

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung in die Terramechanik . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	2
1.2 Schwerpunkte der Terramechanik . . . . .	4
1.2.1 Wechselwirkung Reifen – Boden. . . . .	4
1.2.2 Reifenmodellierung . . . . .	5
1.2.3 Bodenverdichtung . . . . .	6
1.2.4 Messtechnik und Messmethodik . . . . .	7
1.3 Die ISTVS . . . . .	13
<b>2 Der Boden . . . . .</b>	<b>15</b>
2.1 Allgemeine Charakteristik des Bodens . . . . .	15
2.1.1 Häufig angetroffene Bodenarten . . . . .	17
2.1.2 Bodenkarten . . . . .	19
2.2 Bodenphysik . . . . .	22
2.2.1 Körnung . . . . .	22
2.2.2 Gefüge . . . . .	25
2.2.3 Wechselwirkungen zwischen Wasser, Luft und Boden . . . . .	30
2.2.4 Die Gasphase im Boden. . . . .	42
2.2.5 Das thermische Verhalten des Bodens . . . . .	43
2.3 Elemente der Bodenmechanik . . . . .	45
2.3.1 Einführung . . . . .	45
2.3.2 Eine mikromechanische Interpretation der Kräfte im Boden . . . . .	46
2.3.3 Kräfte in Kontaktpunkten. . . . .	47
2.3.4 Hypothese der Bodenmechanik . . . . .	49
2.3.5 Drucksetzung . . . . .	55
2.3.6 Das Fließverhalten und rheologische Modelle des Bodens . . . . .	57
2.3.7 Stochastische und probabilistische Modelle des Bodens. . . . .	63
2.3.8 Ausgewählte physikalische Größen zur In-situ-Beschreibung der mechanischen Festigkeit des Bodens. . . . .	64
2.3.9 Schotterwege . . . . .	67
2.3.10 Fazit . . . . .	71

2.4	Auswirkungen der Pflanzenvegetation . . . . .	72
2.4.1	Moschus . . . . .	72
2.4.2	Auswirkungen der vom Menschen gepflanzten Vegetation . . . . .	74
2.4.3	Einfluss grüner (oberirdischer) Pflanzenteile . . . . .	78
2.4.4	Einfluss der Vegetation auf die Fahrzeugleistung . . . . .	81
2.4.5	Grasflugplätze . . . . .	82
2.4.6	Schlussfolgerungen . . . . .	88
2.5	Geometrie der Bodenoberfläche . . . . .	90
2.5.1	Definition der Geländeunebenheiten . . . . .	90
2.5.2	Oberflächenprofil . . . . .	92
2.5.3	Analytische Methoden zur Bestimmung des Geländeprofils . . . . .	93
2.5.4	Experimentelle Methoden zur Bestimmung des Geländeprofils . . . . .	95
2.6	Terramechanische Charakteristik von Schnee . . . . .	100
2.6.1	Einführung . . . . .	100
2.6.2	Eine allgemeine Charakteristik des Schnees . . . . .	100
2.6.3	Die mechanischen Eigenschaften des Schnees . . . . .	101
2.6.4	Mikromechanik von Schnee . . . . .	104
2.6.5	Statistische Methoden . . . . .	107
2.6.6	Wintertraktion . . . . .	107
2.7	Charakteristik des Gesteinsplanetenbodens und ihre Simulanten . . . . .	109
2.7.1	Simulationen des Mondbodens . . . . .	110
2.7.2	Mars-Regolith und seine Simulationen . . . . .	113
2.7.3	Experimentelle In-situ-Forschungen des Gesteinsplanetenbodens . . . . .	116
Literatur . . . . .		120
<b>3</b>	<b>Wechselwirkungen im Reifen-Boden-System . . . . .</b>	<b>125</b>
3.1	Einführung . . . . .	125
3.2	Zur Mechanik des Reifen-Boden-Systems . . . . .	126
3.2.1	Zu formschlüssigen Mechanismen der Reifen-Boden-Wechselwirkung . . . . .	128
3.2.2	Zur Mikromechanik der Wechselwirkungen im Reifen-Boden-System . . . . .	130
3.2.3	Mechanik der Radbewegung auf einer verformbaren Oberfläche . . . . .	139
3.3	Forschungsverfahren zur Untersuchung der Wechselwirkungen im Reifen-Boden-System . . . . .	142
3.3.1	Experimentelle Forschungsverfahren zur Bestimmung der Wechselwirkung im Reifen-Boden-System . . . . .	143
3.3.2	Empirische und halbempirische Methoden . . . . .	151
3.3.3	Physikalische Methoden . . . . .	162
3.3.4	DEM- und FEM-Methoden . . . . .	168

3.4	Kontaktfläche und Druckverteilung im Latsch . . . . .	185
3.4.1	Reifen-Boden-Kontaktfläche . . . . .	185
3.4.2	Rechnungsmethoden zur Bestimmung der Reifen-Boden-Kontaktfläche . . . . .	189
3.4.3	Experimentelle Verfahren zur Bestimmung der Reifen-Boden-Kontaktfläche und Fahrspurgeometrie . . . . .	193
3.4.4	Druckverteilung in der Berührungsfläche . . . . .	200
3.4.5	Fazit . . . . .	205
	Literatur . . . . .	205
<b>4</b>	<b>Spannung und Verformung im Boden unter fahrenden Fahrzeugen und Maschinen . . . . .</b>	<b>209</b>
4.1	Einführung . . . . .	209
4.2	Theoretische Überlegungen . . . . .	210
4.2.1	Spannung in einem Körper . . . . .	210
4.2.2	Mechanische Verformungen . . . . .	212
4.3	Eine kurze Übersicht der Messmethoden . . . . .	213
4.3.1	Messwertaufnehmer für Spannungsmessungen . . . . .	213
4.3.2	SST . . . . .	216
4.3.3	Messmethoden für Bodenverformung . . . . .	219
4.4	Spannungen im Boden unter Radfahrzeugen . . . . .	220
4.4.1	Analyse der Hauptspannungen . . . . .	221
4.4.2	Analyse oktaedrischer Spannungen . . . . .	239
4.4.3	Verformungen im Boden unter Radfahrzeugebelastung . . . . .	243
4.4.4	Auswirkung wiederholten Überfahrens auf die Bodenverformung . . . . .	244
4.5	Spannungs- und Deformationszustand im Boden unter Belastung von Raupenfahrzeugen . . . . .	250
4.5.1	Einführung . . . . .	250
4.5.2	Feldexperimente . . . . .	250
4.5.3	Ergebnisse . . . . .	253
4.5.4	Diskussion . . . . .	267
4.6	Spannungszustand im Schnee unter fahrenden Fahrzeugen und Maschinen . . . . .	269
4.6.1	Einführung . . . . .	269
4.6.2	Experimente . . . . .	269
4.6.3	Ergebnis und Diskussion . . . . .	274
4.6.4	Fazit . . . . .	279
4.7	Spannungen im Boden unter Belastung eines Flugzeugfahrwerks . . . . .	279
4.7.1	Einführung . . . . .	279
4.7.2	Experiment . . . . .	280
4.7.3	Ergebnisse der Messungen . . . . .	282

4.8	Modelle und Rechensysteme für den Spannungszustand im Boden .....	287
4.8.1	SOCOMO .....	287
4.8.2	Terranimo® – ein Online-System zur Simulation von Bodenspannungen .....	288
4.8.3	TASC .....	293
4.8.4	SoilFlex .....	294
4.8.5	Soilphysics R-Package .....	295
4.9	Zusammenfassung .....	296
Literatur .....		298
<b>5</b>	<b>Mobilität im Gelände .....</b>	<b>303</b>
5.1	Einführung .....	303
5.2	Mobilität im Gelände und ihre Bedingungen .....	304
5.2.1	Bodencharakterisierung für Verkehrsfähigkeit .....	304
5.2.2	Geländecharakterisierung für Mobilität .....	305
5.2.3	Geländeform .....	306
5.2.4	Wasserhindernisse .....	307
5.2.5	Tiefe der Wasserläufe und Wasserflächen .....	309
5.3	Methoden zur Bestimmung der Mobilität im Gelände .....	310
5.3.1	VCI/RCI-Methode .....	310
5.3.2	NGP- und MMP-Modelle .....	312
5.3.3	Karten der Geländebefahrbarkeit .....	316
5.3.4	Bestimmung des IOP-Index .....	317
5.4	Einfluss von Wetterfaktoren auf die Mobilität eines Geländewagens .....	319
5.4.1	Zusammenhang Fahrzeugmobilität-Bodenfeuchtigkeit .....	325
5.5	Das „GARFIELDS“-System .....	327
5.5.1	Einführung .....	327
5.5.2	GARFIELDS-Systembeschreibung .....	328
5.5.3	Technischer Support für das GARFIELDS-System .....	331
5.5.4	Systemvalidierung und -entwicklung .....	334
5.6	Fazit .....	334
Literatur .....		335
<b>6</b>	<b>Messtechnik der Terramechanik .....</b>	<b>337</b>
6.1	Einführung in die Metrologie .....	337
6.1.1	Messaufnehmer .....	338
6.1.2	Systeme der Datenerfassung .....	340
6.1.3	Kalibrierung des Messsystems .....	341
6.1.4	Durchführung der Messungen .....	342
6.1.5	Messfehler und Messunsicherheit .....	342
6.2	Messmethoden und -geräte zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des Bodens .....	345

6.2.1	Messmethoden und -geräte zur Ermittlung der mechanischen Festigkeit des Bodens .....	345
6.2.2	Bevameter .....	355
6.2.3	CBR .....	357
6.3	Messmethoden und -geräte zur Erfassung der Wechselwirkung Reifen-Boden .....	359
6.3.1	Messmethoden zur Bestimmung der am Rad wirkenden Kräfte und Momente .....	359
6.3.2	Messmethoden zur Bestimmung der Kontaktfläche und Druckverteilung .....	370
6.3.3	Messmethoden zur Messung des Bodenspannungszustandes .....	373
6.3.4	Bodenverformungsmessgeräte .....	390
6.3.5	Mobile Ausrüstung für die Messungen der Reifen-Boden-Wechselwirkungen .....	397
6.4	Messausrüstung .....	402
6.4.1	Geräte und Systeme zur Speicherung der Messdaten .....	402
6.4.2	Stromversorgung für Messsysteme .....	408
6.5	Testfahrzeuge und Prüfstände .....	410
6.5.1	Testfahrzeuge .....	410
6.5.2	Einzelradeinrichtungen .....	415
6.5.3	Bodenrinnenprüfstände .....	420
6.6	Messverfahren und Feldprozeduren .....	422
6.6.1	Vorbereitung der Messungen .....	423
6.6.2	Auswahl und Vorbereitung des Messfeldes und der Messstelle .....	425
6.6.3	Planung der Messungen .....	427
	Literatur .....	429
7	<b>Geländefahrzeuge .....</b>	433
7.1	Konzept .....	433
7.2	Rechtliches .....	434
7.3	Landwirtschaftliche Fahrzeuge und Maschinen .....	435
7.3.1	Emissionsgrenzwerte .....	437
7.3.2	Erntemaschinen .....	438
7.4	Militärfahrzeuge .....	439
7.4.1	Kampffahrzeuge: Panzer und Infanteriefahrzeuge .....	439
7.4.2	Panzerspähwagen .....	443
7.4.3	Logistik- und Technikfahrzeuge .....	445
7.4.4	Leichte und unbemannte Militärfahrzeuge .....	447
7.4.5	Baufahrzeuge und Arbeitsmaschinen .....	448
7.5	Geländewagen .....	453
7.5.1	Konzept .....	453
7.5.2	Konstruktive Kriterien für Geländewagen .....	454

7.5.3	Klassifikation der Geländewagen .....	455
7.5.4	Probleme der Geländewagen .....	477
7.5.5	Einsatz .....	480
7.6	Offroad-Motorräder .....	485
7.6.1	Typen von Offroad-Motorrädern .....	487
7.6.2	MTB-Mountainbikes .....	491
7.7	ATV und Buggy .....	493
7.7.1	Quad .....	493
7.7.2	Buggy .....	495
7.8	Planeten-Rover .....	497
7.8.1	Sowjetischer Mond-Rover Lunokhod .....	497
7.8.2	Amerikanische Rover .....	498
7.9	Busch-Flugzeuge .....	501
7.9.1	Wilga-DRACO .....	502
7.9.2	Pilatus PC 24 .....	503
7.9.3	Flugzeuge mit Skiern .....	504
7.10	Fazit .....	506
	Literatur .....	507
<b>8</b>	<b>Antrieb von Geländewagen und SUV .....</b>	<b>509</b>
8.1	Der Motor .....	509
8.1.1	Verbrennungsmotoren .....	509
8.1.2	Beispiele für Antriebsaggregate in Geländewagen und SUV .....	515
8.2	Grundgetriebe .....	520
8.2.1	Beispiele für Grundgetriebe in Geländefahrzeugen .....	521
8.3	Antriebsstrang .....	523
8.3.1	Manuell zuschaltbarer Allradantrieb .....	524
8.3.2	Permanenter Allradantrieb mit variabler Kraftverteilung .....	529
8.3.3	Allradantrieb mit steuerbarer Kraftverteilung .....	536
8.4	Übersicht steuerbarer Allradantriebssysteme von verschiedenen Fahrzeugherstellern .....	543
8.4.1	Daimler-Benz 4MATIC .....	543
8.4.2	BMW xDrive .....	550
8.4.3	Toyota .....	552
8.4.4	Suzuki AllGrip .....	555
8.4.5	Mitsubishi 4WD .....	556
8.4.6	Symmetrical AWD Subaru .....	557
8.4.7	Audi Quattro .....	559
8.4.8	Volkswagen 4Motion .....	560
8.5	Torque Vectoring .....	562
8.5.1	Einführung .....	562
8.5.2	Strategien der Antriebsmomentverteilung bei Radhabenmotoren .....	562

---

8.5.3	Beispiele für Torque-Vectoring-Systeme in Allradfahrzeugen . . . . .	567
8.5.4	Beispiele für Komponenten des TV-Systems . . . . .	570
8.5.5	Fazit . . . . .	576
8.6	Elektroantriebe der Geländewagen und SUV . . . . .	576
8.6.1	Geländewagen und SUV mit Elektroantrieb . . . . .	578
8.6.2	Elektroradnabenmotor . . . . .	582
8.6.3	Entwicklungsprobleme und Tendenzen . . . . .	584
8.7	Hybridantrieb der Geländewagen und SUV . . . . .	585
8.7.1	Hybridantriebe in Geländewagen und SUV . . . . .	587
8.8	Fazit . . . . .	591
Literatur	. . . . .	592
<b>9</b>	<b>Fahrwerk der Geländewagen . . . . .</b>	<b>595</b>
9.1	Radaufhängungen und Achsen . . . . .	595
9.1.1	Anforderungen und Betriebsbedingungen . . . . .	596
9.1.2	Beschädigungen und Verschleiß . . . . .	597
9.1.3	Konstruktions- und Betriebsmerkmale von Unterbaugruppen und Baugruppen . . . . .	598
9.1.4	Optimierung des Komforts und der Querdynamik eines Geländewagens . . . . .	601
9.1.5	Beispiele für Rad- und Achsaufhängungslösungen in Geländefahrzeugen . . . . .	602
9.2	Bremssystem in Geländewagen . . . . .	617
9.2.1	Technische Anforderungen und Betriebsbedingungen . . . . .	618
9.2.2	Konstruktions- und Betriebsmerkmale der Baugruppen und Elemente des Geländewagenbremssystems . . . . .	619
9.2.3	Lösungsbeispiele . . . . .	622
9.3	Lenksystem in Geländewagen . . . . .	626
9.3.1	Anforderungen und Betriebsbedingungen . . . . .	626
9.3.2	Konstruktions- und Betriebsmerkmale von Baugruppen des Lenksystems . . . . .	628
9.3.3	Beispiele für Lenksysteme in Geländefahrzeugen . . . . .	631
9.4	Reifen der Geländewagen . . . . .	634
9.4.1	Anforderungen . . . . .	634
9.4.2	Reifenbauweise . . . . .	638
9.4.3	Die gebräuchlichsten Arten von Offroad-Reifen . . . . .	642
9.4.4	Michelin MTB-Reifen . . . . .	644
9.5	Zusammenfassung . . . . .	647
Literatur	. . . . .	647

<b>10 Fahrdynamik und Fahrverhalten des Geländewagens</b> . . . . .	649
10.1 Einführung . . . . .	649
10.1.1 Definition von Koordinatensystemen . . . . .	651
10.2 Reifeneigenschaften . . . . .	652
10.2.1 Reifeneigenschaften in vertikaler Richtung . . . . .	653
10.2.2 Reifeneigenschaften in Umfangsrichtung . . . . .	655
10.2.3 Reifeneigenschaften in Seitenrichtung . . . . .	659
10.2.4 Kombinierte Längsseiten-Reifeneigenschaften . . . . .	661
10.2.5 Dynamische Reifeneigenschaften . . . . .	661
10.2.6 Kräfte, die auf ein Geländefahrzeugrad wirken . . . . .	663
10.2.7 Kräfte am Fahrzeug . . . . .	664
10.3 Modellierung und Simulation der Fahrdynamik . . . . .	664
10.3.1 Fahrzeugmodellierung . . . . .	665
10.3.2 Reifenmodellierung . . . . .	669
10.3.3 Modellierung und Simulation der Fahrdynamik mittels MKS-Systeme . . . . .	670
10.4 Experimentales Testverfahren für Fahrdynamik . . . . .	689
10.4.1 Einleitung . . . . .	689
10.4.2 Testverfahren für Längsdynamik . . . . .	689
10.4.3 Testverfahren in der Kreisfahrt . . . . .	690
10.4.4 Messmethoden für Übertragungsverhalten . . . . .	693
10.4.5 Testverfahren für die Fahrdynamik von Geländefahrzeugen . . . . .	695
10.4.6 Messgrößen . . . . .	703
10.4.7 Querdynamik . . . . .	705
10.4.8 Messgeräte für Fahrdynamiktests . . . . .	709
10.4.9 Fahrdynamikfahrzeuge . . . . .	717
10.4.10 Ausblick . . . . .	718
10.5 Experimentelle Untersuchungen von Kräften und Momenten im Laufelement-Boden-System . . . . .	719
10.5.1 Kraftmessungen mit der Radmessnabe am Fahrzeug . . . . .	719
10.5.2 Ergebnisse . . . . .	731
10.5.3 Kräfte am Rad eines auf der Grasoberfläche rollenden Flugzeuges . . . . .	742
10.6 Messung der Kräfte am Fahrzeug . . . . .	751
10.6.1 Zugkraft am Fahrzeug – ein militärischer LKW . . . . .	751
10.6.2 Fazit . . . . .	759
10.7 Rollwiderstand des Fahrzeuges . . . . .	759
10.7.1 Schlepptest – ein militärischer LKW . . . . .	760
10.8 Rollwiderstand der Flugzeugräder . . . . .	763
10.8.1 Einführung . . . . .	763
10.8.2 Sommerbedingungen – Grasflugplatz . . . . .	763
10.8.3 Winterbedingungen – schneebedeckter Flugplatz . . . . .	765

10.8.4 Schleppertest .....	766
10.8.5 Messungen .....	767
10.8.6 Ergebnisse .....	768
10.8.7 Flugtestmethode.....	771
10.9 Experimentelle Forschung der Querdynamik und Fahrstabilität des Fahrzeuges im Gelände .....	775
10.9.1 Querdynamik eines Fahrzeuges im Gelände .....	775
10.9.2 Modellierung der Querdynamik mittels der Systemidentifikationsmethode .....	787
10.9.3 Fahrstabilitätstests nach der Systemidentifikationsmethode .....	795
10.10 Fazit .....	806
Literatur .....	807