UNTERSTÜTZENDE STRATEGIEN ZUR OPTIMIERUNG DER FAHRZEUGQUERDYNAMIK

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der
Brandenburgischen Technischen Universität
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte

Dissertation

von

Jochen Busch

Dipl.-Ing. für Maschinenbau

geboren am 13.10.1982 in Bergen auf Rügen

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Peter Steinberg
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hon. Prof. (NUST) Dieter Bestle
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Arnold Kühhorn

Tag der mündlichen Prüfung: 6. November 2015

Berichte aus der Fahrzeugtechnik

Jochen Busch

**Unterstützende Strategien zur Optimierung
der Fahrzeugquerdynamik**

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Cottbus-Senftenberg, BTU, Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4240-5

ISSN 0945-0742

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Wesentlichen während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Lehrstuhl Technische Mechanik und Fahrzeugdynamik der Brandenburgischen Technischen Universität. Begleitet und unterstützt von Prof. Dr.-Ing. habil. Hon. Prof. (NUST) Dieter Bestle konnte ich hier meinem wissenschaftlichen Interesse an der Fahrzeugdynamik nachgehen und gesammelte Ideen aus meiner Zeit bei der Porsche AG umsetzen. Die im Wesentlichen theoretisch geprägten Untersuchungen an der Universität habe ich im Anschluss als Entwicklungsingenieur bei der Team-Rosberg-Engineering GmbH auch industriell erproben und erfolgreich einsetzen können, sodass mir im Jahr 2015 die Fertigstellung meiner Dissertation gelang.

Als Initiator zur Bearbeitung einer Dissertation möchte ich mich besonders bei Dr.-Ing. Malte Huneke bedanken, von Dir und dem gesamten Team der EFF1 Abteilung habe ich schon während meiner Diplomarbeit viel wichtiges Fahrdynamik-Know-how erworben. Für die vielen Stunden wissenschaftlicher Auseinandersetzungen und die intensive Hilfe bei Veröffentlichungen danke ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Hon. Prof. (NUST) Dieter Bestle, und den Professoren Dr.-Ing Arnold Kühhorn sowie Dr.-Ing. Peter Steinberg danke ich für die Übernahme des Korreferates bzw. des Vorsitzes des Prüfungsausschusses.

In meiner langen Assistenzzeit an der BTU habe ich viele Kollegen kennen und schätzen gelernt. Es ist immer eine Freude, Euch von Zeit zu Zeit wiederzusehen - ganz herzlichen Dank für die vielen beruflichen und privaten Bereicherungen! Mein Dank richtet sich auch an Caroline Pöhlmann und Christian Wachs, Ihr habt mit Euren studentischen Abschlussarbeiten einen entscheidenden Teil zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Michèl Hinz, Lars Sommer, Peter Flassig, Ihr habt mir schon vor Längerem vorgemacht, wie schnell man promovieren kann, und mich motiviert, auch mit meiner Arbeit ein Ende zu finden. Vielen Dank für die tolle Zeit!

Zwei Kollegen haben mich ganz besonders intensiv begleitet - zum einen war die Zeit im "Zirkuszimmer" mit Dieter Probst einmalig, die immer hilfreiche mathematische Unterstützung, die langjährige wissenschaftliche Erfahrung und die tolle musikalische Untermauerung jedes Tages sind unbezahlbar und bleiben unvergesslich! - zum anderen fand ich mit Torsten Funke einen Partner in der Fahrdynamikforschung am Lehrstuhl, mit dem ich auch themenübergreifend fahrzeugtechnisches Interesse teilen konnte. Euch beiden danke

ich für die viele Unterstützung und besonders für die vielen Späße, die wir zusammen am und außerhalb des Lehrstuhls erleben durften. Ohne die uneingeschränkte technische Unterstützung von Lutz Anklam und die organisatorischen Fähigkeiten von Peggy Fobo wäre keine so professionelle Arbeitsumgebung möglich gewesen - auch Euch besten Dank für alles!

Liebe Eltern, ohne Euch hätte ich nie die Ruhe und die Fähigkeiten zur Bewältigung dieser Arbeit gehabt, der Dank an Euch ist selbstverständlich - schließlich habt Ihr mich in meinem technischen Interesse schon immer unterstützt. Ohne die bedingungslose Unterstützung von Franziska und das Rundum-sorglos-Paket, welches sie für unsere kleine Familie stets schnürt, wäre meine Konzentration und Motivation nie so robust und standhaft geblieben. Ich bin riesig dankbar für jeden Tag mit Dir. Zu guter Letzt möchte ich auch meinem jüngsten Glück - Sohn Karl für die bisher so friedliche und schreifreie Zeit in Deinem ersten Lebensjahr danken und besonders für das Lachen, welches Du mir in jeder Situation ins Gesicht zaubern kannst. Bitte bleibt alle wie Ihr seid!

Grünstadt, im Dezember 2015

Jochen Busch

Kurzfassung

Unterstützende Strategien zur Optimierung der Fahrzeugquerdynamik

Schlüsselwörter: Fahrzeugdynamik, Modellbildung, Mehrkriterienoptimierung, Lenkstrategien, Hinterachslenkung, robustheitsbasierte Auslegung

Die weltweit zunehmende Zahl neu zugelassener PKW ist Grundlage der stetigen Weiterentwicklung im Individualverkehr. Begleitet von immer mehr Fahrzeugvarianten und zunehmenden landesspezifischen Zulassungsanforderungen gilt es, in immer kürzeren Entwicklungszyklen Zielvorgaben valide und optimal zu erreichen. Dabei sind wesentliche Zielvorgaben durch Steigerungswünsche bezüglich Sicherheit, Komfort, Leistungspotenzial und Kosteneffizienz gekennzeichnet.

Die Absicherung und Verbesserung der Fahrzeugdynamik ist dabei ein wesentlicher Teil, der sowohl durch das Fahrwerk als auch durch Fahrzeugaufbau und Antriebsstrang bestimmt wird. Dabei ist die Aufgabe des Fahrwerks, das dynamische Potenzial optimal auf die Straße zu übertragen, wobei die grundlegende elasto-kinematische Auslegung von immer mehr Applikationsaufwand elektromechanischer Systeme im Fahrwerk begleitet wird. Für den Entwicklungsingenieur steigt damit einerseits die Gestaltungsfreiheit, andererseits wird aber der mögliche Funktionsumfang immer unüberschaubarer. Durch funktionsübergreifende Vernetzung verschiedener Fahrzeugsysteme sowohl untereinander als auch mit dem Verkehrsumfeld wird der Entwicklungsaufwand zusätzlich vergrößert.

Mithilfe algorithmisch gestützter Optimierungsstrategien kann dieser Entwicklungsaufwand schon in frühen Phasen gezielt unterstützt werden. Dafür werden in dieser Arbeit Strategien und Methoden entwickelt, die modellbasiert optimale Kombinationen von Fahrzeugparametern und Regelsystemdaten liefern, um die Fahrzeugquerdynamik zu verbessern und abzusichern. Basierend auf Identifikationsdaten werden Modelle verschiedener Detaillierungsgrade analysiert, um dann objektive Kriterien zur Verbesserung des dynamischen Lenkverhaltens eines Referenzfahrzeugs zu entwickeln. Es werden sowohl die Einflüsse verschiedener Modellierungstiefen, Parametrisierungs- und Optimierungsstrategien untersucht, um zunächst optimale Ergebnisse robust zu erzeugen als auch abschließend robustheitsbasierte Optimierungsstrategien formuliert, um auch bei immer vorhandenen Unsicherheiten in der Modellbildung sowie im Produktions- und Betriebsprozess von Fahrzeugen optimale Lösungen zu erzielen.

Abstract

Optimization Strategies Supporting Vehicle Lateral Dynamics

Keywords: vehicle dynamics, modeling, multi-objective optimization, steering strategies, rear-wheel steering, robust design

The world's increasing number of new registered passenger cars is a major reason for the continuous developments in individual motor car traffic. Despite of the increasing number of vehicle variants and increasing country-specific admission requirements, optimal targets have to be reached in ever shorter development cycles. Essential targets are related to increasing needs in safety, comfort, performance and cost-effectiveness.

The maintenance and improvement of vehicle dynamics is an essential part, which is determined by both chassis and vehicle body with powertrain. The object of the chassis geometry is to transmit the dynamic potential to the road, where the basic elasto-kinematic design will be accompanied more and more by application effort regarding electromechanical systems. On the one hand this increases the engineering freedom of design and, on the other, the possible functions get more and more unmanageable. In addition, through cross-functional networking of various vehicle systems interacting with each other and even with the traffic environment the development effort is increased considerably.

By using numerical optimization strategies, the development can be supported even in early design phases. These strategies and methods being developed in this work, provide optimal combinations of vehicle- and control system parameters to improve the vehicle lateral dynamics and safety. Based on models with different levels of detail, identification data are analyzed in order to develop objectives for improving the dynamic steering behavior of a reference vehicle. Both the influence of different modeling depths and the parameterization and optimization strategies are examined to generate robust optimal results. Due to ever-present uncertainties in modeling as well as in production and operating processes of vehicles, robustness based design strategies and adaption ideas are formulated and solutions are discussed finally.

Inhaltsverzeichnis

Symbole und Abkürzungen	V
1 Einleitung	1
1.1 Klassische und moderne Fahrdynamikentwicklung	2
1.2 Stand der Forschung zur Fahrzeugquerdynamik	6
1.3 Aufbau und Ziel der Arbeit	8
2 Fahrzeugmodelle zur Bewertung der Querdynamik	11
2.1 Nichtlineares Einspurmodell mit Hinterachslenkung	11
2.1.1 Kinetik und Kinematik	12
2.1.2 Reifendynamik mit linearem Einlaufverhalten	15
2.1.3 Nichtlineares Reifenverhalten	18
2.1.4 Modellierung der Wankdynamik	20
2.1.5 Nichtlineare Zustandsgleichungen	24
2.2 Lineares Einspurmodell	24
2.2.1 Linearisierung von Kinetik und Kinematik	25
2.2.2 Lineare Zustandsgleichungen	26
2.2.3 Lenkmoment durch vektorielle Längskraftverteilung	27
2.3 Nichtlineares Zweispurmodell	29
2.3.1 Kinetik und Kinematik	30
2.3.2 Vereinfachte Radaufhängung	35
2.3.3 Erweiterung des Reifenmodells	38
3 Beurteilung der Querdynamik im Zeit- und Frequenzbereich	41
3.1 Fahrmanöver und Datenanalyse	41
3.2 Laplace-Transformation des linearen Einspurmodells	48
3.3 Kriterien zur Bewertung der Querdynamik	54
3.3.1 Beurteilung des Gierverhaltens	58
3.3.2 Bewertung des Querbeschleunigungsverhaltens	62

3.3.3	Bewertung des Wank-, Eigenlenk- und Reifenverhaltens	64
4	Entwicklung optimaler Lenkstrategien am linearen Einspurmodell	69
4.1	Optimale Vorderachslenkung für unterschiedliche Geschwindigkeiten	69
4.1.1	Formulierung als skalares Optimierungsproblem	71
4.1.2	Vergleich gradientenbasierter und stochastischer Optimierungen	73
4.1.3	Formulierung als mehrkriterielles Optimierungsproblem	79
4.1.4	Optimierung mit dem NSGA-II Algorithmus	82
4.1.5	Straftermstrategie für Nebenbedingungen	83
4.1.6	Optimierung mit einem MOPSO Algorithmus	84
4.2	Fahrgeschwindigkeitsabhängige Vorderachslenkung	89
4.2.1	Parametrisierungen	89
4.2.2	Optimierungsergebnisse	92
4.3	Regelung von Vorder- und Hinterachslenkung	95
4.3.1	Parametrisierung geschwindigkeitsabhängiger Regelgrößen	97
4.3.2	Ergebnisvergleich und Parameterreduktion	97
4.4	Fahrzeugindividualisierungsstrategie	102
5	Optimierung der Querdynamik im Bereich des nichtlinearen Fahrverhaltens	107
5.1	Kriterienvergleich zwischen Frequenz- und Zeitbereich	107
5.2	Darstellung des Einflusses von Nichtlinearitäten am Einspurmodell	109
5.2.1	Instationäres Fahrverhalten	110
5.2.2	Stationäres Fahrverhalten	112
5.2.3	Darstellung im Phasenraum	115
5.3	Mehrkriterielle Optimierungen des nichtlinearen Einspurmodells	120
5.3.1	Interpolationsmethode zur Approximation des diskreten Lenküber- setzungskennfeldes	124
5.3.2	Parametrisierung und Formulierung des Optimierungsproblems	127
5.3.3	Diskussion der Optimierungsergebnisse	129
5.4	Mehrkriterielle Optimierungen des nichtlinearen Zweispurmodells	132
6	Robustheitsbasierte Optimierung	139
6.1	Grundlagen der robusten Optimierung	139
6.2	Unsicheres Fahrverhalten durch Zufallsparameter	143
6.2.1	Parameterunsicherheiten	144
6.2.2	Umweltunsicherheiten	145
6.2.3	Einfluss auf das Fahrverhalten	146
6.3	Optimierung des linearen Einspurmodells als robustes Entwurfsproblem	153

6.4	Stichprobenerzeugung und Antwortflächenmethoden	156
6.4.1	Stichprobenerzeugung mit optimal Latin-Hypercubes	157
6.4.2	Approximation mit dem Kriging-Verfahren	160
6.4.3	Untersuchungen zur Approximationsgüte und Recheneffizienz	163
6.4.4	Optimierungsergebnisse für das robuste Entwurfsproblem	167
6.5	Höhere Robustheit durch Adaption	168
7	Zusammenfassung	179
	Anhang A: Ergänzende Zusammenhänge	181
A.1	Zustandsform des linearen Einspurmodells mit Wankfreiheitsgrad	181
A.2	Kriging-Modell	183
	Anhang B: Zusätzliche Simulationen	185
B.1	Lineares Einspurmodell mit Wankfreiheitsgrad	185
B.2	Zweispurmodell	189
	Abbildungen	193
	Tabellen	201
	Literatur	203

Symbole und Abkürzungen

Allgemeine mathematische Ausdrücke

$\checkmark$	Minimalwert oder reduzierter Wert	Re	Realteil
$\dot{}$	Zeitableitung	arg	Argument
$\hat{}$	Maximalwert	d	infinitesimale Änderung
$E[\bullet]$	Erwartungswert	exp	Exponentialfunktion
$\bar{}$	unsicherer Wert	max	Maximum
$\in$	Element von	min	Minimum
$\mathcal{L}$	Laplace-Transformation	sgn	Vorzeichen
Im	Imaginärteil	var	Varianz

Griechische Symbole

Θ	Korrelationsskalierung	μ	allgemeiner Reibkoeffizient oder Mittelwert
Δ	Differenz	ν	allgemeiner Radschlupf
$\Delta\delta$	Lenkwinkelunsicherheit	ν_A	Antriebsschlupf
Ω	Kreisfrequenzbereich	ν_B	Bremsschlupf
α	Schräglaufwinkel	ρ	Kurvenradius
β	Schwimmwinkel	ρ_L	Luftdichte
γ	Strafterm oder Radsturzwinkel	σ^2	Varianz
δ	Lenkwinkel	φ	Wankwinkel
δ_L	Lenkradwinkel	ψ	Gierwinkel
ε	kleine Toleranz	ω	allgemeine Kreisfrequenz oder Winkelgeschw. des Rades
ϑ_0	Hauptachsenverdrehung	ω_0	Kreisfrequenzauflösung
λ	Eigenwert		

Indizes oben

D	deterministischer Entwurf	$norm$	normiert
KM	Kriging-Modell	opt	optimal
M	optimaler Entwurf mit minimalem Abstand zu Null	org	original
P	probabilistischer Entwurf	red	reduziert
$\mathcal{R}$	spezieller Referenzentwurf	ref	allgemeiner Referenzentwurf
SS	Stützstellen	u	unten
g	Erdbeschleunigung	o	oben
ges	gesamt	0	stationär
(k)	Laufindex	$*$	Pareto-Optimal
lin	linear	$+$	positive Abweichung
max	Maximum	$-$	negative Abweichung
min	Minimum	γ	Straftermbasiert

Indizes unten

end	Endwert	l, r	links, rechts
err	Fehler	lok	lokal
$glob$	global	max	Maximum
i, j	Variablenindizes	min	Minimum
k, l	Zählindizes	v, h	vorn, hinten

Lateinische Symbole

A	Amplitude oder Fahrzeugquerschnittsfläche	F_x	Radlängskraft
B	Steifigkeitsfaktor oder Bernsteinpolynom	F_y	Achsquerkraft
C	Formfaktor	F_z	Achsaufstandskraft
D	Maximalkraft oder Problemdimension	H	horizontale Lagerkraft
E	Kurvenfaktor	$I_{x''}$	Wankträgheitsmoment des Aufbaus
F	Fitness oder Verteilungsfunktion	$I_{xz''}$	Deviationsmoment des Aufbaus
F_L	resultierende Luftwiderstandskraft	$I_{y''}$	Nickträgheitsmoment des Aufbaus
F_Q	Querkraft	$I_{z'}$	Gierträgheitsmoment
F_S	Seitenwindkraft	L	Reifeneinlauflänge oder Lagrange-Funktion
		M	Lagermoment

M_{FD}	Feder- Dämpfermoment		Pendelachsenanbindung und Boden
M_L	Längskraftgieirmoment		
M_S	Stabilisator-, oder Seitenwindmoment	h_W	Abstand zwischen Fahrwerkschwerpunkt und Wankpol
M_W	inneres Wankmoment	i_h	Hinterachslenkübersetzung
N	Nicknormalkraft oder Stichprobengröße	i_v	Vorderachslenkübersetzung
ΔN	Achslaständerung	i_{hp}	Übersetzung für die Hinterachslenkgeschwindigkeit
P	Momentanpol oder Phase	k	Querdehnungskonstante oder freie Variable
R_v, R_α	Skalierungsfaktoren der maximalen Reifenkraft	k_z	Degressionsfaktor
S	Fahrzeugschwerpunkt	l	Radstand
S_A	Aufbauschwerpunkt	l_G	Gepäcklage
S_F	Fahrwerksschwerpunkt	l_I	Insassenlage
T	Zeitbereich	l_K	Kraftstoffschwerpunktslage
T_h	geschwindigkeitsabhängige Zeitkonstante	l_v, l_h	Schwerpunktsabstände zur Vorder- und Hinterachse
V	Geschwindigkeitsbereich	m	Gesamtmasse des Fahrzeugs
W	Wankpol	m_A	Aufbaumasse
ΔW	Radlaständerung	m_F	Fahrwerksmasse
a_q	Querbesehleunigung	m_G	Gepäckmasse
c	Degressionsfaktor der Schräglaufsteifigkeit	m_I	Insassenmasse
c_φ, c_v, c_h	Wank- und Federsteifigkeiten	m_K	Kraftstoffmasse
c_w	Luftwiderstandsbeiwert	q	Reifenquerauslenkung
c_y	Quersteifigkeit	r	Radradius
c_α	Schräglaufsteifigkeit	r_e	effektiver Radrollradius
d_φ, d_v, d_h	Wank- und Lineardämpfungen	s^o	oberer Federlagerabstand
f	Frequenz oder Funktion	s^u	unterer Federlagerabstand
g	Erdbeschleunigung oder Funktion	s_v, s_h	Spurweite vorn und hinten
h_A	Abstand zwischen Wankpol und Aufbauschwerpunkt	t	Zeit
h_F	Abstand des Fahrwerksschwerpunkts zum Boden	v	Geschwindigkeit des Fahrzeugschwerpunkts
h_L	Abstand zwischen oberem Federlager und dem Wankpol oder Angriffshöhe des Luftwiderstands	$v_{x'}$	Fahrzeuglängsgeschwindigkeit
h_R	Abstand zwischen	$v_{y'}$	Fahrzeugquergeschwindigkeit
		w	Wichtungsfaktor
		x	allgemeine Variable oder gleichverteilte Zufallszahl
		y	Abschwächungsfaktor
		z	normalverteilte Zufallszahl

Matrizen und Vektoren

A	Zustandsmatrix		Hypercubes
B	Steuerungsmatrix	h^M	Frequenzgang für konstantes Moment um die Hochachse
E	Einheitsmatrix	h_v, h_h	Frequenzgang der Vorderachs- bzw. Hinterachslenkung
H	Frequenzgangmatrix	k	verallgemeinerte Zentrifugal-, Kreisel- und Corioliskräfte
I'	Trägheitstensor des Fahrwerks	p	Parametervektor
I''	Trägheitstensor des Aufbaus	q	verallgemeinerte, eingeprägte Kräfte
M	Massenmatrix	r	Orts- oder Korrelationsvektor
P	Permutationsmatrix	u	allgemeiner Eingangsvektor oder Vektor unsicherer Parameter
R	Korrelationsmatrix	x	Zustandsvektor
b_v, b_h	Steuervektor der Vorder- und Hinterachse	y	verallgemeinerter Lagevektor
c	Vektor unsicherer Umwelteinflüsse	z	verallgemeinerter Geschwindigkeitsvektor
e	Einheitsvektor		
h	Nebenbedingungen oder		

Mengen und Sonstiges

A, B, M	optimale Entwürfe der linearen Modelle	$\mathcal{O}, \mathcal{K}$	optimale Entwürfe der nichtlinearen Modelle
$\mathcal{D}$	deterministisch optimaler Entwurf	$\mathcal{P}$	zulässiger Entwurfsraum
$\mathcal{F}$	Funktionsraum	$\mathcal{P}, \mathcal{C}$	optimale robuste Entwürfe
$\mathcal{L}, \mathcal{K}_m$	Indexmengen	$\mathbb{N}$	Menge der natürlichen Zahlen
$\mathcal{N}$	normalverteilte Zufallszahl	$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen

Abkürzungen

ACC	<u>a</u> daptive <u>c</u> rui <u>s</u> e <u>c</u> ontrol	ESP	<u>E</u> lektronisches <u>S</u> tabilitä <u>t</u> s- <u>P</u> rogramm
AGT	<u>A</u> ggregateträger	FE	<u>F</u> inite <u>E</u> lemente
AWS	<u>a</u> ll- <u>w</u> heel <u>s</u> teering	FFT	<u>F</u> ast <u>F</u> ourier- <u>T</u> ransformation
CAD	<u>c</u> omputer- <u>a</u> ided <u>d</u> esign	GESM	gekoppeltes, lineares <u>E</u> inspurmodell
CAE	<u>c</u> omputer- <u>a</u> ided <u>e</u> ngineering	LDW	lane departure <u>w</u> arning
DoE	<u>d</u> esign <u>o</u> f <u>e</u> xperiment	LHS	<u>L</u> atin- <u>H</u> ypercube <u>S</u> tichprobe
EESM	entkoppeltes lineares <u>E</u> inspurmodell	LRE	<u>l</u> ineares <u>R</u> eifeneinlaufverhalten
ESM	<u>E</u> inspurmodell		

LT	<u>L</u> aplace- <u>T</u> ransformation	OLH	optimal <u>L</u> atin- <u>H</u> ypercube Verfahren
MCS	<u>M</u> onte <u>C</u> arlo <u>S</u> tichprobe	OLHS	optimal <u>L</u> atin- <u>H</u> ypercube <u>S</u> tichprobe
MKS	<u>M</u> ehr <u>k</u> örper <u>s</u> ysteme	ONS	optimal <u>n</u> ormalverteilte <u>S</u> tichprobe
MOPSO	<u>m</u> ulti- <u>o</u> bjective <u>p</u> article <u>s</u> warm optimization	PSO	<u>p</u> article <u>s</u> warm optimization
NESM	<u>n</u> ichtlineares <u>E</u> inspurmodell	RWS	<u>r</u> oulette- <u>w</u> heel <u>s</u> election
NR	<u>n</u> ichtlineares <u>R</u> eifenmodell	TV	<u>t</u> orque <u>v</u> ectoring
NS	<u>n</u> ormalverteilte <u>S</u> tichprobe	ZSM	<u>Z</u> weispurmodell
NSGA-II	<u>n</u> on-dominated <u>s</u> orting <u>g</u> enetic algorithm II		