

1	Einleitung	1
2	Ziele und Aufgabenstellung	4
2.1	Ziele	4
2.2	Aufgabenstellung	5
3	Erkenntnisstand zur Auslegung und zum Betrieb des Krafthebers	6
3.1	Einführung in die Funktion des Krafthebers und dessen Regelung	6
3.1.1	Konzeption des Krafthebers	6
3.1.2	Betriebsarten des Kraftheber-Ventils	7
3.1.3	Regelstrategien	9
3.1.4	Regelungstechnische Begriffe	10
3.2	Grundanforderungen	13
3.3	Konzeption des Krafthebers	14
3.4	Statisches Betriebsverhalten des Krafthebers	17
3.4.1	Geometrie und Verstärkung des Krafthebers	17
3.4.2	Arbeitsvermögen und Hubkraft	18
3.5	Übertragungsverhalten von Werkzeugen zur Bodenbearbeitung	22
3.6	Auslegung der Regelung	26
3.6.1	Anforderungen und Gütekriterien	26
3.6.2	Konzeption des Regelsystems und Regelstrategie	29
3.7	Betriebsverhalten des geregelten Krafthebers	36
3.7.1	Feldmessungen	36
3.7.2	Rechner- und Laborsimulation	46
3.8	Entwicklung der Normung	47
3.9	Marktentwicklung	48
3.10	Patente zur Regelung des Krafthebers	53
4	Der geregelte Heckkraftheber an Traktoren	54
4.1	Mechanischer Aufbau	54
4.1.1	Anbaugestänge	54
4.1.2	Betätigungsgestänge	55
4.1.3	Freiheitsgrade	56
4.1.4	Einstellmöglichkeiten	57
4.2	Hydraulischer Aufbau	57

VI

4.3	Regelsystem und dessen Komponenten	60
4.3.1	Grundkonzepte des Signalteils	60
4.3.2	Sensoren	60
4.3.3	Regelventil	61
4.3.4	Regeleinrichtung	63
4.4	Modellierung der mechanisch-hydraulischen Hubwerksregelung (MHR)	64
4.4.1	Funktionsbeschreibung der MHR	64
4.4.2	Wirkungspläne und Übertragungsfunktionen der MHR	66
4.5	Modellierung der servohydraulischen Hubwerksregelung (SHR)	69
4.5.1	Funktionsbeschreibung der SHR	69
4.5.2	Wirkungspläne der SHR	71
4.6	Modellierung der elektro-hydraulischen Hubwerksregelung (EHR)	75
4.6.1	Funktionsbeschreibung der EHR	75
4.6.2	Wirkungspläne der EHR	76
5	Einsatz des Regelkrafthebers und Anforderungen	78
5.1	Funktion des Krafthebers als Bindeglied zwischen Traktor und Gerät	78
5.2	Arten von Grundanforderungen	78
5.2.1	Landwirtschaftlicher Prozeß	78
5.2.2	Traktoreinsatz	78
5.2.3	Ergonomie	79
5.3	Grundanforderungen des Dreipunktanbaus	80
5.3.1	Positionierung der Geräte	80
5.3.2	Einstellung der Zuglinie	82
5.3.3	Stabiles Betriebsverhalten des Geräts	83
5.4	Gliederung der Anbaugeräte unter dem Aspekt der Anforderungen an den geregelten Kraftheber	83
5.5	Anforderungen der Gerätearten an den Regelkraftheber (Auswahl)	84
5.5.1	Bodenbearbeitungsgeräte	84
5.5.2	Geräte zur Pflege und Aussaat, Hofmaschinen	85
5.5.3	Geräte zur Heuwerbung und Ernte	85
5.6	Ableitung von Gütekriterien aus den Grundanforderungen	86
6	Berechnung des statischen Betriebsverhaltens	87
6.1	Verstärkung des Krafthebers	87
6.1.1	Hubgeschwindigkeit	89

VII

6.1.2	Hubkraftverlauf	89
6.2	Neigungswinkel des Masts	90
6.3	Lage der ideellen Führungspunkte	91
6.3.1	Ideeller Führungspunkt in Seitenansicht	91
6.3.2	Ideeller Führungspunkt im Aufriß	92
6.4	Pendelcharakteristik	93
6.5	Einfluß der Kraft- und Druckregelung auf die Zugkraft	94
6.6	Arbeitsvermögen und Wirkungsgrad	96
7	Prüfstand und Versuchsmethodik	99
7.1	Konzept des Prüfstands	99
7.1.1	Mechanischer Aufbau	101
7.1.2	Hydrostatische Belastungseinrichtung	104
7.1.3	Regelsystem des Krafthebers	105
7.1.4	Weitere Meßtechnik	109
7.2	Kraftmodell	109
7.2.1	Kraftmodell Werkzeug - Boden	112
7.2.2	Kraftmodell des Geräts	115
7.2.3	Übertragung des Kraftmodells auf den Prüfstand	119
7.3	Meß- und Regelungsprogramm	121
7.4	Untersuchte Versuchsparmeter	124
7.4.1	Reglerstruktur	124
7.4.2	Verstärkungsfaktor im Senken	124
7.4.3	Totzone	124
7.4.4	Abtaste der Meßgrößen und der Stellgröße	124
7.4.5	Filterung der digitalisierten Meßwerte	125
7.4.6	Förderstrom der Hydraulikpumpe	125
7.4.7	Größe des Testsignals	125
7.5	Gütekriterien	125
7.5.1	Quadratische Regelfläche	126
7.5.2	Energiebedarf	126
7.5.3	Zeitbedarf der Regelung	128
7.6	Versuchsdurchführung	128
8	Modellierung des Regelsystems und Rechnersimulation	129
8.1	Modell des am Prüfstand realisierten Regelkreises	129

VIII

8.2	Übertragungsfunktionen der Regelkreisglieder	130
8.2.1	Verstärker	130
8.2.2	Regelventil	131
8.2.3	Hubzylinder	131
8.2.4	Krafthebergestänge	131
8.2.5	Belastungseinrichtung	131
8.2.6	Strecke Unterlenker - Lagesensor	132
8.2.7	Lagesensor	132
8.2.8	Kraftmeßbolzen	132
8.3	Übertragungsfunktionen der Regelstrecken	132
8.4	Rechnersimulation der digitalen Regelung	133
8.4.1	Definition eines Gütekriteriums	133
8.4.2	z-Übertragungsfunktion	133
8.4.3	Berechnung der Sprungantwort der Regelgröße Lage bei Führungsgrößensprung	134
8.4.4	Berechnung der Sprungantwort der Regelgröße Zugkraft bei Störgrößensprung	141
8.4.5	Berechnung der Sprungantwort der Regelgröße Zugkraft bei Führungsgrößensprung	145
8.5	Folgerungen aus der numerischen Simulation	146
9	Messung des Betriebsverhaltens	147
9.1	Reproduzierbarkeit	147
9.2	Übertragungsverhalten des geregelten Krafthebers	147
9.2.1	Lageregelung	148
9.2.2	Kraftregelung	160
9.2.3	Druckregelung	165
9.2.4	Mischregelungen	166
9.2.5	Besondere Regelungsverfahren	167
9.3	Erstellung von Bodediagrammen	170
9.3.1	Lageregelung	170
9.3.2	Kraftregelung	171
9.3.3	Druckregelung	171

10	Bedeutung der Ergebnisse für Konstruktion, Abstimmung und Betrieb des Regelkrafthebers	175
10.1	Hubkraft	175
10.2	Anforderungen und Freiheitsgrade des Krafthebers	175
10.3	Regelung des Krafthebers	176
10.4	Prüfstandskonzepte	178
11	Zusammenfassung	179
	Anhang 1 Liste der Patente zur Regelung des Krafthebers	182
	Anhang 2 Berechnung der Kraftheber-Verstärkung	190
	Anhang 3 Liste der Parametersätze der Laborversuche	195
	Literaturverzeichnis	200