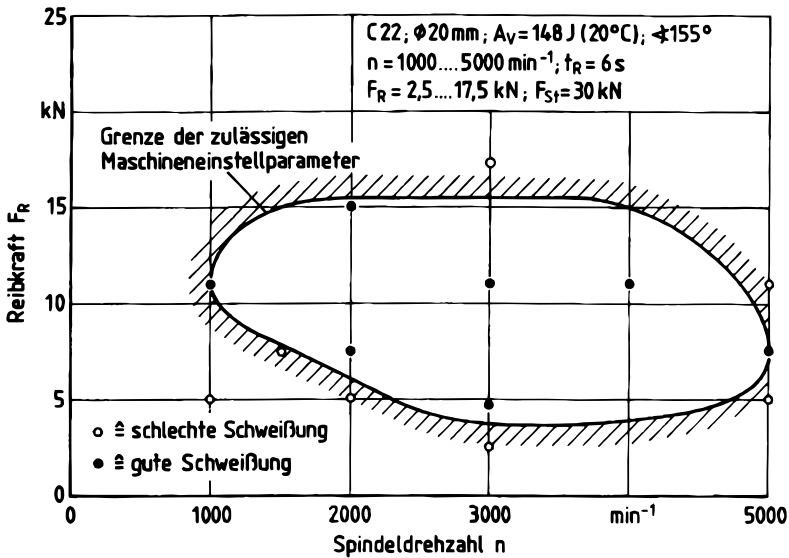


Abb. 4.4.: Beispielhafte Darstellung des Einflusses der Reibkraft und der Reibgeschwindigkeit auf den Schweißprozess. Die Reibzeit ist nicht dargestellt. (Schmidt (1982))

sichert die gleichbleibende Qualität und gewährleistet die Prozessgüte.

Der Reibschweißprozess für Kunststoffe ist in diversen Normen festgehalten, beispielsweise in der DIN 1910 und DIN 16960. In DIN EN ISO 15620 wird das Reibschweißen metallischer Werkstoffe behandelt.

Es haben sich verschiedene Verfahren für das Reibschweißen entwickelt, die sich hauptsächlich in der Bewegung unterscheiden. So werden zylindrische Bauteile in der Regel rotierend verschweißt, längliche Bauteile durch eine Oszillationsbewegung und kleinere Bauteile häufig auch im Ultraschallschweißverfahren, bei dem die Bewegungen recht klein, aber hochfrequent ausgeführt werden. Je nach Schweißnahtgeometrie werden weitere Bewegungsvarianten verwendet (siehe Uebbing (1998) und Michel (1999)). Eine theoretische Betrachtung des Reibschweißprozesses findet sich in Frehse & Tappe (1988). Das Reibschweißen hat den Vorteil gerin-

ger Prozesszeiten und des relativ geringen Wärmeeintrags im Vergleich zu den thermischen Schweißverfahren.

Der mobile Einsatz des Reibschweißverfahrens ist ein Novum im Kanalbau. Bisher werden Kunststoffrohre im Leitungsbau, sofern sie nicht geklebt, oder ineinandergesteckt (gemufft) werden, mittels Heizmuffenverfahren oder Heizelementstumpfschweißverfahren verbunden (siehe Neitzert (1972), Uebbing (1998)). Bei letzterem Verfahren werden die Rohre in eine Vorrichtung gespannt, die Stirnflächen geschält und mit einer beheizten Platte aufgeschmolzen. Im Anschluss an den Schmelzprozess wird der Heizspiegel entfernt und die Rohre aneinander gepresst. Das Verfahren ist vergleichsweise einfach, die Prozesszeiten sind dagegen je Schweißvorgang vergleichsweise lang, da die erlaubte Temperatur der Heizelemente unter der Zersetzungstemperatur des Kunststoffs liegen muss, um eine Materialzerstörung zu verhindern. Die pro Zeiteinheit eingebrachte Wärmemenge ist daher vergleichsweise gering. Der Reibschweißprozess erwärmt das Material deutlich schneller, da die Wärme im Material selbst entsteht und nicht von außen eingebracht werden muss. Auch in axialer Richtung ist der miterwärmte Bereich kleiner.

Der Aufwärm- und Fügeprozess wird durch das Reibschweißverfahren deutlich verkürzt, da die benötigte Wärme durch Reibung im Material erzeugt wird, im Gegensatz zum verbreiteten Heizspiegelschweißen, bei dem die Wärme von außen eingebracht wird und die Wärmemenge durch die Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffs und die maximal zulässige Temperatur begrenzt wird. Schweißungen mit dem Heizspiegelverfahren benötigen daher zwischen 20 und 40 Minuten inkl. der Abkühlzeit. In Versuchen mit einem Rohr mit einem Durchmesser von 300 mm wurden mit der Reibschweißmaschine Zykluszeiten von 3 Minuten ohne Abkühlzeit erreicht. Durch den deutlich geringeren Wärmeeintrag liegt die Abkühlzeit bei unter 10 Minuten. Eine genaue Bestimmung steht hier jedoch noch aus. Insgesamt steht aber bereits fest, dass durch den neuen Prozess eine deutliche Reduzierung der Prozesszeiten erzielt werden kann.

4.2.2. Konzept and Entwurf

Das Fügen der HDPE-Rohre auf der Baustelle mittels Reibschweißen ist technisch anspruchsvoll, da die Relativbewegung zwischen den zu fügenden Rohrstücken nicht leicht zu realisieren ist. Ein Rohrstück ist im Normalfall bereits aus zahlreichen Rohrstücken zusammengeschweißt und aufgrund seiner Länge und gegebenenfalls bereits eingebrachten Abzweigungen nicht mehr drehbar. Auch werden Leitungsgräben bereits vor Fertigstellung der Leitung nicht selten wieder zugeschüttet. Aber auch ein einzelnes Rohrstück von wenigen Metern Länge ist auf der Baustelle nicht mehr ohne Weiteres ohne Gefahr drehbar. Für die Umsetzung wurde daher eine Lösung ausgewählt, bei der drei Rohrstücke gleichzeitig verschweißt werden, je zwei Rohre und ein Mittelstück. Während die beiden langen Rohrstücke in der Maschine fixiert sind, rotiert das kurze Mittelstück. Die beiden langen Rohrabscchnitte werden auf je einem durch einen Hydraulikzylinder angetriebenen Schlitten eingespannt, wodurch die für den Schweißprozess notwendige Zustellbewegung und Anpresskraft in Längsrichtung realisiert wird.

4.2.3. Konstruktion

Abbildung 4.5 zeigt den schematischen konstruktiven Aufbau der Reibschweißmaschine. Das zentrale Bauteil ist ein Stahlrahmen, der die einzelnen Teilsysteme aufnimmt und das Gerät mit dem Trägergerät - hier einem Bagger - verbindet. Der Rahmen trägt die wesentlichen Elemente

- linker Schlitten
- rechter Schlitten
- Schwenkeinrichtung mit Fräs- und Reibeinheit.

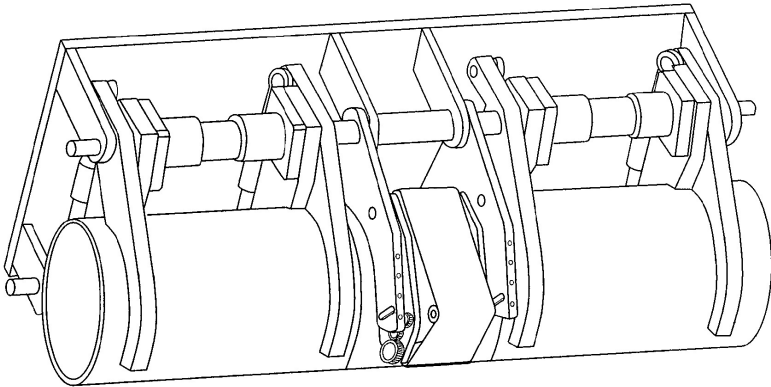


Abb. 4.5.: Prinzip der Reibschweißmaschine (nach Mauz & Riexinger (2011))

Schlitten

Auf beiden Seiten der Rohrschweißmaschine befinden sich lineargeführte Schlitten, die hydraulisch bewegt werden. Jeder Schlitten verfügt über zwei hydraulisch betätigte Klammern zum Greifen der langen Rohrabschnitte.

Schwenkeinheit mit Fräs- und Reibeinheit

Im Zentrum der Maschine sitzt eine Schwenkeinheit mit Fräs- und Reibeinheit. Zur Verbesserung der Schweißnahtgüte werden die Stirnseiten der Rohre profiliert. Hierzu wird die Fräseinheit in den Arbeitsbereich eingeschwankt. Über einen Zahnriemen wird die Fräseinheit von einem Hydraulikmotor angetrieben. Die lineargeführten Schlitten stellen die Rohre zu. Auf diese Weise wird eine zur Schweißung und Zentrierung der Rohre angepasste Geometrie hergestellt.

Ebenfalls an der Schwenkeinheit angebracht ist die riemengetriebene Aufnahme für das Rohrmittelstück. Das Rohrmittelstück wird bereits vorbereitet in die Aufnahme eingelegt. Nach Profilierung der Stirnseiten wird das Rohrmittelstück in den Arbeitsbereich eingeschwenkt und der Reib-



Abb. 4.6.: Schwenkeinheit mit Rohrklammer (Mitte unten) und Fräseinrichtung (rechts)

schweißbeginn wird gestartet. **Abbildung 4.6** zeigt die Schwenkeinheit mit Fräseinrichtung und Rohrklammer für das mittlere Rohrstück.

4.2.4. Hydraulisches System

Das Hydrauliksystem der Reibschweißmaschine verteilt die hydraulische Leistung gemäß den Vorgaben der Steuerung auf die einzelnen Verbraucher. Das zentrale Element bildet der Ventilblock in Sektionsbauweise. Dies ist für die Versuchsmaschine sinnvoll, da einzelne Sektionen bei Bedarf ausgetauscht oder ergänzt werden können, sollte dies notwendig sein. Für die Reibschweißmaschine kommen Load-Sensing-Ventile mit nachgeschalteten Druckwaagen zum Einsatz. Dies hat den Vorteil, dass die Verbraucher bei gleicher Ventilauslenkung stets die gleiche Geschwindigkeit haben, weitgehend unabhängig vom bereitgestellten Druck. Dies ist für die Re-

gelbarkeit von Vorteil. Die Anschlussplatte des Ventilblocks drosselt über eine Blende die LS-Leitung zum Tank hin ab, da Bagger in der Regel nicht über eine separate LS-Leitung für das Anbaugerät verfügen.

Abbildung 4.7 zeigt den Schaltplan des Hydrauliksystems. Der besseren Lesbarkeit wegen werden nicht alle Ventilsektionen dargestellt. Diese sind jedoch für alle Verbraucher, außer dem Motor, identisch. Die Verbraucher des Hydrauliksystems Reibschweißmaschine sind im Detail:

- ein Hydraulikmotor mit konstantem Schluckvolumen zum Antrieb der Reib- und Fräseinheit
- ein Differentialzylinder zum Schwenken der Reib-/Fräseinheit
- je ein Differentialzylinder je Schlitten für die Vorschubbewegung
- insgesamt vier parallel geschaltete Differentialzylinder zum Öffnen und Schließen der Rohraufnahme der Reib-/Fräseinheit
- insgesamt vier Differentialzylinder zum Öffnen und Schließen der vier Klammern, je Schlitten paarweise parallelgeschaltet

Die einzelnen Ventilsektionen beinhalten einen proportional verstellbaren Ventilschieber, nachgeschaltete Druckwagen und für jeden Anschluss ein eigenes Druckbegrenzungsventil sowie ein Nachsaugventil. Für die Zylinderantriebe kommen 4/3-Wege-Ventile und für den Hydraulikmotor ein 2/2-Wege-Ventilschieber zum Einsatz. Der Tankanschluss des Motors ist direkt mit der Tankleitung der Reibschweißmaschine verbunden und wird nicht mehr über das Ventil geführt. Alle Ventilsektionen werden von 24V Proportionalmagneten betätigt. Durch den Einsatz der Proportionalventilen wird eine Regelbarkeit ermöglicht.

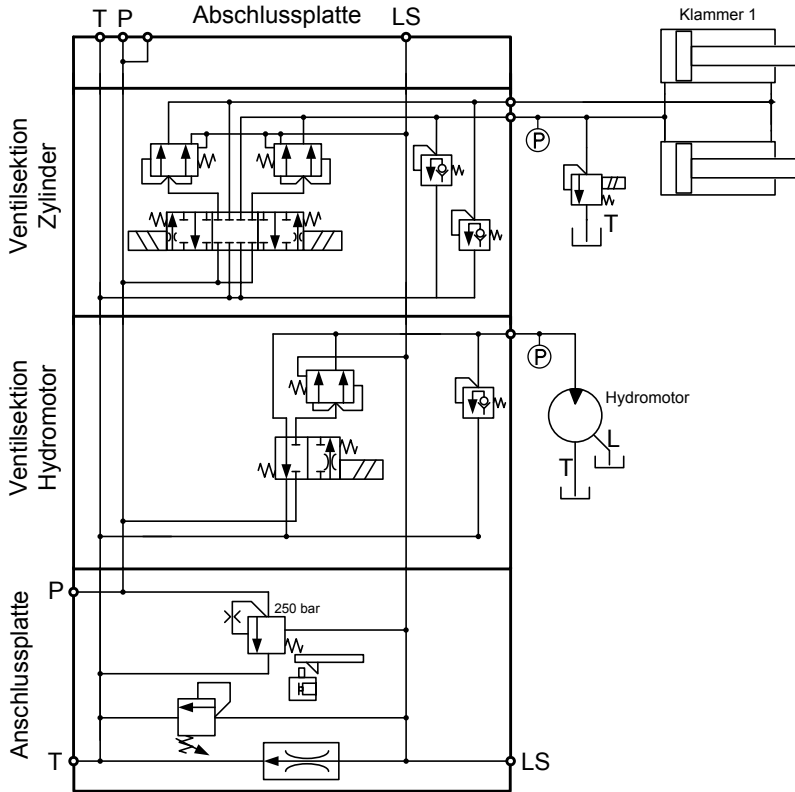


Abb. 4.7.: Reduzierte Darstellung des Ventilblocks (zu Gunsten der Übersichtlichkeit wurden nur zwei Ventilsektionen dargestellt)

Zur Regelung der Klemmkräfte der Klammern und der Vorschubkräfte der Schlitten werden elektrisch einstellbare Druckbegrenzungsventile eingesetzt. Diese werden parallel zum jeweiligen Verbraucher installiert und begrenzen dessen Druck. Während des Einsatzes der Druckregelung geht permanent ein gewisser Volumenstrom zum Tank hin verloren. Durch den Einsatz der Proportionalventile kann der Verluststrom jedoch gering gehalten werden.

4.2.5. Steuerung

Die Ansteuerung und Überwachung der Funktionen erfolgt mit Hilfe einer elektronischen Steuerung¹. Das System besteht aus einem Display, einer Mobilsteuerung und einer weiteren Steuerungseinheit mit geringerer Leistungsfähigkeit, die untergeordnete Steuerungsaufgaben übernimmt. Dies ist notwendig, da die zur Verfügung stehende Mobilsteuerung nicht über eine ausreichende Anzahl von Ein- und Ausgängen verfügt. Während das Display eine grafische Benutzeroberfläche bereitstellt und die Kleinststeuerung untergeordnete Aufgaben wie das Ansteuern der Druckbegrenzungsventile übernimmt, läuft auf der Mobilsteuerung das Hauptprogramm, zu dessen Aufgaben die Ausführung des Arbeitsprozesses, die Regelung der Prozessgrößen sowie die Erfassung und Aufzeichnung von Messdaten gehören.

Die Steuerung stellt zahlreiche Aus- und Eingänge zur Ansteuerung von Aktoren und zur Datenerfassung zur Verfügung, die je nach Aktor bzw. Sensor unterschiedliche Signale ausgeben bzw. verarbeiten können. Die Ventilmagnete werden über PWM-Signale² angesteuert. Die verwendeten Sensoren geben analoge Spannungssignale bzw. im Fall des Drehgebers TTL-Signale aus.

¹ Steuerung im Sinne einer programmierbaren, elektronischen Gerätesteuerung, nicht im Sinne der Regelungstechnik

² PWM - PulsweitenModulation

Die Programmierung der Steuergeräte erfolgt in CODESYS (nach IEC 61131-3). Die einzelnen Module kommunizieren über den CAN-BUS mittels CANopen Protokoll.

Die Steuerung ist für den Mobil- und Serieneinsatz geeignet, bietet aber nicht die Rechenleistung von Prototyping-Systemen. Daher ist bei der Programmierung auf einen effizienten, schnell ausführbaren Code zu achten, um die Bearbeitungszeiten der Schleifen möglichst gering zu halten.

Die Anforderungen an die Regelung sind hoch, da die Prozessparameter exakt eingehalten werden müssen und normale Proportionalventile mit positiver Überdeckung zum Einsatz kommen, die neben einem definierten Leerweg zwischen Nulllage und erster Querschnittsöffnung auch eine gewisse Hysterese im Schieberverhalten zeigen.

4.2.6. Validierung des Konzepts am Beispiel der Reibschweißmaschine

Die in den vorangehenden Abschnitten aufgezeigten, umfangreichen Steuerungs- und Regelungsfunktionen der Steuerungseinheit der Reibschweißmaschine können ebenso von der Anbaugeräteschnittstelle und -steuerung übernommen werden, die Gegenstand dieser Arbeit ist. Die Kommunikation erfolgt in dem Fall ebenfalls über den CAN-BUS. Dadurch kann das Anbaugerät auf eigene Steuerungsmodule verzichten, wodurch der Konstruktionsaufwand und die Kosten für das Anbaugerät reduziert werden. Es muss dann lediglich ein anbaugerätespezifisches Steuerungsprogramm auf die zentrale Anbaugerätesteuerung aufgespielt werden.

Die Anbaugerätesteuerung kommuniziert mit dem Anbaugerät und steuert und regelt dessen Funktionen, in diesem Fall der Reibschweißmaschine. Gleichzeitig kommuniziert sie mit dem Bagger und fordert stets die entsprechende hydraulische Leistung mit den entsprechenden Parametern an. Dazu im Gegensatz steht das konventionelle, heutige System. Hier findet

keine Kommunikation zwischen Anbaugerät und Bagger statt. Der Bagger stellt den für die Anwendung eingestellten Maximaldruck ein und hält diesen aufrecht, unabhängig davon, welcher Druck tatsächlich aktuell benötigt wird.

5. Potentiale der Anbaugerätesteuerung

Bisher wurden die Einatz- und Gestaltungsmöglichkeiten für die Anbaugerätesteuerung und -schnittstelle dargestellt. Im folgenden Kapitel werden die sich daraus ergebenden Potentiale beschrieben.

Die freie Gestaltungsmöglichkeit und die umfangreichen Anschlussmöglichkeiten an die Anbaugerätesteuerung bieten Anwendungspotentiale, die bisher auf dem Bagger in dem Umfang noch nicht vorhanden sind. Hierbei sind die Potentiale nicht nur auf die Ansteuerung des Anbaugeräts und die Interaktion mit dem Maschinenführer beschränkt. Die Möglichkeit der Kommunikation zwischen Steuerung und somit Anbaugerät und dem Bagger erlauben neue Steuerstrategien zur Effizienz- und Leistungssteigerung sowie zur Steigerung der Bedienerfreundlichkeit. Durch den Anschluss von Datenträgern oder Geräten zur Kommunikation, beispielsweise für die Verbindung zu Funknetzen, besteht die Möglichkeit des Datenaustauschs mit externen Systemen.

Die Möglichkeiten werden in den folgenden Abschnitten detailliert dargelegt und für die Beispielanwendung Rohrschweißgerät wird das Energieeinsparungspotential im Detail simuliert und beschrieben.

Ansteuerung des Anbaugeräts und Interaktion mit dem Fahrer

Anbaugeräte werden auf dem Bagger in der Regel direkt über Bedienelemente an den Steuerhebeln betätigt. Bei komplexen Anbaugeräten oder anspruchsvoll zu regelnden Funktionen ist diese Bedienungsmöglichkeit nicht mehr ausreichend, so dass zusätzliche elektronische Steuerungseinrichtungen notwendig werden. Dies geschieht durch zusätzliche Steuerungsmodu-

le und Bedienelemente, die im Fahrerhaus installiert werden müssen. Beim Einsatz mehrerer Anbaugeräte, die eine zusätzliche Steuerung benötigen, steht gegebenenfalls kein ausreichender Montageplatz mehr zur Verfügung, oder die Geräte müssen sichteinschränkend montiert werden.

Durch die Verwendung einer universellen Anbaugerätesteuerung entfallen zusätzliche Steuergeräte, die nur für ein spezielles Anbaugerät verwendbar sind. Die universelle Anbaugerätesteuerung übernimmt nach dem Aufspielen des entsprechenden anbaugerätespezifischen Programms die Steuer- und Regelungsfunktion des Anbaugeräts. Dies spart Bauraum und sorgt bei entsprechender Anordnung für eine ergonomische Bedienbarkeit und gute Sicht auf die Anzeige. Dies führt zu geringerer Ermüdung und steigert die Sicherheit für Mensch und Maschine.

Gleichzeitig steht eine komfortable Visualisierungsschnittstelle zur Verfügung, mit der dem Bediener umfangreiche Informationen dargestellt werden können. Die Gestaltung liegt hierbei beim Anbaugerätehersteller, so dass dieser über die Menüstruktur und Tastenbelegung selbst entscheidet. Auch die Art der Visualisierung obliegt dem Hersteller.

Auf diese Weise entsteht eine standardisierte Schnittstelle zwischen Anbaugerät und Fahrer, die dennoch in der Lage ist, frei an die Erfordernisse angepasst werden zu können und dem Fahrer ein intuitives Bedienkonzept und eine komfortable Visualisierung bietet.

Die Verwendung der Anzeige für die Kontrolle und Parametrierung des Baggers ist ebenfalls denkbar, wenn der Hersteller die Kommunikation des Baggers mit der Steuerung ermöglicht und ein entsprechendes Programm aufspielt. So sind weitere Konsolidierungseffekte möglich, die zu einem aufgeräumten, ergonomischen Fahrerhaus führen.

Somit stehen bei Verwendung der universellen Anbaugerätesteuerung und -Schnittstelle die Möglichkeiten zur Verfügung, um eine neue Generation von Baggeranbaugeräten anzusteuern. Die Bedienerschnittstelle ermöglicht dem Fahrer umfangreiche Einstellungen für den Betrieb des Anbaugeräts und zur Parametrierung des Arbeitsprozesses, sowie die Möglichkeit, über

eine frei programmierbare Anzeige alle wichtigen Werte abzulesen.

Kommunikation zwischen Anbaugerät und Trägermaschine

Die Kommunikation mit der Anbaugerätesteuerung ist Grundvoraussetzung für die Funktion des Anbaugeräts. Auch stehen die Regelungs- und Anzeigefunktionen zur Verfügung und mit geringem Eingriff in das Hydrauliksystem des Baggers auch dessen Hydrauliksystem für die Versorgung des Anbaugeräts. Bis zu diesem Punkt ist das System auf jedem Bagger ohne großen Aufwand und Eingriffe in die Baggersysteme möglich. So können beispielsweise mehrere Bagger eines Fuhrparks mit der Anbaugerätesteuerung ausgerüstet werden, so dass für den Einsatz des Anbaugeräts auf verschiedenen Baustellen dieses nicht mehr in Kombination mit einem Bagger transportiert werden muss.

Darüber hinaus ergeben sich dadurch weitere Potentiale, wenn die Anbaugerätesteuerung und die Baggersteuerung miteinander kommunizieren und so zusätzliche Funktionalitäten ermöglichen. Diese untergliedern sich in:

- Bewegungsfunktionen
- Hydraulikversorgung
- Energetische Funktionen
- Komfortfunktionen

Durch den direkten Zugriff des Anbaugeräts bzw. dessen Steuerungsprogramm auf die Bewegungsfunktionen des Baggers werden exakte, automatisierte Bewegungsabläufe möglich, die mit einer hohen Wiederholgenauigkeit ausgeführt werden. Voraussetzung hierfür ist eine entsprechende Programmfunktion, in der das Steuerungsprogramm des Anbaugeräts seinen Bewegungswunsch an den Bagger meldet und die Baggersteuerung diese ausführt. Diese Funktionalität ist auch für einfache Anbaugeräte sinnvoll, beispielsweise beim automatisierten Anlegen von Böschungen.

Neben der Bewegungsfunktion ist eine Einschränkung der Bewegung auf die gleiche Art mit dem gleichen System möglich. So ist die Sperre der Be-

wegungsfunktion beispielsweise dann sinnvoll, wenn das Anbaugerät arbeitet und dabei seine Position nicht verändern darf. Eine abgewandelte Form stellt die Funktion der Bewegungseinschränkung und Geschwindigkeitsbegrenzung der Arbeitsbewegung dar, oder die Berücksichtigung von unzulässigen Arbeitsräumen, beispielsweise zum Schutz von über- oder unterirdischen Leitungen oder von Gebäuden und Einrichtungen. Diese Funktionalität kann durchaus auch ohne spezielles Anbaugerät nutzvoll sein und kann die Sicherheit erhöhen.

Durch die Kommunikation zwischen Anbaugerät und Steuerung sowie zwischen Steuerung und Bagger ergeben sich neue Möglichkeiten, um die Hydraulikversorgung des Anbaugeräts durch den Bagger zu gestalten. So kann das Anbaugerät im Stande sein, selbsttätig die Befehle für die Zu- und Abschaltung der Hydraulikversorgung zu geben und den benötigten Druck und / oder Volumenstrom vorgeben. Im Unterschied zu bisherigen Systemen mit Anbaugeräteerkennung, bei denen diese Parameter zuvor manuell eingespeichert werden müssen, geschieht dies durch die Vorgabe des Anbaugeräts selbständig.

Bei automatisierten Prozessen, bei denen eine gewisse Vorhersagbarkeit der unmittelbar bevorstehenden Anforderungen an die Hydraulikversorgung möglich ist, kann die Druck- und /oder Volumenstromanforderung regelmäßig oder permanent aktualisiert werden. Auf diese Weise ist es möglich, Verluste im Hydrauliksystem zu reduzieren und somit Energie einzusparen (siehe Kapitel 5.1). Sind die Hydraulikvorgaben des Anbaugeräts und dessen Steuerung zuverlässig, besteht ein weiteres Potential zur Energieeinsparung darin, den Dieselmotor des Baggers in einem besseren Betriebspunkt zu betreiben. Üblicherweise ist eine Energieeinsparung durch Reduktion der Dieseldrehzahl bei gleichzeitiger Reduktion der Drehmomentreserve möglich (vgl. Dengler u. a. (2011)). Dies setzt aber voraus, dass eine entsprechende Regelung auf dem Bagger realisiert ist und unerwartete Lastspitzen ausgeschlossen werden können.

Darüber hinaus bietet es sich an, wiederkehrende Funktionen zu automati-

sieren, um den Aufwand für den Maschinenführer zu reduzieren und den Bedienungskomfort zu steigern.

Datenaustausch mit externen Systemen

Die Vernetzung von Maschinen und Systemen hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Es ist davon auszugehen, dass diese Entwicklung in Zukunft weiter anhalten wird. Die zunehmende Vernetzung soll die Leistungsfähigkeit und Funktionalität der Systeme verbessern. Hierbei wird die Kommunikation mit externen Systemen in mehrere Bereiche unterteilt:

- Systeme zur Datenerfassung und Auswertung
- Systeme zur Informationsbereitstellung
- Systeme zur Kommunikation mit anderen Einheiten

Die Anbaugerätesteuerung dient neben der Steuerung des Anbaugeräts und der Kommunikation mit Anbaugerät und Bagger auch zur Datenerfassung, um anfallende Messgrößen und Prozessparameter zu erfassen und zu dokumentieren. Der Umfang der Datenerfassung ist vom Prozess und den Anforderungen an die Qualitätssicherung abhängig. Diese Daten können offline, d.h. über ein Speichermedium oder online über ein Netzwerk kabelgebunden oder drahtlos übertragen werden und stehen für spätere Auswertungen oder als Nachweis beispielsweise im Büro zur Verfügung.

Durch die Verbindung mit Informationssystemen ist die Steuerung in der Lage, Informationen über die eigene Position - beispielsweise über GPS / RTK abzurufen, sofern die hohe Genauigkeit erforderlich ist. Darüber hinaus sind Online-Anbindungen an Datenbanken denkbar, von denen die Maschine beispielsweise Informationen über den Verlauf von Leitungen oder verborgenen Hindernissen beziehen kann.

Darüber hinaus ist eine Kommunikation mit anderen Fahrzeugen, die mit kompatiblen Kommunikationssystemen ausgestattet sind, denkbar, beispielsweise um die Fahrzeugflotte zu koordinieren und Kollisionen zu vermeiden.

Durch die Kommunikationsfähigkeit wird der Einsatzbereich des Baggers und der Anbaugeräte erweitert und der Bagger ist für zukünftige Anforderungen besser gerüstet.

Zusätzliche nichtanbaugerätespezifische Funktionen

Die Anbaugerätesteuerung kann aufgrund ihrer freien Programmierbarkeit auch Funktionen erhalten, die nicht direkt mit einem Anbaugerät verknüpft sind. So könnte sie beispielsweise mit einem Lagesensorsystem verbunden werden und so zu einem Fahrerassistenzsystem werden, das den Maschinenführer beim Graben unterstützt und beispielsweise Winkel- und Höhendaten anzeigt.

5.1. Vorteile der neuen Steuerung für das System Rohrschweißgerät

Die in der Entwicklung befindliche Version einer Reibschweißmaschine zur Verschweißung von Kunststoffrohren als mobiles Baggeranbaugerät profitiert von der vorgestellten Anbaugerätesteuerung in hohem Maß. Die Protokollierung und Dokumentation der Arbeiten ist mit solch einem System automatisch lösbar. Die Übertragung auf andere Rechner kann drahtlos oder via USB-Datenträger erfolgen. Für den Arbeitsprozess kritische Größen können über Sensoren ebenfalls protokolliert werden. Am Beispiel des Rohrschweißgeräts könnte dies z.B. die Außentemperatur sein. Vorgegebene Abkühlzeiten können durch das Anbaugerät gesteuert eingehalten werden. Dies könnte bei vollständigem Zugriff auf die Baggersteuerung so erfolgen, dass das Anbaugerät die Bewegungsmöglichkeiten des Baggers sperrt. So wäre die Einhaltung der Abkühlzeiten gewährleistet, die entsprechend automatisch protokolliert werden können. Das System Rohrschweißgerät profitiert davon durch eine bessere Prozessführung und der Dokumentation Einhaltung der Prozessparameter.

Zusammenfassend lassen sich folgende Potentiale der Anbaugerätesteuerung festhalten:

- Effizienzsteigerung durch schnellen Wechsel der Anbaugeräte durch die einheitliche Steuerung
- Effizienzsteigerung durch Kompatibilität → Fuhrparkflexibilität: Einsatz eines Anbaugeräts auf mehreren Trägermaschinen
- Ansteuerung und Interaktion durch und mit dem Fahrer können flexibler und individueller gestaltet werden
- Kommunikation zwischen Anbaugerät und Trägermaschine wird möglich → Befehlsaustausch und Kontrolle
- Datenaustausch mit externen Systemen zur Abstimmung und Protokollierung
- Energieeinsparpotential (siehe 5.2)

5.2. Untersuchung der Einsparpotentiale für das Rohrschweißgerät

Neben den vorangenannten funktionalen Potentialen soll gezeigt werden, dass zusätzlich ein Einsparpotential hinsichtlich der vom Bagger bereitgestellten hydraulischen Leistungsversorgung besteht und somit Kraftstoff gespart werden kann. Der Energiespareffekt beruht auf der Möglichkeit, dem Bagger den aktuellen Leistungsbedarf des Anbaugeräts kontinuierlich mitzuteilen und so die Verlustleistungen in Form von Drosselverlusten zu reduzieren.

Im Gegensatz zu Konstantdrucksystemen, die stets einen definierten Systemdruck bereitstellen, soll der Systemdruck dem Bedarf angepasst werden. Load-Sensing-Systeme erfüllen diese Anforderungen besser, benötigen hierfür aber eine Regeldruckdifferenz, um bei einem Leistungsbedarf entsprechend reagieren zu können. Diese Druckdifferenz beträgt üblicherweise 20 bar oder mehr, die lediglich dafür benötigt werden, die Regelungsfunktion und das Verhalten des Systems zu verbessern. Im Hinblick auf den

Wirkungsgrad handelt es sich hierbei jedoch um Verluste. Um diese zu reduzieren, könnte die Druckdifferenz reduziert werden. Allerdings reagiert das System dann träger und schwingungsanfälliger auf Laständerungen.

Ist das Lastprofil bekannt, kann der Druck angepasst werden, bevor der Lastwechsel erfolgt. Dies setzt voraus, dass der Arbeitsprozess hinreichend genau bekannt ist. Bei einem automatisierten Prozess können diese Informationen in der Anbaugerätesteuerung hinterlegt werden, wie im Falle der Reibschweißmaschine. Für jede Funktion ist der benötigte Druck und auch der Volumenstrom im normalen Betrieb bekannt. Unerwartete Lastspitzen sind nicht zu erwarten. In dem Fall ist es möglich, die Druckreserve gering zu halten und die Verlustleistung zu reduzieren.

Der Nachweis des Energieeinsparpotentials wird rechnerisch mit einem validierten Simulationsmodell erbracht. Hierzu wird zunächst ein Modell des Hydrauliksystems des Rohrschweißgeräts erstellt und mit den Messdaten des realen Systems validiert. Die Ergebnisse des validierten Modells stellen für die Berechnungen der nachfolgenden Schritte die Ausgangsbasis dar.

Im zweiten Schritt werden verschiedene Varianten der Hydraulikversorgung des Baggers modelliert. Hierzu werden Konstantdrucksysteme mit verschiedenen Druckeinstellungen sowie Load-Sensing-Systeme mit verschiedenen Regeldruckdifferenzen im Bezug auf den Gesamtenergiebedarf je Arbeitszyklus der Reibschweißmaschine miteinander verglichen.

5.2.1. Aufbau und Validierung des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell des Hydrauliksystems des Rohrschweißgeräts orientiert sich am realen System und beinhaltet alle wesentlichen Komponenten des verwendeten Ventilblocks sowohl auf Seiten der Verbraucher als auch der internen Schaltung in den Ventilsektionen. Die Parametrierung erfolgte auf Basis von Kennfeldern des Herstellers, Messdaten sowie eigenen Berechnungen.

In Abbildung 4.7 (vgl. 4.2.4) ist der zur besseren Übersicht um einige Ventilsektionen reduzierte Schaltplan des Hydrauliksystems der Rohrschweißmaschine dargestellt (vgl. Abschnitt 4.2.4). Das ebenfalls reduzierte Simulationsmodell ist in **Abbildung 5.1** dargestellt, wobei hier auf die Darstellung weiterer Klammer- und der Vorschubsektionen, sowie auf Signalleitungen zum Speichern der Simulationsergebnisse verzichtet wurde. Die nicht dargestellten Klammer- und Vorschubsektionen entsprechen der einen dargestellten Sektion. Die Signalleitungen haben auf das Modell selbst keinen Einfluss. Zusätzlich dargestellt sind die Strukturen der wichtigsten Regelkreise, sowie Wertvorgaben und Schaltentscheidungen, um die Funktionen des Steuerungsprogramms der Reibschweißmaschine logisch nachzubilden.

Um eine Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse mit den Messdaten zu schaffen, ist eine Synchronisation der Befehle in der Simulation und der Steuerung der Reibschweißmaschine unabdingbar. Daher werden die bei den Messungen aufgezeichneten Steuerbefehle als Eingangsgrößen für das Simulationsmodell vorgegeben. Somit ist es möglich, den komplexen, realen Prozess direkt auf das Simulationsmodell abzubilden.

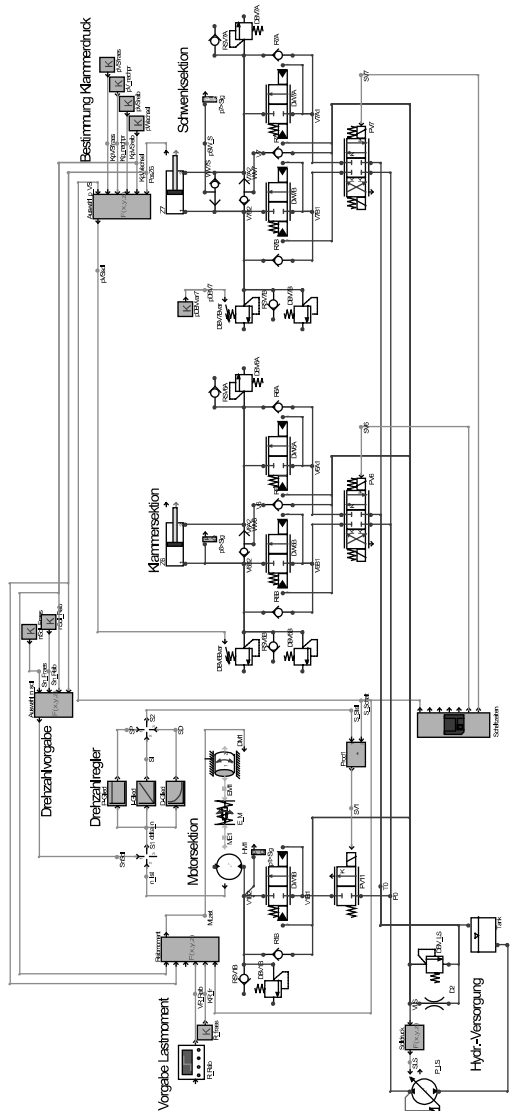


Abb. 5.1.: Darstellung des Simulationsmodells (zu Gunsten der Übersichtlichkeit reduziert, vgl. Abbildungen A.1, A.2 u. A.3)

Abbildung 5.2 stellt den gemessenen und den simulierten Volumenstrom über einem Arbeitszyklus dar. Die Abweichungen basieren auf der Tatsache der gegenseitigen Beeinflussung der Ventile im realen System. Dieser Effekt wirkt sich durch den nahe am Öffnungspunkt liegenden Arbeitspunkt des Ventils besonders deutlich aus. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die verwendeten Ventile für die benötigten kleinen Volumenströme eigentlich zu groß sind. Die benötigten Volumenströme sind allerdings im Vergleich mit mobilen Anwendungen sehr klein. Daher war es nicht möglich, noch kleinere, mobiltaugliche Proportionalventile zu beschaffen. Bereits kleine Lageänderungen des Ventilschiebers wirken sich auf den Volumenstrom stark aus. Allerdings sind diese Effekte mit der zugrunde liegenden Simulation nicht abbildbar und waren auch messtechnisch mit dem vorhandenen Aufbau nicht quantitativ zu erfassen. Die Druckspitzen bei Lastwechseln im Messschrieb sind auf Trägheiten im mechanischen und speziell im hydraulischen System zurückzuführen. Der Druckregler der Versorgungsmaschine in Verbindung mit den langen Leitungen zwischen Anbaugerät und Versorgungsmaschine bewirken eine verzögerte Reaktion auf Lastanforderungen. Letztlich haben diese kurzzeitigen Ausreißer auf den Gesamtenergiebedarf nur einen geringen, vernachlässigbaren Einfluss und werden an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt.

5.2.2. Simulativer Vergleich

Ziel ist es, eine Methodik aufzuzeigen, mit der es möglich sein soll, den momentanen Leistungsbedarf des Anbaugeräts der Baggersteuerung mitzuteilen, so dass diese die angeforderte Leistung möglichst genau liefern kann. Dies soll erreicht werden, indem die Anbaugerätsteuerung vorgibt, welchen Volumenstrom und / oder welchen Druck sie gerade braucht. Hierbei ist es sicher nicht zweckmäßig, jede kleinste Veränderung mitzuteilen. Dies würde aufgrund der üblicherweise auftretenden, wenig vorhersehba-

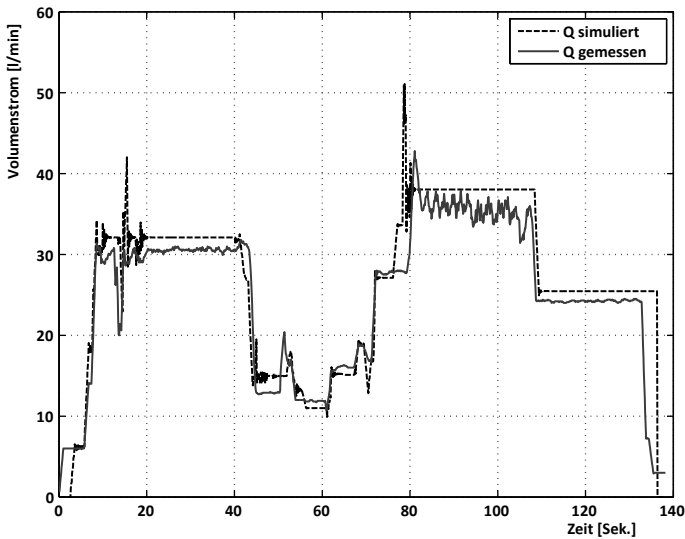


Abb. 5.2.: Gemessener und simulierter Volumenstrom über einen Arbeitszyklus

ren Druckschwankungen ohnehin kaum zu realisieren sein. Zweckmäßiger ist es hier, diskrete Druckstufen anzunehmen, beispielsweise in Druckintervallen von wenigen Bar. Dies erlaubt gewisse Ungenauigkeiten der beteiligten Messsysteme und eine gewisse Toleranz gegenüber geringen Druckschwankungen. Auf diese Weise entsteht beispielsweise aus dem simulierten Volumenstrom eine obere Begrenzungskurve, deren Verlauf die Volumenstromanforderung resultiert (vgl. **Abbildung 5.3**). Die Begrenzungskurve entsteht durch Aufrunden auf das nächste sinnvolle Intervall, beispielsweise auf ganze Zahlen, 5er-Intervall oder Dekaden. Wie weit aufgerundet werden muss, hängt von Druckeinstellgüte, Dynamik und Regelungsgüte ab und ist im Einzelfall zu bestimmen.

Analog hierzu erfolgt die Bestimmung der Begrenzungskurve des erforderlichen Drucks. In den meisten Fällen wird die Meldung des benötigten

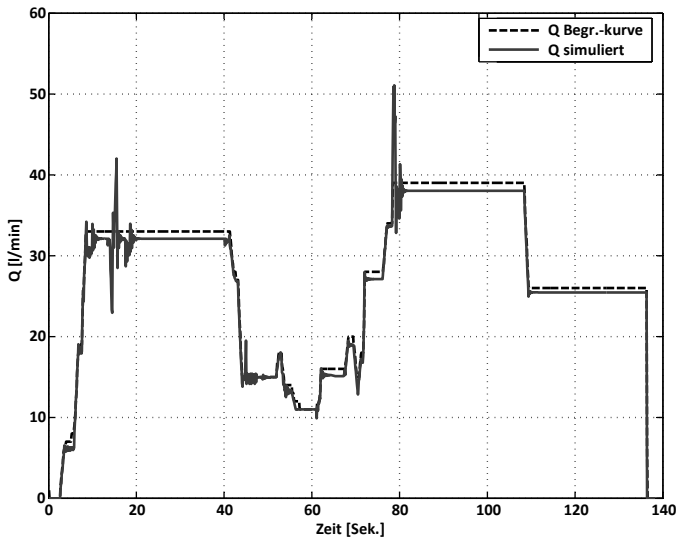


Abb. 5.3.: Begrenzungskurve des Volumenstrombedarfs zur Meldung an die Baggersteuerung (in 1 L/min-Schritten aufgerundet) und um Lastspitzen bereinigt

Drucks an die Baggersteuerung ausreichen, um die gewünschte hydraulische Leistung bereitzustellen, da sich der entsprechende Volumenstrom bei druckgeregelten Systemen entsprechend automatisch einstellt.

Je nach den Kenntnissen über das benötigte Druckniveau für die aktuelle Aufgabe sind von der Anbaugerätsteuerung entsprechende Sicherheitsreserven vorzusehen, so dass der Arbeitsprozess nicht abrupt stehen bleibt. Somit spielt die Kenntnis des Arbeitsprozesses eine entscheidende Rolle für den Energiebedarf. **Abbildung 5.4** zeigt den Maximaldruck sowie den möglichen angeforderten Druck eines Arbeitszyklus der Reibschweißmaschine. Um die angeforderte Last nicht permanent zu ändern und so ggf. einen negativen Einfluss auf die Druckregelung zu bewirken, ist es zweckmäßig, den Druck in diskreten Schritten einzustellen. In **Abbildung 5.4** ist

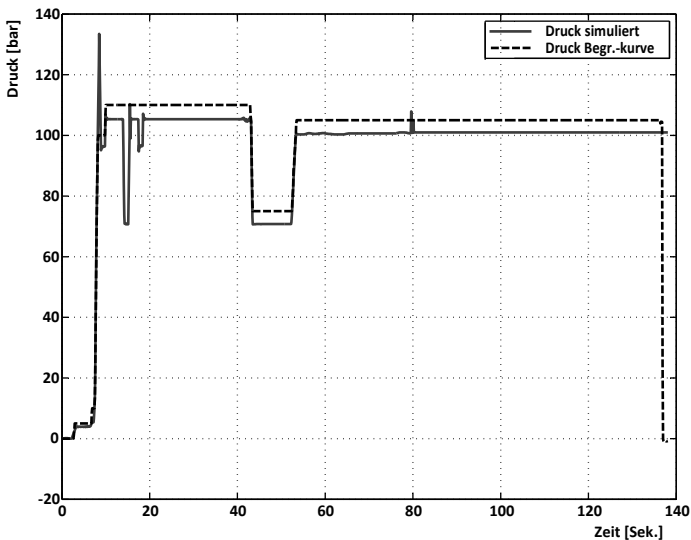


Abb. 5.4.: Begrenzungskurve des Drucks zur Meldung an die Baggersteuerung (in 5-bar-Schritten aufgerundet)

die Begrenzungskurve mit einer 5-bar-Schrittweite eingestellt.

Durch die kontinuierliche Vorgabe des benötigten Drucks entsteht aus einem Konstantdrucksystem ein Konstantdrucksystem mit variablem Systemdruck.

Ermittlung der Begrenzungskurven

Die Erstellung der Begrenzungskurve in Abhängigkeit der hydraulischen Funktionen dient dazu, die Anforderungen des Anbaugeräts so an den Bagger zu melden, dass einerseits das Gerät nicht in Unterversorgung gerät und andererseits die Verlustleistung gering gehalten wird. Hierbei wird im Idealfall zu jeder Zeit genau der Druck zur Verfügung gestellt, der dem

höchsten Verbraucherdruck zuzüglich der Druckverluste durch Ventile und Leitungen entspricht. In der Praxis wird hier entweder eine gewisse Sicherheitsreserve vorzuhalten sein, oder die Steuerung des Anbaugeräts erkennt eine drohende Unterversorgung und erhöht die Druckanforderung. Hierbei ist es nicht zweckmäßig, jede Druckpulsation nachzufahren, sondern den Prozess in Bereiche mit quasi konstantem Druck einzuteilen (vgl. Abbildung 5.4). Kurzzeitige Überschreitungen der Begrenzungskurve durch Druckimpulse sind hier unkritisch, da die Trägheiten des mechanischen Systems diese überbrücken. Zu einer Geschwindigkeitsabweichung kam es in den Versuchen nicht.

Die Erstellung der Begrenzungskurve erfolgt durch Überlagerung der hydraulischen Bedarfe der einzelnen Verbraucher, unter der Voraussetzung, dass deren Last im Voraus bekannt ist. Die Bedarfe können entweder berechnet werden, oder basieren auf Messungen, deren Ergebnisse in der Anbaugerätesteuerung einprogrammiert werden.

Es ist sicherzustellen, dass der so bestimmte Druck nicht unterhalb des benötigten Drucks liegt. **Abbildung 5.5** zeigt eine Begrenzungskurvenschar für verschiedene Differenzdrücke zwischen benötigtem und angefordertem Druck.

Abgrenzung zu Load-Sensing-Systemen

Bei Load-Sensing-Systemen wird über eine Ventilschaltung der Druck am höchstbelasteten Verbraucher über eine hydraulische Signalleitung dem Pumpenregler, dem so genannten Load-Sensing-Regler, gemeldet. Dieser regelt damit den Pumpenausgangsdruck auf den gemeldeten Lastdruck zuzüglich einer gewissen Druckdifferenz. Diese wird benötigt, um den Regelkreis aufrecht zu halten. Die Höhe der Druckdifferenz bestimmt auch das dynamische Verhalten des Regelkreises. Eine zu niedrige Druckdifferenz sorgt für ein unvorteilhaftes Regelverhalten. Diese systembedingte Druckdifferenz ist eine permanente Energiesenke, die den Energiebedarf

5. Potentiale der Anbaugerätesteuerung

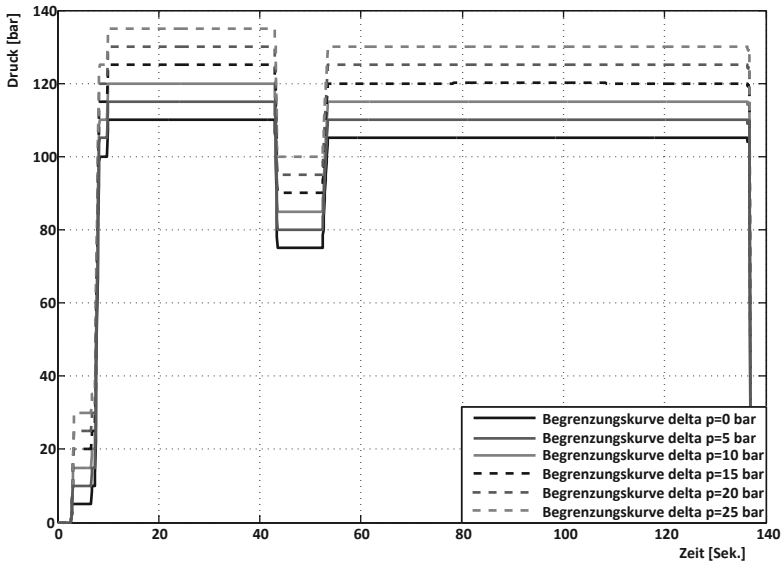


Abb. 5.5.: Begrenzungskurvenschar des Drucks bei verschiedenen Differenzdruckstufen

von Load-Sensing-Systemen erhöht und den Wirkungsgrad reduziert. Im Gegensatz zum Load-Sensing-System wird bei dem hier vorgestellten System mit variablem Druck der Systemdruck von der Steuerung vorgegeben und über den Pumpenregler eingestellt. Dies bietet die Möglichkeit, die Druckdifferenz zwischen benötigtem Druck und Systemdruck anzupassen und zu minimieren, beispielsweise in Stand-By-Phasen, in denen keine hydraulische Leistung benötigt wird. Dies bietet einerseits energetische Vorteile, andererseits aber auch neue Möglichkeiten der Steuerung und ggf. auch eine Verbesserung des dynamischen Verhaltens im Gegensatz zu Load-Sensing-Systemen. Lange Hydraulikleitungen wirken sich negativ

auf das Systemverhalten aus, da sie längere Laufzeiten der Drucksignale verursachen und das System schwingungsanfälliger machen. Hier muss im Einzelfall geprüft werden, welche minimale Druckdifferenz realisiert werden kann, ohne die Systemstabilität zu gefährden.

Bestimmung des Energiebedarfs

Ein Vergleichsmerkmal verschiedener Hydrauliksysteme und Betriebsstrategien ist der Energiebedarf für einen reproduzierbaren Vergleichszyklus. Als Zyklus wird hier ein repräsentativer Arbeitszyklus mit der mobilen Reibschweißmaschine herangezogen. Hierzu wird zunächst aus dem Produkt aus Volumenstrom und anstehendem Druck die bereitgestellte hydraulische Leistung bestimmt. **Abbildung 5.6** zeigt den Leistungsverlauf für verschiedene Differenzdruckwerte sowie für zwei Konstantdrucksysteme mit 200 und 250 bar. Beide Drücke der Konstantdrucksysteme entsprechen gängigen Werten, wobei 200 bar bei Traktoren und deren Anbaugeräten üblich ist. Konstantdrucksysteme werden auf Baggern nicht eingesetzt. Allerdings werden sie in anderen Bereichen häufig eingesetzt. An dieser Stelle dienen sie lediglich dem Vergleich. Man sollte sich dabei bewusst sein, dass der Lastzyklus der Reibschweißmaschine durch die stark schwankenden Drücke für Konstantdrucksysteme nachteilig ist. Da LS-Systeme prinzipbedingt eine konstante Druckdifferenz zwischen System- und höchstem Lastdruck aufrecht erhalten und die Lastanforderung für alle Systeme identisch ist, entsprechen sie in ihrem Volumenstrom und Systemdruck sowie ihrem Leistungsbedarf dem System mit variablem Druck und konstanter Druckdifferenz (vgl. Abschnitt 5.2.2 Abgrenzung zu Load-Sensing-Systemen). Gängige LS-Druckdifferenzen liegen zwischen 20 und 25 bar. Somit sind die Energiebedarfe und -Verläufe der LS-Systeme mit denen der Konstantdrucksysteme mit variablem Systemdruck bei Druckdifferenzen von 20 und 25 bar identisch.

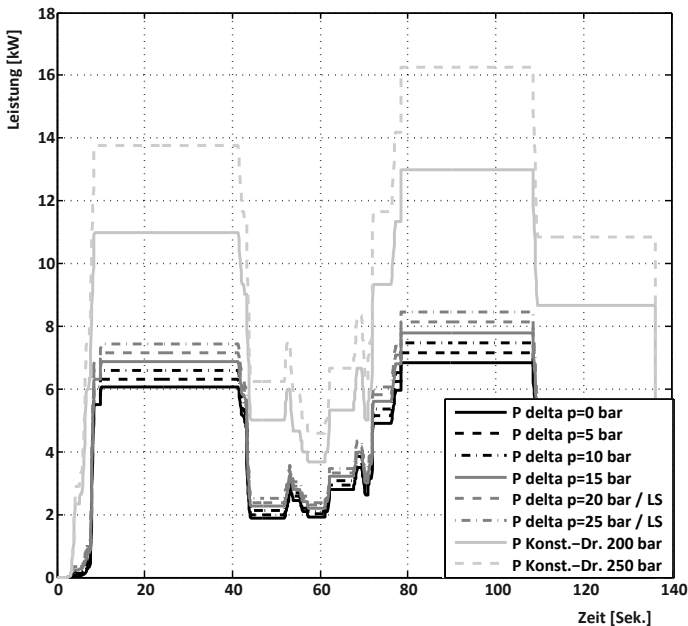


Abb. 5.6.: Leistungskurven bei verschiedenen Differenzdruckstufen

Es ist hieraus ersichtlich, dass der Leistungsbedarf um so höher ist, je höher der erzeugte Druck ist. Dementsprechend hoch ist die benötigte Leistung bei den beiden Konstantdrucksystemen. Es ist anzumerken, dass sich der Leistungsbedarf der Konstantdrucksysteme im Vergleich zu denen der variablen Druckversorgung reduziert, wenn ein Arbeitszyklus mit einem höheren benötigten Druckniveau herangezogen wird. Dennoch ist hieraus ersichtlich, dass der Leistungsbedarf der Konstantdrucksysteme nur dann einen energetischen Vorteil bieten, wenn der benötigte Druck weitgehend dem voreingestellten entspricht, oder der Differenzdruck bei den variablen Drucksystemen so hoch ausfällt, dass der Vorteil wieder ausgeglichen oder

System	Energiebedarf [kWs]
variabler Druck, $\Delta p = 0$ bar	646,1
variabler Druck, $\Delta p = 5$ bar	677,1
variabler Druck, $\Delta p = 10$ bar	708,2
variabler Druck, $\Delta p = 15$ bar	739,4
variabler Druck / LS, $\Delta p = 20$ bar	770,5
variabler Druck / LS, $\Delta p = 25$ bar	801,6
Konstantdruck, $\Delta p = 200$ bar	1.245,5
Konstantdruck, $\Delta p = 250$ bar	1.556,9

Tab. 5.1.: Energiebedarf je Schweißvorgang der verschiedenen Systeme

gar aufgehoben wird. Eine Möglichkeit, den benötigten Druck zu erhöhen ist der Einsatz von Verstellmotoren. Durch Reduktion des Schluckvolumens steigt der benötigte Druck, so dass der Systemdruck weniger abgedrosselt werden muss. Diese Möglichkeit besteht bei Zylindern auf Grund ihres konstanten Querschnitts dagegen nicht.

Abbildung 5.7 zeigt die Verläufe des Energiebedarfs der einzelnen Systeme. Die Verläufe ähneln sich stark, steigen jedoch mit steigender Druckdifferenz stärker an. Die Konstantdrucksysteme weisen für diese Beispielanwendung den größten Energiebedarf auf. **Tabelle 5.1** fasst die Energiebedarfe noch einmal zusammen.

LS-Systeme erhalten eine konstante Druckdifferenz zwischen gemeldetem und bereitgestelltem Druck aufrecht. Dies entspricht dem Verhalten der vorgestellten Systeme mit variablem Druck. Der Unterschied besteht darin, dass das LS-System auf veränderte Lastanforderungen reagiert, sobald diese eintreten. Die Systeme mit variablem Druck dagegen reagieren auf Grund der geänderten Anforderungen, die von der Steuerung vorgegeben werden. Im Gegensatz zu den LS-Systemen können diese Systeme aber in inaktiven Phasen auf null bar und somit in den passiven Modus versetzt werden. LS-Systeme halten die Druckdifferenz auch bei der Nullforderung. Da der hier verwendete Reibschweißzyklus keine Leerlaufzeiten aufweist, besteht in den Leistungs- und Energieverläufen keine Unterschiede. Je nach

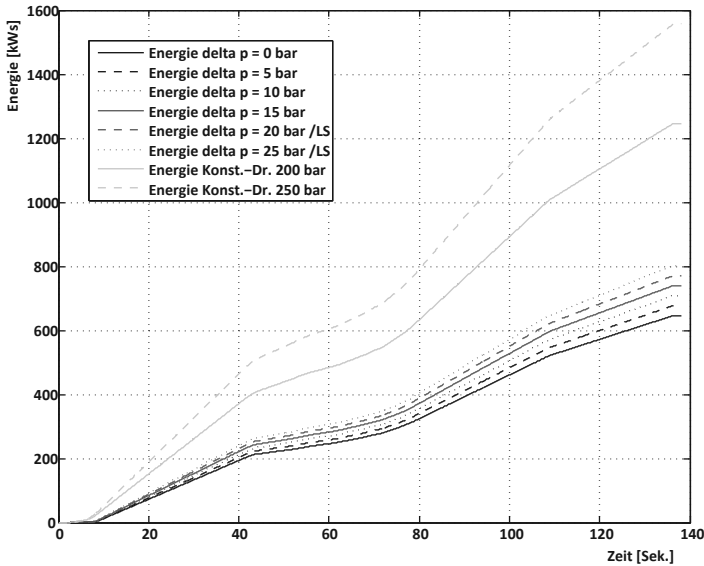


Abb. 5.7.: Energiebedarfskurven der verschiedenen Druckdifferenzstufen

angenommener LS-Druckdifferenz entsprechen also die Leistungsverläufe dem entsprechenden System variablen Drucks und sind in Abbildung 5.6 dargestellt.

In **Tabelle 5.2** werden die Energiemehrbedarfe der verschiedenen Systeme gegenüber gestellt und die Differenzen relativ zueinander zusammengefasst. Die benötigten Energiemengen weichen teilweise erheblich voneinander ab. In der Gruppe der Systeme mit variablem Druck ist dies darin begründet, dass mit zunehmender Druckdifferenz auch die aufgebrauchte hydraulische Leistung steigt, obwohl diese für den Arbeitsprozess selbst nicht notwendig ist, sondern lediglich für das Systemverhalten positiv ist und eine gewisse Leistungsreserve bei Leistungsspitzen darstellt.

5.2. Untersuchung der Einsparpotentiale für das Rohrschweißgerät

Δp	Variabler Druck / LS					Konstantdruck	
	5 bar	10 bar	15 bar	20 bar	25 bar	200 bar	250 bar
0 bar	4,8%	9,6%	14,4%	19,3%	24,1%	92,8%	141,0%
5 bar	-	4,6%	9,2%	13,8%	18,4%	83,9%	129,9%
10 bar	-	-	4,4%	8,8%	13,2%	75,9%	119,0%
15 bar	-	-	-	4,2%	8,4%	68,4%	110,6%
20 bar	-	-	-	-	4,0%	61,6%	102,1%
25 bar	-	-	-	-	-	55,4%	94,2%
200 bar	-	-	-	-	-	-	25,0%

Tab. 5.2.: Mehrenergiebedarf der verschiedenen Systeme im Vergleich

Das System mit variablem Druck und einer Druckdifferenz von 0 bar stellt das Referenzsystem dar und weist einen Energiebedarf von 646,1 kW auf. Die Konstantdrucksysteme weisen bei dem hier verwendeten Zyklus die höchsten Energiebedarfe auf. Das 200 bar Konstantdrucksystem benötigt 1245,5 kW, bzw. 92,8% mehr Energie, das 250 bar Konstantdrucksystem 1556,9 kW bzw. 141% mehr Energie als das Referenzsystem. Dies liegt daran, dass sie prinzipbedingt den Systemdruck stets aufrecht erhalten, auch wenn für den Arbeitsprozess ein niedrigerer Druck benötigt wird. Je näher der für den Arbeitsprozess benötigte Druck an den Systemdruck liegt, desto effizienter werden die Konstantdrucksysteme. Im Vergleich zu Systemen mit variablem Druck können sie aber energetisch nur Vorteile bieten, wenn der geforderte Druck so hoch liegt, dass dieser zuzüglich der Druckdifferenz des variablen Drucksystems über dem Systemdruck des betreffenden Konstantdrucksystems liegt.

Dies ist jedoch bei dem hier zugrunde liegenden Zyklus mit variierender Druckanforderung nicht der Fall. Auch durch Anpassung des Maximaldrucks ist mit dem System Reibschweißmaschine die dauerhafte Ausnutzung des maximalen Systemdrucks nicht darstellbar, weswegen der Betrieb an einem Konstantdrucksystem weniger energieeffizient ist als der Betrieb an Systemen mit variablem Druck.

Load-Sensing-Systeme benötigen bei diesem Beispielzyklus mit 770,5 kW bzw. 801,6 kW bei 20 bar bzw. 25 bar LS-Druckdifferenz etwas mehr Energie als die Systeme mit variablem Druck und geringerer Druckdifferenz, aber weisen dennoch einen großen Unterschied gegenüber der Konstantdrucksysteme auf. Im Vergleich zum minimalen Energiebedarf liegt dieser aber dennoch 19,3% bzw. 24,1% über diesem.

Insgesamt stellt das vorgestellte System einer Baggernbaugerätesteuerung durch die zahlreichen Möglichkeiten und Vorteile ein vielversprechendes Konzept dar und bietet darüber hinaus auch die Möglichkeit der Energieeinsparung.

6. Zusammenfassung

Bagger sind vielseitig einsetzbare Arbeitsmaschinen, die durch die Adaption von verschiedenen Anbaugeräten für ein breites Einsatzspektrum Verwendung finden. Hierbei werden passive Anbaugeräte wie einfache Löffel und aktive Anbaugeräte mit hydraulischen Zusatzfunktionen unterschieden. Bagger verfügen je nach Ausstattung über mehrere Hydraulikkreise zur Ansteuerung der hydraulischen Funktionen von Anbaugeräten. Je umfangreicher die hydraulischen Funktionen eines Anbaugeräts sind, desto komplexer wird auch seine Bedienung durch den Maschinenführer. Darüber hinaus gibt es Anbaugeräte, die in ihrer Funktionsanzahl und der Regelung der Funktionen Anforderungen stellen, die der Mensch nicht mehr erfüllen kann. Solche Anbaugeräte sind beispielsweise:

- Rohrschweißgerät
- Rohrbettfertiger
- Kraftwerkfräse
- Ballenstecher
- Holzvollernteraggregate

In diesem Fall ist die Unterstützung geeigneter elektronischer Steuerungsrechner erforderlich. Bisher bringt jedes Anbaugerät, das mehr als die hydraulischen Standardfunktionen benötigt, eine eigene elektronische Steuerung mit. Dies mindert die Flexibilität bezüglich der Trägermaschine und sorgt bei Verwendung mehrerer solcher Anbaugeräte für Unübersichtlichkeit im Fahrerhaus. Daher ist es zweckmäßig, eine standardisierte und universelle Anbaugerätesteuerung zu entwickeln, welche die Steuerungs- und

Regelungsprogramme der Anbaugeräte ausführt. Die Vorteile einer solchen standardisierten Schnittstelle sind unter anderem:

- Effizienzsteigerung durch schnellen Wechsel der Anbaugeräte durch die einheitliche Steuerung
- Effizienzsteigerung durch Kompatibilität → Fuhrparkflexibilität: Einsatz eines Anbaugeräts auf mehreren Trägermaschinen
- Kommunikation zwischen Anbaugerät und Trägermaschine wird möglich → Befehlsaustausch und Kontrolle
- Energieeinsparpotentiale bei Kommunikation mit der Baggersteuerung
- Ansteuerung und Interaktion durch und mit dem Fahrer können flexibler und individueller gestaltet werden
- verbesserte Ergonomie
- Datenaustausch mit externen Systemen zur Abstimmung und Protokollierung
- Implementierung von Betriebstrategien
- Funktion zur Datenerfassung und Auswertung
- Informationsbereitstellung
- Kommunikation mit anderen Einheiten
- Anschluss von weiterer Bedienhardware wie Tastatur, Bedienhebel etc.

Am Beispiel des Rohrschweißgeräts wurde gezeigt, dass neben den funktionalen Möglichkeiten der standardisierten Anbaugerätesteuerung auch eine Energieeinsparung möglich ist, wenn der Arbeitszyklus dies erlaubt und die Anbaugerätesteuerung Befehle an die Baggersteuerung senden darf. Im konkreten Fall wurde gezeigt, dass bei bekanntem Arbeitszyklus und Druckverlauf - was beim Rohrschweißgerät gegeben ist - dem Bagger der benötigte Druck mitgeteilt werden kann. Dieser stellt dann den Druck bereit. Bei hinreichender Kenntnis kann die zur Systemstabilität benötigte Druckdifferenz klein gehalten werden, bzw. sogar vermieden werden, zu-

mal auch die Möglichkeit der Nachregelung besteht. So erhält man ein System variablen Drucks, das die Druckvorgabe von der Anbaugerätesteuerung erhält. Diese Druckdifferenz ist bei Load-Sensing-Systemen für die Systemstabilität und Reaktionsfähigkeit auf Lastschwankungen notwendig, bewirken aber systembedingte Verluste durch den um ca. 20-25 bar erhöhten Systemdruck, der für die reine Funktion des Anbaugeräts nicht direkt benötigt wird. Somit ist das System mit variabler Druckvorgabe durch die Anbaugerätesteuerung energieeffizienter, sobald die Differenz zwischen benötigtem Druck und Systemdruck unterhalb der LS-Druckdifferenz liegt. Bei dem zu Grunde liegenden Zyklus der Reibschweißmaschine weisen Konstantdrucksysteme im Vergleich den höchsten Energiebedarf auf, da diese stets den maximalen Systemdruck bereitstellen. Dieser Nachteil kann zwar reduziert werden, wenn der Systemdruck auf ein auf die Anwendung abgestimmtes Druckniveau reduziert wird. Dies reicht bei dem hier zugrunde liegenden Zyklen mit schwankenden benötigten Drücken nicht aus, um einen geringeren Energiebedarf als die variablen Drucksysteme zu erzielen. Bei anderen Lastzyklen jedoch kann auch das Konstantdrucksystem Vorteile bringen.

Somit ergeben sich Energieeinsparpotentiale, die in ihrer Höhe jedoch stark vom Anwendungsfall abhängig sind. Zusammen mit den zahlreichen weiteren Vorteilen wie Flexibilität, Effizienz und Bedienerfreundlichkeit sprechen die Ergebnisse für die Umsetzung einer solchen Steuerung.

Die nächsten Schritte zur Umsetzung dieses vielversprechenden Konzepts ist die Schaffung eines Standards und Akzeptanz durch die Maschinen- und Anbaugerätehersteller. Dass dies nicht immer einfach ist, zeigt das Beispiel des ISOBUS-Standards in der Landtechnik. An diesem Beispiel ist jedoch auch der Erfolgsweg eines solchen Systems belegt, denn der ISOBUS ist heute quasi auf jedem Traktor installiert. Dies sollte als Motivation für die Implementierung einer standardisierten Anbaugerätesteuerung auf dem Bagger dienen.

A. Appendix

A.1. Detaillierte Darstellung des Simulationsmodells

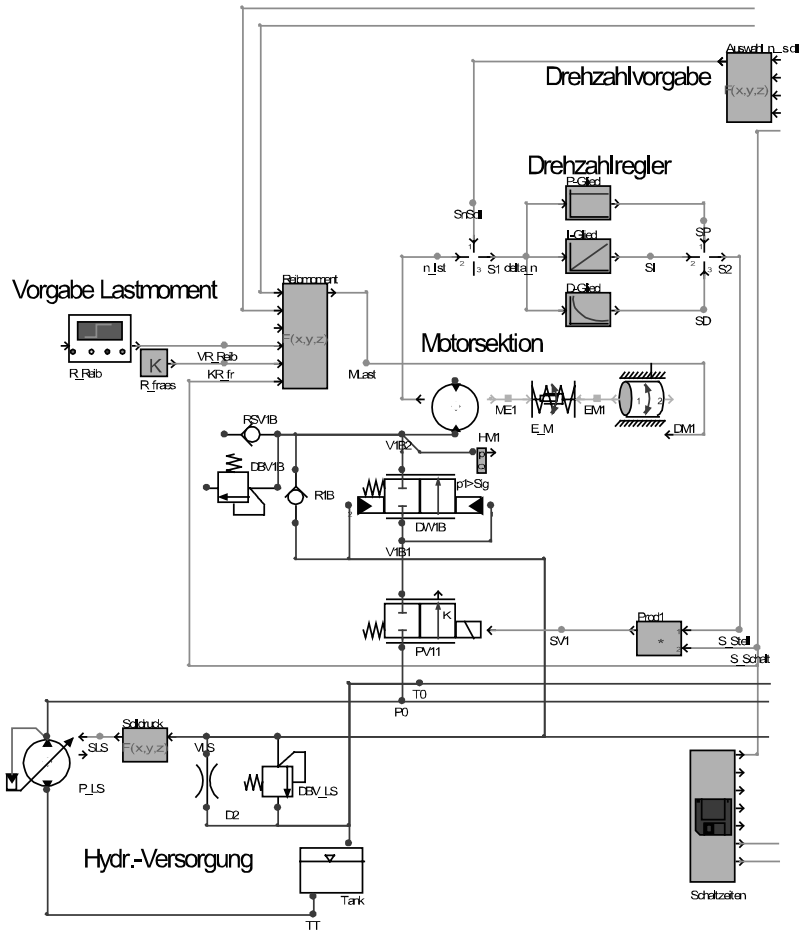


Abb. A.1.: Simulationsmodell: Druckversorgung, Ventilsektion Hydraulikmotor, Lastvorgabe und Drehzahlregler

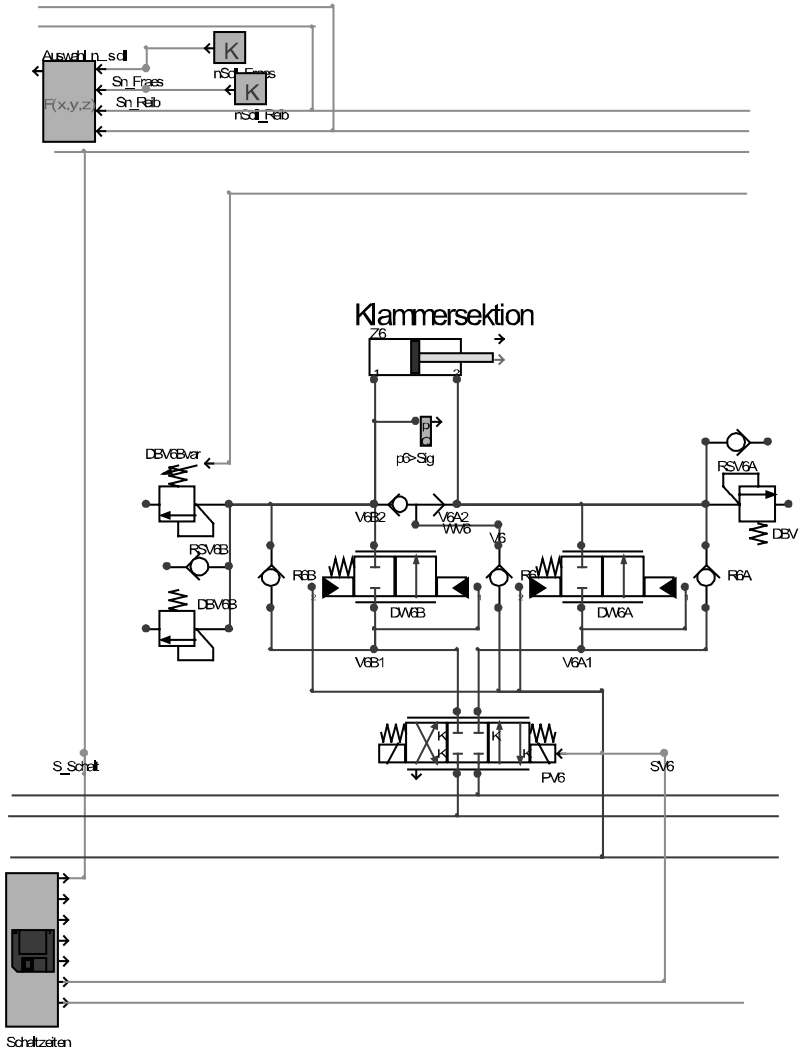


Abb. A.2.: Simulationsmodell: Ventilsektion Klammern und Vorschub

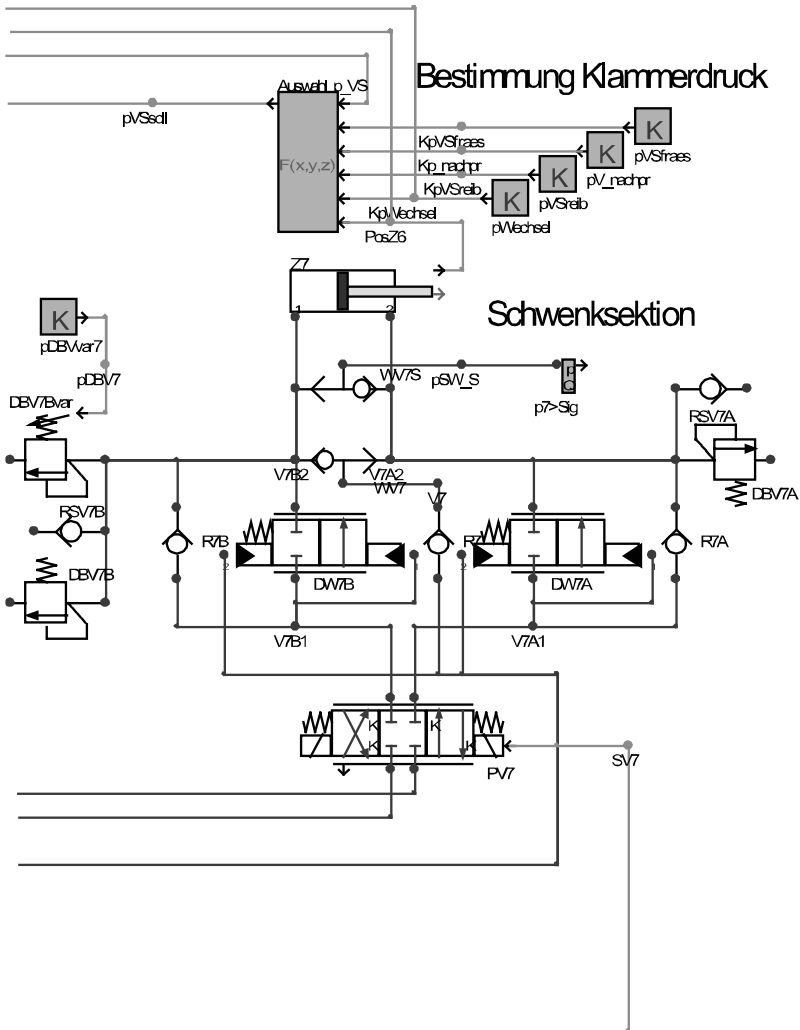


Abb. A.3.: Simulationsmodell: Ventilsection Schwenkeinheit und Klammerdruckbestimmung

Abbildungsverzeichnis

2.1	Struktur der offenen Steuerkette (in Anlehnung an DIN EN 60027, Anhang A)	7
2.2	Struktur eines geschlossenen Regelkreises (in Anlehnung an DIN EN 60027, Anhang A)	8
2.3	Grundlegender Aufbau eines Baggers	10
2.4	Vergleich Hoch- und Tieflöffelbagger	13
2.5	Stark vereinfachter, beispielhafter Aufbau des Hydrauliksystems eines Baggers Typ IHI 55J (in Anlehnung an den Hydraulikschaltplan des Reparaturhandbuchs IHI 55J)	15
2.6	Prinzip hydraulischer Schaltungen mit offener (links) und geschlossener Mittelstellung (rechts)	18
2.7	Prinzipieller Aufbau eines Load-Sensing-Systems mit 2 Verbrauchern	20
2.8	Schaltungsprinzip Load-Sensing-System mit vorgeschalteter (links) und nachgeschalteter Druckwaage (rechts), (HAWE-Hydraulik (2014))	21
2.9	Prinzip Negative und Positive Flow Control	23
3.1	Klassierung Baggeranbaugeräte	30
3.2	Konzeptdarstellung der Anbaugerätesteuerung mit Peripheriegeräten und Schnittstelle	38
4.1	Prinzip Rohrbettfertiger: mögliche Hohlräume bei konventioneller Verfüllung (links), Verdichtungsprozess (Mitte), neues Rohrbett (rechts)	51

4.2	Anbaugerät zur definierten Abtragung von Stahlbeton	52
4.3	Übersicht über den Reibschweißprozess und die wichtigsten Prozessgrößen	54
4.4	Beispielhafte Darstellung des Einflusses der Reibkraft und der Reibgeschwindigkeit auf den Schweißprozess. Die Reibzeit ist nicht dargestellt. (Schmidt (1982))	56
4.5	Prinzip der Reibschweißmaschine (nach Mauz & Riexinger (2011))	59
4.6	Schwenkeinheit mit Rohrklammer (Mitte unten) und Fräseinrichtung (rechts)	60
4.7	Reduzierte Darstellung des Ventilblocks (zu Gunsten der Übersichtlichkeit wurden nur zwei Ventilsektionen dargestellt)	62
5.1	Darstellung des Simulationsmodells (zu Gunsten der Übersichtlichkeit reduziert, vgl. Abbildungen A.1, A.2 u. A.3) .	76
5.2	Gemessener und simulierter Volumenstrom über einen Arbeitszyklus	78
5.3	Begrenzungskurve des Volumenstrombedarfs zur Meldung an die Baggersteuerung (in 1 L/min-Schritten aufgerundet) und um Lastspitzen bereinigt	79
5.4	Begrenzungskurve des Drucks zur Meldung an die Baggersteuerung (in 5-bar-Schritten aufgerundet)	80
5.5	Begrenzungskurvenschar des Drucks bei verschiedenen Differenzdruckstufen	82
5.6	Leistungskurven bei verschiedenen Differenzdruckstufen .	84
5.7	Energiebedarfskurven der verschiedenen Druckdifferenzstufen	86
A.1	Simulationsmodell: Druckversorgung, Ventilsektion Hydraulikmotor, Lastvorgabe und Drehzahlregler	94
A.2	Simulationsmodell: Ventilsektion Klammern und Vorschub	95

A.3 Simulationsmodell: Ventilsektion Schwenkeinheit und Klammerdruckbestimmung	96
---	----

Tabellenverzeichnis

3.1	Befehlsübersicht von der Anbaugerätsteuerung an die Baggersteuerung	41
5.1	Energiebedarf je Schweißvorgang der verschiedenen Systeme	85
5.2	Mehrenergiebedarf der verschiedenen Systeme im Vergleich	87

Literatur

- Backé, W. (1997). Entwicklung der Hydraulik für mobile Anwendungen. *Ölhydraulik und Pneumatik* (41), S. 214ff.
- Baldinger, F. (2011). Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung einer Rohrbettung. Patent EP 2388377 A2.
- Baupraxiszeitung (2013). Anbaugeräte sorgen für steigende Einsatzmöglichkeiten und Auslastung. *Baupraxiszeitung* (3), S. 40f.
- Caterpillar (2013). Hydraulikbagger 336E L/LN H. Produktprospekt.
- Cohrs, H.-H. (2004). *Die etwas anderen Bagger - Kontinuierlich arbeitende Abbau- und Lademaschinen* (1 Aufl.). Podszun Verlag Brilon.
- Cohrs, H. H. (2012). Technisch ausgefeilte Mobilbagger lösen inzwischen auch Spezialaufgaben. *Baupraxiszeitung* (8), S. 15f.
- Cohrs, H.-H., Grube und Holstein (2003). Schnellwechsler bestimmen Leistung und Produktivität. *Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau* (3), S. 18ff.
- Cohrs, H.-H., Grube und Holstein (2005). Der Bagger wird zur Spezialmaschine. *Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau* (12), S. 14ff.
- Cohrs, H.-H., Grube und Holstein (2008). Marktübersicht Mobilbagger. *Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau* (7-8), S. 6ff.
- Damcon (2011). Ballenstecher für Montage an (Mini)Kräne. Produktübersicht.
- DBB (2012). Umschlag auf Augenhöhe. *Deutsches Baublatt* (364), S.11.

- Definition (2008). DIN EN 60027-6 Formelzeichen für die Elektrotechnik- Teil 6: Steuerungs- und Regelungstechnik. Deutsches Institut für Normung.
- Dengler, P., M.Geimer und R. Zahoransky (2011). Potential of Reduced Fuel Consumption of Diesel-Electric APUs at Variable Speed in Mobile Applications. 10th International Conference on Engines & Vehicles, Capri, Napoli, Italy.
- Djurovic, M. (2007). *Energiesparende Antriebssysteme für die Arbeitshydraulik mobiler Arbeitsmaschinen Elektrohydraulisches Flow Matching* (1 Aufl.). Shaker Verlag.
- Eymer, W. (2006). *Grundlagen der Erdbewegung* (2 Aufl.). Kirschbaum Verlag, Bonn.
- Fedde, T. (2007). *Elektrohydraulische Bedarfsstromsysteme am Beispiel eines Traktors* (1 Aufl.). Shaker Verlag.
- Finzel, R. (2010). *Elektrohydraulische Steuerungssysteme für mobile Arbeitsmaschinen* (1 Aufl.). Shaker Verlag.
- Frehsel, H. und P. Tappe (1988). *DVS Berichte - Schweißen und Kleben von Kunststoffen* (1 Aufl.). DVS Verlag GmbH Düsseldorf.
- HAWE-Hydraulik (2014). HAWE-Hydraulik - Fluidtechnik Lexikon, Begriff: Load-Sensing-System. www.hawe.de.
- Hieronimus, P., L. Autermann, R. Hofmann, H. Nissen und G. Henninger (2008). Die Umsetzung von ISOBUS in die Praxis - Eine Herausforderung für die Branche. 5. Kolloquium Mobilhydraulik.
- Hitachi (2012). ZH200 Hybrid: The new generation. Produktdatenblatt.
- Holtmann, W. und C. Hühne (2012). Elektronik ist Schlüsseltechnologie. *Profi Spezial Dezember 2012* (12), S. 8f.
- Hörner, R. und H. Griepentrog (2012). Alles muss zusammenspielen. *Profi Spezial Dezember 2012* (12), S. 6f.

- Huddelmaier, K. (2009). *Bohrgeräte und Hydroseilbagger* (1 Aufl.). Ernst, Berlin.
- Juhasz, T., D. Schmidt, L. Kiekbusch, U. Schmucker und K. Berns (2012). Modellierung und verteilte Simulation eines autonomen Mobilbaggers. Tagungsband Fachabteilung Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben Technischer Systeme.
- Jungmann, V. und J. Seiler (2008). ISOBUS in der Kommunaltechnik Gerätebedienung und Betriebsdatenerfassung. 5. Kolloquium Mobilhydraulik.
- Kesla Oyj Finnland (2014). *Harvesterausrüstung für die Bagger*. Kesla Oyj Finnland.
- König, H. (2011). *Maschinen im Baubetrieb: Grundlagen und Anwendungen* (3 Aufl.). Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- Kotte, G. (2000). *Baumaschinen - Auswahl und Beschaffung* (1 Aufl.). Patzer Verlag Hannover.
- Kreso, B. (2012). Vorteile auf der Hand. *Tiefbau, Hochbau, Ingenieurbau, Straßenbau* (4), S. 74–77.
- Kunze, G., H. Göhring und K. Jacob (2002). *Baumaschinen - Erdbau- und Tagebaumaschinen* (1 Aufl.). Vieweg Verlag Braunschweig / Wiesbaden.
- Liebherr (2010). LiDAT - Das umfassende Fuhrpark- und Flottenmanagement von Liebherr. Produktbeschreibung.
- Liebherr (2013). Mobilbagger A928 Litronic. Produktübersicht.
- Lunze, J. (2006). *Regelungstechnik 1* (5 Aufl.). Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Mauz, H. und Riexinger (2011). Verfahren und Vorrichtung zum Verschweißen von Kunststoffrohren gleichen Durchmessers. Patent DE 10 2011 012 198 A1.

- Michel, P. (1999). *Schweißverfahren in der Kunststoffverarbeitung* (1 Aufl.). DVS Verlag GmbH Düsseldorf.
- Nachschlagewerk (2013). IEC 151-11 Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
- Neitzert, W. A. (1972). *Schweißen und Heißsiegeln von Kunststoffen* (2 Aufl.). Zechner und Huethig Verlag.
- Norm (1974). DIN 16960 - Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen. Deutsches Institut für Normung.
- Norm (1977). DIN1910 - Schweißen von Kunststoffen. Deutsches Institut für Normung.
- Norm (1994). Straßenfahrzeuge. Langsam laufende serielle datenübermittlung. International Organization for Standardization.
- Norm (2000). DIN EN ISO 15620 - Reibschweißen von metallischen Werkstoffen. Deutsches Institut für Normung.
- Norm (2005). DIN EN 61508 - Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme. Deutsches Institut für Normung.
- Norm (2008). ISO 11783 - Traktoren und Maschinen für Landwirtschaft und Forsten - Serielle Steuerung und Kommunikationsnetzwerk. International Organization for Standardization.
- Norm (2009). DIN IEC 60050-351 - Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik. Deutsches Institut für Normung.
- Pierrat, C. (2013). Liebherr-Raupenbagger R 9XX concept: Technologieträger für elektrische Hybridantriebe. Bauma 2013 - Pressemitteilung, Liebherr-France SAS.
- Rabsahl, R. (1994). Verstellbares Gegengewicht für eine Baumaschine und Hydraulikbagger. Patentanmeldung.

- Reinhardt, Gentes, Weidemann, Geimer, Heise und Edlmann (2011). Ein neues Konzept zum gezielten Abtrag von Stahlbetonstrukturen. JTK 2011, Jahrestagung Kerntechnik.
- Rexroth (2012). LUDV-Steuerblock in Monoblock-/Scheibenbauweise M6-15. Produktdatenblatt.
- Rixner, S. (2009). Anbaugeräte optimieren die Prozesskette. *Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau* (5), S. 36ff.
- Schmidt, J. (1982). *Beitrag zur Prozeßsteuerung beim Reibschweißen* (1 Aufl.). Aachen, Technische Hochschule, Dissertation.
- Schwab, C. und J. Föllner (2013). Messgenauigkeit von Ernteaggregaten. *Forst & Technik* (8), S. 30ff.
- Seifried, W. (2011). Der Mobilbagger als energieoptimierter Geräteträger. *Bauportal* (11), S. 39ff.
- Späth, R. und C. Holländer (2008). Moderne Hydrauliksysteme für Raupenbagger - Anforderungen und Lösungen. 5. Kolloquium Mobilhydraulik.
- StVZO (2012). Straßenverkehrszulassungsordnung. Gesetzestext.
- TOPCON (2010). Modernste Höhen- und Neigungsanzeige für Bagger. Produktbeschreibung.
- Tsuji, M. und T. Teranaka (2008). Introduction of PC200-8 Hybrid Hydraulic Excavators. Forschungsbericht, Komatsu.
- Uebbing, M. (1998). *Fügen von Kunststoffen* (1 Aufl.), Band 136. DVS Verlag GmbH Düsseldorf.
- von Hoyningen-Huene, M. und M. Baldinger (2010). Tractor-Implement-Automation and its application to a tractor-loader wagon combination. 2nd International Conference on Machine Control and Guidance.

- Weidemann, Geimer, Gentes, Heise und Edelmann (2011). Confined precise removal of reinforced concrete. Kontec 2011, Internationales Symposium "Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle".
- Weidemann, R., Geimer, Reinhardt, Gentes, Heise und Edelmann (2011). Confined precise removal of reinforced concrete. 10. Internationales Symposium "Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle".
- Will, D., N. Gebhardt und H. Ströhl (2007). *Hydraulik - Grundlagen, Komponenten, Schaltungen* (3 Aufl.). Springer Verlag Berlin Heidelberg.

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Die Bände sind unter www.ksp.kit.edu als PDF frei verfügbar
oder als Druckausgabe bestellbar.

- Band 1** Urs Wiesel
Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsparung im schweren Nutzfahrzeug. 2010
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2** Andreas Huber
Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrentriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladers. 2010
ISBN 978-3-86644-564-2
- Band 3** Maurice Bliesener
Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen. Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement. 2010
ISBN 978-3-86644-536-9
- Band 4** Manuel Boog
Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslasterfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten. 2011
ISBN 978-3-86644-600-7
- Band 5** Christian Kraft
Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich. 2011
ISBN 978-3-86644-607-6
- Band 6** Lars Völker
Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation. 2011
ISBN 978-3-86644-611-3
- Band 7** 3. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 17. Februar 2011, Karlsruhe. 2011
ISBN 978-3-86644-599-4

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 8** Vladimir Iliev
Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs. 2011
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz
Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk. 2011
ISBN 978-3-86644-701-1
- Band 10** Phillip Thiebes
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. 2012
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler
Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis. 2012
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies
Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen. 2012
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber
Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz. 2012
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik.**
27./28. September 2012 in Karlsruhe. 2012
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** **4. Fachtagung**
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen
20. Februar 2013, Karlsruhe. 2013
ISBN 978-3-86644-970-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 16** Hans-Joachim Unrau
Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen. 2013
ISBN 978-3-86644-983-1
- Band 17** Xi Zhang
Untersuchung und Entwicklung verschiedener Spurführungsansätze für Offroad-Fahrzeuge mit Deichselverbindung. 2013
ISBN 978-3-7315-0005-6
- Band 18** Stefanie Grollius
Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells. 2013
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke
Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. 2013
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr
Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch. 2014
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova
Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme. 2014
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt
Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. 2014
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann
Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System. 2014
ISBN 978-3-7315-0187-9

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 24** Roman Weidemann
Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger. 2014
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei
Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. 2014
ISBN 978-3-7315-0232-6
- Band 26** David Schmitz
Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren. 2014
ISBN 978-3-7315-0264-7
- Band 27** Christian Schwab
Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte. 2014
ISBN 978-3-7315-0281-4

Bagger sind vielseitig einsetzbare Baumaschinen, die mit entsprechenden Anbaugeräten eine Vielzahl von Arbeitsaufgaben erfüllen können. Diese reichen von einfachen Grab- und Reißprozessen bis hin zu komplizierteren Aufgaben.

Wird die Anzahl der hydraulischen Funktionen des Anbaugeräts jedoch zu groß, oder erfordern sie eine genaue Regelung, so ist eine direkte Ansteuerung über die Bedienelemente des Baggers nicht mehr möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Steuerungssystem für Baggeranbaugeräte entworfen, welches die Steuerung und Regelung komplexer Anbaugeräte ermöglicht. Durch die freie Programmierbarkeit sind zusätzliche Funktionen, wie Protokollierung und Dokumentation des Arbeitsprozesses, möglich. Darüber hinaus ist das Steuerungssystem so leistungsfähig, dass bisherige Steuerungs- und Assistenzsysteme des Baggers auf ihm laufen. Dadurch wird die Anzahl der Anzeigelemente reduziert und die Übersichtlichkeit der Fahrerkabine gesteigert.