

3.7.3 Seiltrommel.....	44
3.7.4 Aufspulmotor und Bremse.....	45
3.7.5 Steuerung.....	46
4 Datenanalyse.....	48
4.1 DATENVORBEREITUNG.....	48
4.2 DATENAUFBEREITUNG.....	49
4.2.1 Einführung.....	49
4.2.2 Gleitende Mittelwerte.....	49
4.2.3 Korrigierte Radumfangsgeschwindigkeiten.....	50
4.2.4 Hangneigungskorrektur.....	51
4.2.5 Berechnung zusätzlicher Variablen	52
4.2.6 Variablenrecodierung.....	53
4.3 ARTEFAKTBEREINIGUNG.....	54
4.3.1 Hintergrund	54
4.3.2 Mindestradgeschwindigkeit.....	55
4.3.3 Mindestfadengeschwindigkeit	56
4.3.4 Fehlerhafte Datensätze.....	56
4.3.5 Besonderheiten der Traktionsmessungen.....	56
4.3.6 Besonderheiten der Validierungsmessungen.....	59
4.4 DATENSÄTZE.....	60
4.4.1 Hintergrund.....	60
4.4.2 Aggregierte Datensätze.....	60
4.4.3 Ebenendaten.....	61
4.4.4 Hangdaten.....	62
4.5 EXEMPLARISCHE DATENANSICHT.....	63
4.5.1 Kurvenverläufe.....	63
4.5.2 Traktions-Schlupf-Kurven.....	65
4.6 AUSGLEICHSFUNKTION.....	66
5 Ergebnisse.....	68
5.1 DATENGRUNDLAGE.....	68
5.1.1 Einführung.....	68
5.1.2 Traktionsmessungen.....	68
5.1.3 Hangmessungen.....	69
5.2 EINFLUSSFAKTOREN.....	70
5.2.1 Einordnung der Einflussfaktoren.....	70
5.2.2 Maschinenparameter.....	71
5.2.3 Bestandesparameter.....	73
5.2.4 Bodenparameter.....	76
5.3 TRAKTIONSMESSUNGEN.....	81
5.3.1 Traktions-Schlupfkurven.....	81
5.3.2 Alternative Ausgleichsdatsätze.....	96
5.4 HANGNEIGUNGSPROGNOSE.....	99
5.4.1 Einführung.....	99
5.4.2 Einflussfaktoren.....	100

5.4.3 Entwicklung eines Grenzneigungsmodells	108
5.4.4 Modelldarstellung.....	111
5.5 VALIDIERUNGSMESSUNGEN IN HANGLAGEN.....	112
5.5.1 Einführung.....	112
5.5.2 Exemplarische Datenbeschreibung.....	113
5.5.3 Überprüfung der Grenzneigungsprognosen.....	115
6 Diskussion.....	120
6.1 ERHEBUNGSMETHODIK.....	120
6.1.1 Traktionsmessungen.....	120
6.1.2 Validierungsfahrten.....	126
6.1.3 Bodenerhebungen.....	128
6.2 DATENVERARBEITUNG.....	132
6.2.1 Datenaufbereitung.....	132
6.2.2 Datenauswahl / Artefaktbereinigung.....	133
6.2.3 Fazit der Datenverarbeitung.....	134
6.3 EBENENAUSWERTUNG.....	135
6.3.1 Traktionsmessungen / Punktwolken.....	135
6.3.2 Vergleich Rad-, Bänder- und Raupenfahrwerk.....	139
6.3.3 Einflussfaktoren auf das Traktionsverhalten.....	140
6.3.4 Prognosemodelle.....	151
6.4 HANGAUSWERTUNG.....	154
6.4.1 Überprüfung der Neigungsprognosen.....	154
6.5 KONSEQUENZEN.....	155
6.5.1 Hochmechanisierte Holzernte in Hanglagen.....	155
6.5.2 Technische Zusatzanforderungen in Hanglagen.....	157
7 Zusammenfassung.....	159
8 Summary.....	161
9 Literaturverzeichnis.....	163
10 Anhang.....	I

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bodenverformung und Gleiten in der Kontaktfläche eines Schlepperreifens (9-40) bei verschiedenem Schlupf; I: Lage der Gipsstränge vor der Befahrung, II Lage der Gipsstränge nach der Befahrung (nach Söhne, 1952a).....	5
Abbildung 2: Verlauf der Traktionsbeiwertkurve bei unterschiedlicher Festlegung des Radumfangs; I: Traktions-Schlupfkurve mit positiven Traktionsbeiwerten bei 0 % Schlupf, II: Traktions-Schlupfkurve durch den Ursprung, III: Traktions-Schlupfkurve schneidet Abszisse bei positivem Schlupf.....	16
Abbildung 3: Exemplarische Verläufe von Traktionsbeiwerten (Reibungszahlen) über dem Schlupf für verschiedene Untergründe (nach Zomotor, 1991).....	17
Abbildung 4: Auf Fahrzeuge wirkende Kräfte bei der Befahrung von Steigungen (nach Jacke und Drewes, 2004).....	19
Abbildung 5: Verzögerungstechnik für Zugkraftmessungen an Forstmaschinen in aufgebautem Zustand (Eigenkonstruktion des ifa).....	22
Abbildung 6: Messung des Bodenwassergehalts mit der Theta Probe ML2x und dem Handauslesegerät.....	27
Abbildung 7: Scherfestigkeitsmesser mit halb versenkter Messvine	28
Abbildung 8: Entnahme einer Mineralbodenprobe mit Hilfe eines Stechzylinders (250 cm ³).....	29
Abbildung 9: Lage der Versuchsrevierförstereien im Südniedersächsischen Bergland	31
Abbildung 10: Versuchsvorwender Ponsse S10 mit Ketten und Bändern sowie montierter Messtechnik.....	34
Abbildung 11: MGCsplit Messtechnik (bestehend aus Netzteil, Kommunikationsprozessor und 2 Messverstärkermodulen) in der Fahrerkabine eines Raupenharvesters	38
Abbildung 12: Zugkraftmessdose montiert zwischen dem Versuchsvorwender und der Umlenkrolle zur Reduktion der Seilkräfte durch das „Flaschenzugprinzip“	39
Abbildung 13: Spill-Konstruktion zur Erfassung der tatsächlichen Geschwindigkeit.....	41
Abbildung 14: Montage der inkrementalen Drehgeber in der Verlängerung der Radachsen zur Messung der theoretischen Geschwindigkeit.....	42
Abbildung 15: Technischer Teil der Verzögerungstechnik bestehend aus Elektromotor, Seiltrommel und Bremsanlage montiert auf dem Grundrahmen.....	43
Abbildung 16: Eingabemaske des am ifa geschriebenen Programms CAT2ASC.....	48
Abbildung 17: Exemplarische Traktionsbeiwerte über dem Schlupf vor der Artefaktbereinigung	54
Abbildung 18: Exemplarische Traktionsbeiwerte über dem Schlupf nach der Beschränkung auf eine Mindestradumfangsgeschwindigkeit von 0,2 m/s.....	55
Abbildung 19: Exemplarische Traktionsbeiwerte über dem Schlupf nach der Beschränkung auf einen Maximalschlupf von 98 %.....	57
Abbildung 20: Exemplarische Traktionsbeiwerte über dem Schlupf nach der Beschränkung auf ansteigende Schlupfwerte	58
Abbildung 21: Verlauf der Radumfangs- (blau) und Fadengeschwindigkeit (grün) für einen exemplarischen Zeitausschnitt von 125 s.....	63
Abbildung 22: Verlauf der Schlupfwerte für einen exemplarischen Zeitausschnitt von 125 s.....	64
Abbildung 23: Verlauf der Traktionsbeiwerte für einen exemplarischen Zeitausschnitt von 125 s	65
Abbildung 24: Punktwolke aus Traktionsbeiwerten und Schlupf für einen exemplarischen Zeitausschnitt von 125 s.....	66
Abbildung 25: Punktwolke aus Schlupf und Traktionsbeiwert für die Konfiguration 0 bei 34,8 % Bodenwassergehalt.....	82

Abbildung 26: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei 34,8 % Bodenwassergehalt.....	83
Abbildung 27: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 1 bei 32,1 % Bodenwassergehalt.....	85
Abbildung 28: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 37,6 % Bodenwassergehalt.....	87
Abbildung 29: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 37,6 % Bodenwassergehalt.....	89
Abbildung 30: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 4 bei 27,6 % Bodenwassergehalt.....	90
Abbildung 31: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 5 bei 45,8 % Bodenwassergehalt.....	92
Abbildung 32: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 6 bei 43,9 % Bodenwassergehalt.....	93
Abbildung 33: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 15 bei 40,4 % Bodenwassergehalt und einer Zuladung von 4.000 kg.....	95
Abbildung 34: Exemplarische Punktwolke aus Schlupf und Traktionsbeiwerten vor der Reduktion auf gleichbesetzte Schlupfstufen.....	98
Abbildung 35: Exemplarische Punktwolke aus Schlupf und Traktionsbeiwerten nach der Reduktion auf gleichbesetzte Schlupfstufen.....	98
Abbildung 36: Stufenmittelwerte und deren Ausgleich für die Konfiguration 4 bei einem Bodenwassergehalt von 29,9 %.....	99
Abbildung 37: Punktwolke für die Konfiguration 4 bei einem Bodenwassergehalt von 29,9 % mit Ausgleichskurve basierend auf den Stufenmittelwerten.....	99
Abbildung 38: Schlupf über der Zeit für eine (Hanglagen-) Erstbefahrung mit neuen Reifen (Konfig. 2) bei einem Bodenwassergehalt von 39,2 % und einer Steigung von 18 %.....	113
Abbildung 39: Schlupf über der Zeit für eine (Hanglagen-) Erstbefahrung mit gebrauchten Reifen (Konfig. 0) bei einem Bodenwassergehalt von 26,6 % und einer Steigung von 30 %....	114
Abbildung 40: Streuwolke aus Traktionsbeiwerten und Schlupf für drei unterschiedliche Radumfänge (grün: um 5 % reduzierter Radumfang; blau: „richtiger“ Radumfang; beige: um 5 % erhöhter Radumfang).....	121
Abbildung 41: Vergleich zwischen originären Messdaten (blau) für die tatsächliche Geschwindigkeit und den gleitenden Mittelwerten (grün).....	122
Abbildung 42: Vergleich zwischen originären Messdaten (blau) für die tatsächliche Geschwindigkeit und den gleitenden Mittelwerten (grün).....	124
Abbildung 43: Reifen mit zugesetztem Profil nach dem Versuch, eine Steigung von 28 % bei einem Bodenwassergehalt von 39,2 % zu befahren	126
Abbildung 44: Fahrspur nach Befahrung einer Steigung von 23 % mit höherem Schlupf.....	127
Abbildung 45: Exemplarische Ausgleichskurven für die drei unterschiedlichen Gruppen von typischen Kurvenverläufen (I: steiler Anstieg mit klarem Maximum; II: steiler Anstieg ohne Maximum; III flacher Anstieg ohne Maximum).....	135
Abbildung 46: Verteilung der Residuen über den vorhergesagten Traktionsbeiwerten für die Konfiguration 0.....	138
Abbildung 47: Exemplarische Ausgleichskurven für drei unterschiedliche Fahrwerkskonfigurationen (I: Radfahrwerk; II: Radfahrwerk mit Ketten und Bändern; III: Raupenfahrwerk).....	139