
ATZ/MTZ-Fachbuch

In der Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch vermitteln Fachleute, Forscher und Entwickler aus Hochschule und Industrie Grundlagen, Theorien und Anwendungen der Fahrzeug- und Verkehrstechnik. Die komplexe Technik, die moderner Mobilität zugrunde liegt, bedarf eines immer größer werdenden Fundus an Informationen, um die Funktion und Arbeitsweise von Komponenten sowie Systemen zu verstehen. Fahrzeuge aller Verkehrsträger sind ebenso Teil der Reihe, wie Fragen zu Energieversorgung und Infrastruktur.

Das ATZ/MTZ-Fachbuch wendet sich an Ingenieure aller Mobilitätsfelder, an Studierende, Dozenten und Professoren. Die Reihe wendet sich auch an Praktiker aus der Fahrzeug- und Zulieferindustrie, an Gutachter und Sachverständige, aber auch an interessierte Laien, die anhand fundierter Informationen einen tiefen Einblick in die Fachgebiete der Mobilität bekommen wollen.

Jarosław Pytka

Terramechanik und Geländefahrzeuge

Reifen-Boden-System, Messmethoden,
Fahrzeugtechnik

Jarosław Pytka
Kraftfahrzeugtechnik/Fakultät für Maschinenbau
Technische Universität Lublin
Lublin, Polen

Die Veröffentlichung wird aus dem polnischen Staatshaushalt im Rahmen des Programms des Ministers für Bildung und Wissenschaft mit dem Titel Excellent Science, Projektnummer DNM/SP/513833/2021, Kofinanzierungsbetrag: 35.000 PLN, Gesamtprojektwert: 39.620 PLN, kofinanziert.

ISSN 2628-104X ISSN 2628-1058 (electronic)
ATZ/MTZ-Fachbuch
ISBN 978-3-658-32012-6 ISBN 978-3-658-32013-3 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-32013-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Markus Braun

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung in die Terramechanik	1
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
2 Der Boden	15
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
3	Wechselwirkungen im Reifen-Boden-System	125
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

4 Spannung und Verformung im Boden unter fahrenden

	Fahrzeugen und Maschinen	209
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
5	Mobilität im Gelände	303
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
6	Messtechnik der Terramechanik	337
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	Beviameter	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	Geländefahrzeuge	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
8	Antrieb von Geländewagen und SUV	509
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 Radnabenmotoren	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
9	Fahrwerk der Geländewagen	595
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

10	Fahrdynamik und Fahrverhalten des Geländewagens	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	Schlepptest	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