ATZ/MTZ-Fachbuch

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Motoren macht einen immer größer werdenden Fundus an Informationen notwendig, um die Funktion und die Arbeitsweise von Komponenten oder Systemen zu verstehen. Den raschen und sicheren Zugriff auf diese Informationen bietet die regelmäßig aktualisierte Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch und anwendungsorientiert zusammenstellt.

Die Reihe wendet sich an Fahrzeug- und Motoreningenieure sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeug- und Motorentechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für das Verständnis wie auch die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Forscher und Entwicklungsingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie bei Dienstleistern benötigt werden.

Heiko Johannsen

Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion

Grundlagen der Unfallaufklärung

3., überarbeitete Auflage

Mit 129 Abbildungen und 21 Tabellen

Springer Vieweg

Prof. Dr.-Ing. Heiko Johannsen
Fachgebiet Kraftfahrzeuge
TU Berlin
Berlin, Deutschland

Die ersten beiden Auflagen des Buches erschienen unter dem Titel „Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion“.

ISBN 978-3-658-01593-0
DOI 10.1007/978-3-658-01594-7

ISBN 978-3-658-01594-7 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2013

Dieses 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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort zur dritten Auflage

Dieses Buch bezieht sich auf den Pkw-Unfall im Straßenverkehr und behandelt die Themenkreise Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion. Vorangestellt wird, um Begriffe eindeutig festzulegen, ein Kapitel zur Unfallsystematik.

Im Vordergrund stehen technische Aspekte der Unfallaufklärung. Auf medizinische und rechtliche Fragestellungen wird nur soweit wie nötig eingegangen. Zentrales Anliegen des Buches ist die Erläuterung moderner technischer Rekonstruktionsverfahren vor dem Hintergrund der klassischen Mechanik mit Impulssatz, Drehimpulssatz und Zusatzhypothesen. Grundlagen und Anwendung, Theorie und Praxis sollen verbunden, Prinzipielles und Methodisches betont werden. Die Grundlagen für das Verständnis von modernen Unfallrekonstruktionsverfahren, ob in Vorwärts- oder Rückwärtsrechnung gehalten, ob auf Stoßrechnung oder Kraftrechnung basierend, werden dargestellt und an anwendungsnahe Beispielen demonstriert.

Die technische Unfallrekonstruktion ist ein vergleichsweise junger Wissenschaftsbereich. Sein Anfang liegt in den vierziger Jahren des 20. Jahrhunderts und hat mit den Arbeiten von Brüderlin begonnen. Die stetige Weiterentwicklung der Verfahren bis in die heutige Zeit der PC-Unterstützung wird in diesem Buch nachgezeichnet.

In dieser dritten Auflage des erstmals im Jahre 1994 erschienenen Buches werden die Abschnitte Unfallsystematik, Unfallforschung und Unfallmechanik aktualisiert und der Abschnitt Unfallrekonstruktion erweitert. Definitionen werden präzisiert, Daten aktualisiert, zwischenzeitlich erschienene Veröffentlichungen und Bücher werden berücksichtigt. Behandelt werden in diesem Buch auch – nur scheinbar – nachgeordnete Fragen, über die oft hinweggegangen wird, so zum Beispiel: Wo verstecken sich bei dem grafischen Verfahren der Unfallrekonstruktion die Zusatzhypothesen? Wie ist bei rechnerischen Verfahren das Koordinatensystem zu legen? Wie unterscheidet sich die Vorzeichenfestlegung bei vorgegebenen und gesuchten Größen, z. B. Geschwindigkeiten? Warum ist zwischen eingprägten Kräften und Reaktionskräften zu unterscheiden? Zu welcher Gruppe gehört die Stoßkraft bzw. der Stoßantrieb, welche Konsequenzen ergeben sich daraus?

Das Buch basiert auf langjähriger Forschung und Lehre im Fachgebiet Kraftfahrzeuge der Technischen Universität Berlin.

Das Buch wendet sich vornehmlich an Unfall- und Kraftfahrzeug-Sachverständige, seien sie selbstständig oder für Versicherungen bzw. Überwachungsvereine tätig. Gerade dem

erfahrenen, in der Praxis tätigen Unfallgutachter soll mit dem Buch die Rückbesinnung auf die physikalischen Grundlagen der von ihm entweder explizit oder, in Software eingebunden, implizit angewandten Verfahren erleichtert werden. Darüber hinaus möge das Buch den Studenten an Universitäten und Hochschulen bei ihrer Ausbildung behilflich sein. Das Buch eignet sich hier als Grundlage und Leitfaden bei Vorlesungen und Übungen. Auch den Sicherheitsingenieuren bei Automobilherstellern und Sicherheitszulieferern wird das Buch nützlich sein. Schließlich soll das Buch jungen Ingenieuren den Einstieg in die technische Unfallrekonstruktion, Unfallanalyse und Unfallforschung erleichtern und deren Verbindungen zur Sicherheitsforschung aufzeigen.

Diese Buch basiert im Wesentlichen auf der 2. Auflage von Professor Dr.-Ing. Hermann Appel, Dr.-Ing. Gerald Krabbel und Dirk Vetter. Bei der vorliegenden Überarbeitung und Neugestaltung des Buches hat Herr cand. ing. T. Berger tatkräftig mitgeholfen. Des Weiteren basiert die Überarbeitung teilweise auf fruchtbaren Diskussionen mit Gerd Müller und Mathias Stein. Wesentliche Teile der In-Depth Datenanalysen wurden freundlicher Weise von Prof. Dietmar Otte bereitgestellt. Ihnen allen habe ich sehr zu danken.

Berlin, im Juni 2013

Heiko Johannsen

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Bezeichnungen, Formelzeichen	XI
1 Einleitung	1
2 Unfallsystematik	5
2.1 Definitionen: Unfall, Risiko, Sicherheit	5
2.2 Zeitliche Phasen des Unfalls	11
2.3 Unfallart und Unfalltyp	12
2.4 Kollisionsart und Kollisionstyp	17
2.5 Aufprallart und Aufpralltyp	20
2.6 Belastungs- und Verletzungsarten des Menschen	25
3 Unfallforschung	27
3.1 Bearbeitungskette von der Unfallerhebung bis zur Unfallforschung	27
3.2 Unfallerhebungen	28
3.2.1 Polizeiliche Unfallerhebungen	31
3.2.2 Erhebungen am Unfallort durch spezielle Forschungsteams	32
3.2.3 Retrospektive Unfalluntersuchungen	36
3.3 Unfallrekonstruktion und Unfallaufklärung, Rechtsprechung	41
3.4 Unfallanalyse	44
3.5 Unfallschwere, Unfallfolgenschwere	46
3.5.1 Unfallschwere, Unfallkenngroße	47
3.5.2 Unfallfolgen, Unfallfolgenschwere	52
3.6 Unfallforschung, Sicherheitsforschung	57
3.7 Ausgewählte Ergebnisse der Unfallanalyse, Unfallforschung und Sicherheitsforschung	59
4 Unfallmechanik	85
4.1 Kinematische Grundlagen	85
4.2 Crashkinematik, Crashpulse, Stoßziffer (Stoffgesetze)	88
4.2.1 Crashkinematik, Deformationskennungen	88
4.2.2 Stoßziffer	95

4.3	Kraftrechnung	97
4.3.1	Schwerpunktsatz	99
4.3.2	Drallsatz	100
4.4	Stoßrechnung	101
4.4.1	Stoßarten	101
4.4.2	Stoßtheorien	102
4.4.3	Ergänzungshypothesen	104
4.4.4	Impulssatz	105
4.4.5	Drehimpulssatz	105
4.4.6	Stoßgleichungen für die ebene Scheibe	106
4.4.7	Gerader zentrischer Stoß zweier Scheiben	107
4.4.8	Schiefer exzentrischer Stoß zweier Scheiben	110
4.5	Arbeitssatz (Energiesatz)	112
4.5.1	Arbeitssatz für starre Körper	112
4.5.2	Arbeitssatz für deformierbare Körper im statischen Gleichgewicht	114
4.5.3	Arbeitssatz allgemein	115
4.5.4	Arbeitssatz für den Wandaufprall eines Fahrzeugs	115
4.5.5	Arbeitssatz für die gerade, zentrische Kollision zweier Fahrzeuge	116
4.5.6	Arbeitssatz für den exzentrischen Aufprall eines Fahrzeugs auf einen starren Pfahl	117
4.5.7	Arbeitssatz für die Auslaufbewegung nach dem Stoß	117
4.5.8	Berechnung der Stoßziffer für einen Wandaufprall	119
4.6	Anwendungsbeispiele zur Kraftrechnung	120
4.6.1	Physikalisches Pendel	120
4.6.2	Frontalkollision zweier Fahrzeuge	121
4.7	Anwendungsbeispiele zur Stoßrechnung	125
4.7.1	Exzentrischer Stoß gegen eine drehbar gelagerte Scheibe	125
4.7.2	Kollision Pkw-Baum	128
4.7.3	Pkw-Pkw-Seitenkollision	133
4.7.4	Pkw-Pkw-Offset-Frontalkollision	135
4.7.5	Kollision Pkw-Fußgänger	138
4.7.6	Frontalaufprall ohne und mit Abgleiten, Einfluss auf Geschwindigkeitsänderung und Energieabsorption	144
4.8	Festlegung der Unbekannten in Ersatzsystemen	146
5	Unfallrekonstruktion	149
5.1	Unfallrekonstruktionsverfahren	150
5.1.1	Rückwärts-Unfallrekonstruktion, insbesondere Rückwärts-Kollisionsrekonstruktion	153
5.1.2	Vorwärts-Unfallrekonstruktion, insbesondere Vorwärts-Kollisionsrekonstruktion	156
5.1.3	Kontrollmöglichkeiten	159

5.1.4	Unfalldatenspeicher	160
5.2	Grafische Rekonstruktionsverfahren	162
5.2.1	Antriebs-Balance-Verfahren	163
5.2.2	Impuls-Spiegelverfahren	165
5.2.3	Drehimpuls-Spiegelverfahren	167
5.2.4	Energie-Ringverfahren	169
5.2.5	Rhomboid-Schnittverfahren	172
5.2.6	Band-Schnittverfahren	173
5.3	Rechnerische Rekonstruktionsverfahren	177
5.4	Anmerkungen und Ergänzungen zu den vorgestellten Rekonstruktionsverfahren	179
5.5	Einflüsse auf die Qualität von Rekonstruktionsergebnissen	182
Anhang		187
Literatur		199
Sachverzeichnis		213

Abkürzungen, Bezeichnungen, Formelzeichen

Abkürzungen

ABS	Anti-Blockiersystem (Bezeichnung der Fa. Bosch für ihre ABV)
ABV	Automatischer Blockierverhinderer
ACC	Autonomous Cruise Control (oder Adaptive Cruise Control)
ACIR	Automotive Crash Injury Research (USA)
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobilclub e. V.
ADR	Australian Design Rules
AIS	Abbreviated Injury Scale alt.: Automotive Industry Standards (Indien)
ANCAP	Australian New Car Assessment Programme
APF	Abdominal Peak Force
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie, jetzt Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
BMW	Bayrische Motorenwerke AG
BUB	bewegliche undeformierbare Barriere
C-NCAP	China New Car Assessment Programme
CARAT	Computer Aided Reconstruction of Accidents in Traffic
CDC	Collision Deformation Classification
CDS	Crashworthiness Data System (Unterprogramm von NASS, sammelt statistische Daten zu Fahrzeugkollisionen)
CRASH	Calspan Reconstruction of Accident Speeds on the Highway
DAT	Deutsche Automobil Treuhand GmbH
DEKRA	Deutscher Kraftfahrzeug-Überwachungs-Verein e. V.
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DOT	Department of Transportation (USA)
Dummy	Messpuppe
EBS	Equivalent Barrier Speed (veraltet)
ECE	Economic Commission of Europe

EDCRASH	Engineering Dynamics Corporation Reconstruction of Accident Speeds on the Highway, Unfallrekonstruktionsprogramm der Engineering Dynamics Corporation (USA)
EES	Equivalent Energy Speed
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ESV	Experimental Safety Vehicle
ETS	Equivalent Test Speed
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
EVU	Europäischer Verein für Unfallforschung und Unfallanalyse e. V.
FARS	Fatality Analysis Reporting System (USA)
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. im VDA
FEM	Finite Elemente Methode
Fg	Fußgänger
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
FOLKSAM	Automobilversicherer in Schweden
Fr	Fahrrad, Fahrradfahrer
GB	Guobiao (nationale Norm in China)
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.
GIDAS	German In Depth Accident Study
GTÜ	Gesellschaft für Technische Überprüfungen
GUVU	Gesellschaft für Ursachenforschung bei Verkehrsunfällen e. V.
HIC	Head Injury Criterion
HLDI	Highway Loss Data Institute (USA, Institut der Versicherungswirtschaft)
HPC	Head Protection Criterion (wie HIC, aber Untersuchungszeit begrenzt auf Kontaktzeitraum)
HUK	Verband der Haftpflichtversicherer, Unfallversicherer, Autoversicherer und Rechtsschutzversicherer e. V. (HUK-Verband), München. Abgelöst durch GDV
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety (USA)
INRETS	Institut National De Recherche Sur Les Transports Et Leur Sécurité (Frankreich), heute IFSTTAR
IR	Infrarot
IRCOBI	International Research Committee On Biomechanics
ISS	Injury Severity Score
JNCAP	Japan New Car Assessment Programme
Kfz (KFZ)	Kraftfahrzeug
KMVSS	Korean Motor Vehicle Safety Standard (Südkorea)
KNCAP	Korean New Car Assessment Programme
KT	Kollisionstyp
Latin NCAP	Latin New Car Assessment Programme (Südamerika)
LV	Leicht Verletzte
M	Momentanpol, Drehpol

MAIS	Maximum AIS = Maximaler AIS-Wert bei einem Verletzten
MB	Mercedes Benz
MHH	Medizinische Hochschule Hannover
MKS	Mehrkörpersystem
Mz	Motorisierte Zweiradfahrer
NASS	National Automotive Sampling System (USA, 1966 eingeführt)
NCAP	New Car Assessment Program (USA)
NCSA	National Center for Statistics and Analysis (USA), „Statistisches Bundesamt“ der USA, bei dem z. B. die Unfallerhebungsdaten aus NASS einfließen
Nfz (NFZ)	Nutzkraftwagen
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration (USA), amerikanische Verkehrssicherheitsbehörde im DOT
NIC	Neck Injury Criterion
Nij	Normalised Neck Injury Criterion
ODB	ortsfeste deformierbare Barriere
OOP	Out of Position
OUB	ortsfeste undeformierbare Barriere
OWiG	Ordnungswidrigkeitengesetz
Pkw (PKW)	Personenkraftwagen
PMTO	Post Mortal Testobject (Leiche)
PODS	Probability of Death Score
PSPF	Pubic Symphysis Peak Force
RDC	Rib Deflection Criterion
S	Schwerpunkt
SAE	Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, DA, USA
SID	Side Impact Dummy
SNPRM	Supplemental Notice of Proposed Rulemaking
SPUL	Spezifische Unfall-Leistung
STAPP	Name, daher Stapp Conference
StPO	Strafprozessordnung
SV	schwer Verletzte
TRIAS	Type Approval Test Procedures (Japan)
TRL	Transport Research Laboratory (England), früher TRRL
TRRL	Transport Road Research Laboratory (England)
TTI	Thoracic Trauma Index
TUB	Technische Universität Berlin
TUD	Technische Universität Dresden
TÜV	Technischer Überwachungsverein
TV	tödlich Verletzte
UDS	Unfall-Daten-Speicher (früher: Unfall-Daten-Schreiber)
US-NCAP	US New Car Assessment Programme
VC	Viscous Criterion

VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDI	Vehicle Deformation Index
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIDI	Vehicle Interior Deformation Index (inzwischen nicht mehr angewandt)
VOI	Volkswirtschaftlich Optimierter Insassenschutz (BMFT-Forschungsprojekt)
VTI	Swedish National Road and Transport Research Institute
VW	Volkswagen AG

Formelzeichen, Bezeichnungen

α		Einlaufwinkel
μ		Reibwert
φ	Bog	Drehwinkel
ω	Bog/s	Winkelgeschwindigkeit
Θ	kgm^2	Massenträgheitsmoment
Θ_0	kgm^2	Massen-Trägheitsmoment bezogen auf den Punkt 0
$\underline{\underline{\Theta_0}}$	kgm^2	Massen-Trägheitsmatrix bezogen auf den Punkt 0
a		Index für äußere Kraft
$\underline{a}$	m	Abstandsvektor des Stoßantriebes
$\underline{\underline{a}}$	m/s^2	Beschleunigung (Betrag)
A	Nm	Arbeit
A, E		Anfang, Ende einer Bewegung
B		Berührungspunkt, Kontaktpunkt, Impulsübertragungspunkt am Fahrzeug (identisch mit K)
c	N/m	Steifigkeit
c_{ers}	N/m	Ersatzsteifigkeit
D	kgm^2	Drall
D	m	Eindrückung
1D, 2D, 3D		ein-, zwei-, dreidimensional
Δv	m/s	Geschwindigkeitsänderung
e		Index für eingeprägte Kraft
$\underline{e}$		Einheitsvektor
$\underline{\underline{e}}$	m	minimaler Abstandsvektor des Stoßantriebes
E	Nm	Kinetische Energie
EES	km/h	Equivalent Energy Speed
F	N	Kraft
h	m	Höhe
i		Index für innere Kraft
i	m	Trägheitsradius
$I, \underline{I}$	kgm/s, Ns	Impuls, Impulsvektor

k		Restitutionskoeffizient, Stoßziffer, Stoßzahl
K		Berührungspunkt, Kontaktpunkt, Impulsübertragungspunkt am Fahrzeug (identisch mit B)
KO		Kollisionsort auf der Straße
l	m	Länge
l_R, R	m	Radstand
m	kg	Masse
M	Nm	Moment
M		Momentanpol
M_D		Drehpol
m_{ers}	kg	Ersatzmasse
N		Normalrichtung des Stoßantriebes
N	kgm/s ²	Newton
$\underline{P}, \underline{P}$	kgm/s, Ns	Stoßantrieb, Stoßantriebsvektor
P^*	kgm/s, N s	kleinstmöglicher Stoßantrieb, Hilfsgröße
$\underline{r}$	m	Lagevektor
R		Index für Reaktionskraft
R	m	Radstand
s	m	Weglänge, Deformationsweg
s		Sekunde
S		Schwerpunkt
$SPUL$	m ² /s ²	Spezifische Unfalleistung
T		Tangentialrichtung des Stoßantriebes
T	s	Vollschwingungsdauer
t	s	Zeit
v	m/s	Geschwindigkeit
v_{koll}, v_0	m/s	Aufprall-, Kollisionsgeschwindigkeit
v_{rel}	m/s ²	Relativgeschwindigkeit
W, W_{Def}	Nm	Deformationsarbeit
W_{el}	Nm	elastische Deformationsarbeit
W_{pl}	Nm	plastische Deformationsarbeit
$\times$		äußeres Produkt von Vektoren
x, y, z	m	Lagekoordinaten (i. Allg. für den Schwerpunkt)
$x(t)$	m	zeitabhängiger Weg
$\dot{x}(t)$	m/s	zeitabhängige Geschwindigkeit
$\ddot{x}(t)$	m/s ²	zeitabhängige Beschleunigung
$() , ()'$		vor, nach dem Stoß
$(\underline{\quad})$		einfache Unterstreichung für Vektor
$(\underline{\underline{\quad}})$		doppelte Unterstreichung für Matrix, Tensor