

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Simulation der Geländebefahrbarkeit - Stand der aktuellen Forschung	3
2.1	FEM - Finite Elemente Methode	3
2.2	Alternative numerische Ansätze (Distinct Element Method)	5
2.3	Analytische Wechselwirkungsmodelle	6
2.4	Systemsimulation (Mensch-)Fahrzeug-Gelände	7
3	Bisheriger Entwicklungsstand von ORSIS	9
3.1	Grundlegender Programmaufbau	10
3.2	Motormodell	11
3.3	Antriebsmodell	11
3.4	Fahrmodell	12
3.4.1	Längsdynamik	12
3.4.2	Positionsbestimmung	13
3.4.3	Radlasten	13
3.5	Rad-Boden-Modell	14
3.5.1	Berücksichtigung des elastischen Reifens	14
3.5.2	Einfluß Reifeninnendruck	14
3.5.3	Multipass	14
3.5.4	Schlupfeinsinkung	15
3.6	Digitales Geländemodell	16
3.7	Benutzerschnittstellen	17
3.7.1	Interaktive Schnittstelle Fahrer-Fahrzeug	17
3.7.2	Anzeige von Betriebsgrößen	18
3.8	Aktuelle Weiterentwicklungen	18
3.8.1	Anwenderfreundlichkeit	19

3.8.2	3D-Visualisierung	19
3.8.3	Autopilot	20
3.8.4	Zusätzliche Submodelle	21
3.8.5	Hardware in the Loop	21
3.8.6	Fahrsimulator für das Gelände	22
4	Programmstruktur und Schnittstellen	23
4.1	Grundlegende Programmstruktur	23
4.2	Wesentlicher Inhalt der Weiterentwicklung	24
4.2.1	Fahrzeugmodell	24
4.2.2	Rad-Boden-Modell	25
4.2.3	Geländemodell	26
4.2.4	Zusatzmodule	26
4.3	Funktion und Schnittstellen der Kernmodelle	26
5	Objektorientiertes Fahrdynamikmodell	28
5.1	Vorüberlegungen	28
5.2	Anforderungen im Hinblick auf die Geländefahrt	29
5.3	Grundlagen der Mehrkörpersimulation	30
5.3.1	Prinzip der MKS	30
5.3.2	Berechnungsverfahren der MKS	32
5.4	Diskussion alternativer Lösungsansätze für ORSIS	33
5.5	Räumliches Einmassenmodell zur Bestimmung der Radlasten	34
5.5.1	Berechnungsprinzip	34
5.5.2	Anwendungsbereich und Grenzen	36
5.6	Kraftgekoppeltes Mehrmassenmodell	37
5.6.1	Möglichkeiten und Grenzen	38
5.6.2	Mathematisch-mechanische Modellierung	42
5.6.3	Bewegungsgleichungen	46
5.6.4	Nutzung von Quaternionen	51
5.6.5	Berechnung von Kraftkopplungen	55
5.7	Numerische Berechnung	60
5.7.1	Numerische Integrationsverfahren	60
5.7.2	Integrationsverfahren in ORSIS	62
5.7.3	Abschätzung der notwendigen Schrittweite	62
5.7.4	Multirate-Verfahren	63

5.8	Objektorientierte Modell- und Programmstruktur	65
5.8.1	Merkmale der objektorientierten Programmierung	65
5.8.2	Programmstruktur des Mehrkörpersystems	66
5.9	Äußere Kräfte am Fahrzeug	68
5.9.1	Luftkraft	69
5.9.2	Zug- und Stützkkräfte	69
5.9.3	Kopplung von Fahrdynamikmodell und Bodenreaktionskräften . .	70
5.10	Fahrzeugmodellierung im Hinblick auf die Fahrdynamik	72
5.10.1	Auswahl und Fahrzeugmodellierung	72
5.10.2	Abbildung torsionsweicher Rahmen	77
5.11	Laufzeitbetrachtung	78
6	Lenkungsmodell	80
6.1	Lenkkonzepte bei zwei- und mehrachsigen Fahrzeugen	80
6.2	Simulationsmodell für die Lenkung	84
6.2.1	Berechnung der Kurvenfahrt ohne Querdynamik	85
6.2.2	Diagonalfahrt (Hundegang)	90
6.2.3	Beschreibung der Kurvenfahrt aufgrund äußerer Kräfte	92
6.3	Benutzerschnittstelle zur Änderung der Lenkungsauslegung	93
7	Antriebsmodell	94
7.1	Vorüberlegungen	94
7.2	Antriebsmodell für Mehrachsfahrzeuge	95
7.2.1	Antriebsstrang 6x6	96
7.2.2	Antriebsstrang 8x8	97
7.3	Erweiterte Bedienoberfläche	97
8	Rad-Boden-Wechselwirkungsmodell	99
8.1	Grundlegende Modellvorstellung und Berechnungsverfahren	100
8.1.1	Druckfestigkeit des plastischen Bodens	101
8.1.2	Scherfestigkeit	101
8.1.3	Bestimmung des Bodendruckes unter Berücksichtigung der Kon- taktkontur	103
8.1.4	Berücksichtigung des Multipass-Effektes	105
8.2	Rad-Boden-Modell mit elastisch-plastischen Bodeneigenschaften	108
8.2.1	Vorüberlegung	108

8.2.2	Erweiterte Modellvorstellung mit elastisch-plastischen Bodeneigenschaften	110
8.3	Beschreibung der elastischen Bodeneigenschaften	111
8.4	Ersatzkontur des elastischen Reifens auf elastisch-plastischem Boden . .	114
8.4.1	Ohne Vorverdichtung (1. Rad)	115
8.4.2	Mit Vorverdichtung (Multipass)	116
8.4.3	Lage und Größe des Ersatzkreises	117
8.5	Bodendruckverteilung und Bodenreaktionskraft	120
8.5.1	Definition der Winkelbereiche	120
8.5.2	Lokaler Bodendruck und Bodenreaktionskraft	121
8.5.3	Reifen-Federkraft	124
8.5.4	Verhältnis Einfederung zu Einsinkung	126
8.5.5	Ersatzkreisdurchmesser im Multipass	127
8.6	Rollwiderstand	130
8.6.1	Modellvorstellung und Berechnung	130
8.6.2	Vergleich der Rollwiderstände nach den bisherigen Modellen und dem neuen Rad-Boden-Modell	135
8.7	Scherweg in der Latschfläche	138
8.7.1	Scherweg in Längsrichtung	138
8.7.2	Scherweg in Querrichtung	140
8.8	Umfangsmoment und Triebkraft am Rad	142
8.8.1	Berechnung	143
8.8.2	Vergleich der Horizontalkräfte nach den bisherigen Modellen und dem neuen Rad-Boden-Modell	144
8.9	Seitenführungskräfte	146
8.9.1	Vorüberlegung	146
8.9.2	Berechnung der Seitenkräfte	147
8.9.3	Gleichzeitige Übertragung von Seiten- und Umfangskräften . . .	151
8.10	Reifenrückstellmoment	156
8.11	Bodenreaktionsvektor	158
8.12	Grundlegender Berechnungsablauf	158
9	Anwendungsbereiche und exemplarische Simulationsergebnisse	160
9.1	Anwendungsbereiche von ORSIS	161
9.2	Vorbemerkung zu den Beispielsimulationen	162
9.3	Mobilität im Gelände (Längsdynamik)	163

9.3.1	Einfluß der Achszahl auf Rollwiderstand und freie Zugkraft . .	164
9.3.2	Steigfähigkeit	170
9.3.3	Vergleich verschiedener Antriebskonzepte	171
9.3.4	Momentenverteilung	174
9.3.5	Differentialsperren	175
9.3.6	Einfluß der Lenkauslegung auf den Rollwiderstand bei Kurvenfahrt	177
9.4	Beispiele für die Querdynamik im Gelände	182
9.4.1	Vergleich Straße-Gelände	182
9.4.2	Bodenart	183
9.4.3	Antriebskonzept	183
9.4.4	Differentialsperren	185
9.5	Vertikaldynamik auf nachgiebigen Böden	187
9.5.1	Fahrt über ein Einzelhindernis	187
9.5.2	Vertikaldynamik in Verbindung mit statistischen Geländeeigen- schaften	199
9.5.3	Dissipierte Energien in den Aufbaudämpfern	204
10	Zusammenfassung	207
A	Anhang	211
A.1	Geländeeigenschaften	212
A.1.1	Bodenkennwerte	212
A.1.2	Spektrale Unebenheitsdichten	212
A.2	Fahrzeugparameter	213
A.2.1	Maße und Gewichte	213
A.2.2	Feder- und Dämpferkennlinien	214
	Literaturverzeichnis	215
	Studien- und Diplomarbeiten	227