



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Diplomarbeit

Studiendepartment Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

**Aufbau einer Datenbasis zur Fahrwerkssimulation im
Mehrkörpersimulationsprogramm „SimMechanics“**

Kai Schulze

12. Juni 2007



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Studiendepartment Fahrzeugtechnik + Flugzeugbau
Berliner Tor 9
20099 Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Liebherr - Aerospace Lindenberg GmbH
Pfänderstraße 50 - 52
88161 Lindenberg

Verfasser: Kai Schulze
Abgabedatum: 12.06.2007

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME
2. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Willy Bräunling

Industrieller Betreuer: Dipl.-Ing. Armin Rasch

Kurzreferat

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Simulation des Landestoßes für verschiedene Fahrwerkstypen. Sie dokumentiert die theoretischen Grundlagen und die programmtechnische Umsetzung in *MATLAB*, *Simulink* und *SimMechanics*. Eine Beispielrechnung zeigt, dass das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Programm die beim Landestoß auftretenden Kräfte, Verschiebungen und Geschwindigkeiten realistisch wiedergeben kann.

Ziel der Landestoßsimulation ist die Senkung des Zeit- und Kostenaufwandes während der Entwicklung und des Tests von Fahrwerken für Fluggeräte. Spezielles Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung von Modellen für verschiedene Fahrwerkstypen, die in Aufbau und Bedienung eine hohe Kommunalität aufweisen. Diese gemeinsame Plattform soll die Erweiterbarkeit und Weiterverwendung der Modelle gewährleisten. Die betrachteten Fahrwerkstypen sind Teleskop-, Schwinghebel- und Halbschwingenfahrwerk. Es werden Modelle dieser Fahrwerke mit Einzel- und Zwillingsbereifung erstellt. Das Schwinghebelfahrwerk kann mit Druck- oder Zugdämpfer ausgerüstet sein.

Simuliert wird lediglich der Landestoß eines einzelnen Fahrwerks. Die erarbeiteten Modelle bilden aber eine Voraussetzung für die Erstellung eines Gesamtmodells des Fluggeräts, mit dem sich die Interaktion mehrerer Fahrwerke bei der Landung oder beim Rollen simulieren lassen.



DEPARTMENT FAHRZEUGTECHNIK UND FLUGZEUBAU

Aufbau einer Datenbasis zur Fahrwerkssimulation im Mehrkörpersimulationsprogramm "SimMechanics"

Aufgabenstellung zur *Diplomarbeit* gemäß Prüfungsordnung

Hintergrund

Die dynamischen Lasten aus der Interaktion von Fahrwerk und Flugzeugrumpf beim Landestoß und beim Rollen am Boden bestimmen wesentlich die Dimensionierung der Strukturen in großen Bereichen des Flügels und des Rumpfes. Darüber hinaus wirken die Beschleunigungen, die das Flugzeug durch den Landestoß erfährt, auf das Komfortempfinden der Passagiere. Die Auslegung der Flugzeug- und Fahrwerksstruktur erfordert zuverlässige Aussagen über Landelasten und -lastfaktoren. Daher wird das dynamische Verhalten eines Fahrwerks in umfangreichen Fallversuchen, sogenannten Drop Tests, untersucht und beschrieben. Um Kosten- und Zeitaufwand solcher Versuchsreihen zu minimieren und bereits in einem frühen Stadium der Entwicklung verlässliche Voraussagen treffen zu können, sind verstärkt Simulationsprogramme im Einsatz.

Aufgabe

Die Diplomarbeit umfasst den Aufbau einer Datenbasis zur Fahrwerkssimulation im Mehrkörpersimulationsprogramm "SimMechanics". Um auf die Anforderungsprofile der Flugzeughersteller eingehen zu können, sind Simulationsmodule für verschiedene Fahrwerkskonfigurationen zu erstellen. Hierbei sind die grundlegenden Fahrwerkskonfigurationen Schwinghebel- und Teleskopfahrwerk mit jeweils verschiedenen Reifenanordnungen und Dämpfervariationen zu berücksichtigen. Die Aufgabenstellung beinhaltet folgende Punkte:

- Erfassung der theoretischen Grundlagen der Fahrwerkssimulation.
- Programmtechnische Umsetzung in Matlab/Simulink/SimMechanics.
- Ausführliche Dokumentation und Beschreibung der Fahrwerksmodule.
- Verifikation der Einzelmodule durch einen Vergleich mit Messungen aus Drop Tests.

Die Ergebnisse sollen in einem Bericht dokumentiert werden. Bei der Erstellung des Berichtes sind die entsprechenden DIN-Normen zur Gestaltung wissenschaftlicher Arbeiten zu beachten. Die Arbeit wird bei der Liebherr Aerospace GmbH in Lindenberg angefertigt. Industriel-
ler Betreuer ist Dipl.-Ing. Armin Rasch.

Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Diplomarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

.....

Datum

Unterschrift

Inhalt

	Seite
Verzeichnis der Bilder.....	8
Verzeichnis der Tabellen.....	10
Liste der Symbole.....	11
Liste der Abkürzungen	14
Verzeichnis der Begriffe und Definitionen	15
1 Einleitung	19
1.1 Ziel der Arbeit	19
1.2 Die Landung als Teil der Flugmission	20
1.3 Aufbau der Arbeit.....	21
2 Theoretische Grundlagen	22
2.1 Fahrwerkstypen	22
2.1.1 Teleskopfahrwerk	24
2.1.2 Schwingen- oder Schwinghebelfahrwerk	25
2.1.3 Halbschwingenfahrwerk.....	27
2.2 Bewegungsgleichungen	27
2.3 Stoßdämpfer	29
2.3.1 Gasfeder.....	32
2.3.2 Hydraulische Drossel.....	40
2.3.3 Dämpferreibung.....	41
2.3.4 Steifigkeit und modale Dämpfung.....	44
2.4 Reifenmodell	46
2.5 Shimmy Damper.....	49
2.6 Landestoßanalyse.....	49
3 Programmtechnische Umsetzung	51
3.1 Programmkenndaten.....	52
3.1.1 Verwendete Programme	52
3.1.2 Systemvoraussetzungen.....	53
3.1.3 Dateien und Speicherstruktur	54
3.2 Programmablauf und Menüsystem.....	57
3.3 Eingabe	68
3.3.1 Geometrie	69
3.3.2 Stoßdämpfer	72
3.3.3 Reifen	74
3.4 Ausgabe	75

3.4.1	Ausgabeparameter	75
3.4.2	Ausgabedateien.....	76
3.5	Fahrwerkskinematik	78
3.5.1	Teleskopfahrwerk.....	78
3.5.2	Schwinghebelfahrwerk.....	80
3.5.3	Halbschwingenfahrwerk.....	82
3.6	Stoßdämpfer	84
3.6.1	Gasfeder.....	86
3.6.2	Hydraulische Drossel.....	86
3.6.3	Dämpferreibung.....	91
3.6.4	Steifigkeit und modale Dämpfung.....	92
3.7	Reifen	92
3.8	Shimmy Damper.....	93
3.9	Besonderheiten	94
4	Verifikation und Beispielrechnung.....	96
4.1	Kennlinie der Gasfeder.....	96
4.2	Zeppelin NT	98
4.3	Teleskopfahrwerk aus dem LTH.....	103
5	Zusammenfassung.....	108
	Literaturverzeichnis.....	109
	Anhang A Übersicht der Programme und Unterprogramme.....	111
	Anhang B Struktogramme.....	118
	Anhang C Übersicht der Programmvariablen.....	144
C.1	Eingabeparameter	144
C.2	Berechnete und geladene Parameter.....	154
C.3	Ausgabeparameter	158
	Anhang D Blöcke in <i>SimMechanics/Simulink</i>	164
	Anhang E Simulationsergebnisse	168
E.1	Grafische Ausgabe.....	169
E.2	Simulationsprotokoll	177

Verzeichnis der Bilder

Bild 2.1	Typische Anordnungen der Räder bei Flugzeugfahrwerken	23
Bild 2.2	Fahrwerkstypen	24
Bild 2.3	Skizze der Kinematik des Schwinghebelfahrwerks	26
Bild 2.4	Kräftegleichgewicht am Beispiel eines Schwinghebelfahrwerks.....	28
Bild 2.5	Aufbau eines einstufigen oleo-pneumatischen Stoßdämpfers.....	30
Bild 2.6	Dämpferkräfte in Abhängigkeit der Zeit und des Federwegs.....	31
Bild 2.7	Aufbau eines zweistufigen Dämpfers.....	37
Bild 2.8	Vergleich des Druckverlaufs einer ein- und einer zweistufigen Gasfeder	39
Bild 2.9	Normalkräfte an den Dämpferlagern	43
Bild 2.10	Reibungskoeffizient über dem Schlupf	47
Bild 2.11	Von-Schlippe-Annäherung für die Kontaktlinie des Reifens mit dem Boden	48
Bild 3.1	Speicherstruktur des Landestoßsimulationsprogramms	56
Bild 3.2	Auswahl des Fahrwerkstyps in <i>DROP_SIMU</i>	57
Bild 3.3	Hauptmenü der Landestoßsimulation.....	58
Bild 3.4	Auswahlmenü zum Laden der Konfiguration	59
Bild 3.5	Laden einer Gesamtkonfiguration	60
Bild 3.6	Untermenü zum Ändern einer Konfiguration.....	61
Bild 3.7	Ändern des Stoßdämpferparameters maximaler Federweg.....	62
Bild 3.8	Wahl des Eingabemodus der Drossel­eigenschaften	63
Bild 3.9	Laden von Daten in Form einer Matrix	64
Bild 3.10	Dialog zum Speichern einer Konfiguration.....	65
Bild 3.11	Übersicht der Simulationsergebnisse	66
Bild 3.12	Informationsbildschirm beim Speichern der Simulationsergebnisse	67
Bild 3.13	Eingabe der Geometrie eines Teleskopfahrwerks	69
Bild 3.14	Eingabe der Geometrie eines Schwinghebelfahrwerks	71
Bild 3.15	Eingabe der Geometrie eines Halbschwingenfahrwerks	72
Bild 3.16	Eingabe der Geometrie des Dämpfers	73
Bild 3.17	<i>SimMechanics</i> -Modell eines Teleskopfahrwerks mit zwei Rädern.....	79
Bild 3.18	<i>SimMechanics</i> -Modell eines Schwinghebelfahrwerks mit einem Rad.....	80
Bild 3.19	Dämpferfreiheitsgrade beim Schwinghebelfahrwerk	81
Bild 3.20	Dämpferfreiheitsgrade beim Halbschwingenfahrwerk.....	82
Bild 3.21	<i>SimMechanics</i> -Modell eines Halbschwingenfahrwerks mit einem Rad	83
Bild 3.22	Dämpferfreiheitsgrade beim Teleskopfahrwerk	84
Bild 3.23	Modell des Stoßdämpfers	85
Bild 3.24	Betrachtete Dämpferbauformen	87
Bild 3.25	Drosselfaktoren und Faktoren zur Berechnung der Druckdifferenzen.....	90
Bild 3.26	<i>Simulink</i> -Modell zur Berechnung der Lagerkraft	91
Bild 3.27	<i>Simulink</i> -Modell der vertikalen Federeigenschaften des Reifens.....	93

Bild 4.1	Vergleich der berechneten und gemessenen Gasfederkennlinien	96
Bild 4.2	Ergebnisvergleich Zeppelin NT, Kräfte	100
Bild 4.3	Ergebnisvergleich Zeppelin NT, Einfederungen	101
Bild 4.4	Ergebnisvergleich Zeppelin NT, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen	102
Bild 4.5	Ergebnisvergleich Teleskopfahrwerk LTH, Kräfte und (Absolut-) Drücke.....	105
Bild 4.6	Ergebnisvergleich Teleskopfahrwerk LTH, Einfederungen.....	106
Bild E.1	Ausgabediagramme Zeppelin NT, Gasfeder und Landebahnunebenheiten	169
Bild E.2	Ausgabediagramme Zeppelin NT, Hydraulische Drossel	170
Bild E.3	Ausgabediagramme Zeppelin NT, Reifen.....	171
Bild E.4	Ausgabediagramme Zeppelin NT, Randbedingungen.....	172
Bild E.5	Ausgabediagramme Zeppelin NT, Kräfte	173
Bild E.6	Ausgabediagramme Zeppelin NT, Momente	174
Bild E.7	Ausgabediagramme Zeppelin NT, Drücke, Energie, Arbeit	175
Bild E.8	Ausgabediagramme Zeppelin NT, Einfederungen und Geschwindigkeiten	176

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1	Literaturübersicht zum Polytropenexponent der Gasfeder	32
Tabelle 2.2	Thermischer Volumenausdehnungskoeffizient ausgewählter Flüssigkeiten	33
Tabelle 2.3	Referenzkompressibilitätsmodul ausgewählter Flüssigkeiten	34
Tabelle 2.4	Literaturübersicht zum Durchflusskoeffizienten	40
Tabelle 3.1	Verwendete Programmversionen.....	52
Tabelle 3.2	Systemvoraussetzungen für <i>MATLAB</i> 7.4	53
Tabelle 3.3	Größe der erzeugten Ergebnisdateien	53
Tabelle 3.4	Schlüssel für den Fahrwerkstyp in Programmnamen	55
Tabelle 3.5	Messpunkte bei der Ausgabe	75
Tabelle 3.6	Wirksame Flächen und Drosselfaktoren.....	89
Tabelle 3.7	Besonderheiten des Programms.....	94
Tabelle 4.1	Daten der Gasfeder für den Kennlinienvergleich	97
Tabelle 4.2	Eingabeparameter für Fallversuch des Heckfahrwerks des Zeppelin NT.....	99
Tabelle 4.3	Vergleich der Maximalwerte (Zeppelin NT)	102
Tabelle 4.4	Eingabeparameter für Fallversuch aus dem LTH	104
Tabelle 4.5	Vergleich der Maximalwerte (Teleskopfahrwerk LTH).....	107
Tabelle A.1	Übersicht der Programme und Unterprogramme.....	111
Tabelle C.1	Eingabeparameter	144
Tabelle C.2	Berechnete und geladene Parameter für die Simulation.....	154
Tabelle C.3	Ausgabeparameter	158
Tabelle E.1	Erklärung der verwendeten <i>SimMechanics/Simulink</i> -Blöcke.....	164

Liste der Symbole

An dieser Stelle sollen nur die Symbole aufgelistet werden, die in dieser Diplomarbeit zur Vermittlung der theoretischen Grundlagen verwendet werden. Eine Übersicht der in den erstellten Simulationsprogrammen vorkommenden Variablen, sowie deren Beschreibung befindet sich in Anhang C. Alle mit dem Landestoßsimulationsprogramm zusammenhängenden Programme, Unterprogramme, Ordner, Dateinamen und Programmvariablen sind in dieser Diplomarbeit hervorgehoben.

Symbole

a	halbe Kontaktlänge
A	Fläche
<i>AirPercent</i>	Anteil des in der Hydraulikflüssigkeit gelösten Gases
$B_{\dot{O}l}$	Kompressibilitätsmodul
B_{Ref}	Referenzkompressibilitätsmodul
C	Steifigkeitsmatrix des Fahrwerks
C	Federsteifigkeit
c_1, c_2, c_3	Elemente der diagonalen Steifigkeitsmatrix
C_D	Discharge Coefficient, Durchflussfaktor
C_{fa}	Kurvensteifigkeit des Reifens
C_{ma}	Selbstausrichtungssteifigkeit des Reifens
D	Außendurchmesser
d	Innendurchmesser
E	Elastizitätsmodul, E-Modul oder Energie
E_A	Faktor für den Einfluss des gelösten Gases auf $B_{\dot{O}l}$
E_P	Faktor für den Einfluss des Druckes auf $B_{\dot{O}l}$
E_T	Faktor für den Einfluss der Temperatur auf $B_{\dot{O}l}$
F	Kraft
g	Fallbeschleunigung
K	Dämpfungsfaktor
K	modale Dämpfungsmatrix des Fahrwerks
k_1, k_2, k_3	Elemente der diagonalen Dämpfungsmatrix
k_m	Dämpfungsverhältnis, Lehrsches Dämpfungsmaß
L	Lift, Auftriebskraft
LF	Load Factor, Lastvielfaches
l_{TOR}	Abstand des Verbindungspunktes der <i>torque links</i> zur Dämpferachse
M	Massenmatrix des ungefederten Teil des Fahrwerks

m	Masse
m_1, m_2, m_3	Elemente der diagonalen Massenmatrix
n	Polytropenexponent
p	(Absolut-)Druck
P	Abstand zwischen oberem Lager und der Radachse, parallel zur Dämpferachse
Q	Abstand zwischen oberem und unterem Lager im unbelasteten Zustand
$quadra$	Matrix der Drosselfaktoren
R	(Reifen-) Radius
R_b	mittlerer Lagerradius
s	Einfederung, Verschiebung
s	Wandstärke
T	Temperatur
V	Volumen
v	Geschwindigkeit
W	Arbeit
z_{TOR}	Abstand des Verbindungspunktes der <i>torque links</i> zur Radachse, parallel zur Dämpferachse

Griechische Symbole

γ	thermischer Volumenausdehnungskoeffizient
η	Wirkungsgrad
κ	Schlupf des Reifens
μ	Reibungskoeffizient
ν	Querkontraktionszahl
ρ	Dichte
ς	Verlustzahl
σ	Reifenentspannungslänge
ψ	Gierwinkel
ω	Winkelgeschwindigkeit

Indizes

0	unbelasteter Zustand oder Füllzustand der Gasfeder
1	erste Stufe der Gasfeder oder oberes Dämpferlager
2	zweite Stufe der Gasfeder oder unteres Dämpferlager
atm	Atmosphäre, Umgebung
bear	die Dämpferlager betreffend
CG	Schwerpunkt, <i>Center of Gravity</i>
damp	Dämpfung
end	Ende
flex	Flexibilität
fric	<i>friction</i> , die Lagerreibung betreffend
Gas	das Dämpfergas betreffend
Ground	Bodenkräfte
hydr	hydraulisch, die Drossel betreffend
in	innen oder Einfedern
lin	linear
max	maximal
MF	<i>main fitting</i>
n	Normalkraftkomponente
Öl	die Hydraulikflüssigkeit betreffend
orif	<i>orifice</i> , die (Haupt-) Drossel betreffend
out	außen oder Ausfedern
pneu	pneumatisch, die Gasfeder betreffend
quad	quadratisch
r	Rollen, das Rollen/Rotieren des Reifens betreffend
rec	<i>Recoil</i>
Ref	Referenz
Rohr	allgemein für die beiden Rohre SLT und MF
SAT	<i>shock absorber travel</i>
SD	<i>Shimmy Damper</i>
SLT	<i>sliding tube</i>
tyre	Reifen
Vol	Volumen (-strom)
WA	<i>wheel axle</i> , Radachse
X	Zustand mit geänderter Temperatur bzgl. des Füllzustandes
x	in Richtung oder um die x-Achse
y	in Richtung oder um die y-Achse
z	in Richtung oder um die z-Achse

Liste der Abkürzungen

AC	a ircraft, Flugzeug
ASCII	A merican S tandard C ode for I nformation I nterchange
CD-ROM	C ompact D isk- R ead O nly M emory
CG	C enter of G ravity
char	ch aracter, Datentyp für Zeichenketten
CS	C ertification S pecifications
DIN	D eutsches I nstitut für N ormung e. V.
FEM	F inite E lement- M ethode
http	H ypertext T ransfer P rotocol
ICAO	I nternational C ivil A viation O rganization
int	i nteger, Datentyp für ganze Zahlen
LG	L anding G ear, Fahrwerk
LLI	L iebherr Aerospace L indenberg GmbH
LTH	L uftfahrttechnisches H andbuch
MF	M ain F itting
MKS	M ehrkörpersimulationsprogramm
NT	N eue T echnologie, new technology
OpenGL	O pen G raphics L ibrary
PC	P ersonal C omputer
PDF	P ortable D ocument F ile
real	Datentyp für reale Zahlen
SAT	S hock A bsorber T ravel
SD	S himmy D amper
SI	s ystème i nternational d' u nités, internationales Einheitensystem
SLT	S liding T ube
struct	s tructure, Datentyp in <i>MATLAB</i> , der das Speichern von Variablen verschiedenen Datentyps unter einem übergeordneten Namen ermöglicht
URL	U niversal R esource L ocator
ZLT	Z eppelin L uftschifftechnik GmbH & Co. KG

Verzeichnis der Begriffe und Definitionen

Die Luftfahrt ist stark von englischen Begriffen geprägt. Aufgrund der internationalen wirtschaftlichen Beziehungen der Luftfahrtindustrie werden viele zum Austausch unter den Firmen notwendige Dokumente zunehmend in englischer Sprache verfasst. Es ist daher kaum möglich, auf die Verwendung englischer Begriffe und Literatur zu verzichten. In dieser Arbeit sind die englischen Fachbegriffe (*technical terms*) in Klammern gesetzt den deutschen Übersetzungen, oder ggf. Umschreibungen gegenübergestellt. Zusätzlich enthält dieser Abschnitt eine Übersicht des wichtigsten verwendeten englischen Vokabulars mit deutscher Übersetzung.

In dieser Diplomarbeit werden Warenzeichen, Handelsnamen und Gebrauchsnamen verwendet. „MATLAB“, „Simulink“ und „SimMechanics“ sind Warenzeichen der MathWorks Incorporated. Alle weiteren im Text verwendeten Warenzeichen werden als geschützt anerkannt.

Definitionen

Allgemeine Luftfahrt (*general aviation activities*)

„All civil aviation operations other than scheduled air services and non-scheduled air transport operations for remuneration or hire (Annex 6 PartII). For ICAO statistical purposes the general aviation activities are classified into instructional flying, business and pleasure flying, aerial work, and other flying.“

(ICAOdata)

Andrehstoß (*spin up*)

„The process of accelerating the wheel of an aircraft from zero to high angular velocity in a very small increment of time at touchdown and contact with the runway which induces high drag loads in the landing gear structure ...“

(SAE 2001)

Datei

„Eine vollständige, benannte Auflistung von Informationen, beispielsweise ein Programm, eine von einem Programm verwendete Datenmenge oder ein von einem Benutzer erstelltes Dokument. Eine Datei stellt die grundlegende Speichereinheit dar ...“

(Microsoft 2005)

Fahrwerk (*landing gear*)

„The apparatus comprising those components of an aircraft or spacecraft that support and provide mobility for the craft on land, water, or other surfaces. The landing gear consist of wheels, floats, skids, bogies, and treads, or other devices, together with all associated struts, bracing, shock absorbers, etc ...“

(SAE 2001)

Landung

„Unter dem Begriff Landung versteht man streng genommen denjenigen kurzen, nur wenige Sekunden umfassenden Zeitabschnitt eines Fluges, innerhalb dessen das Fluggerät die Berührung mit dem Boden wiedergewinnt. Die Landung beginnt also in dem Zeitpunkt, in dem die Außenkontur des Fluggeräts den Boden erstmalig wieder berührt, und sie endet in dem Zeitpunkt, in dem das Fluggerät einen Zustand der Ruhe oder der stationären Bewegung relativ zum Boden unter Beibehaltung der Bodenberührung erreicht hat.“

(König 1979)

MATLAB

„MATLAB is a high-level technical computing language and interactive environment for algorithm development, data visualization, data analysis, and numeric computation.“

(MathWorks a)

Ordner/Programmordner:

„Ein Container für Programme und Dateien auf grafischen Benutzeroberflächen, der auf dem Bildschirm durch das grafische Symbol eines Dateiodners dargestellt wird. Mit Ordnern können Programme und Dokumente auf einem Datenträger organisiert werden. Ordner können sowohl Dateien als auch weitere Ordner enthalten.“

(Microsoft 2005)

Reifenflattern (shimmy)

„Shimmy is an oscillatory, combined lateral-yaw motion of the landing gear caused by the interaction between dynamic tyre behaviour and landing gear structural dynamics.“

(Besselink 2000)

SimMechanics

„SimMechanics extends Simulink with tools for modeling and simulating mechanical systems.“

(MathWorks c)

Simulink

„Simulink is a platform for multidomain simulation and Model-Based Design of dynamic systems... Simulink is integrated with MATLAB, providing immediate access to an extensive range of tools for algorithm development, data visualization, data analysis and access, and numerical computation.“

(MathWorks b)

Stoßdämpfer (shock absorber)

„A device for absorbing the energy from impact of mass or force input“

(SAE 2001)

Zurückfedern (spring back)

„A structural reaction in the landing gear system which follows spin up. The energy stored in the gear structure by spin up causes a cyclic reaction to produce forward drag forces in the system“

(SAE 2001)

Englische Begriffe

<i>air</i>	Luft (Gas, hier oft Stickstoff)
<i>articulated</i>	gelenkig
<i>axle</i>	(Rad-) Achse
<i>bogie</i>	gelenkig gelagerter Achsenträger, Achsaggregat
<i>bulk modulus</i>	Kompressibilitätsmodul
<i>cantilever</i>	freitragend
<i>chamber</i>	Kammer
<i>command window</i>	Befehlsfenster
<i>damper</i>	Dämpfer
<i>default</i>	standard, voreingestellt
<i>directory</i>	Verzeichnis
<i>drop test</i>	Fallversuch
<i>friction</i>	Reibung
<i>general aviation</i>	allgemeine Luftfahrt
<i>joint</i>	Verbindungsstelle, Gelenk
<i>landing gear</i>	Fahrwerk
<i>levered</i>	mit Hebel
<i>look up table</i>	Kennfeld
<i>lower bearing</i>	unteres Lager
<i>main fitting</i>	(Haupt-) Stoßdämpfergehäuse
<i>metering pin</i>	Dosierstift
<i>model</i>	Modell
<i>oil</i>	Öl (hier allgemein hydraulische Flüssigkeit)
<i>orifice</i>	Drosselblende
<i>orifice support tube</i>	(Drossel-) Stützrohr
<i>peak</i>	Spitze
<i>piston</i>	Kolben (siehe <i>sliding tube</i>)
<i>rake angle</i>	Neigung des Stoßdämpfers (um Nickachse)
<i>recoil</i>	Zurückschlagen, Ausfedern
<i>saturation</i>	Sättigung
<i>seal</i>	Dichtung
<i>shimmy</i>	(Reifen-) Flattern
<i>shock absorber travel</i>	(Stoßdämpfer-) Einfederung
<i>shock absorber, shock strut</i>	Stoßdämpfer
<i>single</i>	alleinig, Einzel
<i>skid</i>	Rutschen
<i>sliding tube, sliding member</i>	Gleitrohr, Kolben
<i>spin up</i>	andrehen
<i>spring back</i>	zurückspringen
<i>strut</i>	Federbein
<i>substructure, substruct</i>	Unterstruktur
<i>subsystem</i>	Untersystem, Gliederungsebene in Simulink

<i>switch</i>	Schalter
<i>technical terms</i>	Fachbegriffe
<i>throttle</i>	Drossel
<i>torque links</i>	Hebel der Drehmomentenverbindung
<i>trail</i>	Nachlauf
<i>twin</i>	Zwilling
<i>upper bearing</i>	oberes Lager
<i>valve</i>	Ventil
<i>weld</i>	verschweißt
<i>workspace</i>	Arbeitsbereich

Koordinatensysteme

Bei der Simulation des Landestoßes werden vier verschiedene Koordinatensysteme verwendet. Als globales, ortsfestes Koordinatensystem bildet das Bodenkoordinatensystem den Bezugspunkt für alle Betrachtungen. Der Ursprung dieses Systems liegt am Beginn der Landebahn. Die positive x-Richtung zeigt horizontal entgegen der Landerichtung, also auf die Freifläche vor der Landebahn. Die positive z-Achse zeigt vertikal nach oben, die y-Achse dementsprechend nach rechts.

Das Reifenkoordinatensystem ist im Vergleich zum Bodenkoordinatensystem um 180° um die z-Achse gedreht. Die x-Achse zeigt daher in Fahrtrichtung und die y-Achse in Fahrtrichtung gesehen nach links. Das Reifenkoordinatensystem hat denselben Ursprung wie das Bodenkoordinatensystem.

Des Weiteren wird ein Flugzeugkoordinatensystem verwendet, dessen Achsen um Roll-, Nick- und Gierwinkel zum Bodenkoordinatensystem geneigt sind. Dabei beschreibt der Rollwinkel die Drehung um die x-Achse, der Nickwinkel die Drehung um die y-Achse und der Gierwinkel die Drehung um die z-Achse. Der Ursprungspunkt dieses Koordinatensystems ist frei verschiebbar und bewegt sich mit dem Fluggerät. Jedoch muss die x-y-Ebene die Aufstandsfläche der Reifen bei unbelastetem Fahrwerk sein.

Das Stoßdämpferkoordinatensystem ist nochmals um den Einbauwinkel des Stoßdämpfers um die Nickachse (*rake*) und Rollachse (*roll*) im Vergleich zum Flugzeugkoordinatensystem geneigt.

1 Einleitung

1.1 Ziel der Arbeit

Für die Firma Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH (LLI) soll eine Sammlung von Landestoßsimulationsprogrammen erstellt werden, die alle in dieser Firma gängigen Fahrwerkstypen abdeckt. Die Motivation zu dieser Arbeit liegt nicht darin, etwas vollkommen Neues zu schaffen oder den Landestoß neu zu erfinden. **NACA 1952** und **LTH BM 22 110-02** zeigen bereits mögliche Umsetzungen der Landestoßberechnung. Auch LLI verfügt bereits über zahlreiche Landestoßsimulationen, die von verschiedenen Personen auf verschiedenen Plattformen mit sicherlich größter Sorgfalt erstellt worden sind. Aufgrund der verschiedenen Entstehungsdaten, der enormen Zunahme der Rechnerleistung in den letzten Jahren und der damit einhergehenden unterschiedlichen Tiefe der verwendeten Modelle, verwundert es nicht, dass die Simulationsergebnisse der verschiedenen Programme voneinander abweichen. Des Weiteren wurden viele dieser Programme von verschiedenen Anwendern weiterentwickelt und an spezielle Bedürfnisse angepasst, sodass verschiedene Varianten eines Programms im Umlauf sind. Die Dokumentation der individuellen Änderungen stand oftmals nicht im Vordergrund, so dass Unterschiede in den Simulationsergebnissen nur schwer zu ergründen sind.

Entsprechend dieser Erfahrungen sind die Schwerpunkte dieser Diplomarbeit gesetzt worden. Die neuen Programme sollen auf dem bereits bestehenden Shimmy-Modell basieren, welches im Mehrkörpersimulationsprogramm (MKS) *SimMechanics* aufgebaut worden ist. Dieses MKS ist voll in die Entwicklungsumgebung von *MATLAB / Simulink* integriert, welche zum aktuellen Standard in Industrie und Wissenschaft zählt. Das bestehende Modell soll so modifiziert werden, dass eine sichere Eingabe außerhalb der Entwicklungsumgebung möglich wird. Hierfür müssen Eingabe-, Menü- und Berechnungsroutinen erstellt werden. Diese und die an das „Urmodell“ angelehnten Modelle der verschiedenen Fahrwerkskonfigurationen sollen weitestgehend identische Strukturen aufweisen und sich der gleichen Berechnungsalgorithmen bedienen.

Besonderer Wert wird auf die sorgfältige Dokumentation der theoretischen Grundlagen und der programmtechnischen Umsetzung gelegt. Die besten Rechenergebnisse sind nur schwer verwertbar, wenn Zweifel über deren Generierung nicht ausgeräumt werden können. Zudem ist die ausführliche Beschreibung der Software eine wichtige Grundvoraussetzung für eine mögliche Erweiterung und spätere Pflege des Programms. Um letzteres zu gewährleisten und fachkundigen Dritten das Verstehen der Programmstruktur zu erleichtern, wird auch auf das gründliche Auskommentieren des Quelltextes geachtet.

1.2 Die Landung als Teil der Flugmission

Obwohl die Landung nur einen sehr kurzen Zeitabschnitt während eines Fluges darstellt, so ist sie für das Gelingen der gesamten Flugmission von erheblicher Bedeutung. Denn diese ist erst erfolgreich beendet, wenn Fracht und Passagiere wieder sicher am Boden sind. Auch wenn der große Vorteil der Luftfahrt gegenüber der erdgebundenen Fortbewegung in der hohen, möglichen Reisegeschwindigkeit liegt, welche den Zustand des Fliegens voraussetzt und es ermöglicht, in kürzerer Zeit größere Distanzen zurückzulegen, so bilden die Bodenlasten ein nicht unerhebliches Kriterium bei der Auslegung eines Flugzeugs. Verstärkend kommt hinzu, dass die Bodenlasten anders als die aerodynamischen Kräfte die punktuell an den Fahrwerksaufnahmen wirken. Diese Lastkonzentration führt dazu, dass bestimmte Bereiche der Struktur zur Lasteinleitung verstärkt werden müssen. Um das Gewicht gering zu halten, sollte daher bei der Positionierung der Fahrwerke auch das Vorhandensein von geeigneten Lastpfaden geprüft werden.

Im Allgemeinen gilt das Fahrwerk während der Flugphase als tote Masse, die keine Fluglasten aufnimmt und auch sonst keine Funktion erfüllt, aber dennoch für die die Phasen Start, Landung und Manövrieren am Boden mitgeführt werden muss. Die Fahrwerksbuchten blockieren Stauraum der sonst für Fracht zur Verfügung stehen würde. Daher gilt die Effizienz, neben der Reduktion der Lasten, als zweite Hauptanforderung an das Fahrwerk, um Masse und Bauraum zu minimieren.

Um das Fahrwerk in Hinblick auf die Lasten und die Effizienz optimieren zu können, muss die Charakteristik des Fahrwerks bekannt sein. Diese wird in der Regel experimentell durch ausgiebige Reihen von Fallversuchen (*drop tests*) ermittelt. Um diesen Prozess weniger zeitaufwendig und kostenintensiv zu gestalten, empfiehlt sich die Arbeit mit Simulationsprogrammen. Diese ermöglichen zudem Vorraussagen für die auftretenden Lasten und helfen, die Grenzen des Fahrwerks ohne dessen Beschädigung abzuschätzen. Auf diese Weise kann die Sicherheit bei der Durchführung der Versuche, aber auch beim allgemeinen Betrieb des Fluggeräts erhöht werden.

Nicht zu vernachlässigen ist auch die Wirkung der Landung auf das Komfort- und Sicherheitsempfinden der Passagiere. Harte Stöße bei der Landung oder Vibrationen beim Rollen können beim Passagier einen unsicheren Eindruck vermitteln und unnötige Ängste schüren. Da auch die Akzeptanz beim Passagier als zahlenden Kunden ein erheblicher Faktor für den Erfolg eines Flugzeugmusters ist, sollten auch aus diesem Grund besondere Anstrengungen bei der Fahrwerksauslegung unternommen werden.

Es zeigt sich die besondere Bedeutung der Fahrwerksauslegung für die Flugmission. Nur ein optimal ausgelegtes und einwandfrei funktionierendes Fahrwerk kann den Anforderungen an Komfort und Sicherheit genügen. Zahlreiche Tests und Simulationen sollen dies sicherstellen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit soll als Dokumentation zum erstellten Landestoßsimulationsprogramm dienen. Den drei Hauptabschnitten, die die theoretischen Grundlagen, die programmtechnische Umsetzung und eine Beispielrechnung enthalten, ist ein Abschnitt zur Einleitung vorangestellt. Gefolgt werden sie von einer kurzen Zusammenfassung. Zahlreiche Tabellen und Diagramme zur Erläuterung des Programms befinden sich im Anhang dieser Arbeit

Abschnitt 2 widmet sich den physikalischen Grundlagen. Zudem werden einige Kriterien zur Auslegung eines Fahrwerks beschrieben.

Abschnitt 3 erklärt die Umsetzung dieser Grundlagen in *MATLAB*, *Simulink*, *SimMechanics*. Zudem wird auf die Bedienung und die Besonderheiten des Programms eingegangen.

Abschnitt 4 zeigt durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit Versuchsdaten die Funktionsfähigkeit der erstellten Simulation.

Abschnitt 5 schließt die Arbeit mit einem Resümee ab.

Anhang A listet alle Programme, Unterprogramme und Modelle der Landestoßsimulation auf.

Anhang B soll anhand von Struktogrammen den Ablauf der Programme verdeutlichen und so die Pflege oder Anpassung der Programme erleichtern.

Anhang C beschreibt die Parameter der Ein- und Ausgabe.

Anhang D gibt eine Übersicht über die verwendeten *SimMechanics*-Blöcke und soll so bei Lesern ohne Erfahrung mit *SimMechanics* und *Simulink* beim Verstehen der Modelle helfen.

Anhang E zeigt einige der vom Simulationsprogramm ausgegebenen Dateien.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Fahrwerkstypen

Fahrwerke lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten klassifizieren. In dieser Arbeit soll die Unterscheidung zum einen anhand der Konfiguration der Räder und zum anderen anhand der Kinematik des Fahrwerks beim Einfedern stattfinden. Da in der ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit erstellten Simulation nur einzelne Fahrwerke beim Landestoß betrachtet werden, wird auf mögliche Anordnungen der einzelnen Fahrwerke am Fluggerät nicht eingegangen.

Die Klassifizierung von Flugzeugfahrwerken nach Anzahl und Anordnung der Räder geschieht vor allem in Hinblick auf die Belastung der Start- und Landebahn und weiterer Flächen des Flugplatzes. Für die Simulation des Landestoßes sind vor allem aber andere Aspekte von Bedeutung. So sind der Verlauf und die Heftigkeit des Andrehstoßes (*spin up*) vom Trägheitsmoment des Rades oder der Räder abhängig. Es macht daher einen Unterschied, ob z. B. ein großer oder zwei kleinere Reifen verwendet werden. Zudem können durch die Anordnung der Reifen exzentrische Kräfte am Federbein eingeleitet werden, sei es durch Montage eines einzelnen Rades mit seitlichem Versatz zur Mittelebene des Dämpfers zur Verbreiterung der Spur des Fluggeräts oder durch ungleichmäßigen Reifendruck oder –verschleiß bei Zwillingsbereifung. Derartige Effekte müssen bei der Auslegung des Fahrwerks in Betracht gezogen werden. Bild 2.1 zeigt eine Auswahl der derzeit gängigen Radanordnungen bei Flugzeugfahrwerken. Es sei darauf hingewiesen, dass in der Abbildung die Bezeichnungen *DUAL TWIN TANDEM* und *TWIN TRYCICLE* vertauscht sind.

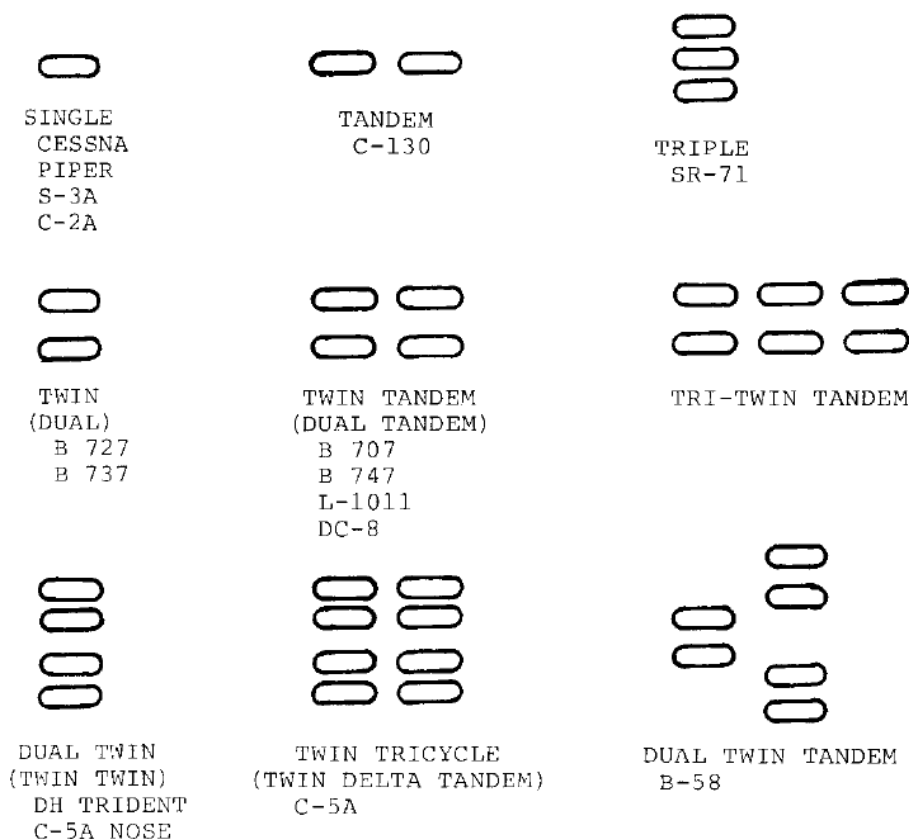


Bild 2.1 Typische Anordnungen der Räder bei Flugzeugfahrwerken (Currey 1988, S. 7)

Bei LLI werden zurzeit nur Fahrwerke für Flugzeuge der allgemeinen Luftfahrt (*general aviation*), für eher kleinere Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge und Bugfahrwerke (*nose landing gear*) gebaut. Zur Anwendung kommen hierbei ausschließlich Fahrwerke mit einem Rad (*single*) und Zwillingsbereifung (*twin*). Auf mehrachsige Fahrwerke (*bogie gears*) wird deshalb in dieser Arbeit nicht eingegangen.

Wichtig für die Berechnung der Lasten ist ebenso die Kinematik des einfedernden Fahrwerks. Je nach Bauform lassen sich an den Komponenten des Fahrwerks verschiedene Kräftegleichgewichte und Bewegungsgleichungen aufstellen. Die Kinematik bestimmt dabei die Belastung der einzelnen Baugruppen. Die drei Hauptbauformen die hier betrachtet werden sollen, sind

- das Teleskopfahrwerk (*cantilever/telescopic landing gear*)
- das Schwinghebelfahrwerk/Schwingenfahrwerk (*articulated/levered landing gear*) und
- das Halbschwingenfahrwerk (*semi-articulated/semi-levered landing gear*).

Ein Schema dieser Bautypen zeigt Bild 2.2.

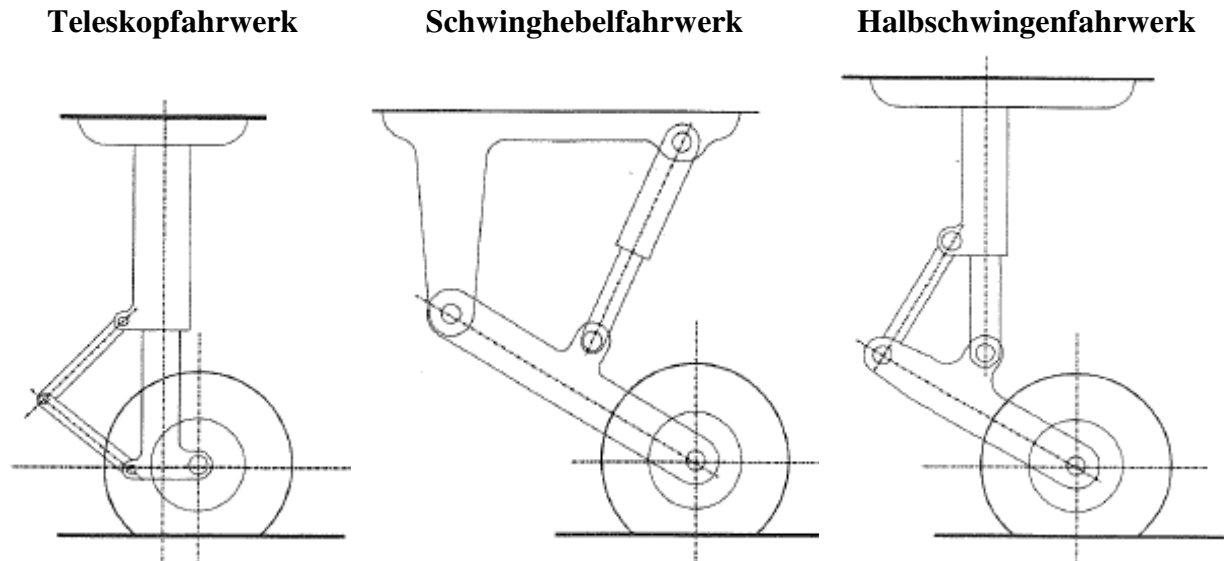


Bild 2.2 Fahrwerkstypen
(nach SAE 2001)

So vielseitig der Einsatz von Flugzeugen derzeit ist, so zahlreich sind auch die Varianten der Fahrwerksbauformen. Sie alle bringen die besondere Anpassung des Fahrwerks an spezielle Anforderungen zum Ausdruck. Um überhaupt einen Einstieg zu finden, ist es vorerst hilfreich sich auf die Hauptbauformen zu beschränken. Die Simulation von Landungen mit Sonderbauformen von Fahrwerken sollte dann in Anlehnung an die Grundbauformen und auf der Basis der im Rahmen dieser Diplomarbeit erstellten Simulation möglich sein. Die Vor- und Nachteile sowie die Kinematik der drei oben genannten Fahrwerkstypen werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

2.1.1 Teleskopfahrwerk

Das Teleskopfahrwerk ist in der kommerziellen Luftfahrt, vor allem bei Flugzeugen der Transportkategorie, der am meisten verbreitete Fahrwerkstyp. Diese Stellung ist durch seine besonderen Eigenschaften begründet.

Vorteile:

- Geringste vertikale Einfederung
- Geringes Gewicht
- Geringes benötigtes Stauvolumen
- Einfach zu fertigen

Nachteile:

- Hohe Reibung
- Fahrkomfort am Boden hängt hauptsächlich vom Reifen ab (kein Ansprechen des Dämpfers auf horizontale Belastungen durch Unebenheiten)
- Hohe Lasten beim Rückfedern des Rades (*spring back*)
- Größere Länge im Vergleich zum Schwingenfahrwerk, größerer Abstand von der Fahrwerksbasis zum Boden erforderlich.

(Vor- und Nachteile nach **Young 1992&1995**, Kapitel 06, S. 2-3)

Bei Tiefdeckern mit am Flügel montierten Triebwerken, welche die Mehrheit der Transportflugzeuge bilden, überwiegen ganz klar die Vorteile dieses Bautyps, soweit kein Einsatz auf unbefestigten Pisten vorgesehen ist. Lediglich die hohe Reibung und die hohen horizontalen Lasten durch die dynamischen Effekte der Strukturelastizität bleiben als echte Nachteile.

Ein weiterer Vorteil des Teleskopfahrwerks ist die einfache Kinematik. Zwischen der Absenkung der gefederten Masse und der Einfederung des Dämpfers besteht ein linearer Zusammenhang. Bewegungen der Radachse zur Fahrwerksaufnahme in laterale und Fahrtrichtung treten nur infolge Neigung des Dämpfers und Flexibilität auf.

2.1.2 Schwingen- oder Schwinghebelfahrwerk

Beim Schwinghebelfahrwerk sind Radachse und Dämpfer nicht direkt, sondern mittels eines Hebels miteinander verbunden. Dementsprechend herrscht ein Übersetzungsverhältnis zwischen den jeweils angreifenden Kräften. Obwohl diese Bauform häufig schwerer ist und mehr Teile und Gelenke aufweist, was zu höheren Kosten führt, hat sie andere Vorzüge, die ihre Anwendung rechtfertigen (nach **Young 1992&1995**, Kapitel 01, S. 1).

Vorteile:

- Verschafft geringe Einbauhöhe
- Kürzerer Stauraum beim Einfahren
- Geringere Reibung kann erreicht werden, feineres Ansprechen des Dämpfers möglich
- Guter Fahrkomfort da Widerstandskräfte am Reifen zum Ansprechen des Dämpfers führen
- Stoßdämpfereinheit kann einfacher abmontiert und gewartet werden, ohne andere Systeme zu beeinträchtigen
- Die Position der Radachse bezüglich der Aufhängungspunkte ist flexibler wählbar
- Bei fester Anbindung an die Struktur kann es eine gewichts- und kosteneffiziente Lösung darstellen

Nachteile:

- Höheres Gewicht und höhere Kosten als Teleskopfahrwerk
 - Aufhängungslasten häufig höher als bei entsprechenden Teleskopfahrwerken
 - Braucht oft größeren Stauraum trotz geringerer Länge
 - Geringere Torsionssteifigkeit
 - Anwendung bei mehrachsigen Fahrwerken aufwändig
- (Vor- und Nachteile nach **Young 1992&1995**, Kapitel 01, S. 1)

Als besonderer Vorteil der Schwingenfahrwerke ist das feine Ansprechen auf Fahrbahnebenheiten und den daraus resultierenden horizontalen Lasten zu nennen. Daher kommen derartige Fahrwerke bevorzugt bei Klein- und Geschäfts- und militärischen Transportflugzeugen zum Einsatz, die auch von unbefestigten Pisten operieren. Aufgrund der geringen Länge eignen sich Schwinghebelfahrwerke gut für die Montage am Rumpf.

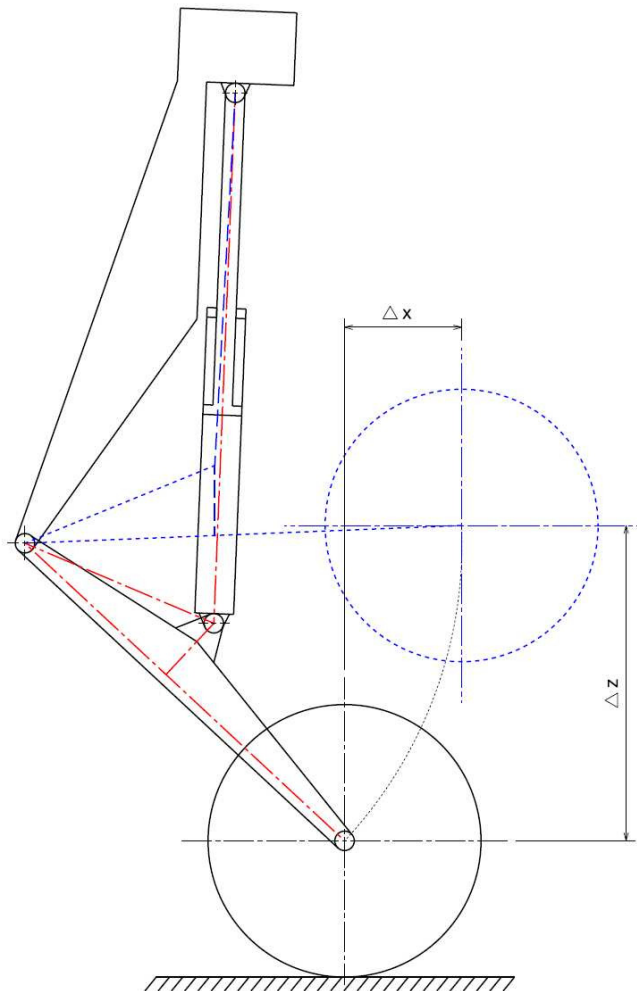


Bild 2.3 Skizze der Kinematik des Schwinghebelfahrwerks

Die Kinematik des Schwinghebelfahrwerks ist wesentlich komplizierter als die eines Teleskopfahrwerks. Mit der Einfederung des Dämpfers ändert sich nicht nur der Schwingenwinkel, sondern auch die Lage des Dämpfers im Raum. Hinzu kommt, dass an die Einfederung in

z-Richtung auch eine horizontale Bewegung der Radachse gekoppelt ist. Die analytische Darstellung dieser Kinematik führt zu sehr unhandlichen Bestimmungsgleichungen. Daher empfiehlt sich das Arbeiten mit Übersetzungsverhältnissen oder die Verwendung von Mehrkörpersimulationsprogrammen.

2.1.3 Halbschwingenfahrwerk

Das Halbschwingenfahrwerk ist eine Mischform der beiden oben beschriebenen Typen und soll deren Vorteile verbinden. Die Kombination des Teleskopfahrwerks mit einer Schwinge reduziert den erforderlichen Hub des Stoßdämpfers und somit die Länge des Gleitrohrs (*sliding tube*). Geringere Querkräfte im Dämpfer und eine Senkung der Lagerreibung sind die Folge. Gleichzeitig wird das Ansprechen auf Unebenheiten der Fahrbahn verbessert. Diese Verbesserungen werden jedoch mit mehr Bauteilen und Gelenken, also einer im Allgemeinen aufwendigeren Konstruktion und mehr Gewicht erkauft. Die Halbschwinge verbindet so auch die Nachteile der beiden Fahrwerkstypen Teleskop und Schwinghebel, wenn gleich einige stark vermindert sind.

Das Halbschwingenfahrwerk weist die am meisten komplizierte Kinematik der drei Fahrwerkstypen auf. Dies kommt daher, da sich der Drehpunkt der Schwinge, der hier am unteren Ende des Stoßdämpfers liegt, sich nun auch noch translatorisch mit der Einfederung des Stoßdämpfers verschiebt. Die Schwinge führt daher eine Längsbewegung in Richtung der Stoßdämpferachse mit gleichzeitiger Drehung durch.

Wie sich zeigt, gibt es keine Universallösung für die Frage nach dem richtigen Fahrwerkstyp. Die Vor- und Nachteile jeder Konstruktion müssen unter Beachtung der Anforderungen gegeneinander abgewogen werden.

2.2 Bewegungsgleichungen

Das System Fahrwerk lässt sich auch durch einen Zweimassenschwinger darstellen. Die am Fahrwerk wirkenden Kräfte führen entsprechend dem zweiten Newtonschen Axiom zu Beschleunigungen an der unteren (m_2) und oberen Masse (m_1). Dazwischen wirken der Reifen und der Stoßdämpfer wie Federn. Im Falle des Stoßdämpfers wirkt parallel zur Feder noch ein Dämpfungselement. Auf diese Weise lassen sich dynamische Gleichgewichte (x- und z-Richtung) für das gesamte Fahrwerk aufstellen. Ähnliches ließe sich auch für die y-Richtung durchführen.

$$\begin{aligned}
 F_{z \text{ Grund}} &= m_1 \cdot \ddot{z}_1 + m_2 \cdot \ddot{z}_2 + (m_1 + m_2) \cdot g - L \\
 F_{x \text{ Grund}} &= m_1 \cdot \ddot{x}_1 + m_2 \cdot \ddot{x}_2
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Durch Schnitte durch das Fahrwerk können an beliebigen Stellen die Kräfte und deren Reaktionen gegenübergestellt und so die Belastungen ermittelt werden. Die folgende Abbildung zeigt die Kräftegleichgewichte in x- und z-Richtung am Beispiel eines Schwinghebelfahrwerks. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde auf die Benennung aller Schnittkräfte verzichtet.

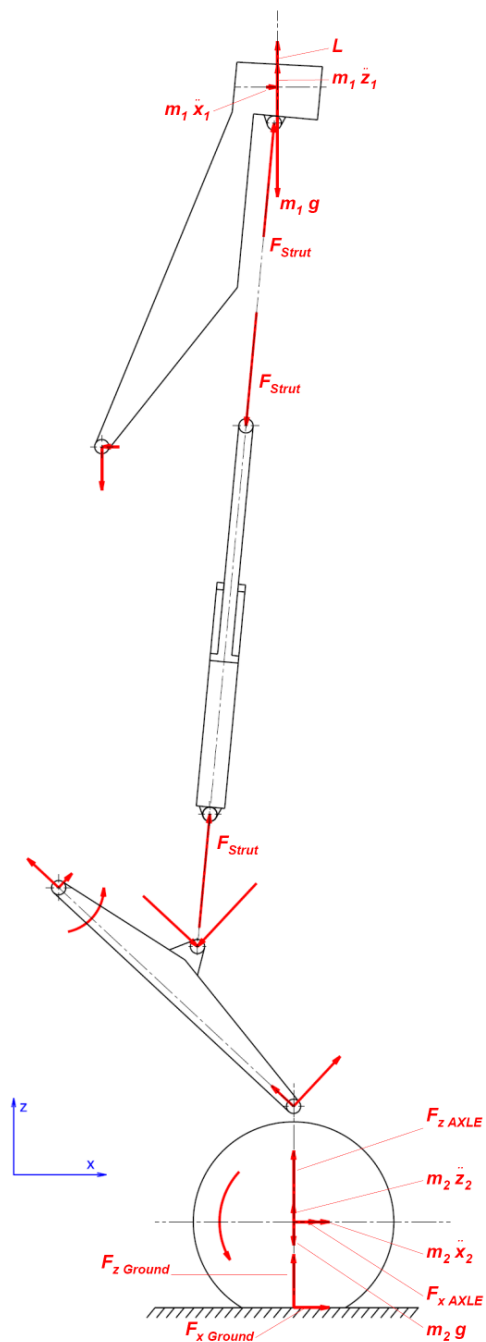


Bild 2.4 Kräftegleichgewicht am Beispiel eines Schwinghebelfahrwerks

Das Schwinghebelfahrwerk weist die Besonderheit auf, dass neben der Massenträgheit der unteren Masse auch noch die das Massenträgheitsmoment des Schwinghebels beachtet werden muss. Die über den Federweg veränderlichen Richtungen der am Schwinghebel angreifenden Kräfte erschweren eine analytische Darstellung der Kinematik. Auch aus diesem Grund bietet sich die Verwendung von Mehrkörpersimulationsprogrammen wie *SimMechanics* an.

Die in Gleichung 2.1 dargestellten Beziehung sind Differentialgleichungen zweiter Ordnung. Sie lassen sich unter Beachtung der Randbedingungen zum Beispiel numerisch mit Hilfe eines Zeitschritt-Differenzen-Verfahrens oder Runge-Kutta-Verfahrens lösen. *MATLAB/Simulink* stellt zu diesem Zwecke zahlreiche eigene Werkzeuge zum Auflösen der Gleichungen (*solver*) zur Verfügung, so dass auf diese Verfahren nicht näher eingegangen werden soll.

2.3 Stoßdämpfer

Der Stoßdämpfer als wohl wichtigste Baugruppe des Fahrwerks größerer Flugzeuge ist allen betrachteten Fahrwerkstypen gemein. Er ist hauptsächlich dafür zuständig, die kinetische Energie des Landestoßes zu vernichten und die in die Struktur eingeleiteten Lasten auf ein akzeptables Niveau abzusenken. Ziel der Auslegung des Stoßdämpfers ist ein hoher Wirkungsgrad bei der Arbeitsaufnahme um den erforderlichen Federweg möglichst gering zu halten, was zu einer kompakten Bauweise führt. Die von der Struktur ertragbare Last sollte über den gesamten Federweg bestmöglich ausgenutzt werden. Der optimale Stoßdämpferwirkungsgrad von 100% würde ein rechteckiges Kraft-Weg-Schaubild ergeben. Mit einem Wirkungsgrad von 80% bis 90% (**Currey 1988**, S. 77) erfüllt der oleo-pneumatische Stoßdämpfer am besten die Forderung nach hoher Effizienz bei gleichzeitig sehr großer Dissipation der Stoßenergie. Diese Bauform mit einer meist mit Stickstoff gefüllten Gasfeder und einer hydraulischen Drossel ist daher der Standard in der Kategorie der Transportflugzeuge, weshalb auf die Erläuterung anderer Bauweisen in diesem Bericht verzichtet wird.

Im Bild 2.5 sind die wesentlichen Bauteile eines einstufigen Stoßdämpfers dargestellt und benannt:

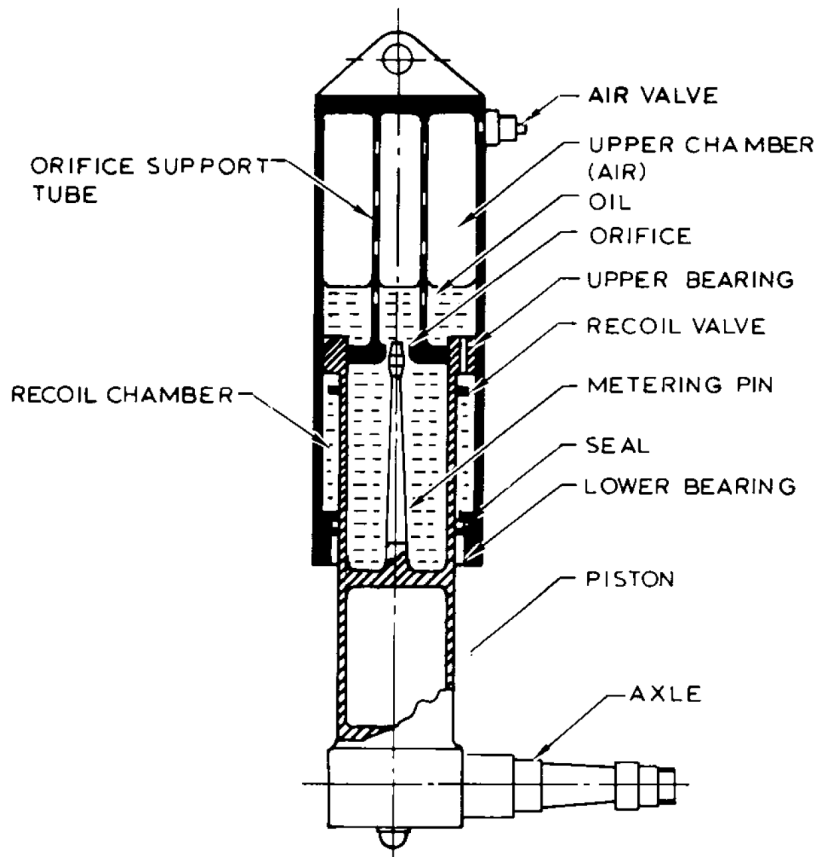


Bild 2.5 Aufbau eines einstufigen oleo-pneumatischen Stoßdämpfers (Currey 1988, S. 76)

Der oben gezeigte Stoßdämpfer besitzt drei Kammern in denen bei der Bewegung des Kolbens (*piston, sliding tube*) unterschiedliche Drücke herrschen. In der einen Kammer, die das eingeschlossene Volumen der Gasfeder beinhaltet, bestimmt die einfederungsabhängige Kompression des Gases den Druck. Der Druck in der Kammer, aus der das Öl beim Einfedern verdrängt wird, ergibt sich hauptsächlich aus der Wirkung der Drossel (*orifice*), welche den Durchfluss der zwischen den beiden Kammern behindert. Eine Besonderheit dieses Stoßdämpfers ist der Dosierstift (*metering pin*), der die Querschnittsfläche der Drossel abhängig von der Einfederung reguliert. Die dritte Kammer ist die *recoil chamber*, in die das Öl beim Einfedern mit vergleichsweise geringem Widerstand einströmen kann. Durch die Reduktion der Querschnittsfläche der Ausflussöffnung durch einen Ventilring (*recoil valve*), treten beim Ausfedern größere Widerstandskräfte auf, die die Bewegung des Gleitrohres dämpfen. Zusätzlich treten an den Lagern (*upper, lower bearing*) und an den Dichtungen (*seals*) Reibungskräfte auf.

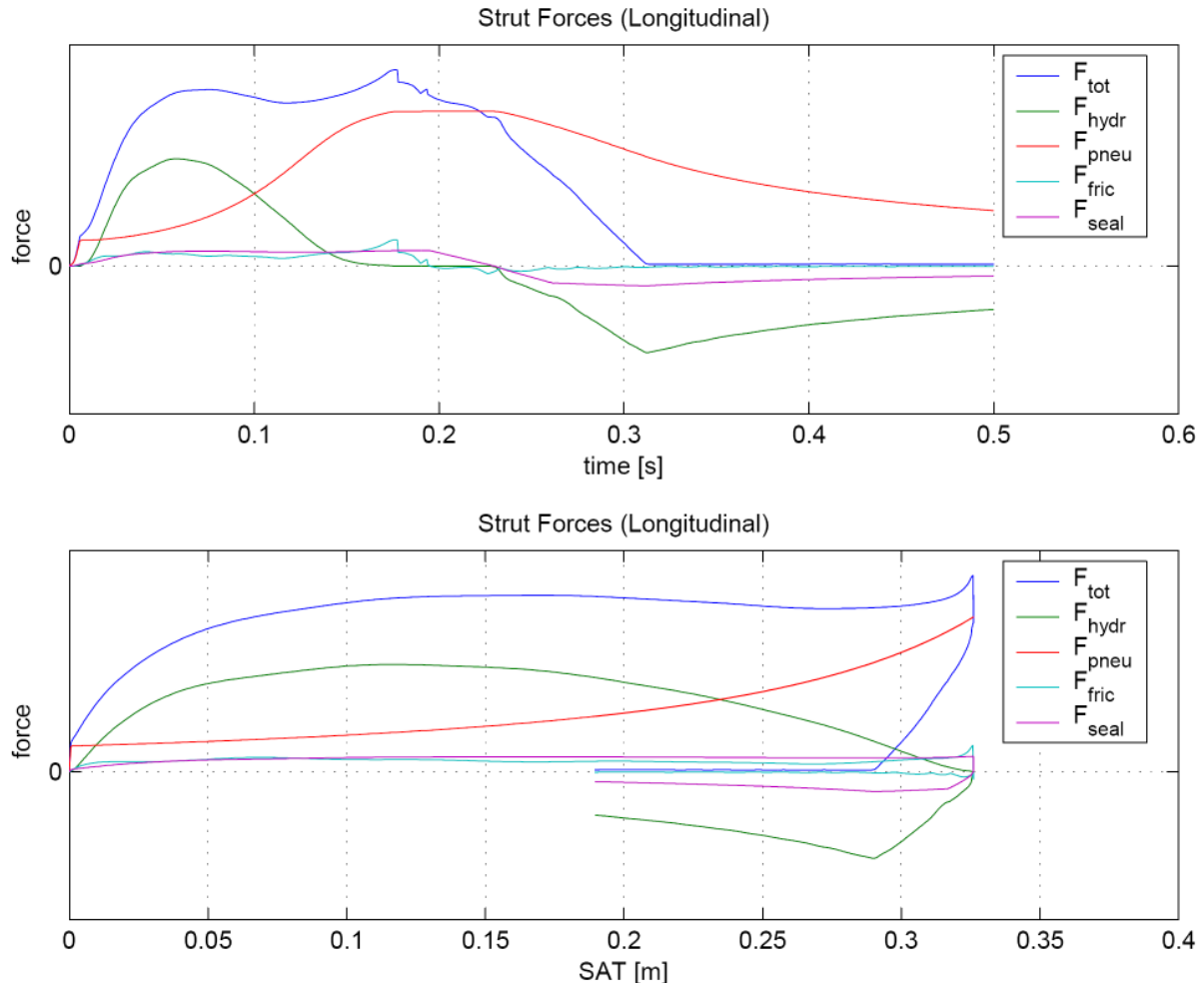


Bild 2.6 Dämpferkräfte in Abhängigkeit der Zeit und des Federwegs

Bild 2.6 zeigt den charakteristischen Verlauf der Dämpferkraft und ihrer Komponenten in Abhängigkeit des Dämpferweges eines Stoßdämpfers mit Gasfeder und Öldrossel. Wie im Bild zu sehen, trägt die geschwindigkeitsabhängige Drossel in der frühen Phase des Landestoßes den größten Teil zur Gesamtkraft bei, die progressive, wegabhängige Gasfeder gewinnt mit zunehmender Einfederung in der späteren Phase des Stoßes an Bedeutung. Je nach Dämpferkonfiguration sind daher zwei Spitzen (*peaks*) mehr oder weniger ausgeprägt. Die Addition aller Kräfte führt zu dem gewünschten, hohen Wirkungsgrad. In den folgenden Abschnitten werden die physikalischen Grundlagen zur Berechnung der Dämpferkräfte wiedergegeben, die später in der Simulation angewendet werden. Die Dämpferkräfte sind im Koordinatensystem des Stoßdämpfers angegeben, in welchem die positive z-Achse in Richtung der Dämpferachse nach oben und die y-Achse in Fahrtrichtung gesehen nach rechts zeigt. Der Einbauwinkel um die Nickachse, mit dem die Dämpferachse zur z-Achse des Bodenkoordinatensystems gedreht ist, ist der *rake angle* und der um die Rollachse der *roll angle*.

2.3.1 Gasfeder

Die Wirkung der Gasfeder basiert auf der Komprimierung eines eingeschlossenen Gasvolumens, meist Stickstoff, mit zunehmendem Federweg, die zu einer Erhöhung des Druckes in der Gasfeder führt. Es ist darauf zu achten, dass alle Rechnungen mit den herrschenden Absolutdrücken durchgeführt werden und auch solche als Ergebnis liefern. Fülldrücke werden üblicherweise relativ zum Umgebungsdruck angegeben, so dass dessen Betrag zum genannten Überdruck addiert werden muss, um den Absolutdruck zu erhalten. Ob es sich bei den angegebenen Drücken um Absolut- oder Relativdrücke handelt, ist vor der Berechnung zu überprüfen. Für das Verhältnis von aktuellem Druck p_1 zum absoluten Fülldruck p_{01} gilt folgender Zusammenhang:

$$\frac{p_1}{p_{01}} = \left(\frac{V_{01}}{V_1} \right)^n \quad (2.2)$$

Der Druck p_{01} und das Volumen V_{01} kennzeichnen hierbei den Anfangszustand der Gasfeder. Es ist ersichtlich, dass mit abnehmenden Volumen V_1 das Druckverhältnis von aktuellem Druck p_1 zum Anfangsdruck steigt. Der Verlauf ist stark progressiv über der Einfederung, zum einen wegen der Reduktion des verfügbaren Raumes und zum anderen aufgrund des Polytropenexponenten n . Die Werte für den Exponenten müssen zwischen $n = 1$ bei isothermer, sehr langsamer Verdichtung, bei der die gesamte Wärme abgeführt wird, und $n = 1,4$ (Luft/Stickstoff) bei polytroper, adiabater Verdichtung liegen. Die folgende Tabelle stellt die Werte für den Polytropenexponenten für den dynamischen Vorgang Landestoß aus verschiedenen Quellen gegenüber.

Tabelle 2.1 Literaturübersicht zum Polytropenexponent der Gasfeder

Bauform der Gasfeder	n	Quelle
Öl und Gas (Stickstoff) durch Trennkolben separiert	1,35	Currey 1988 (S. 102)
	1,3 ... 1,4	LTH BM 22 110-02 (S. 3)
Öl und Gas (Stickstoff) vermischen sich beim Landestoß	1,1	Currey 1988 (S. 102)
	1,0 ... 1,1	LTH BM 22 110-02 (S. 3)
	1,12	NACA 1952 (S. 1092)

Das aktuelle Volumen hängt ab von a) der Einfederung, b) der Temperatur des Öles im Vergleich zu dessen Fülltemperatur, c) der Komprimierbarkeit des verwendeten Öles und d) der Ausdehnung der Druckkammern infolge des Überdruckes. All diese Einflüsse sollen nachfolgend beschrieben werden.

a) Einfederung

Die wesentliche Volumenänderung erfährt das Gas infolge der Bewegung des beweglichen Rohres (*sliding tube*, SLT), bezüglich des Stoßdämpfergehäuses (*main fitting*, MF). Das verdrängte Gasvolumen ergibt sich aus der Multiplikation der Einfederung s (*shock absorber travel*, SAT) mit der Querschnittsfläche des eindringenden Körpers. Hier sollen ausschließlich runde Rohre betrachtet werden. Die für die Volumenänderung verantwortliche Querschnittsfläche ist durch den Außendurchmesser des SLT gegeben. Es ergibt sich folgende Volumenänderung infolge Einfederung. Die Variablen in der tief gestellten Klammer drücken jeweils eine Abhängigkeit aus.

$$\Delta V_{(s_{SAT})} = s_{SAT} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{SLT}^2 \quad (2.3)$$

b) Temperaturänderung

Eine Temperaturänderung zwischen dem Befüllen und dem Landstoß hat zweierlei Auswirkungen. Die hydraulische Flüssigkeit erfährt eine Volumenänderung entsprechend ihres thermischen Ausdehnungskoeffizienten γ und des ursprünglichen Füllvolumens $V_{0\ \dot{o}l}$.

$$\Delta V_{\dot{o}l(\Delta T)} = V_{0\ \dot{o}l} \cdot \gamma \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenstellung der thermischen Volumenausdehnungskoeffizienten für ausgewählte Flüssigkeiten:

Tabelle 2.2 Thermischer Volumenausdehnungskoeffizient ausgewählter Flüssigkeiten (nach Lee 2003, modifiziert)

Flüssigkeit	γ [1/°F]	γ [1/K]
MIL-H-5606	0,00046	0,000828
MIL-H-583282	0,00046	0,000828
MIL-H-6083	0,00044	0,000792
SKYDROL 500B-4	0,00047	0,000846
Wasser	0,00021	0,000378

Die Temperaturdifferenz ΔT ergibt sich durch Subtraktion der Temperatur beim Landestoß T_X von der Fülltemperatur T_0 . Diese Veränderung des Ölvolumens führt zu einer Änderung des Gasdruckes in der Gasfeder. Das Gas unterliegt ebenfalls der Temperaturänderung, reagiert aufgrund seiner Kompressibilität mit einer nahezu isochoren Änderung des Druckes.

$$\frac{p_{01X}}{p_{01}} = \frac{T_X}{T_0} \quad (2.5)$$

c) Komprimierbarkeit des Öles

Die Komprimierbarkeit des Öles hat geringeren Einfluss als die beiden vorher genannten Vorgänge. Bei hohen Drücken, wie sie beim Landestoß in der Gasfeder vorkommen, ist sie jedoch nicht mehr vernachlässigbar. Die Kompressibilität des Öles führt dazu, dass sich das Volumen des Öles verringert. Das Gasvolumen wird um genau diesen Betrag weniger verdichtet. Es wird angenommen, dass sich die Volumenänderung infolge Kompressibilität ohne Verzögerung einstellt. Nach **Lee 2003** (S. M26) besteht folgende Abhängigkeit:

$$\Delta V_{\text{öl}(\Delta p)} = \frac{V_{0\text{öl}}}{B_{\text{öl}}} \cdot \Delta p \quad (2.6)$$

Hierbei ist $B_{\text{öl}}$ der Kompressibilitätsmodul (*bulk modulus*) der hydraulischen Flüssigkeit, der vom Druck (*pressure*), vom Anteil der im Öl gelösten Luft (*air*), bzw. des gelösten Stickstoffes, und von der Temperatur (*temperature*) abhängt. Entsprechend ergeben sich die einheitslosen Faktoren E_P , E_A und E_T zur Anpassung des Referenzwertes des Kompressibilitätsmoduls B_{Ref} an die Gegebenheiten.

$$B_{\text{öl}} = E_P \cdot E_A \cdot E_T \cdot B_{\text{Ref}} \quad (2.7)$$

Eine Zusammenstellung der Werte für B_{Ref} für verschiedene Flüssigkeiten ist in **Lee 2003** (S. M25) gegeben. Eine Auswahl dieser Werte, ergänzt um eine Umrechnung in [bar] gibt Tabelle 2.3 wieder.

Tabelle 2.3 Referenzkompressibilitätsmodul ausgewählter Flüssigkeiten
(nach **Lee 2003**, modifiziert)

Flüssigkeit	B_{ref} [psi]	B_{ref} [bar]
MIL-H-5606	260000	17927
MIL-H-583282	300000	20685
MIL-H-6083	260000	17927
SKYDROL 500B-4	340000	23443
Wasser	310000	21375

Die Werte werden mit Hilfe der Methoden in **Lee 2003** (S. M27-M28), die nach SI-Einheiten umgestellt wurden, ermittelt. Es handelt sich dabei um Größengleichungen, dass heißt es müssen die Werte in den geforderten Einheiten eingesetzt werden. Die Gleichungen 2.8 und 2.10 sind Geradengleichungen, die aus Schaubildern ermittelt worden sind. Der Einfluss des Druckes (eingesetzt in [Pa]) berechnet sich somit wie folgt:

$$E_P = 0,893 + 6,22 \cdot 10^{-9} \cdot p_1 \quad (2.8)$$

In die Gleichung zur Bestimmung der Änderung der Kompressibilität infolge gelöster Gase müssen B_{ref} , p_{01} und p_1 in [Pa] und der Anteil der gelösten Luft $AirPercent$ in Prozent eingesetzt werden. Bei Stoßdämpfern mit getrennten Kammern für Gas und hydraulische Flüssigkeit kann keine Vermischung stattfinden, wodurch $E_A = 1$ ist, was sich auch aus der folgenden Gleichung ergibt:

$$E_A = \frac{1}{\frac{1013,25 \cdot B_{Ref}}{p_{01} \cdot p_1} \cdot Airpercent + 1} \quad (2.9)$$

Der Korrekturfaktor E_T hängt linear von der aktuellen Temperatur (eingesetzt in [K]) ab.

$$E_T = -0,0045 \cdot (T_x - 273,15) + 1,17 \quad (2.10)$$

d) Flexibilität der Druckkammern

Einen weiteren Beitrag zur gesamten Änderung des Volumens liefern die Nachgiebigkeiten des Stoßdämpfergehäuses und Gleitrohrs. Basierend auf der Kesselformel gelten nach **Backé 1994** folgende Beziehungen. Für dünnwandige, kreisrunde Rohre, d. h. für Rohre mit einem Verhältnis von Wandstärke zu Rohrinne Durchmesser $s_{Rohr}/d_{Rohr} \leq 10$, gilt Gleichung 2.11 für dickwandige Rohre die Gleichung 2.12:

$$\Delta V_{Rohr (\Delta p)} = V_{Rohr} \cdot \frac{\Delta p}{E_{Rohr}} \cdot \frac{d_{Rohr}}{s_{Rohr}} \quad (2.11)$$

$$\Delta V_{Rohr (\Delta p)} = V_{Rohr} \cdot \frac{\Delta p}{E_{Rohr}} \cdot \frac{2 \cdot \left(\frac{D_{Rohr}}{d_{Rohr}}\right)^2 \cdot (1 + \nu) + 3 \cdot (1 - 2\nu)}{\left(\frac{D_{Rohr}}{d_{Rohr}}\right)^2 - 1} \quad (2.12)$$

Entscheidender Parameter für die Flexibilität des Rohres ist der Elastizitätsmodul E_{Rohr} . Die Querkontraktionszahl ν (nur in Gleichung 2.12) ist von geringer Bedeutung da sie für die meisten Metalle näherungsweise $\nu = 0,3$ (Aluminium $\nu = 0,33$) beträgt. Die Berechnung muss für Stoßdämpfergehäuse und Gleitrohr getrennt durchgeführt werden. Die Gleichungen 2.13 und 2.14 zeigen die Berechnung der Volumen der beiden Rohre, auf die die Druckdifferenz wirkt.

$$V_{SLT} = (s_{SAT \max} - s_{SAT}) \cdot \frac{\pi \cdot d_{SLT}^2}{4} \quad (2.13)$$

$$V_{MF} = s_{SAT \max} \cdot \frac{\pi \cdot d_{MF}^2}{4} \quad (2.14)$$

Der Druck in der Gasfeder wird nun in mehreren Schritten berechnet:

1) Beaufschlagen der Gasfeder mit Druck

Um ein vollständiges Ausfedern zu gewährleisten und um höhere Endkräfte aufnehmen zu können, sind die meisten Gasfedern auch im vollständig ausgefederten Zustand mit einem Überdruck beaufschlagt, also sozusagen vorgespannt. Üblicherweise wird der Stoßdämpfer erst mit der vorgesehenen Menge Öl befüllt und danach über ein Ventil mit Druck beaufschlagt, bis der Nenndruck erreicht ist. Das Bedrücken erfolgt in mehreren Schritten, um auszugleichen, dass sich das Gas beim Befüllen erhitzt, dann später aber diese Wärme an das Öl, den Stoßdämpfer und somit auch an die Umgebung abgibt, wodurch der Druck in der Gasfeder wieder etwas abnimmt. Beim Befüllen wird der Druck auf das Öl und die Stoßdämpferrohre vom Umgebungsdruck p_{atm} auf den Fülldruck angehoben, so dass die Kompressibilität des Öles und die Flexibilität der Rohre Einfluss haben. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass das Befüllen so sorgfältig erfolgt, dass sich keine Luftbläschen im Öl befinden, so dass $E_A = 1$ gilt. Es muss real also mehr Gas in die Gasfeder gepresst werden, als man es aus technischen Zeichnungen ablesen würde (V_{geom}). Das tatsächliche Füllvolumen an Gas berechnet sich nach Gleichung 2.15:

$$V_{01} = V_{geom} + \Delta V_{Rohr (p_{01}-p_{atm})} + \Delta V_{\text{Öl} (p_{01}-p_{atm})} \quad (2.15)$$

2) Veränderung der Temperatur bezüglich des Befüllens

Während das Befüllen normalerweise bei ungefähr Zimmertemperatur durchgeführt wird, können die Einsatztemperaturen des Fahrwerks stark schwanken. Mit der Temperatur ändern sich der Ausgangsdruck und somit die gesamte Charakteristik der Gasfeder (Gleichung 2.16).

$$p_{01x} = p_{01} \cdot \frac{V_{01} \cdot \frac{T_x}{T_0}}{V_{01} - \Delta V_{\text{Öl} X (T_x - T_0)} + \Delta V_{Rohr X (p_{01x} - p_{01})} + \Delta V_{\text{Öl} X (p_{01x} - p_{01})}} \quad (2.16)$$

Gleichung 2.16 zeigt, dass die Beziehungen sehr verstrickt sind. Eine Temperaturänderung verändert den Druck, welcher Einfluss auf die Kompression des Öles und die Ausdehnung der Rohre hat, was wieder auf den Druck zurückwirkt. Da ein Auflösen dieser Beziehungen nach dem Druck zu unhandlichen Gleichungen führen würde, empfiehlt es sich, beim Berechnen des Gasfederdruckes iterativ vorzugehen.

3) Einfedern des Stoßdämpfers

Nachdem Ausgangsdruck und -volumen berechnet sind, kann nun die Abhängigkeit des Druckes der Gasfeder von der Einfederung berechnet werden. Im Gegensatz zum Einstellen

Diese Berechnung soll nur als optional betrachtet werden. Wenn keine zweite Gaskammer existiert, kann auf diesen und die nächsten Schritte verzichtet werden. Ist jedoch eine zweite Stufe vorhanden, so hat diese einen größeren Anfangsdruck als die erste, ist also stärker vorgespannt. Solange der Anfangsdruck der zweiten Stufe nicht erreicht ist, wirkt nur die erste Stufe. Wenn der Anfangsdruck der zweiten Stufe überschritten wird, beginnt auch diese einzufedern. Dies wirkt dann wie eine Vergrößerung des Volumens der ersten Stufe, wodurch die Gasfeder ab diesem Punkt weicher wird. Daher weist die Federkennlinie (Federkraft/-druck über Federweg) einer zweistufigen Feder einen charakteristischen Knick auf, der das Einsetzen der zweiten Stufe kennzeichnet. Zur Berechnung des zugehörigen Federwegs $s_{SAT1\ end}$ empfiehlt sich ein iteratives Vorgehen, indem man in Gleichung 2.17 die Einfederung solange variiert, bis der Druck der ersten Stufe gleich dem Anfangsdruck der zweiten Stufe ist. Es ist jedoch zu beachten, dass auch dieser der Änderung der Temperatur unterliegt, was sich jedoch mangels Öl nur in einer Druckdifferenz äußert:

$$p_{02\ X} = p_{02} \cdot \frac{T_X}{T_0} \quad (2.18)$$

Das Volumen des komprimierten Gases der ersten Stufe beim Beginn des Einfederns von Stufe zwei berechnet sich aus der Einfederung $s_{SAT1\ end}$ und dem Anfangsdruck der zweiten Stufe $p_{02\ X}$, wie Gleichung 2.19 darstellt:

$$V_{1\ end} = V_{01} - \Delta V_{\text{Öl } X (T_X - T_0)} + \Delta V_{\text{Rohr } X (p_{02} - p_{01})} + \Delta V_{\text{Öl } X (p_{02} - p_{01})} - \Delta V_{(s_{SAT1\ end})} \quad (2.19)$$

5) Druckverlauf nach Einsetzen der zweiten Stufe

Wie oben beschrieben sorgt die zweite Stufe nach Erreichen für eine weichere Gasfeder (siehe Gleichung 2.20). Sie kann so zu einem besseren Stoßdämpferwirkungsgrad beitragen. Ihr größter Vorteil ist aber das feinere Ansprechen des Stoßdämpfers bei statischer Einfederung beim Rollen. Dies erkauft man sich mit einer Zunahme an Bauteilen und einer damit verbundenen Zunahme der Komplexität der Baugruppe Stoßdämpfer. Daher müssen die Vor- und Nachteile gegeneinander abgewogen werden.

$$p_1 = p_{02\ X} \cdot \left(\frac{V_{02} + V_{1\ end}}{V_{02} + V_{1\ end} + \Delta V_{\text{Rohr } X (p_2 - p_{02\ X})} + \Delta V_{\text{Öl } X (p_2 - p_{02\ X})} - \Delta V_{(s_{SAT} - s_{SAT1\ end})}} \right)^n \quad (2.20)$$

Die folgende Abbildung soll den qualitativen Verlauf des Dämpferdruckes nach dem Einsetzen der zweiten Stufe mit dem weiteren theoretischen Verlauf der ersten Stufe gegenüberstellen.

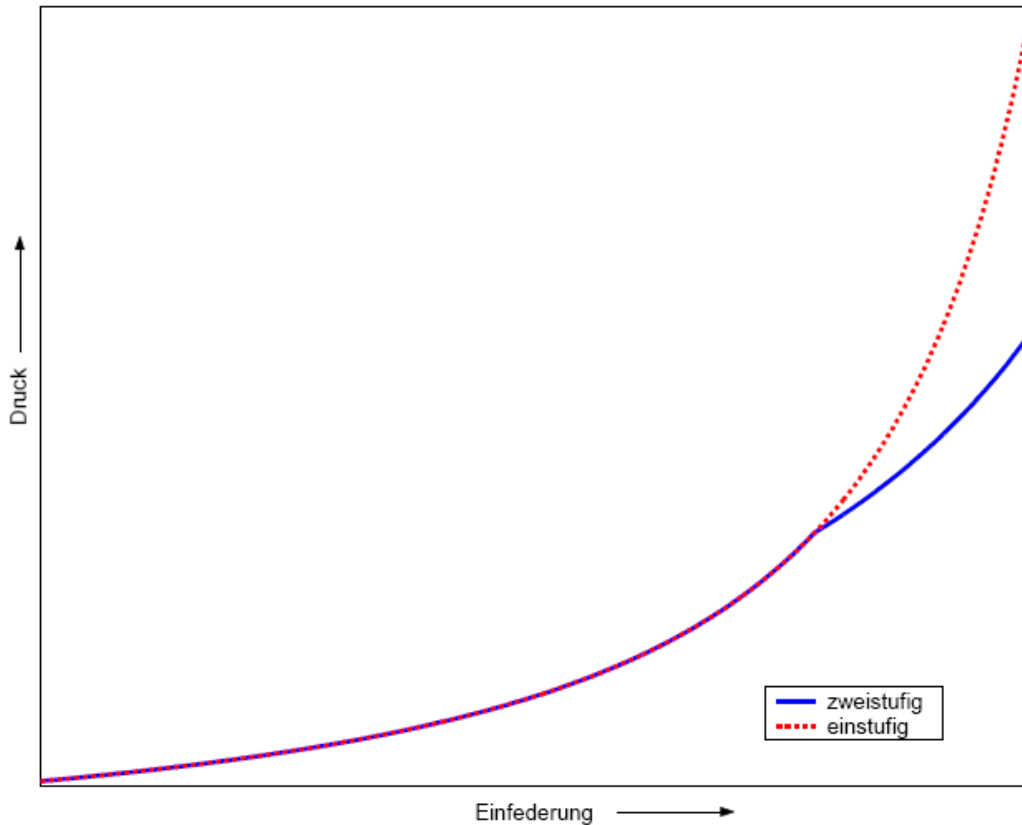


Bild 2.8 Vergleich des Druckverlaufs einer ein- und einer zweistufigen Gasfeder

Die wirkende pneumatische Kraft ergibt sich aus der Druckdifferenz zwischen Gasfeder und Umgebung, die an der pneumatischen Fläche wirkt. Diese Fläche ist normalerweise die Querschnittsfläche des Gleitrohrs. Auch bei zweistufigen Dämpfern bleibt diese Fläche die Referenzfläche, da die zweite Stufe lediglich das Volumen der ersten Stufe vergrößert.

$$F_{pneu} = (p_1 - p_{atm}) \cdot A_{pneu} \quad (2.21)$$

Mit dem oben beschriebenen Verfahren lässt sich die Charakteristik einer Gasfeder so beschreiben, dass sie zur Erstellung eines Kennfeldes der Federkraft in Abhängigkeit der Einfederung in einem Modell verwendet werden kann. Die meisten der Parameter ergeben sich bereits aus der Konstruktion des Dämpfers, müssen aber vielleicht in der Auslegungsphase anhand ähnlicher Konstruktionen abgeschätzt werden. Lediglich der Polytropenexponent kann nicht einfach gemessen werden, sondern kann erst bei einem Fallversuch mit dem kompletten Fahrwerk ermittelt werden. Für Entwurfsrechnungen sollten die in Tabelle 2.1 gegebenen Richtwerte ausreichende Genauigkeit besitzen.

2.3.2 Hydraulische Drossel

Die hydraulische Drossel dissipiert einen Großteil der beim Landestoß auftretenden Energie, was sie von der Gasfeder unterscheidet, welche die Energie speichert und beim Ausfedern wieder freigibt. Die Wirkungsweise entspricht der einer Messblende in einem von einer hydraulischen Flüssigkeit durchströmten Rohr. Der Fluss des Öles, welches durch die Bewegung des Gleitrohres von einer Kammer des Stoßdämpfers in die andere gepresst wird, wird an der Drossel eingeschnürt, wodurch eine Druckdifferenz zwischen den Kammern entsteht. Die daraus resultierende Kraft wirkt stets der Bewegung des Gleitrohres entgegen. Die Druckdifferenz an der Drossel kann mit der Gleichung von Bernoulli und dem Kontinuitätsgesetz berechnet werden:

$$\Delta p_{orif} = \frac{\dot{s}_{SAT}}{|\dot{s}_{SAT}|} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{A_{Vol}^2}{A_{orif}^2} \cdot (1 + \xi) \cdot \dot{s}_{SAT}^2 \quad (2.22)$$

Wie Gleichung 2.22 zeigt, ist der Druckverlust an der Drossel proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit des Dämpfers \dot{s}_{SAT} . Das Verhältnis der Fläche A_{Vol} , deren Bewegung zum Volumenstrom des Öles führt, zur Querschnittsfläche der Drosselöffnung A_{orif} geht ebenfalls quadratisch ein. Der Faktor $(1 + \xi)$, welcher die Verluste beim Durchströmen der Drossel wiedergibt, wird bei Dämpferberechnungen häufig in der Form $1/C_{D\ orif}^2$ verwendet, wobei $C_{D\ orif}$ der Durchflusskoeffizient ist (siehe Tabelle 2.4). Es wird angenommen, dass der Durchflusskoeffizient unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit in der Drossel ist. Die Dichte ρ der hydraulischen Flüssigkeit hat hingegen untergeordneten Einfluss auf die Drosselwirkung.

Tabelle 2.4 Literaturübersicht zum Durchflusskoeffizienten

Merkmal	$C_{D\ orif}$	Quelle
Stoßdämpferdrosseln allgemein	0,7 ... 1,0	NACA 1952 (S. 1098)
Gebrochene Kanten in Stoßdämpfern	0,65	LTH BM 22 110-02 (S. 3)
Ausgerundete Düsen in Stoßdämpfern	0,9	NACA 1952 (S. 1092)
Normblenden bei ungestörter Strömung	0,59 ... 0,8	LTH BM 22 110-02 (S. 3)
Normdüsen bei ungestörter Strömung	0,98 ... 1,2	LTH BM 22 110-02 (S. 3)

Gleichung 2.22 gilt für eine einzeln betrachtete Drossel. Durch die richtige Definition der verschiedenen Flächen für die Berechnung kann sie allgemein verwendet werden. In einem Stoßdämpfer wirken jedoch häufig mehrere Drosseln gleichzeitig. Neben der Hauptdrossel wird oft auch eine *recoil throttle* verwendet, die das Ausfedern des Dämpfers bremst. Der gleiche Effekt wird durch Ventile und Ringe erreicht, die beim Ausfedern die Drosselfläche verringern. Überdruckventile an der Drossel können die Drosselfläche druckabhängig vergrößern und den Dämpfer so weicher machen. Sie wirken dann wie eine parallel geschaltete Drossel. An beiden Drosseln wirkt die gleiche Druckdifferenz, die sich folgendermaßen aus

den Flächen (A_{orif} , $A_{orif(p)}$) und Durchflusskoeffizienten ($C_{D\ orif}$, $C_{D\ orif(p)}$) der beiden Drosseln ergibt:

$$\Delta p_{orif(p)} = \frac{\dot{s}_{SAT}}{|\dot{s}_{SAT}|} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{A_{Vol}^2}{C_{D\ orif}^2 \cdot A_{orif}^2 \cdot \left(1 + \frac{C_{D\ orif(p)} \cdot A_{orif(p)}}{C_{D\ orif} \cdot A_{orif}}\right)^2} \cdot \dot{s}_{SAT}^2 \quad (2.23)$$

Die Drosselfläche A_{orif} muss ebenfalls nicht konstant sein. Durch Einsatz eines *metering pins* (siehe Bild 2.5) kann die Drosselfläche abhängig von der Einfederung variiert werden. Diese Einrichtung wird in der Regel nur an der Hauptdrossel genutzt. Die hydraulische Dämpferkraft F_{hydr} berechnet sich wiederum aus der Druckdifferenz und der Fläche A_{hydr} , auf der diese wirkt. Die in der Simulation umgesetzten Bauformen und Besonderheiten werden im Abschnitt 3.6.2 beschrieben. Ähnlich wie der Polytropenexponent der Gasfeder ist der Durchflusskoeffizient C_D der Drosseln nicht mit elementaren Mitteln messbar. Vielmehr wird er nachträglich so angepasst, dass sich die Simulationsergebnisse an die Messungen angleichen. Für den Entwurf können die in Tabelle 2.4 genannten Werte aus der Literatur als Orientierung dienen.

2.3.3 Dämpferreibung

Die Reibungskraft wirkt stets der Einfederungsbewegung des Stoßdämpfers entgegen. Um ein feines Ansprechen des Stoßdämpfers auf Unebenheiten beim Rollen und bei der Landung zu erreichen, sollte Sorge getragen werden, die Reibung gering zu halten. Die resultierende Reibungskraft setzt sich zusammen aus der querkraftabhängigen Reibung an den beiden Lagern des Gleitrohres und der druckabhängigen Dichtungsreibung.

Zur Berechnung der Normalkräfte an den Dämpferlagern, welche zur Bestimmung der Lagerreibung benötigt werden, müssen die Kräftegleichgewichte in der x-z-Ebene und der y-z-Ebene (beides Stoßdämpferkoordinatensystem, siehe Bild 2.9) aufgestellt und ausgewertet werden. Dabei muss beachtet werden, dass sich der Abstand der Lager beim Einfedern ändert, da sich das eine Lager am Gleitrohr, das andere am Hauptgehäuse befindet. Das obere Lager trägt hierbei den Index 1, das untere den Index 2. Die Lagerkräfte in x-Richtung ergeben sich dann aus der Kraft F_x und dem Nickmoment M_y , welches durch den Nachlauf (*trail*) des Reifens, einen Bremsmanöver oder den Andrehstoß hervorgerufen werden kann.

$$\begin{aligned}
F_{n\ x1} &= \frac{F_x \cdot (P - Q - s_{SAT}) - M_y}{Q + s_{SAT}} \\
F_{n\ x2} &= \frac{F_x \cdot P - M_y}{Q + s_{SAT}}
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Das Selbe wird in Seitenrichtung vorgenommen. Einfluss auf die Lagerkräfte haben hier die Seitenkraft F_y und ein mögliches Rollmoment M_x infolge eines einzelnen, exzentrisch montierten Rades, einer Kurvenfahrt oder Ähnlichem. Aber auch die Verbindungen zur Übertragung von Giermomenten (*torque links*) üben eine Seitenkraft auf die Lager aus.

$$\begin{aligned}
F_{n\ y1} &= \frac{F_y \cdot (P - Q - s_{SAT}) + M_y + \frac{M_z}{l_{TOR}} (P - Q - s_{SAT} - z_{TOR})}{Q + s_{SAT}} \\
F_{n\ y2} &= \frac{F_y \cdot P + M_y + \frac{M_z}{l_{TOR}} (P - z_{TOR})}{Q + s_{SAT}}
\end{aligned} \tag{2.25}$$

Die Reibungskräfte an beiden Lagern ergeben sich nun aus der Multiplikation der resultierenden Lagerkräfte mit dem Reibungskoeffizienten μ_{bear} . Sie lassen sich zur resultierenden Lagerreibungskraft addieren. Diese wirkt gleichzeitig der Drehung um die z-Achse und der Bewegung in Dämpferlängsrichtung entgegen und kann in die entsprechenden Komponenten zerlegt werden.

$$\begin{aligned}
F_{fric} &= \mu_{bear} \cdot \left(\sqrt{F_{n\ x1}^2 + F_{n\ y1}^2} + \sqrt{F_{n\ x2}^2 + F_{n\ y2}^2} \right) \\
F_{fric\ z} &= \frac{v_z}{\sqrt{v_z^2 + (\omega_z \cdot R_b)^2}} \cdot F_{fric} \\
M_{fric\ z} &= \frac{\omega_z \cdot R_b}{\sqrt{v_z^2 + (\omega_z \cdot R_b)^2}} \cdot F_{fric} \cdot R_b
\end{aligned} \tag{2.26}$$

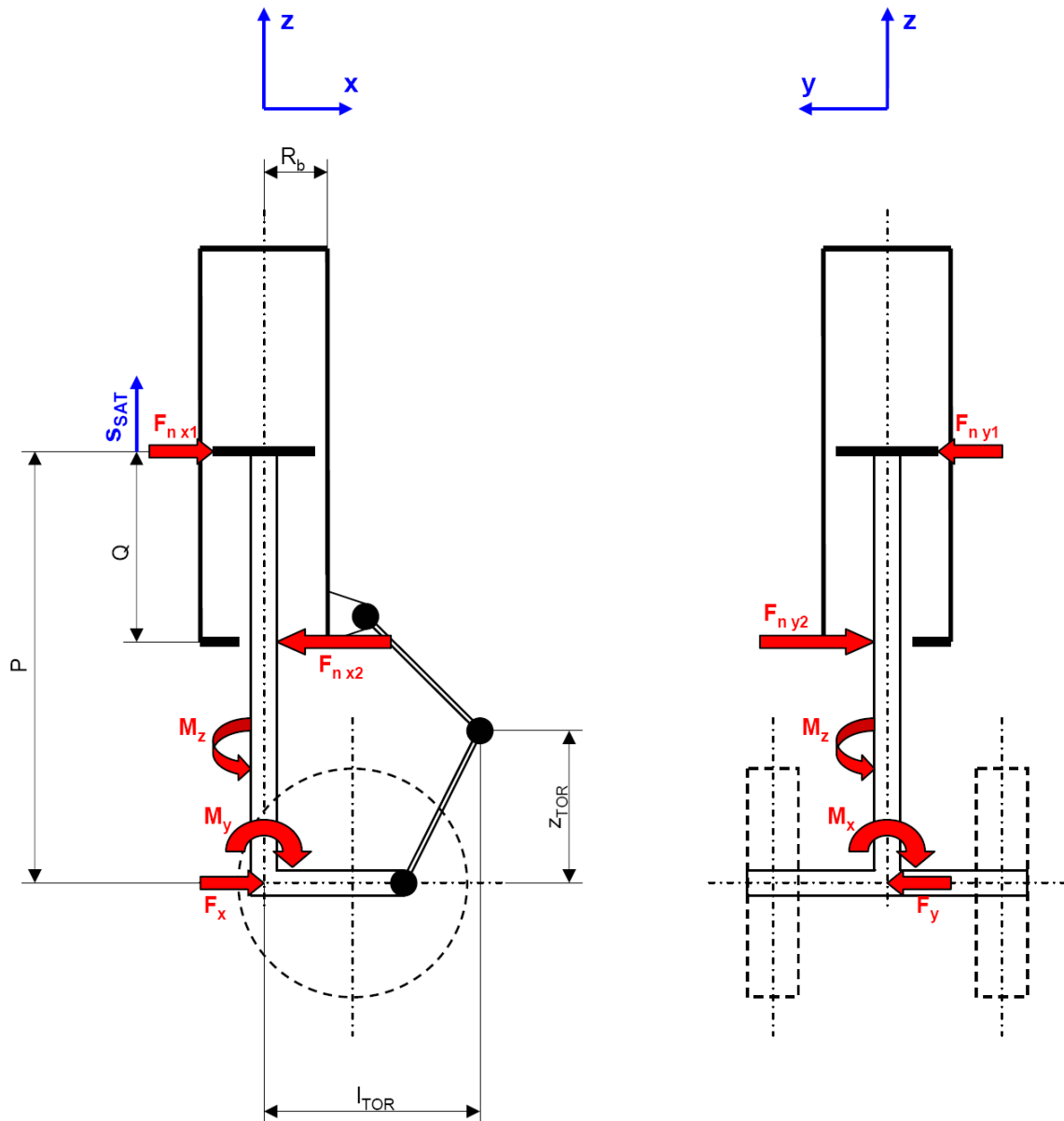


Bild 2.9 Normalkräfte an den Dämpferlagern

Weiterhin treten Reibungskräfte an den Dichtungen des Stoßdämpfers auf. Diese hängen hauptsächlich davon ab, wie fest die Dichtungen angepresst werden. Es besteht ein proportionaler Zusammenhang zu den Drücken im Stoßdämpfer, genau wie bei der hydraulischen und pneumatischen Dämpferkraft. Die Reibungskoeffizienten μ_{hydr} und μ_{pneu} geben das Verhältnis der Dichtungsreibung zur hydraulischen bzw. zur pneumatischen Dämpferkraft an:

$$\begin{aligned}
 F_{fric\ hydr} &= \mu_{hydr} \cdot F_{hydr} \\
 F_{fric\ pneu} &= \mu_{pneu} \cdot F_{pneu}
 \end{aligned}
 \tag{2.27}$$

Die Reibungskoeffizienten μ_{bear} , μ_{hydr} und μ_{pneu} lassen sich nur schwer ermitteln. So schwanken die Angaben für die Reibungskoeffizienten an den Lagern zwischen $\mu_{bear} = 0,05$ in

LTH BM 51 100-04, $\mu_{bear} = 0,1$ in **Conway 1958** (S. 104) und $\mu_{bear} = 0,25$ in **Young 1992&1995** (Kapitel 06, S. 9). Auch aus diesem Grund werden sie hier als unabhängig von Einfederung und Einfederungsgeschwindigkeit angenommen. Über die Reibungskoeffizienten besteht die Möglichkeit, die Simulationsergebnisse an die Messungen beim Fallversuch anzupassen. Für Auslegungsrechnungen ist häufig der mittlere Wert nach **Conway 1958** eine gute erste Näherung. In **LTH BM 22 110-02** (S. 3) werden die Koeffizienten für die Manschettenreibung im Bereich $\mu_{hydr} = \mu_{pneu} = 0,08 \dots 0,10$ angegeben. Bei Schwinghebelfahrwerken, bei denen theoretisch aufgrund der gelenkigen Lagerung keine Lagerkräfte auftreten, ist die Manschettenreibung der einzige Mechanismus für Reibung.

2.3.4 Steifigkeit und modale Dämpfung

Die Lasten des Landestoßes führen dazu, dass sich der Dämpfer verformt. Die „Weichheit“ des Dämpfers in der Vertikalen ist gewünscht, da sie die gewünschte Reduzierung der Stoßlasten herbeiführt. Doch auch die anderen Freiheitsgrade der Radachse unterliegen Verformungen, auch wenn diese geringer sind. Für die exakte Untersuchung von dynamischen Phänomenen wie Andrehstoß (*spin up*) und Rückfedern (*spring back*) des Rades und dem Reifenflattern (*shimmy*) muss die Steifigkeit der Struktur berücksichtigt werden, da sie Amplitude und Frequenz dieser Schwingungen maßgeblich beeinflusst.

Die Flexibilität des Fahrwerks, also die Verformung bezogen auf die wirkende Kraft, ist abhängig von der Einfederung. Sie lässt sich in einer Matrix darstellen, die die Flexibilität für alle sechs Freiheitsgrade ausdrückt. Die Inverse dieser Matrix ist die Steifigkeitsmatrix \mathbf{C} . Aus dieser und der Massenmatrix \mathbf{M} lässt sich die modale Dämpfungsmatrix \mathbf{K} berechnen, welche ebenfalls für das Eigenschwingungsverhalten des Fahrwerks von Bedeutung ist. Bei der gesamten Ermittlung der Dämpfungsmatrix \mathbf{K} (Gleichung 2.28 bis 2.31) wird analog zu **Besselink 2000** (S. 46) vorgegangen. Als erstes wird die Matrix \mathbf{T} bestimmt, welche spaltenweise die Eigenvektoren der folgenden Gleichung enthält:

$$\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{T} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{\Omega} \quad (2.28)$$

Die Matrix $\mathbf{\Omega}$ enthält die Eigenwerte des Systems, welche den Quadraten der Kreisfrequenzen der Eigenformen entsprechen. Als nächster Schritt werden die Massen- und Steifigkeitsmatrix in die Form von Diagonalmatrizen gebracht um die Eigenformen zu entkoppeln. Die folgenden Formeln zeigen das Vorgehen für 3 x 3-Matrizen.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} &= \mathbf{T}^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{T} \\
 \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix} &= \mathbf{T}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{T}
 \end{aligned}
 \tag{2.29}$$

Die Elemente der diagonalen Dämpfungsmatrix berechnen sich nun aus den Dämpfungsverhältnis k_m (auch Lehrsches Dämpfungsmaß) und den Elementen der zwei obigen Diagonalmatrizen wie folgt:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= 2 \cdot k_m \cdot \sqrt{m_1 \cdot c_1} \\
 k_2 &= 2 \cdot k_m \cdot \sqrt{m_2 \cdot c_2} \\
 k_3 &= 2 \cdot k_m \cdot \sqrt{m_3 \cdot c_3}
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

Dabei werden alle Eigenformen unabhängig voneinander betrachtet. Die Matrix der modalen Dämpfung ergibt sich nun nach Gleichung 2.31:

$$\mathbf{K} = (\mathbf{T}^T)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{T}^{-1}
 \tag{2.31}$$

Die Kräfte infolge der Verschiebungen an der Radachse s_{WA} und der Verformungsgeschwindigkeit an der Radachse v_{WA} (beides Vektoren) ergeben sich nun wie folgt.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_{flex} &= \mathbf{C} \cdot s_{WA} \\
 \mathbf{F}_{damp} &= \mathbf{K} \cdot v_{WA}
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

Die Matrizen der Steifigkeit, Masse und modalen Dämpfung sind alle über die Einfederung veränderlich.

2.4 Reifenmodell

Der Reifen bildet das Bindeglied zwischen Fahrwerk und Boden. Zudem nimmt er durch sein Einfedern einen Teil der Stoßenergie auf und trägt in der sehr frühen Phase des Landestoßes bis zum Erreichen der Vorspannkraft der Gasfeder erheblich zur Federcharakteristik bei. Beim Manövrieren am Boden mit statisch eingefedertem Stoßdämpfer sorgt er vor allem bei Teleskopfahrwerken für den Fahrkomfort.

Für die Simulation des Landestoßes spielen vor allem die Federcharakteristik senkrecht zum Boden und die Reibung am Boden die übergeordnete Rolle. Die Steifigkeit des Reifens ist dabei abhängig von der Reifeneinfederung. Der genaue Zusammenhang von vertikaler Bodenkraft und Reifeneinfederung muss beim Reifenhersteller erfragt oder durch Versuche ermittelt werden.

$$F_{zGround} = f(\Delta R) \quad (2.33)$$

Die horizontale Bodenkraft in Fahrtrichtung $F_{xGround}$ ist die Reibungskraft des Reifens am Boden.

$$F_{xGround} = \mu_{Ground}(\kappa) \cdot F_{zGround} \quad (2.34)$$

Der Reibungskoeffizient μ_{Ground} hängt maßgeblich vom Rutschen (*skid*) des Reifens ab. Der Schlupf κ (*slip*) des Reifens drückt dabei das Verhältnis der Differenz der Umfangsgeschwindigkeit des Reifens $\omega_{tyre} \cdot R_R$ zur Vorwärtsgeschwindigkeit v_x des Fluggeräts aus.

$$\kappa = -\frac{v_x - \omega_{tyre} \cdot R_r}{v_x} \quad (2.35)$$

Der Rollradius des Reifens wird nach **Currey 1988** (S. 127) berechnet:

$$R_r = R_0 - \frac{\Delta R}{3} \quad (2.36)$$

Der für die Zulassung maximal anzusetzender Betrag des Reibungskoeffizienten kann der Vorschrift **CS-25** (CS 25.473 Landing load conditions and assumptions) entnommen werden.

„The coefficient of friction between the tyres and the ground may be established by considering the effects of skidding velocity and tyre pressure. However, this coefficient of friction need not be more than 0.8.“

Bei Fallversuchen, bei denen auch der Andrehstoß des Rades untersucht wird, muss der Reibungskoeffizient an die herrschenden Bedingungen angepasst werden. Ein Beispiel für einen bereichsweise linearisierten Zusammenhang zwischen Reibungskoeffizienten und Schlupf zeigt Bild 2.10.

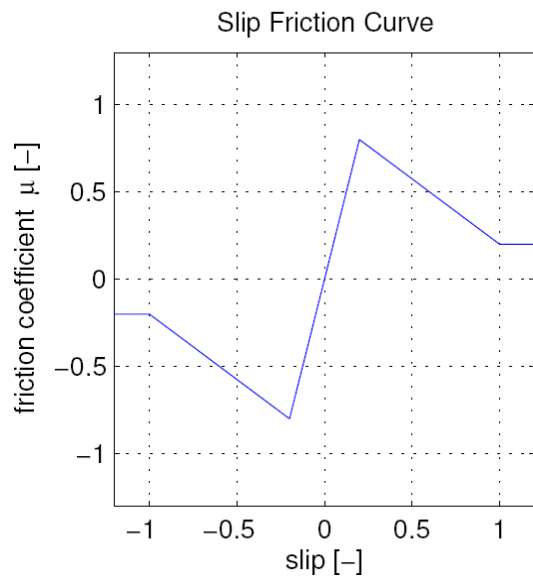


Bild 2.10 Reibungskoeffizient über dem Schlupf

Da das erstellte Modell auch die Basis für ein Gesamtmodell zur Simulation von Bodenmanövern bilden soll, wird das Von-Schlippe-Reifenmodell verwendet, welches auch die laterale Steifigkeit des Reifens sowie dessen Selbstausrichtungseigenschaften beinhaltet. Die Grundlagen des Reifenmodells sind **Besselink 2000** entnommen worden und sollen hier nur kurz umrissen werden. Im Von-Schlippe-Reifenmodell wird der Reifen durch einen Faden idealisiert, der in der Reifenmittelebene auf der Umfangskontur liegt. Bei einer Kurvenfahrt oder infolge Seitenkraft wird die Kontaktlinie des Reifens mit dem Boden relativ zum Radmittelpunkt seitlich ausgelenkt und dabei der Faden gedehnt (*stretched string tyre model*). Die Kontaktlinie von Reifen und Boden wird im Von-Schlippe-Reifenmodell durch eine Gerade angenähert (Bild 2.11).

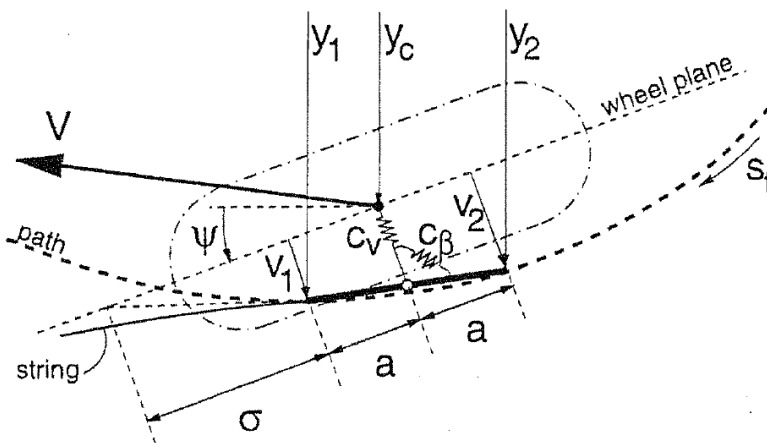


Bild 2.11 Von-Schlippe-Annäherung für die Kontaktlinie des Reifens mit dem Boden (Besselink 2000, S. 87)

a	Halbe Kontaktlänge
c_v	Seitensteifigkeit des Reifens
c_β	Giersteifigkeit des Reifens
y_1, y_2, y_c	Koordinaten: vorderer, hinterer Punkt der Kontaktlinie, Reifenmitte
σ	Reifenentspannungslänge
ψ	Gierwinkel

Für die Berechnung der Seitenkraft und des Giermomentes (Gleichung 2.37) am Reifen werden die Reifenparameter Entspannungslänge σ (*relaxation length*), halbe Kontaktlänge a (*half contact length*), Kurvensteifigkeit C_{fa} (*cornering stiffness*) und die Selbstausrichtungssteifigkeit C_{ma} (*self aligning stiffness*) benötigt. Diese sind abhängig von der Einfederung und somit auch von der vertikalen Last und müssen vom Reifenhersteller bezogen oder durch Versuche ermittelt werden.

$$F_y = \frac{C_{fa}}{\sigma + a} \cdot \left(\frac{y_1 + y_2}{2} - y_c \right) \quad (2.37)$$

$$M_z = -C_{ma} \cdot \left(\frac{y_2 - y_1}{2a} - y_c \right)$$

2.5 Shimmy Damper

Der *shimmy damper* soll das Flattern des Reifens unterbinden. Er findet vor allem bei Teleskopfahrwerken Verwendung und befindet sich an der Verbindung der beiden *torque links* (siehe Bild 2.9, mit l_{tor} und z_{tor} bemaßt). Durch zwei gegeneinander wirkende, vorgespannte Federn wird der Dämpfer in der Mittellage gehalten. Giermomente lenken ihn aus dieser Ruhelage aus. Die Bewegung wird durch hydraulische Drosseln oder durch die Eigendämpfung der Federn gedämpft. Ersteres von beiden wirkt dabei proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit, zweites direkt proportional zu dieser. Die resultierende Kraft an der Verbindung der Giermomentübertragung ergibt sich dann zu:

$$F_{SD} = C_{SD} \cdot s_{SD} + K_{SD \text{ lin}} \cdot \dot{s}_{SD} + \frac{\dot{s}_{SD}}{|\dot{s}_{SD}|} \cdot K_{SD \text{ quad}} \cdot \dot{s}_{SD}^2 \quad (2.38)$$

2.6 Landestoßanalyse

Das Fahrwerk nimmt während des Landestoßes die Energie des sich im Sinkflug befindlichen Fluggerätes auf. Diese setzt sich aus der kinetischen Energie und der potentiellen Lageenergie zusammen. Beachtet man zusätzlich den Auftrieb, so berechnet sich die Anfangsenergie des Fluggerätes in Vertikalrechnung beim Aufsetzen wie folgt:

$$E_0 = \frac{1}{2} \cdot m_{AC} \cdot v_z^2 + (m_{AC} \cdot g - L) \cdot z_{\max} \quad (2.39)$$

Die in Gleichung 2.39 berechnete Energie ist die Differenz der Energie zwischen der ersten Bodenberührung des Reifens und dem Ende der Sinkbewegung. Der Zustand bei maximaler Absenkung der oberen Masse z_{\max} dient als Bezugspunkt der Energiebetrachtung. Die vergleichsweise geringe, ungedammte Masse soll in dieser Betrachtung zur oberen Masse zugefügt werden. Die vom Fahrwerk verrichtete Arbeit, entspricht genau der oben beschriebenen Anfangsenergie. Sie berechnet sich aus der vertikalen Fahrwerkskraft, die der Sinkbewegung des Fluggerätes entgegenwirkt, und der maximalen Absenkung der oberen Masse.

$$W_{LG} = - \int_0^{z_{\max}} F_z dz \quad (2.40)$$

Die gleiche Rechnung lässt sich für den Stoßdämpfer vornehmen.

$$W_{SA} = \int_0^{s_{SAT \max}} F_{strut} ds_{SAT} \quad (2.41)$$

Da für die Gleichungen 2.39 bis 2.41 die maximalen Einfederungen bekannt sein müssen, können derartige Energiebetrachtungen nur im Anschluss von Simulationen durchgeführt werden. Sie dienen daher hauptsächlich zur Kontrolle der ermittelten Lasten, können aber auch zur Analyse verwendet werden. So lässt sich mit Gleichung 2.40 auch die maximal in der Gasfeder gespeicherte Energie berechnen, wenn man die maximale Federkraft und die maximale Einfederung des Stoßdämpfers einsetzt. Ebenso erlaubt die Arbeitsaufnahme eine Aussage zum Wirkungsgrad des gesamten Fahrwerks und des Stoßdämpfers.

$$\eta_{LG} = \frac{W_{LG}}{F_{z \max} \cdot (-\Delta z_{\max})} \quad (2.42)$$

$$\eta_{SA} = \frac{W_{SA}}{F_{strut \max} \cdot s_{SAT \max}}$$

Der Gesamtwirkungsgrad des Fahrwerkes wird dabei niedriger liegen als der des Dämpfers, da die Federkennlinie des Reifens nahezu linear verläuft, also einen Wirkungsgrad von rund ein Halb aufweist.

Ein weiterer wichtiger Parameter des Landestoßes ist das auftretende Lastvielfache. Er wird nicht selten vom Hersteller des Fluggeräts als Randbedingung für die Entwicklung eines Fahrwerkes gegeben. Das Lastvielfache am Krafteinleitungspunkt der Fahrwerksaufnahme in Vertikalrichtung berechnet sich aus der dort wirkenden vertikalen Kraft und dem Gewicht des Fluggeräts.

$$LF_{MF} = \frac{F_z}{m_{AC} \cdot g} \quad (2.43)$$

Auf das gesamte Fluggerät wirkt zudem noch die Auftriebskraft, so dass das vom Passagier wahrgenommene Lastvielfache noch um deren Beitrag größer ausfällt:

$$LF_{CG} = \frac{F_z + L}{m_{AC} \cdot g} \quad (2.44)$$

3 Programmtechnische Umsetzung

Die Simulation des Landestoßes basiert auf dem Modell zur Simulation des Radflatterns (*shimmy model*), welches von I. Besselink für LLI erstellt worden ist. Die theoretischen Grundlagen hierfür sind in **Besselink 2000** beschrieben. Bei der Programmierung der Landestoßsimulation wurde versucht, hohe Kommunalität zu diesem Modell zu wahren, um eine gemeinsame Plattform für die wichtigen Fahrwerksimulationen zu schaffen. Im Gegensatz zu unterschiedlichen Modellen mit unterschiedlichen Einschränkungen der Gültigkeit, die häufig viele Fragen aufwerfen und auch gegenüber dem Kunden zu Erklärungsnoten führen, soll die Verwendung der gleichen physikalischen Modelle in den verschiedenen Simulationen Klarheit bei den Ergebnissen schaffen. Auch sollen auf diese Weise Deutungsversuche aufgrund verschiedener Ergebnisse vermieden werden.

Die Tatsache, dass in den verschiedenen Simulationen auf die gleichen physikalischen Modelle zurückgegriffen wird, führt aber auch dazu, dass in den Simulationen teils unnötige Blöcke mitgeschleppt werden, die zur Erfüllung der eigentlichen Aufgabe nicht unbedingt erforderlich wären. Auch wird die Komplexität der Modelle in den verschiedenen Simulationen unterschiedlich ausgeschöpft. Das Reifenmodell aus der *shimmy simulation* ist zum Beispiel für die Landestoßsimulation „überdimensioniert“. Da die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Fahrwerksdatenbasis aber auch zur Erstellung eines Gesamtmodells für die Simulation von Koppelstößen, dem Rollen und dem Bremsen dienen soll, lohnt es sich, die im Augenblick scheinbar überflüssigen Module beizubehalten. Die Lösung des „Problems“ liegt vielmehr darin, die unnötigen Module durch bestimmte Eingaben oder Schalter zu deaktivieren. Auf diese Weise bleiben sie dennoch erhalten und stehen bei späterem Bedarf immer noch zur Verfügung. Im Fall der Landestoßsimulation betrifft dies den *shimmy damper*, das bereits oben erwähnte Reifenmodell und zahlreiche Einrichtungen, um das Flattern des Fahrwerks anzuregen.

Um die Benutzung der Simulation von der Kenntnis des Quelltextes zu trennen, wurde ein Menüsystem entworfen, welches den Anwender durch das Programm führt. Das Menü, alle Kommentare im Quelltext und die Ausgabe sind in englischer Sprache verfasst. Durch die Verwendung eines Menüs ist der Quelltext der Simulation vor ungewollter Veränderung geschützt. Durch Umwandeln der *MATLAB*-Programmdateien (*.m) in p-Dateien, welche nicht in *MATLAB* editierbar sind, besteht eine Möglichkeit, den Kreis der Personen mit Zugriff auf den Quelltext zu begrenzen und so die Kontrolle über im Umlauf befindliche Versionen zu behalten. Die Umwandlung von *m-files* in *p-files* erfolgt mit dem Befehl *pcode*.

3.1 Programmkenndaten

Das Programm `DROP_SIMU.m`, welches in einem gleichnamigen Ordner gespeichert ist, dient zur Simulation des Landestoßes für verschiedene Fahrwerkstypen. Dies sind: Teleskopfahrwerk, Schwinghebel-/Schwingenfahrwerk mit Druck- oder Zugdämpfer und Halbschwingenfahrwerk. Alle genannten Fahrwerkstypen können mit einem einzelnen Reifen (*single*) oder Zwillingsbereifung (*twin*) bestückt werden. Das Modell beschränkt sich auf die Simulation des Landestoßes eines einzelnen Fahrwerks. Die geschaffene Fahrwerksdatenbasis kann aber zum Aufbau komplexerer Modelle genutzt werden.

Das Programm ist in *MATLAB* erstellt worden und kann auch nur mit *MATLAB* gestartet werden. In das Programm sind die Modelle der Fahrwerkstypen eingebaut, die im Mehrkörpersimulationsprogramm *SimMechanics* erarbeitet worden sind. *SimMechanics* ist eine Werkzeugleiste (*toolbar*) von *Simulink* und somit vollständig in die *MATLAB*-Entwicklungsumgebung integriert.

3.1.1 Verwendete Programme

Zur Erstellung der Datenbasis zur Fahrwerkssimulation wurden folgende Programmversionen verwendet. Das erstellte Simulationsprogramm sollte auf allen neueren Versionen von *MATLAB* lauffähig sein.

Tabelle 3.1 Verwendete Programmversionen

Programm	Version
Betriebssystem	<i>Microsoft Windows XP Professional</i> Service Pack 2
<i>MATLAB</i>	6.5.1 R13 SP1
<i>Simulink</i>	5.1
<i>SimMechanics</i>	2.1.1

Zum Öffnen der Ergebnis- und Protokolldateien werden weitere Programme benötigt. Für die erzeugten ASCII-Dateien (*.dat, *.tbl, *.ipt) empfiehlt sich die Verwendung von *Microsoft WordPad* oder des *Microsoft Editor*. Zum Vergleich der ASCII-Dateien verschiedener Rechenläufe ist *Compare It!* von *Grig Software* ein nützliches Werkzeug. Zudem wird zum Konvertieren der PostScript-Dateien (*.ps) in *portable document files* (*.pdf) ein weiteres Programm benötigt. Bei der Entwicklung der Landestoßsimulation wurde hierfür *FreePDF XP 3.20* verwendet. Zum lesen der PDF-Dateien wird der *Adobe Reader* gebraucht.

3.1.2 Systemvoraussetzungen

a) für aktuelle Programmversionen MATLAB 7.4, Simulink 6.6.1, SimMechanics 2.6 für Windows

Tabelle 3.2 Systemvoraussetzungen für *MATLAB* 7.4
(nach **MathWorks** d)

Programm	Version	
Betriebssystem	<i>Windows XP</i>	(Service Pack 1 oder 2)
	<i>Windows 2000</i>	(Service Pack 3 oder 4)
	<i>Windows Server 2003</i>	
	<i>Windows Vista</i>	
Prozessor	<i>Intel Pentium</i>	(<i>Pentium IV</i> oder höher)
	<i>Intel Celeron</i>	
	<i>Intel Xeon</i>	
	<i>Intel Core</i>	
	<i>AMD Athlon</i>	
	<i>AMD Opteron</i> <i>AMD64</i>	
Festplattenspeicher	500 MB	(nur <i>MATLAB</i>)
Arbeitsspeicher	512 MB	(1024 MB empfohlen)
Grafik	16-, 24- oder 32-bit <i>OpenGL</i> fähiger Grafikkadapater <i>DirectX</i> 9.0c (August 2005) oder jünger	

b) für **DROP_SIMU**

Für den Ordner **DROP_SIMU** (ohne gespeicherte Rechenergebnisse, nur Programmdateien, Eingabedaten Standardkonfigurationen und *SimMechanics*-Modelle) werden ca. 6 MB an Festplattenspeicher benötigt. Bei jedem Abspeichern der Simulationsergebnisse werden zusätzlich Daten mit einer Speichergröße von ca. 1,25 MB erzeugt (Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3 Größe der erzeugten Ergebnisdateien

Dateinhalt	Endung	Größe	
Ergebnisstruktur (s)	.mat	ca.	800 KB
Diagramme	.ps	ca.	280 KB (die erzeugte PDF-Datei ca. 170 KB)
Eingabedaten	.ipt	ca.	150 KB
Simulationsprotokoll	.dat	ca.	30 KB
Ergebnistabelle	.tbl	ca.	10 KB
Gesamt		ca.	1270 KB (\approx 1,25 MB)

Da der Speicherbedarf der Ergebnisdateien nicht unerheblich ist, sollten nicht benötigte Rechenergebnisse, die dennoch abgespeichert wurden, regelmäßig gelöscht werden. Für die Verwertbarkeit und Aussagekraft der Simulationsergebnisse auch nach einiger Zeit nach der Berechnung ist die Fülle an Daten und die detaillierte Auswertung des Rechenlaufs aber zuträglich.

3.1.3 Dateien und Speicherstruktur

Alle Programme, Unterprogramme, Modelle und Eingabedaten des Landestoßsimulationsprogramms **DROP_SIMU.m** sind im gleichnamigen Ordner gespeichert. Vom Programm erzeugte Daten werden auch, wie später beschrieben, in diesem Ordner abgelegt. Für die Funktionsfähigkeit des Programms ist es wichtig, dass die Namen der Ordner und deren Schachtelung nicht verändert werden.

Der Ordner **DROP_SIMU** enthält zum einen den Ordner **ASV** mit den von *MATLAB* automatisch erstellten Sicherungskopien der Programmdateien, den Ordner der von allen Versionen genutzten Unterprogramme **general program files**, sowie sechs Ordner mit den Bezeichnungen der Simulation der verschiedenen Fahrwerkskonfigurationen. In ihm befindet sich auch die Startdatei **DROP_SIMU.m**.

Die sechs Ordner für die verschiedenen Fahrwerkskonfigurationen sind gleich gegliedert. Die Ordner **data_complete**, **data_flex**, **data_general**, **data_geom**, **data_mass**, **data_sa**, **data_sd** (nur bei Teleskopfahrwerken) und **data_tyre** dienen als Ablage für Eingabedaten in Form von mat-Dateien, die beim Programmablauf geladen, editiert und gespeichert werden können. In den in diesen Ordnern enthaltenen Unterordnern sind verschiedene Parameter als ASCII-Datei gespeichert. Bei den Parametern handelt es sich um größere Matrizen, deren Eingabe im Menüsystem schnell unübersichtlich werden würde. Anstelle der Elemente der Matrix werden im Programm die Namen der jeweiligen ASCII-Dateien eingegeben, die dann geladen werden. Der Ordner **program files** beinhaltet alle für die Simulation des Fahrwerkstypen notwendigen Unterprogramme. Diese tragen hinter dem eigentlichen Programmname immer einen Schlüssel für den Fahrwerkstyp, für den das Unterprogramm verwendet wird. Tabelle 3.4 zeigt eine Übersicht der verwendeten Abkürzungen.

Tabelle 3.4 Schlüssel für den Fahrwerkstyp in Programmnamen

Abkürzung	Konfiguration	
*_t1w	Teleskopfahrwerk mit einem Rad	(<i>telescope, 1 wheel</i>)
*_t2w	Teleskopfahrwerk mit zwei Rädern	(<i>telescope, 2 wheels</i>)
*_l1w	Schwinghebelfahrwerk mit einem Rad	(<i>lever, 1 wheel</i>)
*_l2w	Schwinghebelfahrwerk mit zwei Rädern	(<i>lever, 2 wheels</i>)
*_s1w	Schwinghebelfahrwerk mit einem Rad	(<i>semi-levered, 1 wheel</i>)
*_s2w	Schwinghebelfahrwerk mit zwei Rädern	(<i>semi-levered, 2 wheels</i>)
*_1w	mit einem Rad	(<i>1 wheel</i>)
*_2w	mit zwei Rädern	(<i>2 wheels</i>)

Werden während des Programmablaufs Ergebnisse gespeichert, so geschieht dies im Ordner **results**. Unter **data** werden die Ergebnisdaten (*.mat), unter **graph** die Diagrammdateien (*.ps), unter **input** die ASCII-Dateien mit den Eingabedaten (*.ipt) und unter **protocol** die Protokolldateien in Text- (*.dat) oder Tabellenform (*.tbl) abgelegt. Das jeweilige *SimMechanics*-Modell (*.mdl) befindet sich in **simmech_model**. In den sechs Ordnern für die verschiedenen Fahrwerkstypen befindet sich auch jeweils eine Datei **DROP_SIMU-Fahrwerkstyp.m**, die als Startdatei für die jeweilige Simulation verwendet werden kann. Die folgende Abbildung soll die Speicherstruktur verdeutlichen.

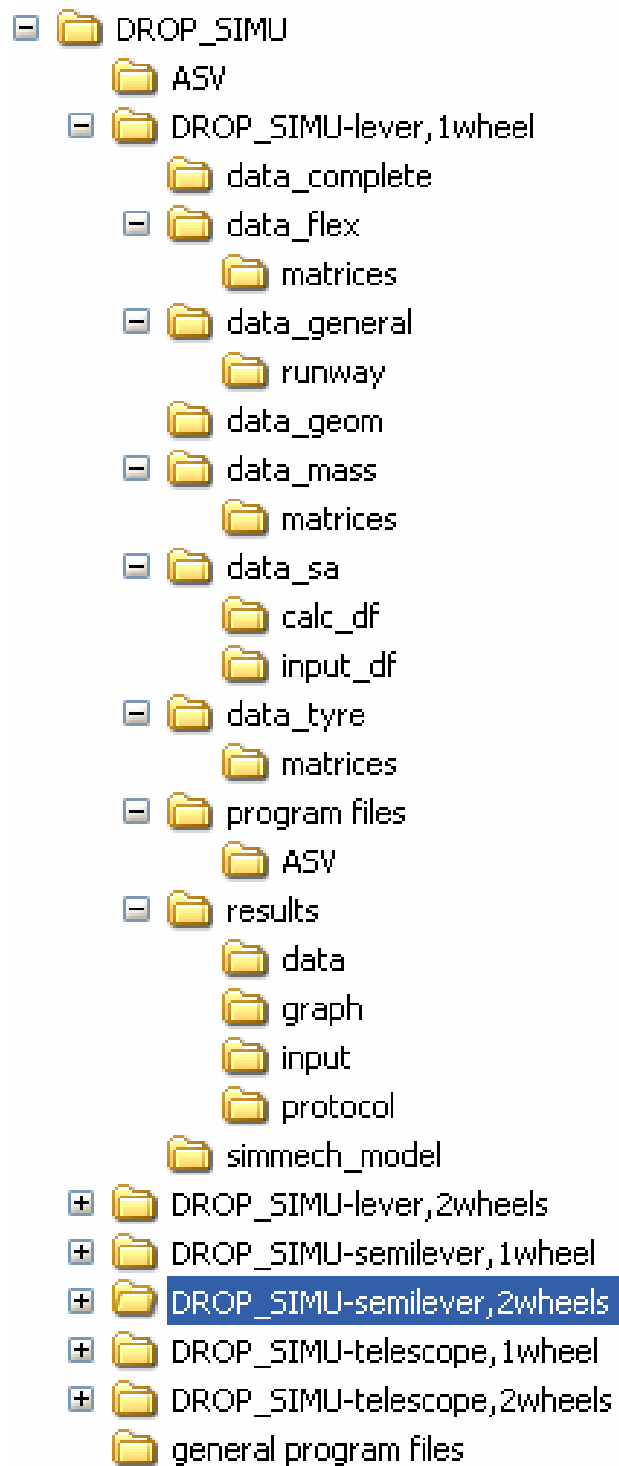


Bild 3.1 Speicherstruktur des Landestößsimulationsprogramms

3.2 Programmablauf und Menüsystem

An dieser Stelle soll dem Anwender des Programms `DROP_SIMU.m` der grundsätzliche Programmablauf gezeigt werden. Für denjenigen, der den Quelltext des Programms ändern will oder muss, sei darauf hingewiesen, dass sich in Anhang B Struktogramme zu allen Programmen und Unterprogrammen befinden, welche zum besseren Verständnis beitragen sollen.

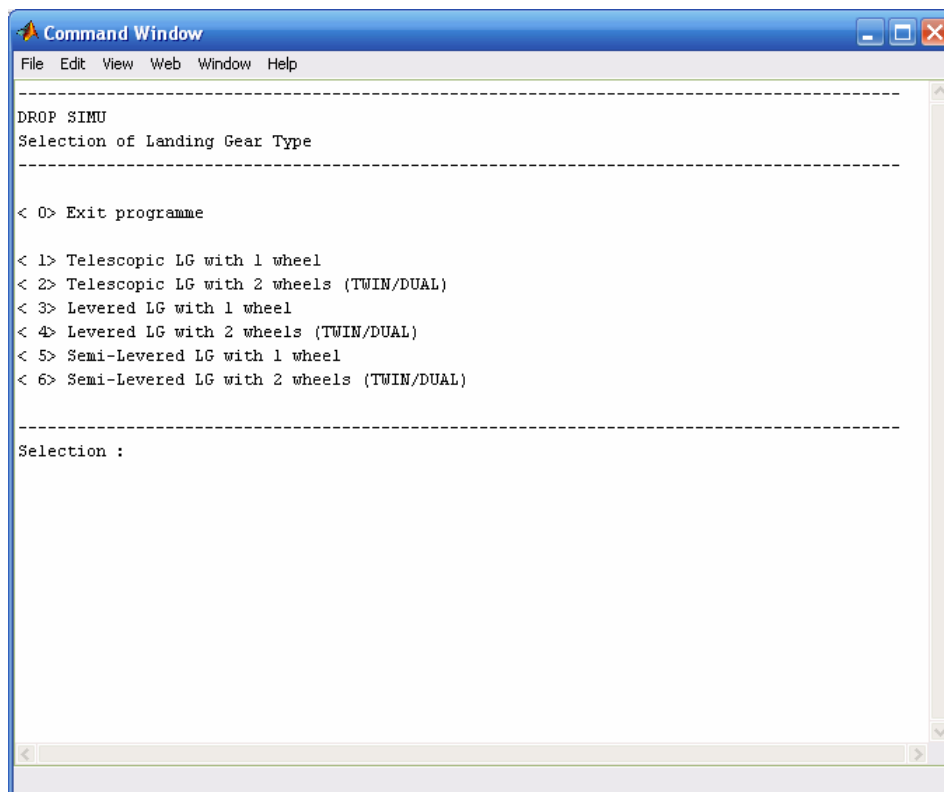
1) Starten von *MATLAB*

2) Hinzufügen des Programmordners `DROP_SIMU` mit allen Unterverzeichnissen zum aktuellen *MATLAB*-Pfad

Dies geschieht durch Auswählen von *File* → *Set Path* → *Add with Subfolders...* in der Menüleiste.

3) Aufruf der Datei `DROP_SIMU.m`

Nach Anklicken der Datei im *Current Directory* mit der rechten Maustaste und der Wahl von *Run* im sich öffnenden Menü, erscheint folgende Anzeige im Befehlsfenster (*command window*) von *MATLAB*.



```

Command Window
File Edit View Web Window Help
-----
DROP SIMU
Selection of Landing Gear Type
-----

< 0> Exit programme

< 1> Telescopic LG with 1 wheel
< 2> Telescopic LG with 2 wheels (TWIN/DUAL)
< 3> Levered LG with 1 wheel
< 4> Levered LG with 2 wheels (TWIN/DUAL)
< 5> Semi-Levered LG with 1 wheel
< 6> Semi-Levered LG with 2 wheels (TWIN/DUAL)

-----
Selection :

```

Bild 3.2 Auswahl des Fahrwerkstyps in `DROP_SIMU`

4) Auswahl des Fahrwerkstyps

Durch Eingabe der dem gewünschten Fahrwerkstyp vorangestellten Ziffer und Bestätigen mit *Enter* wird das jeweilige Programm aufgerufen. Durch Eingabe einer Null wird das Programm bereits an dieser Stelle beendet. Diese Form der Auswahl setzt sich im gesamten Programmverlauf fort.

Um das weitere Vorgehen anhand eines Beispiels zu erklären, soll nachfolgend so vorgegangen werden, als ob durch Eingabe einer „1“ das Teleskopfahrwerk mit Einzelbereifung gewählt worden ist. Demnach öffnet sich nun das Hauptmenü der Simulation (siehe Bild 3.3). Gleichzeitig werden die Standardwerte (*default*) für den jeweiligen Fahrwerkstyp geladen und stehen für den Start der Simulation oder zum Editieren in den Untermenüs zur Verfügung.

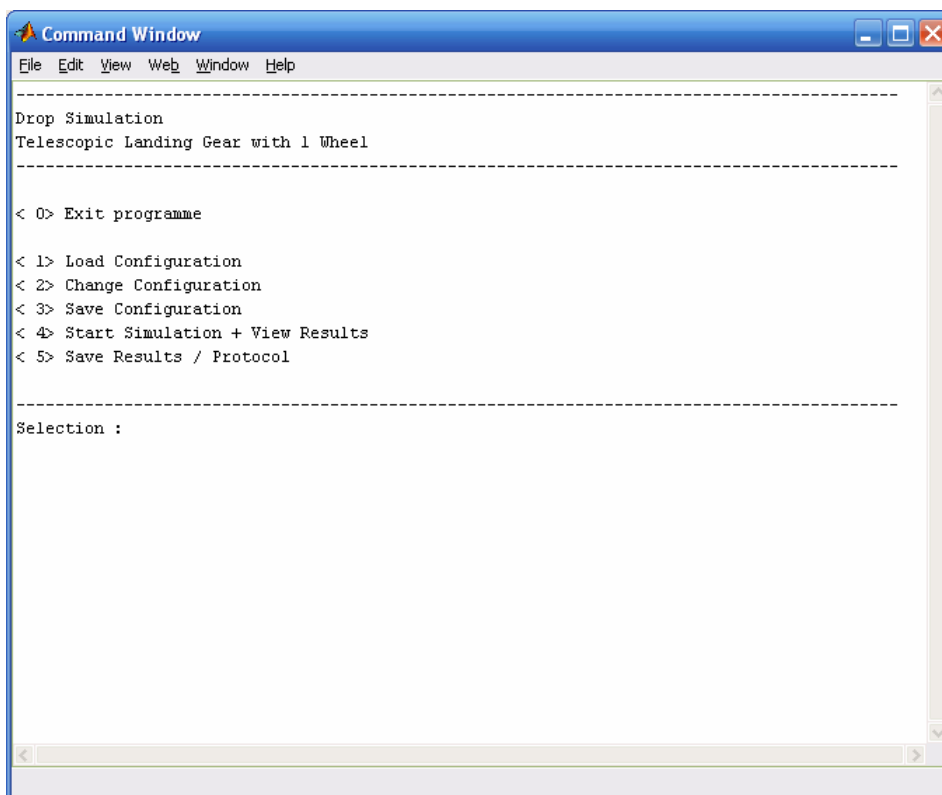


Bild 3.3 Hauptmenü der Landestoßsimulation

5) Laden einer Konfiguration

Wie bereits erwähnt, werden die Standardwerte für die Simulation automatisch geladen. Diese Konfiguration trägt den Namen **default** und ist als *mat*-Datei im Ordner **data_complete** gespeichert. Um auf außerhalb dieses Programms erstellte oder bei vorherigen Anwendungen des Programms gespeicherte Konfigurationen zurückzugreifen, bietet das Programm die Möglichkeit zum Laden (*load*) verschiedener Konfigurationen. Durch Wahl der „1“ im Hauptmenü gelangt man in das Auswahlmenü (Bild 3.4), welches beim Laden, Ändern und Speichern von Daten identisch aufgebaut ist.

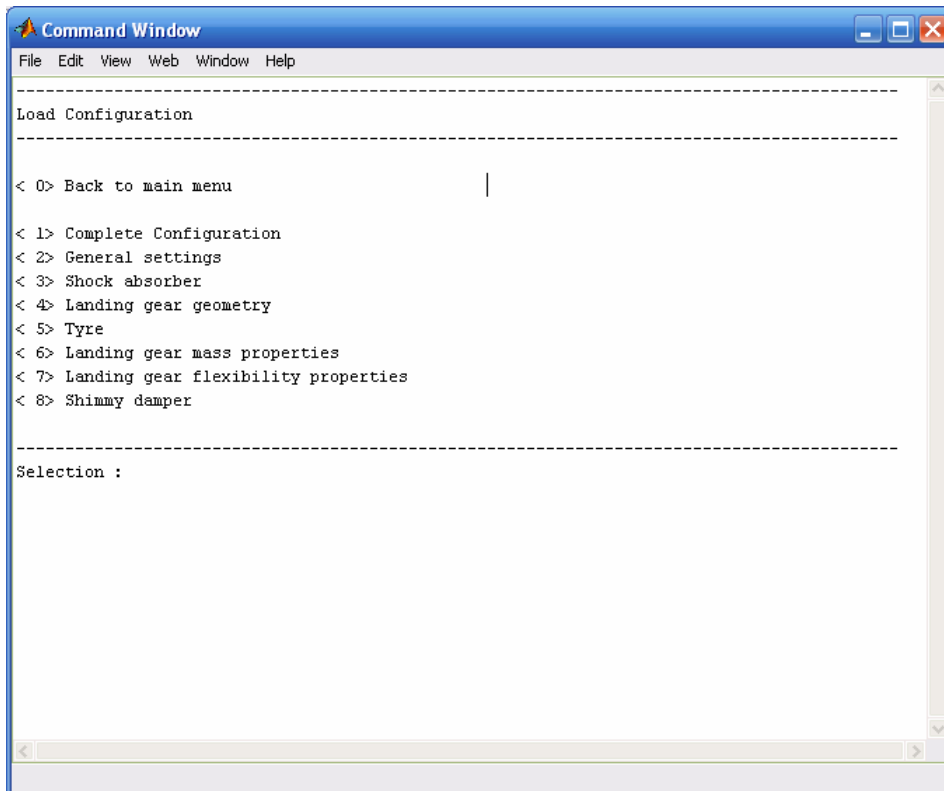


Bild 3.4 Auswahlmönü zum Laden der Konfiguration

Im Kopf ist die Aktion beschrieben, die gerade durchgeführt werden kann (hier: „*Load Configuration*“). Darunter befindet sich, wie gewohnt eine Auflistung der möglichen Optionen. Mit „0“ kehrt man zum Hauptmenü zurück, mit der Eingabe von „1“ bis „8“ wählt man die Art der zu ladenden Konfiguration. Es besteht die Möglichkeit eine gesamte Konfiguration von Fahrwerk und Randbedingungen zu laden, oder die eines speziellen Kriteriums. Diese Kriterien sind zum Beispiel die Randbedingungen oder ausgewählte Baugruppen. Jedem der aufgezählten Kriterien ist auch eine Unterstruktur (*substructure*) in der Struktur *d* zugeordnet, die die Eingangsdaten für das *SimMechanics*-Modell enthält. Je nach Auswahl wird die entsprechende Unterstruktur geladen. Bei Wahl der „1“ (*Complete Configuration*) wird die gesamte Struktur *d* geladen. Die einzelnen Unterstrukturen sind im Abschnitt 3.3 beschrieben. Eine Erklärung der Variablen der Eingabestruktur *d* befindet sich in Anhang C. In diesem Ablaufbeispiel soll eine Gesamtkonfiguration geladen werden. Deshalb wird eine „1“ eingegeben und mit der Eingabetaste bestätigt.

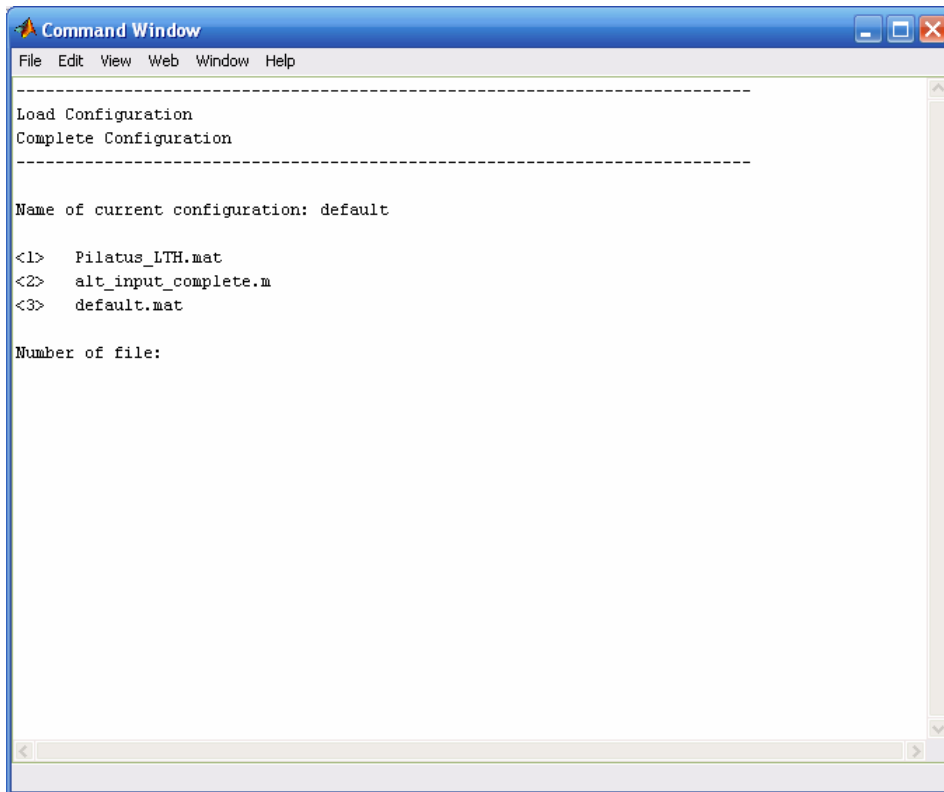


Bild 3.5 Laden einer Gesamtkonfiguration

Der Bildschirm zum Laden einer Konfiguration zeigt unter den Kopfzeilen den Namen der aktuellen Konfiguration an, der gleichzeitig der Name der jeweiligen Unterstruktur ist (d.*.name). Darunter wiederum wird der Inhalt des entsprechenden Ordners (siehe Abschnitt 3.1.3) angezeigt, in dem die jeweiligen Konfigurationen abgespeichert sind. Es ist darauf zu achten, dass nur mat-Dateien geladen werden können. Beim Versuch, andere Datentypen zu laden, wird eine Fehlermeldung angezeigt, das Laden abgebrochen und zum Menü „Load Configuration“ zurückgekehrt. In diesem Fall bleiben die bisherigen Daten unverändert. Ebenso gilt Vorsicht beim Laden von extern erstellten Eingabedateien. Die enthaltenen Programmvariablen und deren Bezeichnungen müssen exakt mit denen der jeweiligen Standardkonfiguration (default.mat) übereinstimmen. Fehlerhafte Eingabedaten werden zum Abbruch der Simulation führen. Es wird daher empfohlen, zum Editieren der Eingabe immer über die Menüs zu verfahren, wie weiter unten beschrieben wird.

In diesem Ablaufbeispiel wird die Konfiguration `Pilatus_LTH.mat` gewählt, die auch in der Beispielrechnung (Abschnitt 4.3) verwendet wird. Anschließend wird das Menü „Load Configuration“ durch Eingabe „0“ verlassen und so zum Hauptmenü zurückgekehrt.

6) Ändern einer Konfiguration

Durch Wahl der „2“ im Hauptmenü (Bild 3.3) gelangt man in das Untermenü „Change Configuration“ (Bild 3.6).

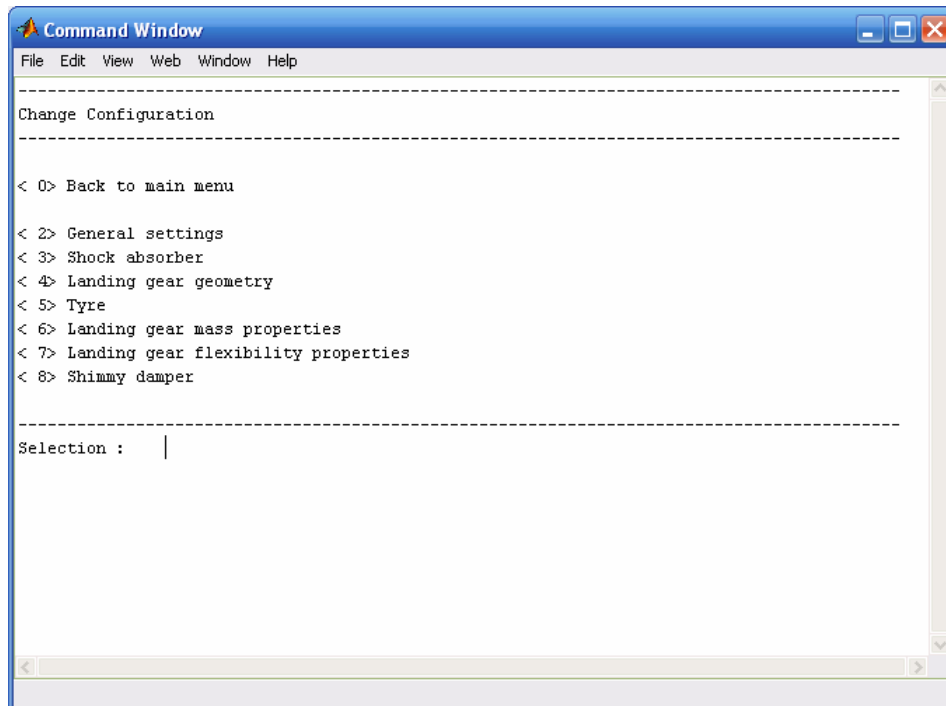


Bild 3.6 Untermenü zum Ändern einer Konfiguration

An dieser Stelle soll das Ändern der Stoßdämpferparameter gezeigt werden, da hierbei alle angewandten Eingabeverfahren erklärt werden können. Es wird daher die „3“ gewählt und mit Enter bestätigt. Im folgenden Menü werden die Parameter der aktuellen Konfiguration aufgelistet. Der vorangestellten Ziffer folgen eine kurze Beschreibung, der Name der Variable, die Einheit und der aktuelle Wert. Wie generell im Programm üblich, erfolgt die Auswahl der zu ändernden Größe durch Eingabe der vorangestellten Ziffern. Direkt unter der Auflistung erscheint dann eine Zeile für die gewählte Größe, an deren Ende der neue Wert einzugeben ist. Durch Bestätigen mit Enter wird die Eingabe übernommen. In diesem Beispiel wird das Ändern des maximalen Federwegs dargestellt (Bild 3.7). Das Prinzip der Eingabe ist bei allen Datentypen identisch. Bei der Eingabe von Vektoren und Matrizen muss darauf geachtet werden, dass die Spalten durch Leerzeichen oder Komma und die Zeilen durch Semikolon getrennt werden. Zudem muss die Eingabe dann in eckige Klammern gesetzt werden. All dies ist aber auch sonst in *MATLAB* üblich. Durch Eingabe der „0“ gelangt man in die nächste Eingabekarte oder nach der letzten Karte zurück zum Menü „Change Configuration“.

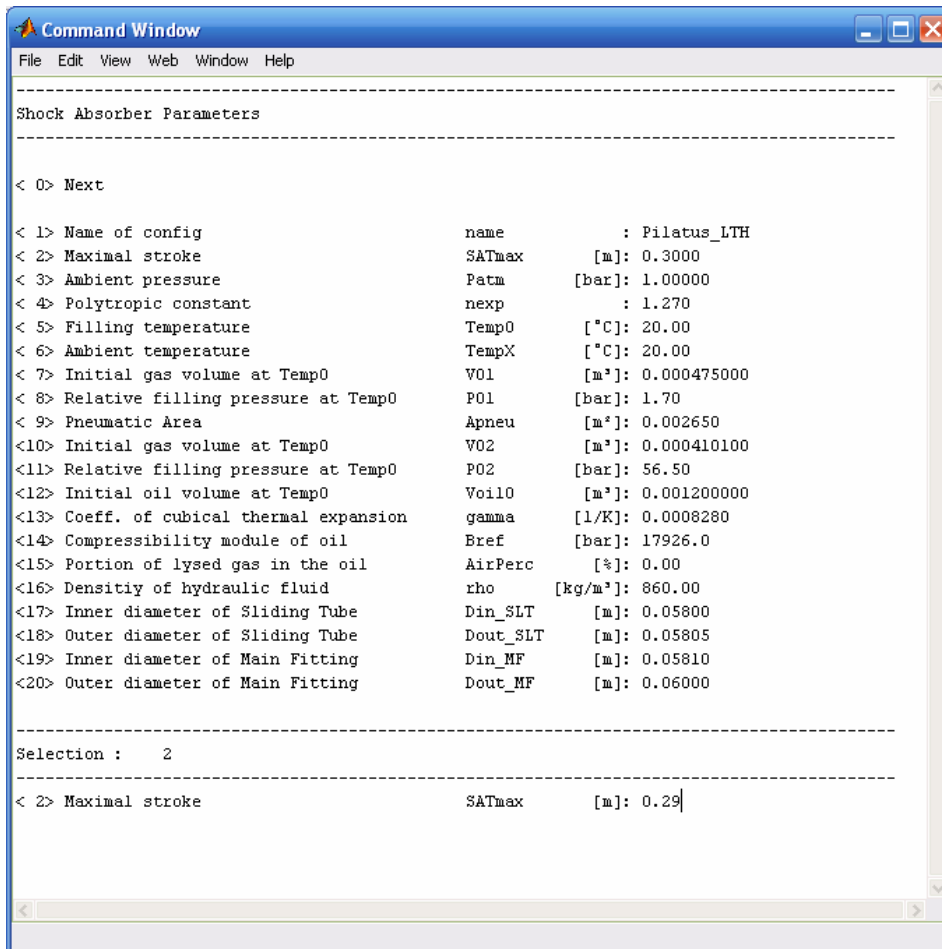


Bild 3.7 Ändern des Stoßdämpferparameters maximaler Federweg

Eine Besonderheit bei der Eingabe sind Schalter, die nur zwei verschiedene Werte annehmen können, was auch bei der Eingabe überprüft wird. Als Beispiel hierfür dient die Auswahl des Eingabemodus für die Parameter der quadratischen Dämpfung in der nächsten Eingabekarte der Stoßdämpferparameter. Die Eingabe entscheidet, ob die quadratische Dämpferkonstante aus der weiteren Eingabe der Geometrie der Drossel berechnet werden soll (bei Eingabe „0“) oder, ob sie direkt eingegeben wird (bei Eingabe „1“). Dementsprechend wird auch der weitere Verlauf des Eingabemenüs durch diese Eingabe bestimmt. Die folgende Abbildung zeigt, wie das Programm auf Falscheingaben an dieser Stelle reagiert. Letztendlich wird dann doch die „0“ gewählt, um die Geometrie der Drossel zu editieren.

```

Command Window
File Edit View Web Window Help
-----
Shock Absorber Parameters
-----
< 0> Next

< 1> Young's modulus of the Sliding Tube      ER_SLT      [N/m²]: 1.00e+015
< 2> Young's modulus of the Main Fitting     ER_MF       [N/m²]: 1.00e+015
< 3> Coeff. of transversal contraction SLT    ny_SLT      : 0.300
< 4> Coeff. of transversal contraction MF    ny_MF       : 0.300
< 5> Limit pressure for pres.-dep. throttle  Porif_p     [bar]: 10000000.0
< 6> Step size for calc. of the gascurve    dSATpneu   [m]: 0.0005
< 7> Bump stiffness                          c_bump      [N/m]: 5.00e+007
< 8> Coefficient of bearing friction        Mybear      : 0.0500
< 9> Coeff. of seal friction (pneumatic)    Mypneu      : 0.0000
<10> Coeff. of seal friction (hydraulic)    Myhydr      : 0.0000
<11> Damp. coeff.: calc=>0 or dir. input=>1  input       : 0

-----
Selection :    11
-----
< 11> Damp. coeff.: calc=>0 or dir. input=>1  input       : 5
< 11> Damp. coeff.: calc=>0 or dir. input=>1  input       : .7
< 11> Damp. coeff.: calc=>0 or dir. input=>1  input       : 0

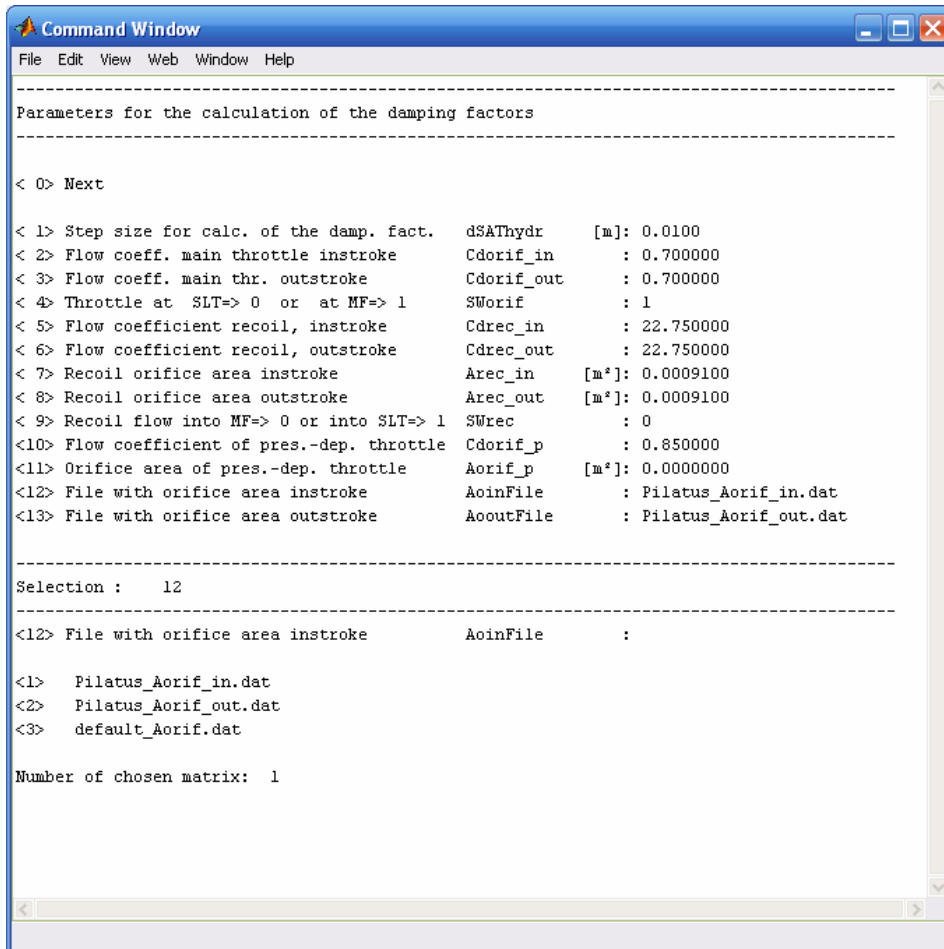
```

Bild 3.8 Wahl des Eingabemodus der Drossel Eigenschaften

Eine weitere Besonderheit besteht darin, dass einige Daten in Form von ASCII-Dateien gespeichert sind und in das Programm geladen werden. Diese Möglichkeit wird bei größeren Matrizen genutzt, deren Eingabe im Menüsystem wenig übersichtlich ist. Um die Daten in das Programm laden zu können, müssen sie vorher erstellt werden. Dabei muss sich streng an das Format der Musterdateien gehalten werden. Die Größe der jeweiligen Matrix und die Reihenfolge der Elemente ist zudem in Anhang C beschrieben.

In diesem Ablaufbeispiel wird das erneute Laden der Matrix mit der Querschnittsfläche der Hauptdrossel dargestellt. Die zu ladende Matrix hat zwei Spalten. Die erste davon enthält Werte für die Einfederung des Dämpfers, die zweite die zugehörige Drosselfläche. Für eine einfache Drossel mit konstanter Fläche muss die Matrix somit aus zwei Einfederungen und zweimal der gleichen Fläche bestehen. Zwischen den angegebenen Werten wird dann bei der Berechnung des Drosselfaktors interpoliert. Das gewählte Format ist notwendig, um bei Verwendung eines *metering pin* die mit der Einfederung veränderliche Querschnittsfläche realisieren zu können. Doch von alledem merkt man beim Laden im Menü nichts. Der Vorgang des Ladens entspricht dem beim Laden einer Konfiguration. Es werden wiederum alle sich im entsprechenden Ordner befindlichen Dateien angezeigt. Durch Eingabe der entsprechenden

vorangestellten Ziffer wählt der Nutzer die gewünschten Daten aus. Bild 3.9 zeigt nochmals das Vorgehen hierbei.



```

Command Window
File Edit View Web Window Help
-----
Parameters for the calculation of the damping factors
-----
< 0> Next

< 1> Step size for calc. of the damp. fact.   dSATHydr   [m]: 0.0100
< 2> Flow coeff. main throttle instroke     Cdorif_in   : 0.700000
< 3> Flow coeff. main thr. outstroke        Cdorif_out  : 0.700000
< 4> Throttle at SLT=> 0 or at MF=> 1      SWorif      : 1
< 5> Flow coefficient recoil, instroke      Cdrec_in    : 22.750000
< 6> Flow coefficient recoil, outstroke     Cdrec_out   : 22.750000
< 7> Recoil orifice area instroke          Arec_in     [m²]: 0.0009100
< 8> Recoil orifice area outstroke         Arec_out    [m²]: 0.0009100
< 9> Recoil flow into MF=> 0 or into SLT=> 1 SWrec       : 0
<10> Flow coefficient of pres.-dep. throttle Cdorif_p    : 0.850000
<11> Orifice area of pres.-dep. throttle   Aorif_p     [m²]: 0.0000000
<12> File with orifice area instroke       AoinFile    : Pilatus_Aorif_in.dat
<13> File with orifice area outstroke      AoutFile    : Pilatus_Aorif_out.dat

-----
Selection : 12
-----
<12> File with orifice area instroke       AoinFile    :

<1> Pilatus_Aorif_in.dat
<2> Pilatus_Aorif_out.dat
<3> default_Aorif.dat

Number of chosen matrix: 1

```

Bild 3.9 Laden von Daten in Form einer Matrix

Auf dieselbe Weise können so alle Unterstrukturen der Eingabe editiert werden. Wie gewohnt gelangt man durch die Eingabe der „0“ zum Hauptmenü zurück.

7) Speichern einer Konfiguration

An dieser Stelle soll nun gezeigt werden, wie die geänderte Konfiguration gespeichert wird, damit sie beim nächsten Programmaufruf erneut zur Verfügung steht. Hier wird das Abspeichern der gesamten Konfiguration beschrieben. Das Vorgehen beim Speichern der Unterkonfigurationen ist identisch. Durch Wahl der „3“ im Hauptmenü, gelangt man in das Untermenü „Save Configuration“, welches mit dem Menü „Load Configuration“ bis auf den Kopf übereinstimmt. Durch Wahl der „1“ wird der Dialog zum Speichern der gesamten Konfiguration geöffnet. Angezeigt werden der Name der aktuellen Konfiguration, sowie der Inhalt des Ordners, in dem gespeichert wird. Der Nutzer hat die Möglichkeit, einen neuen Namen der Konfiguration einzugeben, unter dem dann gespeichert wird. Wird ohne Eingabe eines Namens die Eingabetaste gedrückt, so wird unter dem Namen der aktuellen Konfiguration gespeichert. Da beim Speichern bereits bestehende, gleichnamige Dateien ohne weitere

Rückfrage überschrieben werden, wird empfohlen, den angezeigten Inhalt des Ordners gründlich zu prüfen und gegebenenfalls doch den Namen der Konfiguration zu ändern.

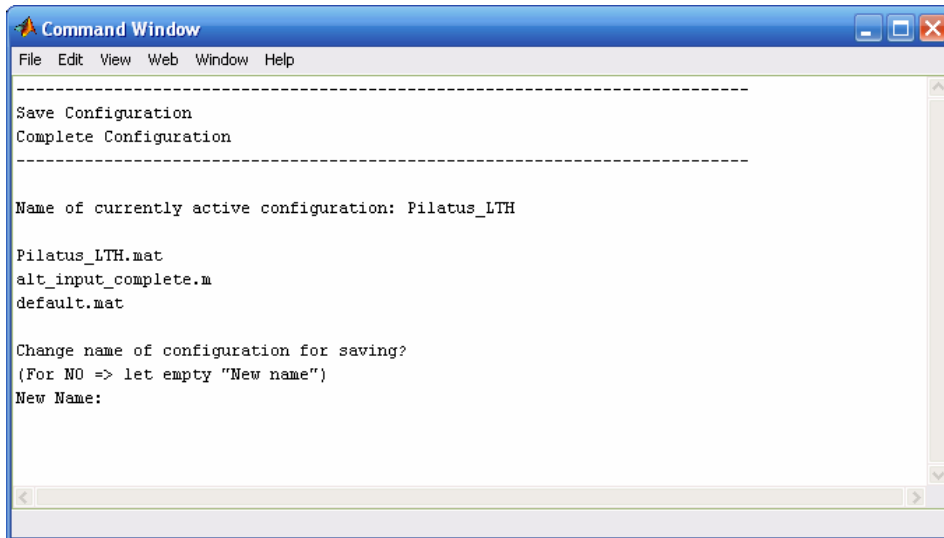


Bild 3.10 Dialog zum Speichern einer Konfiguration

8) Starten der Simulation

Ausgehend vom Hauptmenü wird die Simulation durch Eingabe der „4“ gestartet. Es wird das entsprechende *SimMechanics*-Modell mit den eingegebenen Daten ausgeführt. Auf dem Bildschirm erscheinen einige Informationen zum Status des *Shimmy Damper* („*shimmy damper disabled*“ oder „*shimmy damper activated*“) und zur Definition der Reifenreibung am Boden („*self defined slip friction curve*“ bzw. „*MagicFormula used*“). Beim Schwinghebelfahrwerk wird zudem eine Information zum Typ des Stoßdämpfers ausgegeben („*compression type shock absorber*“ oder „*tension type shock absorber*“). Nach erfolgreichem Rechenlauf öffnet sich ein Fenster mit sechs Diagrammen (Bild 3.11), die Überblick über die Simulationsergebnisse geben sollen. Gleichzeitig wird zum Hauptmenü zurück gesprungen. Die Konfiguration, mit der die Simulation durchgeführt wurde, bleibt auch nach dem Rechenlauf bestehen. Sie muss nicht erneut geladen werden.

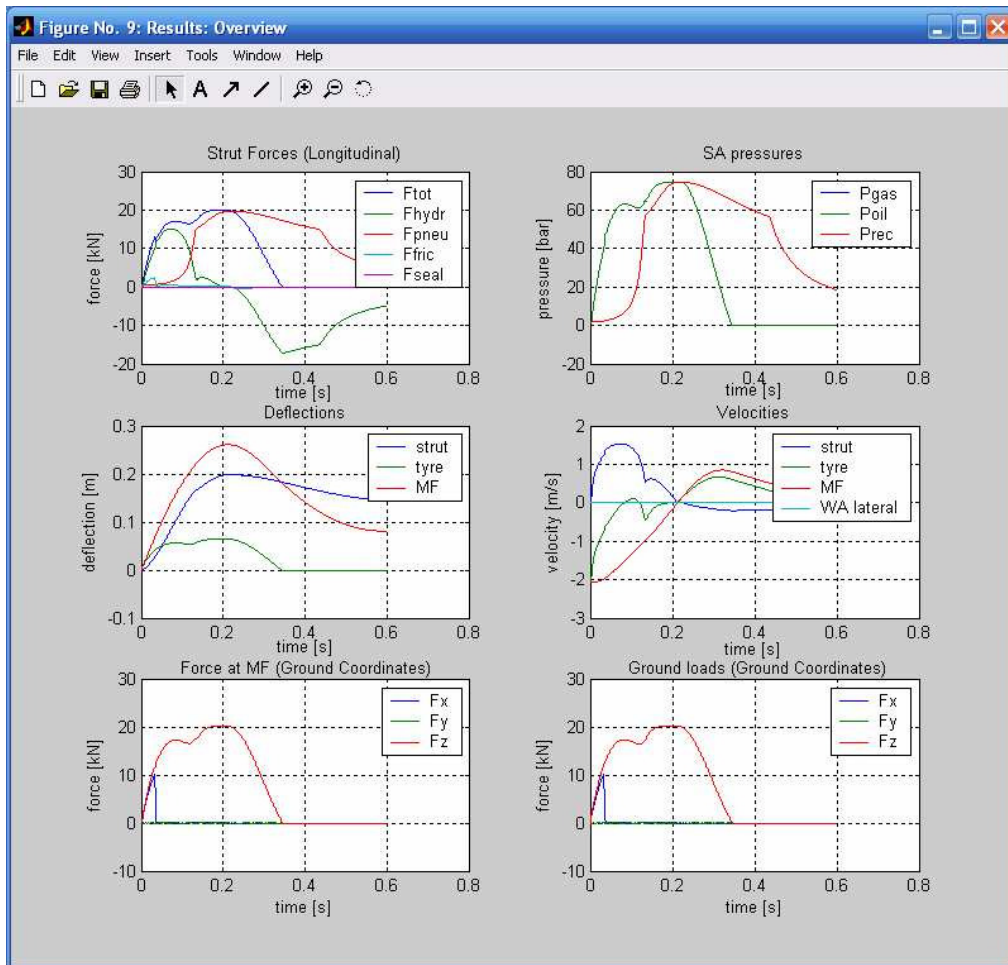
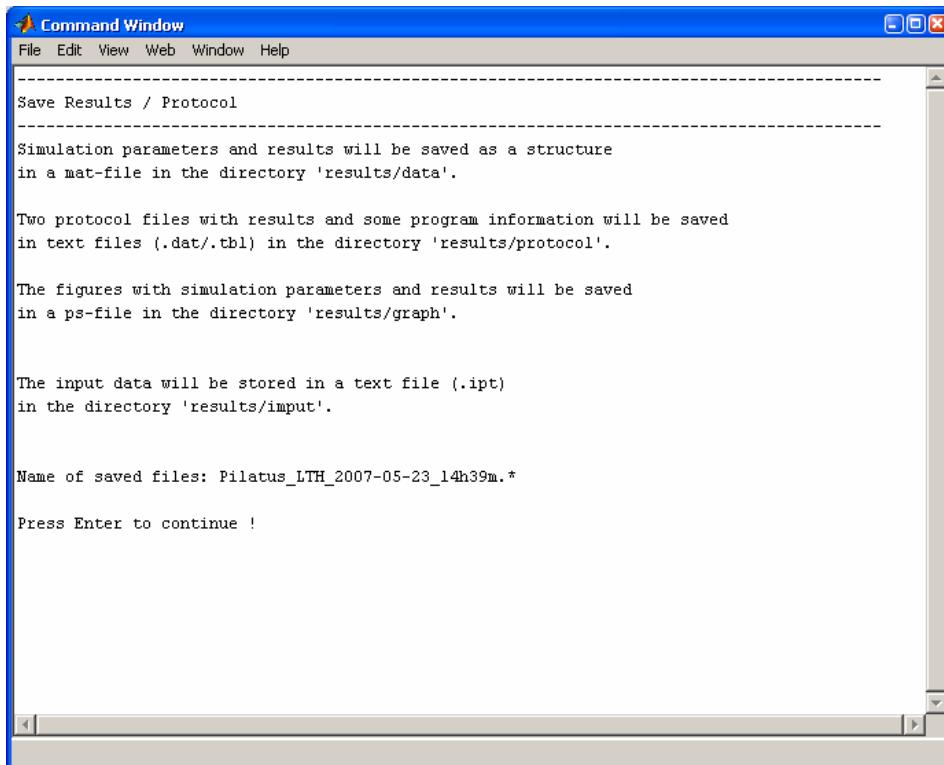


Bild 3.11 Übersicht der Simulationsergebnisse

9) Speichern der Simulationsergebnisse

Nach einem erfolgreichen Rechenlauf besteht die Möglichkeit, die Ergebnisse der Simulation zu speichern. Dies geschieht durch Wahl der „5“ im Hauptmenü. Sollte das Speichern gewählt werden, bevor ein Rechenlauf durchgeführt worden ist, erscheint eine Fehlermeldung, nach deren Bestätigung zum Hauptmenü zurückgekehrt wird. Die einzelnen Dateien, die beim Speichern erzeugt werden, werden im Abschnitt 3.4 ausführlich beschrieben. Nachfolgend wird der Informationsbildschirm beim Speichern gezeigt.

A screenshot of a 'Command Window' window with a blue title bar and a menu bar containing 'File', 'Edit', 'View', 'Web', 'Window', and 'Help'. The window contains text explaining the save process for simulation results. The text is as follows:

```
-----  
Save Results / Protocol  
-----  
Simulation parameters and results will be saved as a structure  
in a mat-file in the directory 'results/data'.  
  
Two protocol files with results and some program information will be saved  
in text files (.dat/.tbl) in the directory 'results/protocol'.  
  
The figures with simulation parameters and results will be saved  
in a ps-file in the directory 'results/graph'.  
  
The input data will be stored in a text file (.ipt)  
in the directory 'results/input'.  
  
Name of saved files: Pilatus_LTH_2007-05-23_14h39m.*  
  
Press Enter to continue !
```

Bild 3.12 Informationsbildschirm beim Speichern der Simulationsergebnisse

Mit Hilfe der obigen Beschreibung eines Musterablaufs sollte der Rest des Menüsystems selbsterklärend sein. Da nach der Simulation zum Menü zurückgekehrt wird, besteht die Möglichkeit, durch ständiges Verändern der Parameter das Fahrwerk zu optimieren. Die größte Arbeit besteht darin, einmal alle benötigten Eingabedaten zu beschaffen und im Menü zu editieren. Das Anpassen der Konfigurationen geht von diesem Punkt an relativ zügig.

3.3 Eingabe

Bei der Programmierung der Landestoßsimulation wird von einem fachkundigen Benutzer des Programms ausgegangen. Dies bedeutet, dass das Programm nur bedingt gegen Falscheingabe abgesichert ist. Die Eingabe des korrekten Datentyps wird zum größten Teil überprüft. Die Überprüfung der jeweiligen Werte auf deren Zulässigkeit würde den Programmieraufwand aber in einen nicht mehr zu rechtfertigen Bereich treiben. Unzulässige Werte, die nicht bei der Eingabe ausgefiltert werden, führen zum Abbruch des Programms. Unsinnige Eingaben sind schwerer zu entdecken. Die ausgiebige grafische Darstellung der Rechenergebnisse und auch einiger Eingabewerte im Nachlauf der eigentlichen Simulation, vor allem die von Kennfeldern und Matrizen, sollen dem Anwender helfen, unsinnige Werte oder Tippfehler zu erkennen. Damit auch nach einiger Zeit keine Zweifel auftreten, werden die Eingangswerte für die Simulation zudem in einer Textdatei protokolliert.

Die Eingabe wird in der Struktur `d` gespeichert, auf welche die Simulation in *SimMechanics* zurückgreift (siehe Anhang C). Dies ermöglicht das Speichern von Daten verschiedener Typen und Formate. Sie ist grundsätzlich eingeteilt in verschiedene Unterstrukturen (*substructure*), die jeweils die Werte für ein bestimmtes Kriterium enthalten. Diese einzelnen Gesichtspunkte sind

- `d.general` die Randbedingungen und allgemeinen Daten,
- `d.geom` die Geometrie des Fahrwerks,
- `d.sa` der Stoßdämpfer,
- `d.tyre` der/die Reifen,
- `d.sd` der *shimmy damper*,
- `d.mass` die Massendaten der ungefederten Teile (Räder, Achsen, SLT...) und
- `d.flex` die Flexibilitätseigenschaften des Fahrwerks.

Es gibt insgesamt zwei Möglichkeiten, die Simulation mit Ausgangsdaten zu versorgen. Die erste hiervon ist die Eingabe über das Menüsystem. Auf diese Weise werden die Standardwerte (*default*), die beim Programmstart geladen werden editiert. Die zweite Möglichkeit besteht darin, gespeicherte Daten zu Laden. Diese Daten können aus einem vorherigen Rechenlauf stammen oder extern erzeugt worden sein. Da vor allem bei kompletter Neueingabe der Weg über das Menüsystem aufwendig ist, wurden auch alternative Eingaberoutinen geschaffen. Diese erlauben das Erstellen und Speichern der Eingabestruktur und Unterstrukturen in einer externen, von der Simulation unabhängigen *MATLAB*-Datei. Man muss sich jedoch bewusst sein, dass diese Art der Eingabe ein erhöhtes Fehlerrisiko birgt, da nicht nur Werte editiert, sondern auch Parameter gelöscht werden können. Dies kann Fehler oder gar den Abbruch des Programms zur Folge haben. Es empfiehlt sich daher, die ursprüngliche Version dieser Dateien schreibgeschützt als Muster zu sichern. Ebenso muss darauf geachtet werden, dass

sich die externen Eingaberoutinen immer auf demselben Stand befinden, wie die aktuelle Programmversion. Die externen Programme zur Erzeugung von Dateien, die in die Simulation geladen werden können, befinden sich jeweils im Ordner, in dem die zu ladenden Dateien gespeichert sind. Sie tragen den Namen `alt_input_Kriterium.m`.

Aus der Fülle der Eingabedaten sollen in den folgenden Abschnitten nur ausgewählte Parameter erläutert werden. Eine Übersicht aller Eingabedaten mit Datentyp und Beschreibung befindet sich in Anhang C.

3.3.1 Geometrie

Das folgende Bild zeigt die Eingabeparameter der Geometrie eines Teleskopfahrwerkes mit zwei nebeneinander angeordneten Rädern. Sie sind alle in der Unterstruktur `d.geom` zusammengefasst.

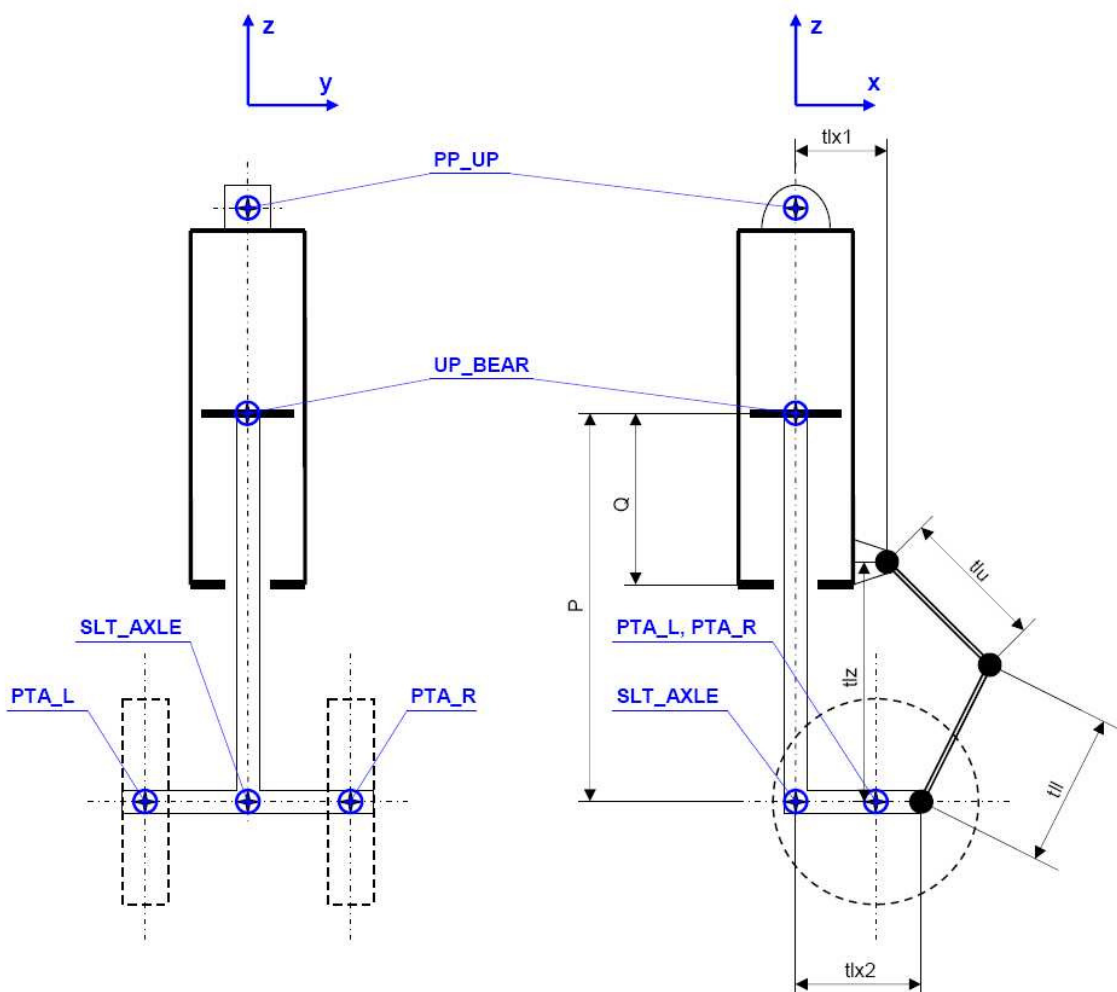


Bild 3.13 Eingabe der Geometrie eines Teleskopfahrwerkes

In der obigen Abbildung sind Punktkoordinaten mit \oplus gekennzeichnet. Die jeweiligen Koordinaten werden im Flugzeugkoordinatensystem angegeben. Alle anderen Daten sind Längenangaben. Der Punkt **UP_BEAR** dient im Modell als Schwerpunkt des MF, hat aber auf die Simulation keinen Einfluss. Der Punkt **PP_UP**, der vom Namen her die Koordinaten des oberen Befestigungsbolzens (*pintle point*) beschreibt, soll als Ersatz für die oft mehreren Befestigungspunkte dienen. Auf ihn sind alle Lasten, die in Rumpfstruktur eingeleitet werden, bezogen. Der virtuelle Schnittpunkt der Dämpferlängsachse mit der Senkrechten, auf der die Radachse liegt, trägt den Namen **SLT_AXLE**. Bei einem Fahrwerk mit nur einem Rad werden die beiden Radmittelpunkte **PTA_L** und **PTA_R** durch nur einen ersetzt (**PTA**). Die Längenangaben **P** und **Q** bestimmen die Lage der beiden Lager. Dies gilt allerdings nur für den unbelasteten Zustand, da sich die Lager beim Einfedern relativ zueinander bewegen. Die Geometrie der Giermomentübertragung (*torque links*) ist durch die Längen **tlu**, **tll**, **tlx1**, **tlx2** und **tlz** gekennzeichnet.

Selbiges gilt für das Schwinghebelfahrwerk. Der Bezugspunkt für die in die Struktur einzuleitenden Lasten ist wiederum **PP_UP** und die Radmittelpunkte sind **PTA_L** und **PTA_R** (bei nur einem Rad nur **PTA**). Weiterhin ist die Eingabe des Verbindungspunktes der Schwinge (*trailing arm*) mit der Radachse (**TA_AXLE**) und des Drehpunktes der Schwinge (**PPIV**) erforderlich. Aus den Punkten **PPIVa1** und **PPIVa2** wird ein Vektor gebildet, der die Lage der Gelenkachse im Raum beschreibt. Da nur die Richtung des Vektors zählt, müssen die beiden Punkte nicht zwangsweise am Gelenk liegen. Bezüglich der Verbindungslinie von **PPIV** und **TA_AXLE** wird der Schwingenwinkel bei der Einfederung gemessen. Der Stoßdämpfer ist oben (**PSTU**) mit dem Gehäuse und unten (**PSTL**) mit der Schwinge gelenkig verbunden. Die Verbindungslinie der beiden Gelenke bildet gleichzeitig die Stoßdämpferlängsachse. Bild 3.14 soll die Lage und Bezeichnung der einzelnen Punkte verdeutlichen.

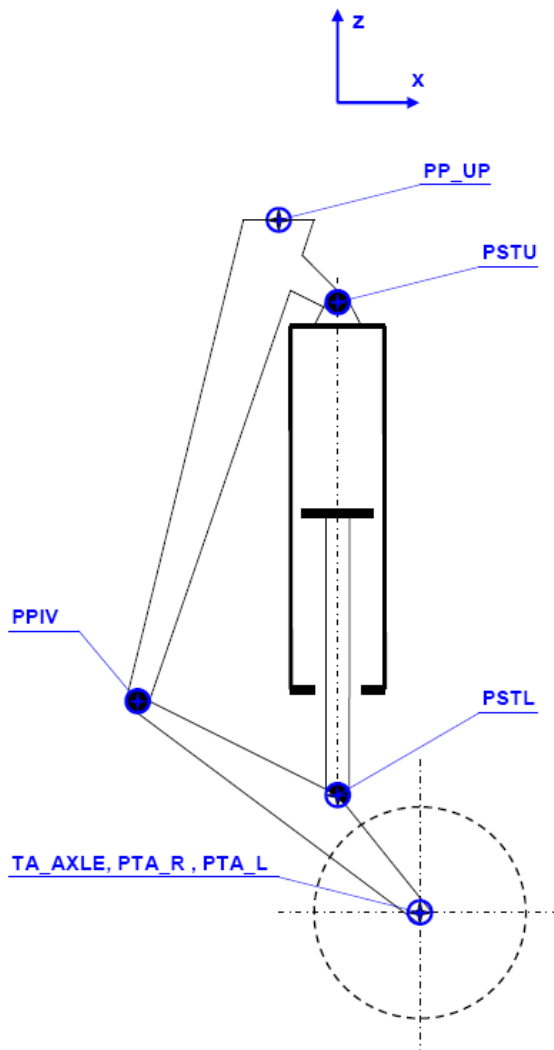


Bild 3.14 Eingabe der Geometrie eines Schwinghebelfahrwerks

Beim Schwinghebelfahrwerk ist ebenfalls die Verwendung eines Zugdämpfers denkbar. Dies wird durch die Anordnung des Angriffspunktes des Stoßdämpfers am anderen Ende des Hebels erreicht. Zum Umschalten der Simulation auf den Zugdämpfer muss der Parameter `pushpull = -1` gesetzt werden (Druckdämpfer `pushpull = 1`).

Die Halbschwinge unterscheidet sich vom reinen Schwingenfahrwerk dadurch, dass der Stoßdämpfer am oberen Punkt nicht gelenkig gelagert ist und somit auch Kräfte quer zur Dämpferachse aufnehmen kann. Um der Schwinge dennoch die nötigen Freiheitsgrade zu verschaffen, wird ein Verbinder gebraucht, der sowohl am Hauptgehäuse (PPIV_MF) als auch an der Schwinge (PPIV_TA) gelenkig gelagert ist. Bild 3.15 zeigt die Punkte der Eingabe für das HalbschwingeFahrwerk.

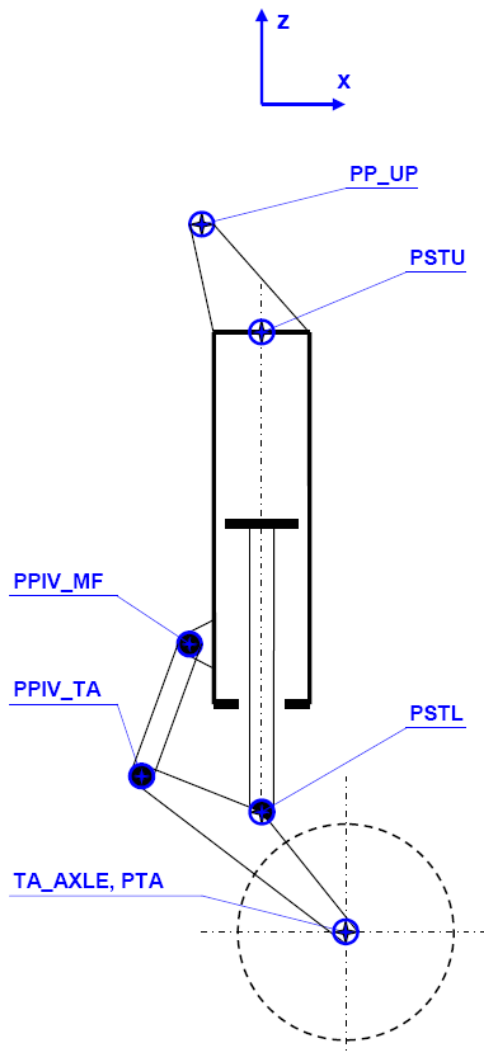


Bild 3.15 Eingabe der Geometrie eines Halbschwingenfahrwerks

3.3.2 Stoßdämpfer

Der Stoßdämpfer wird durch die Eingabe der geometrischen und physikalischen Parametern definiert. Die ersten zwei Eingabebildschirme (siehe Bild 3.7 und Bild 3.8) dienen hauptsächlich zur Eingabe der Parameter, die für die Berechnung der Kennlinie der Gasfeder benötigt werden. Die folgende Abbildung zeigt die Eingabeparameter der Geometrie von Gasfeder und Drossel.

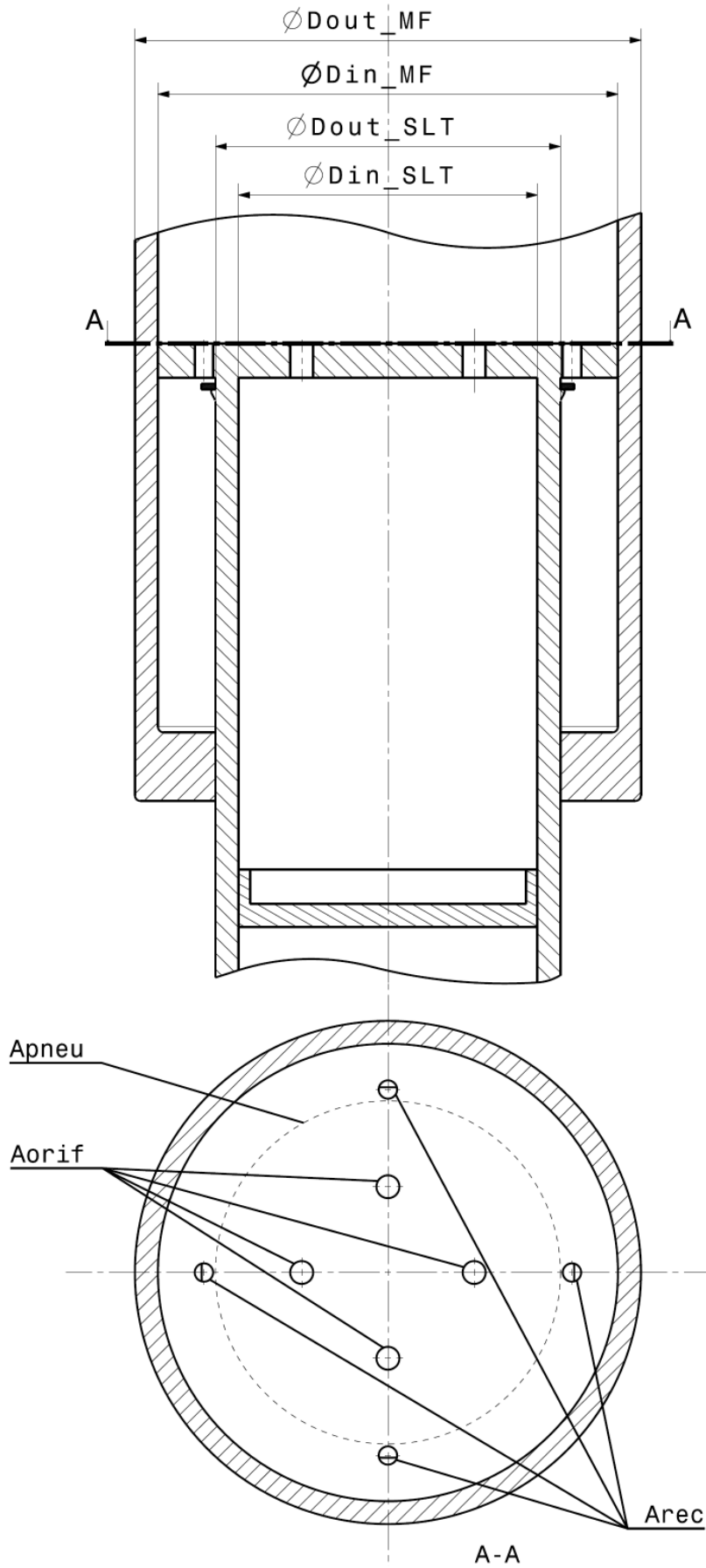


Bild 3.16 Eingabe der Geometrie des Dämpfers

Die Eingabe ist für eine zweistufige Gasfeder geschaffen. Soll ein Dämpfer mit nur einer Stufe simuliert werden, so sind Druck und Volumen der zweiten Stufe gleich Null zu setzen. Die druckabhängige Drossel wird durch einen unerreichbar hohen Grenzdruck in der hydraulischen Flüssigkeit der Drosselkammer ausgeschaltet. Zu beachten ist, dass es sich bei den Fülldrücken der einzelnen Stufen der Gasfedern um Relativdrücke handelt. Die Elastizität der Rohre der Dämpfer hat relativ geringen Einfluss auf die Kennlinie der Gasfeder. Daher können in der Entwurfsphase, in der noch wenige Parameter bekannt sind, die entsprechenden Eingabeparameter bei den Standardwerten belassen werden, oder man setzt die E-Moduln der Materialien von SLT und MF auf sehr hohe Werte, um den Effekt zu minimieren.

Der letzte Wert (`d.sa.input`) des zweiten Eingabebildschirms des Dämpfers entscheidet, auf welche Weise die Drosselkennlinien bestimmt werden sollen. Der Anwender hat die Wahl die Drosselfaktoren aus der Eingabe der Geometrie und Flussgrößen berechnen zu lassen (`d.sa.input = 0`) oder sie aus Dateien, die die Matrizen im geeigneten Format enthalten, zu laden (`d.sa.input = 1`). Sollte die Berechnung gewählt werden, so sind die einzugebenden Drosselflächen die Summen der Querschnitte der einzelnen Drosseln, wenn, wie in Bild 3.16, mehrere Löcher die Drossel bilden. Die Drosselflächen und die entsprechenden Durchflussfaktoren werden für das Ein- und Ausfedern getrennt angegeben. Die entsprechenden Eingabeformate sind zu beachten (siehe Anhang C oder Musterdateien).

3.3.3 Reifen

Die Reifenparameter müssen beim Reifenhersteller erfragt und dann in geeigneter Form (siehe Anhang C) in ASCII-Dateien gespeichert werden. Diese werden dann während der Eingabe in die Simulation geladen. Über Korrekturfaktoren besteht die Möglichkeit, die eingegebenen Parameter (jeweils die zweite Spalte der entsprechenden Matrix) an dynamische Effekte anzupassen, ohne die gesamte Datei ändern zu müssen. Bei Fahrwerken mit Zwillingsbereifung können die Parameter des linken und rechten Reifens separat eingegeben werden (`d.tyre.sym = 0`). Durch Wahl von `d.tyre.sym = 1` wird die Eingabe des linken Reifens für den rechten übernommen.

3.4 Ausgabe

3.4.1 Ausgabeparameter

Alle Ergebnisse der Simulation werden in der Struktur **s** zusammengefasst und, wenn gewünscht, auch gespeichert. Eine Auflistung der einzelnen Parameter und deren Beschreibung enthält Anhang C.

Ziel der Simulation ist es, die Zustände an verschiedenen Stellen des Fahrwerks über die Dauer des Landestoßes vorhersagen zu können. Den Zustand beschreiben die auftretenden Kräfte und Momente, die Position und Orientierung des Messpunktes im Raum und dessen Bewegung. Tabelle 3.5 gibt eine Übersicht der in der Simulation betrachteten Stellen und die zugehörigen Unterstrukturen wieder.

Tabelle 3.5 Messpunkte bei der Ausgabe

Unterstruktur	Beschreibung
s.ac	Krafteinleitungspunkt des Fahrwerks an der Struktur des Fluggeräts (d.geom.PP_UP)
s.axle (s.laxle, s.raxle)	Radmittelpunkt auf der Radachse (d.geom.PTA) (bei Zwillingbereifung links und rechts, d.geom.PTA_L, d.geom.PTA_R)
s.flex	Verbindungspunkt von Radachse und Schwinge, auf den bei Schwinge und Halbschwinge die Elastizität des gesamten Fahrwerks reduziert ist
s.tyre (s.ltyre, s.rtyre)	Mittelpunkt der Aufstandsfläche des Reifens (bei Zwillingbereifung links und rechts)
s.strut	unteres Ende/Gelenk des Dämpfers/gesamter Dämpfer (die ausgegebenen Parameter beziehen sich meist auf das Dämpferkoordinatensystem, Ausnahme: s.strut.force2, s.strut.force3)
s.TA	Gelenk der Schwinge (soweit vorhanden), welches nicht am Stoßdämpfer befestigt ist (Schwinghebel: d.geom.PPIV, Halbschwinge: d.geom.PPIV_TA)

Die oben beschriebenen Größen werden als abhängige der Simulationszeit in Matrizen bzw. Vektoren gespeichert. Alle Werte werden mit derselben Speicherfrequenz **d.gen.fs** erfasst und können daher der Simulationszeit (**s.time**) zugeordnet werden, ohne dass diese in der Ausgabematrix der Größe enthalten ist. Alle so bestimmten Ausgabematrizen haben daher auch dieselbe Länge.

Zusätzlich enthält die Ausgabestruktur noch Werte, die im Anschluss an die eigentliche Simulation berechnet werden (**s.post**). Hierbei handelt es sich zum Beispiel um Maximalwer-

te, Arbeits- und Energiebetrachtungen und Lastfaktoren. Die Unterstruktur *s.info* enthält Daten zum Simulationsprogramm wie Speicherort und Änderungsstand der aufgerufenen Unterprogramme. Unter *s.model.data* werden die gesamten Eingabedaten (Struktur *d*) abgelegt, um die Rechnung gegebenenfalls wiederholen zu können, wenn zum Beispiel Veränderungen am Simulationsprogramm vorgenommen worden sind. Auf diese Weise bleiben die Simulationsergebnisse auch immer nachvollziehbar.

3.4.2 Ausgabedateien

Nachdem im Anschluss an einen erfolgreichen Rechenlauf eine Übersicht mit Diagrammen der wichtigsten Landestoßparameter in Abhängigkeit der Zeit (siehe Bild 3.11) dem Anwender einen Überblick verschafft hat, kann dieser entscheiden, ob er die Simulationsergebnisse abspeichern möchte. Wählt er diese Option im Menüsystem aus, so werden insgesamt fünf Dateien mit einer Größe von zusammen ca. 1,25 MB erstellt. Alle Dateien tragen denselben Namen, lediglich die Endung variiert. Der Name hat dabei immer folgendes Format:

*Name-der-Gesamtkonfiguration_Datum_Uhrzeit.**

Datum und Uhrzeit beziehen sich dabei auf den Start des Rechenlaufs. Ein Beispiel für den Namen der Datei der Eingabeparameter wäre *default_2007-05-05_12h34m.ipt*. In Anhang E befinden sich die Ausgabedateien der Beispielrechnung als Beispiele.

In einer ersten Datei (**.mat*) wird die Struktur mit den Simulationsergebnissen gespeichert. Es handelt sich dann um eine Binärdatei, die vorzugsweise mit *MATLAB* geöffnet werden kann. Die in dieser Datei gespeicherten Daten können für eine noch sorgfältigere Auswertung der Simulationsergebnisse verwendet werden. Da auch die Eingabedaten in dieser Datei als Unterstruktur in *s* gespeichert sind, wird die Nachvollziehbarkeit der Rechenergebnisse sichergestellt.

Eine weitere Datei mit der Endung **.ps* muss erst in eine PDF-Datei umgewandelt werden, um ihren Inhalt einzusehen. Bei der Erstellung des Programms wurde hierfür *FreePDF XP* verwendet. Die Datei enthält zahlreiche Diagramme, die zum einen einige Eingabeparameter und zum anderen Simulationsergebnisse grafisch darstellen. Von den Eingabeparametern werden jene, die in Matrizenform in das Programm eingegeben werden, gezeigt. Auf diese Weise soll die Kontrolle der Daten gewährleistet werden, da Diagramme für den Anwender leichter zu überschauen sind als Matrizen und Eingabefehler dementsprechend auch leichter entdeckt werden können. Die Simulationsergebnisse werden umfassender dargestellt als im Überblick direkt nach der Simulation.

Eine Datei im ASCII-Format (*.ipt) enthält nochmals alle Eingabedaten in einem Format, was auf jedem normalen PC mit üblicher Software geöffnet werden kann. Als einfachste Anwendungen sollen an dieser Stelle *Microsoft Editor* und *Microsoft WordPad* genannt sein.

Zudem werden zwei weitere ASCII-Dateien gespeichert, die wesentliche Simulationsergebnisse in geordneter Form zeigen. Die Datei mit der Endung *.tbl enthält einige Zustandsdaten, wie Einfederung und verschiedene Kräfte, für bestimmte Zeitpunkte, so zum Beispiel den Augenblick der maximalen Einfederung des Dämpfers, in Tabellenform. Die Datei mit der Endung *.dat dient als eine Art Protokolldatei und enthält unter anderem ebenfalls diese Daten, allerdings ausführlicher umschrieben. Zudem enthält sie ein Änderungsverzeichnis (*change log*) aller bei der Simulation aufgerufenen Unterprogramme, sowie eine Auflistung der maximalen Werte ausgewählter Stoßgrößen.

3.5 Fahrwerkskinematik

In den folgenden Abschnitten wird die Umsetzung der Fahrwerkskinematik der verschiedenen Fahrwerkstypen in *SimMechanics* erklärt. Genauere Beschreibungen der einzelnen Baugruppen enthalten die Folgeabschnitte. Für Leser ohne *SimMechanics*-Erfahrung enthält Anhang D eine Übersicht der verwendeten Blöcke mit einer kurzen Erklärung. Für weitere Informationen sei auf die Dokumentation des Herstellers verwiesen.

3.5.1 Teleskopfahrwerk

Das *SimMechanics*-Modell des Teleskopfahrwerks kann in fünf Funktionseinheiten gegliedert werden (siehe Bild 3.17, A bis E). Die Einheit A beschreibt die Position, Ausrichtung und Bewegung des Fluggeräts, oder besser gesagt der oberen Fallmasse, im Raum. Dies ist notwendig, um die Freiheitsgrade des Fahrwerks einzuschränken und auf diese Weise die Einspannung des Fahrwerks am Fluggerät zu simulieren. Als Referenz für Position und Bewegung dient der Boden (**Ground**) der dieselben Koordinaten trägt wie **PP_UP** im nicht gedrehten und nicht verschobenen Flugzeugkoordinatensystem. Durch ein Lager mit sechs Freiheitsgraden (**Bushing**), welches den Boden und den Flugzeugrumpf (**Aircraft Fuselage**) verbindet, kann das Fluggerät dann frei im Raum bewegt werden. Die Ausrichtung wird durch Kennfelder definiert, die abhängig von der Zeit die entsprechenden Roll-, Nick- und Gierwinkel an Aktuatoren senden, welche dann das Gelenk bewegen (**Joint Actuator**). Die Anfangswerte für die Bewegung und die Position der translatorischen Freiheitsgrade liefert ein weiterer Block (**Joint Initial Conditions**). Der in einem Kennfeld hinterlegte Auftriebsfaktor muss noch mit der Fallmasse und der Fallbeschleunigung multipliziert werden. Die ebenfalls in einem Kennfeld hinterlegte Seitenkraft wirkt direkt über einen Aktuator auf die Verbindung. Zu beachten ist, dass alle Kräfte, Entfernungen, Winkel und Geschwindigkeiten im Bodenkoordinatensystem definiert sind

Zu Einheit B sind der Rumpf (**Aircraft Fuselage**) und das fest mit ihm verbundene (**Weld**) Hauptgehäuse (**MF**) zusammengefasst. Der Name Rumpf ist eher willkürlich gewählt. Die Beschreibung obere, gefederte Masse oder reduzierte Fallmasse würden den Block besser beschreiben, da bei dieser Simulation immer nur ein einzelnes Fahrwerk betrachtet wird, auf das die entsprechenden Lasten des gesamten Fluggeräts reduziert werden.

Einheit C dient zur Messung der Lage, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der gefederten Masse. Dementsprechend kommen Sensoren an der oberen Masse (**Body Sensor Fuselage**) und an der festen Verbindung (**Joint Sensor**) zum Einsatz. Angeschlossene Blöcke senden die gemessenen Werte an den MATLAB-Arbeitsbereich.

Einheit D umfasst den Stoßdämpfer und die Messung der mit ihm verbundenen Größen. Der Stoßdämpfer selbst ist der Übersichtlichkeit halber zu einem Block bzw. Untersystem zusammengefasst. Den Aufbau dieses Untersystems verdeutlicht Bild 3.22. Alle gemessenen Größen sind auf das Stoßdämpferkoordinatensystem bezogen. Daher erfolgt auch eine Rotation der Kräfte in das Bodenkoordinatensystem (*force rotation*).

Die ungefederte Masse der Räder mit Bremse und der Radachse und alle damit verbundenen Größe bilden Einheit E. Ähnlich wie Auftrieb und Seitenkraft sind die Bremsmomente in Kennfeldern hinterlegt und wirken über Aktuatoren auf die Räder. Somit wird die Möglichkeit geboten in alle drei Achsenrichtungen Kräfte auf das Modell wirken zu lassen. Die Reifen sind wiederum Untersysteme und werden in Abschnitt 3.7 näher beschrieben.

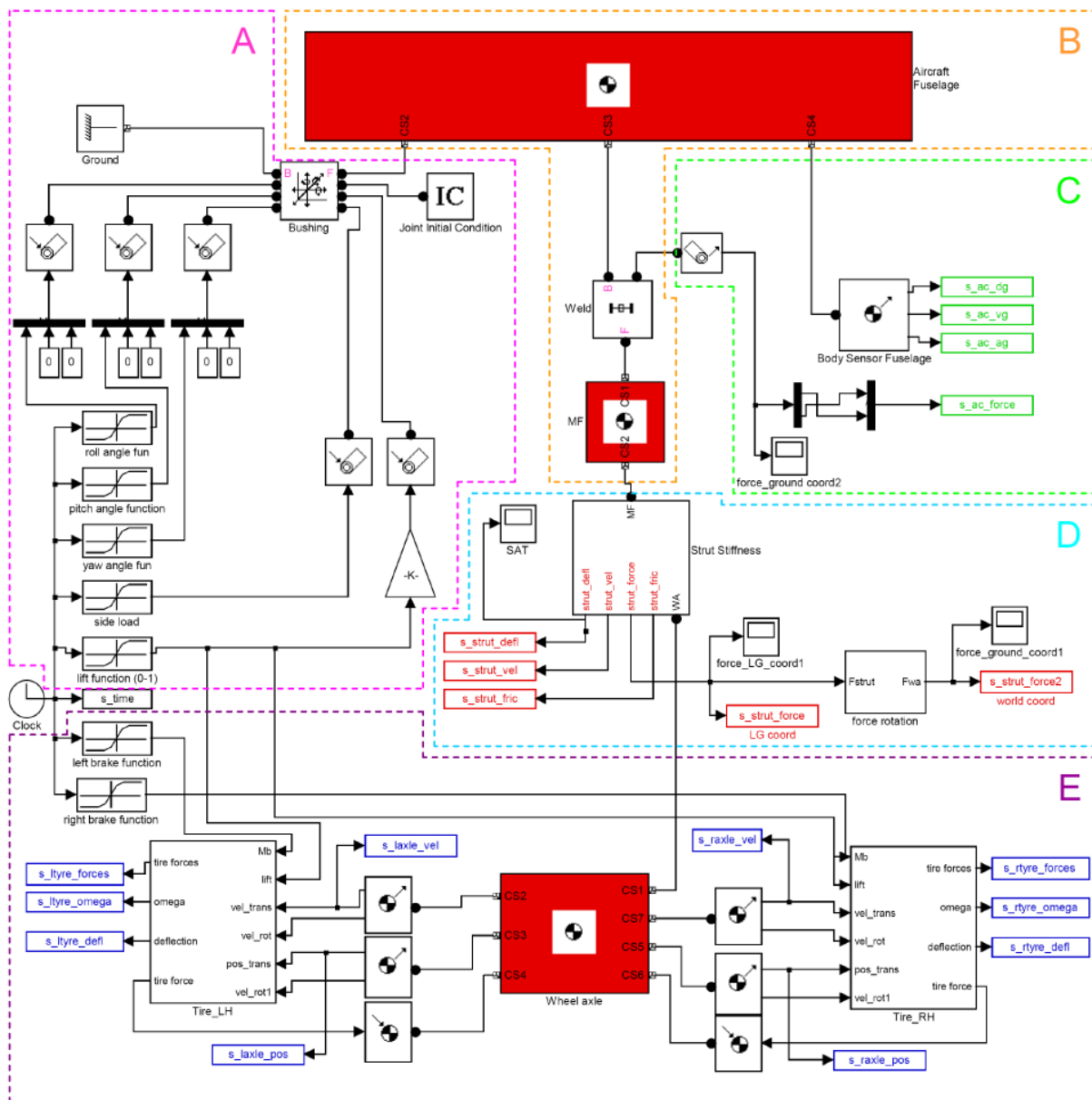


Bild 3.17 SimMechanics-Modell eines Teleskopfahrwerks mit zwei Rädern

3.5.2 Schwinghebelfahrwerk

Das Modell des Schwinghebelfahrwerks greift die Struktur des Teleskopfahrwerks auf, unterscheidet sich aber in einigen Punkten. Zum einen wird die neue Baugruppe der Schwinge (C, trailing arm) in das Modell integriert, was auch mehrere neue Verbindungselemente (A) nach sich zieht. Zum anderen kann die Elastizität nun nicht mehr über die Dämpferfreiheitsgrade realisiert werden, da der Stoßdämpfer (B) durch die gelenkige Lagerung (siehe Bild 3.19) keine Querkräfte und Biegemomente aufnimmt. Daher wurde die Flexibilität (D) zwischen die Schwinge und Radachse gelegt. Sie wird durch eine Verbindung mit sechs Freiheitsgraden und den entsprechenden Sensoren und Aktuatoren simuliert.

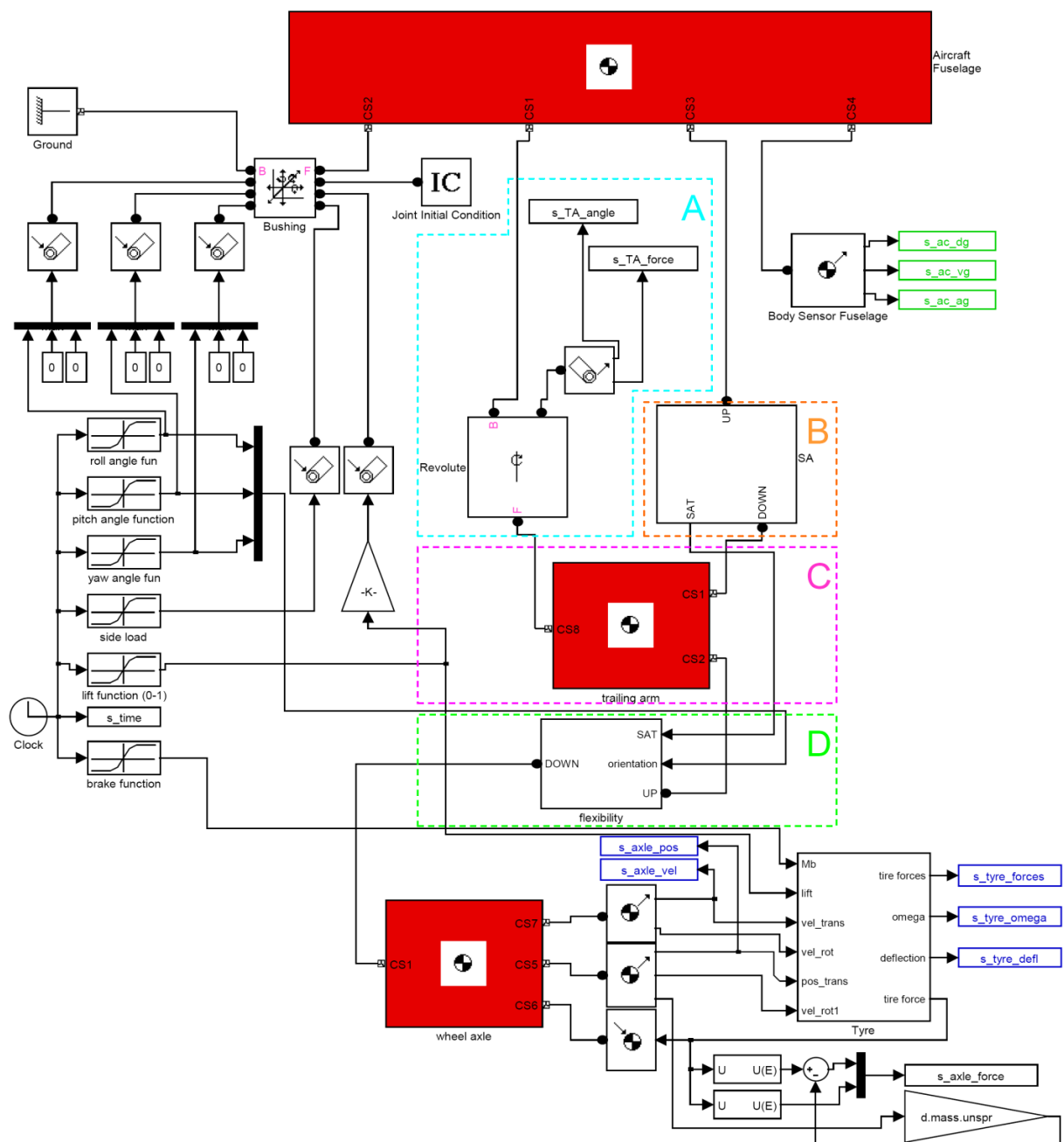


Bild 3.18 SimMechanics-Modell eines Schwinghebelfahrwerks mit einem Rad

Bild 3.18 zeigt zudem eine Fahrwerkskonfiguration mit nur einem Reifen. Da beim Schwinghebelfahrwerk die Kraft an der Radachse nicht gleich der Kraft am Dämpfer ist, wird sie zusätzlich berechnet, was einen weiteren Unterschied zum Teleskopfahrwerk darstellt. Das folgende Bild zeigt die gelenkige Lagerung und den einzelnen Freiheitsgrad des Stoßdämpfers. Zudem wird die Umsetzung des Zugdämpfers zumindest teilweise ersichtlich. Durch den Parameter `d.geom.pushpull` wird das Vorzeichen einiger Parameter gegebenenfalls umgekehrt, so dass bei Verwendung eines Zugdämpfers die Vorzeichen der Ausgabeparameter und somit die Diagramme der Ausgabe gleich sind wie beim Druckdämpfer. Die Anzeigen „*compression type shock absorber*“ oder „*tension type shock absorber*“ weisen den Anwender noch mal bei jedem Rechenlauf auf seine Eingabe hin.

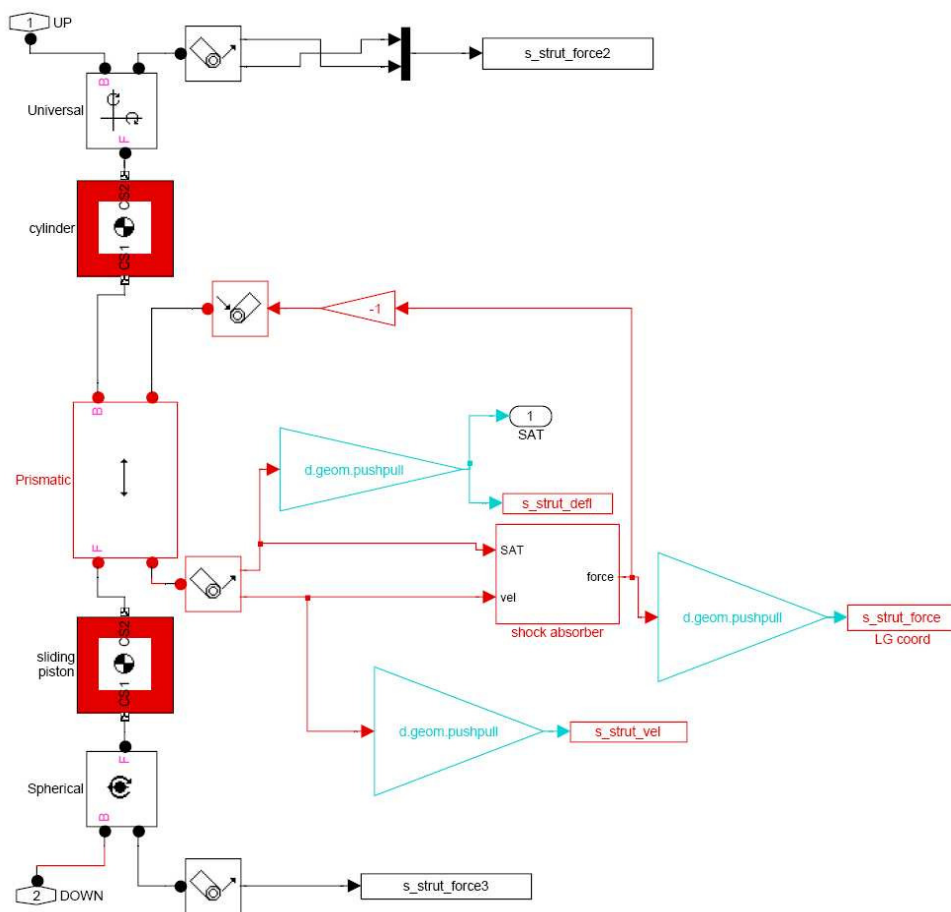


Bild 3.19 Dämpferfreiheitsgrade beim Schwinghebelfahrwerk

3.5.3 Halbschwingenfahrwerk

Beim Halbschwingenfahrwerk werden im Vergleich zum Schwinghebelfahrwerk ein weiteres Verbindungsteil (link) und ein zusätzliches Gelenk benötigt (siehe Hervorhebung in Bild 3.21). Auch ändern sich die Wertigkeiten der Lager (Cylindrical und Spherical). Beim Modellieren wurde auf eine bestimmte Lagerung geachtet. Wie beim Schwinghebelfahrwerk wird die Elastizität der Struktur in einem Block zwischen Schwinge und Radachse verwirklicht. Entsprechend der sechs Freiheitsgrade dieser Verbindung werden bei Schwinghebel- und Halbschwingenfahrwerk 6 x 6-Matrizen für die Flexibilität und die Masse benötigt, wohingegen beim Teleskopfahrwerk nur 5 x 5-Matrizen benutzt werden, da hier die die Flexibilität des Dämpfers eine Dimension ausfüllt. Anders als beim Schwinghebelfahrwerk kann beim Halbschwingenfahrwerk eine Querkraft senkrecht zur Stoßdämpferachse wirken, welche eine Lagerreibung zur Folge hat. Dies wird bei der Modellierung des Stoßdämpfers beachtet. Dieser hat, wie beim Schwinghebelfahrwerk, nur einen translatorischen Freiheitsgrad (siehe Bild 3.20) für die Einfederung, was durch die Realisierung der Elastizität an der Radachse begründet ist.

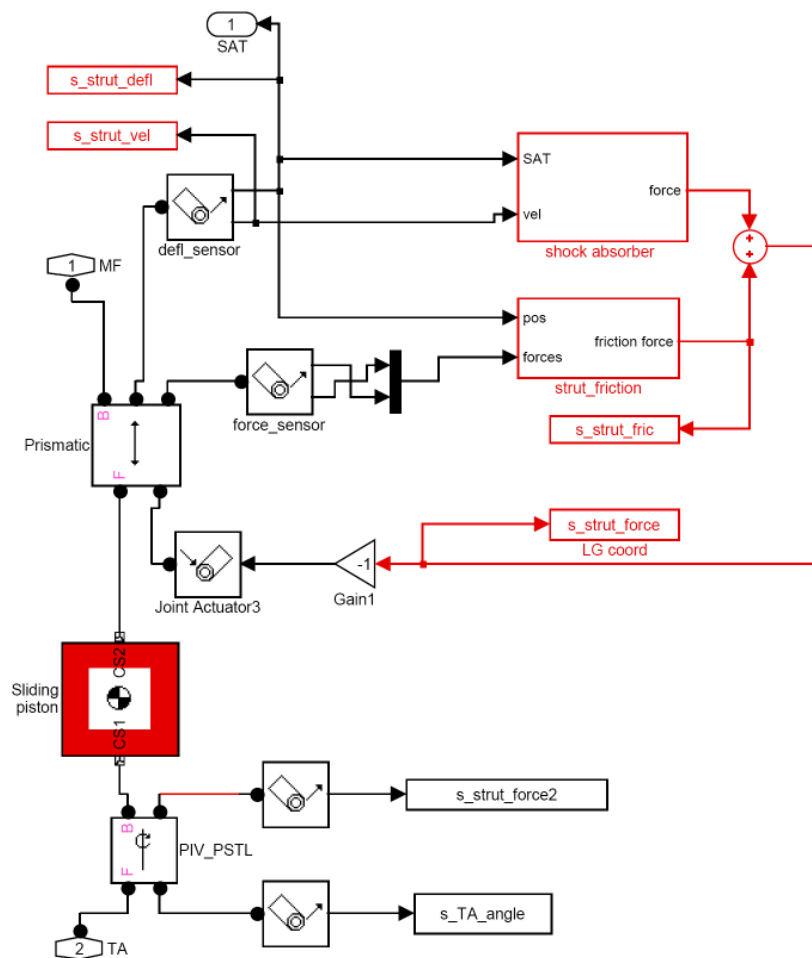


Bild 3.20 Dämpferfreiheitsgrade beim Halbschwingenfahrwerk

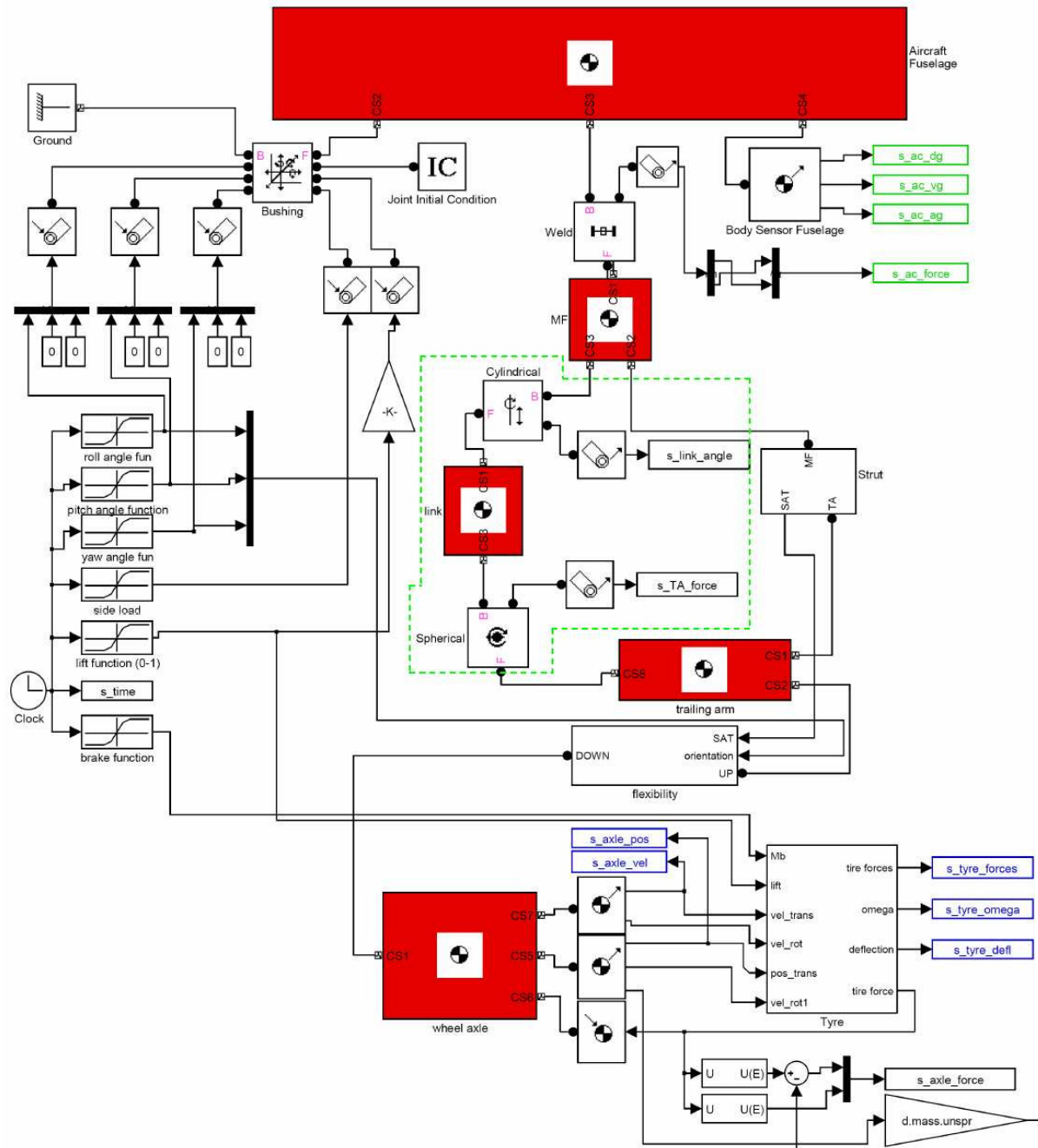


Bild 3.21 SimMechanics-Modell eines Halbschwinge-fahrwerks mit einem Rad

Die obigen Abbildungen zeigen, dass das Schwinggehebel-fahrwerk einzelne Elemente des Teleskop- und des Schwinggehebel-fahrwerks vereint.

Nachträglich ist zu erwähnen, dass in allen Modellen lediglich die obere und untere Masse umgesetzt sind. Alle anderen Körper besitzen vernachlässigbar kleine Massen. Bei Schwinggebel- und Halbschwinge-fahrwerk wird zudem die Massenträgheit der Schwinge berücksichtigt.

3.6 Stoßdämpfer

Aufgrund der großen Bedeutung dieser Baugruppe, wird die Modellierung besonders detailliert vorgenommen. Beim Teleskopfahrwerk wird der Stoßdämpfer in *SimMechanics* durch ein Gelenk mit sechs Freiheitsgraden (drei translatorische und drei rotatorische) simuliert. Bei Fahrwerken mit Schwinge ist die Zahl der Freiheitsgrade auf eins reduziert, da die Flexibilität des Fahrwerks zwischen Schwinge und Radachse appliziert ist. Sensoren nehmen die Verformungen und Verformungsgeschwindigkeit aller Freiheitsgrade am Gelenk ab und stellen so die Übergabeebene zu *Simulink* dar. Mit den gemessenen Wegen und Geschwindigkeiten lassen sich die Stoßdämpfer-, Reibungs-, Steifigkeits- und Dämpfungskräfte berechnen, die dann über Aktuatoren auf das Gelenk zurückgeregelt werden und so die *Simulink*-Signale an *SimMechanics* zurückführen. Das Gelenk befindet sich im Stoßdämpferkoordinatensystem, welches beim Teleskop- und Halbschwingenfahrwerk um dessen Neigung um die Nickachse (*rake angle*) und die Rollachse (*roll angle*) zum Bodenkoordinatensystem gedreht ist. Die folgende Abbildung zeigt die Umsetzung in *SimMechanics* (Untersystem *strut stiffness*):

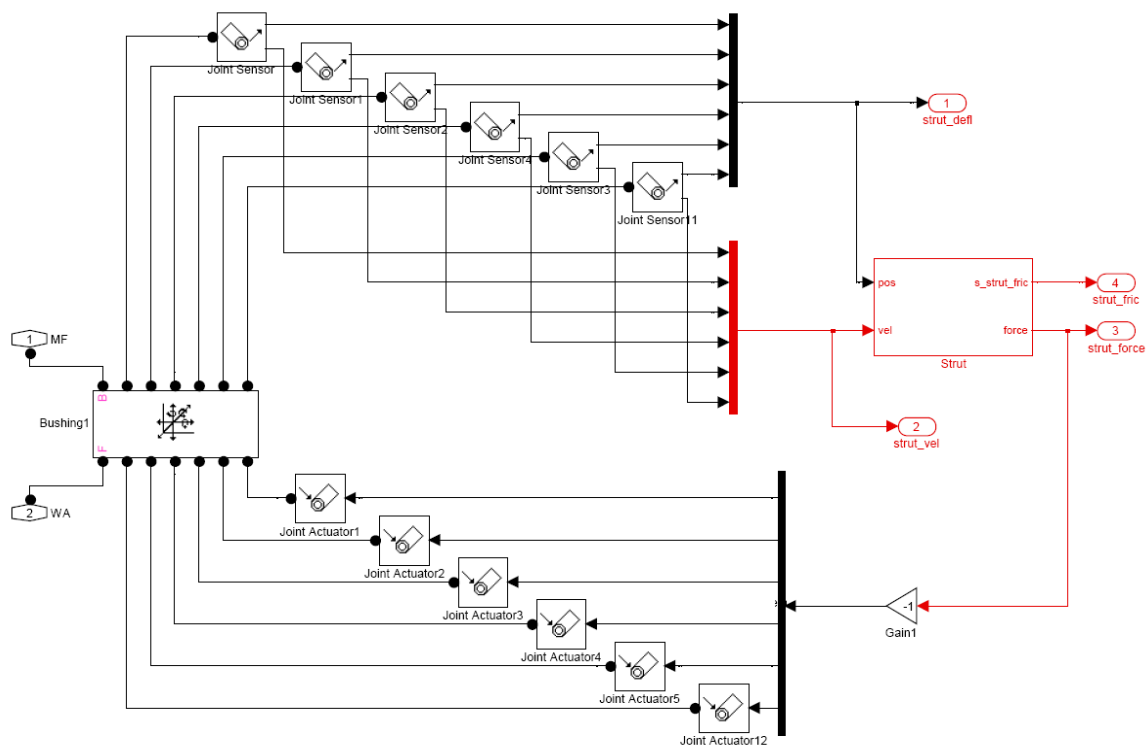


Bild 3.22 Dämpferfreiheitsgrade beim Teleskopfahrwerk

Ein Großteil der Berechnungen wird außerhalb des *SimMechanics*-Modells in *MATLAB*-Unterprogrammen durchgeführt und ist in Form von Kennfeldern (*look-up tables*) in das Modell integriert. Eingangparameter für die Kennfelder sind die Einfederung und die Einfederungsgeschwindigkeit. Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Modells des Stoßdämpfers, wie es im Untersystem (*subsystem*) *shock absorber* umgesetzt wurde.

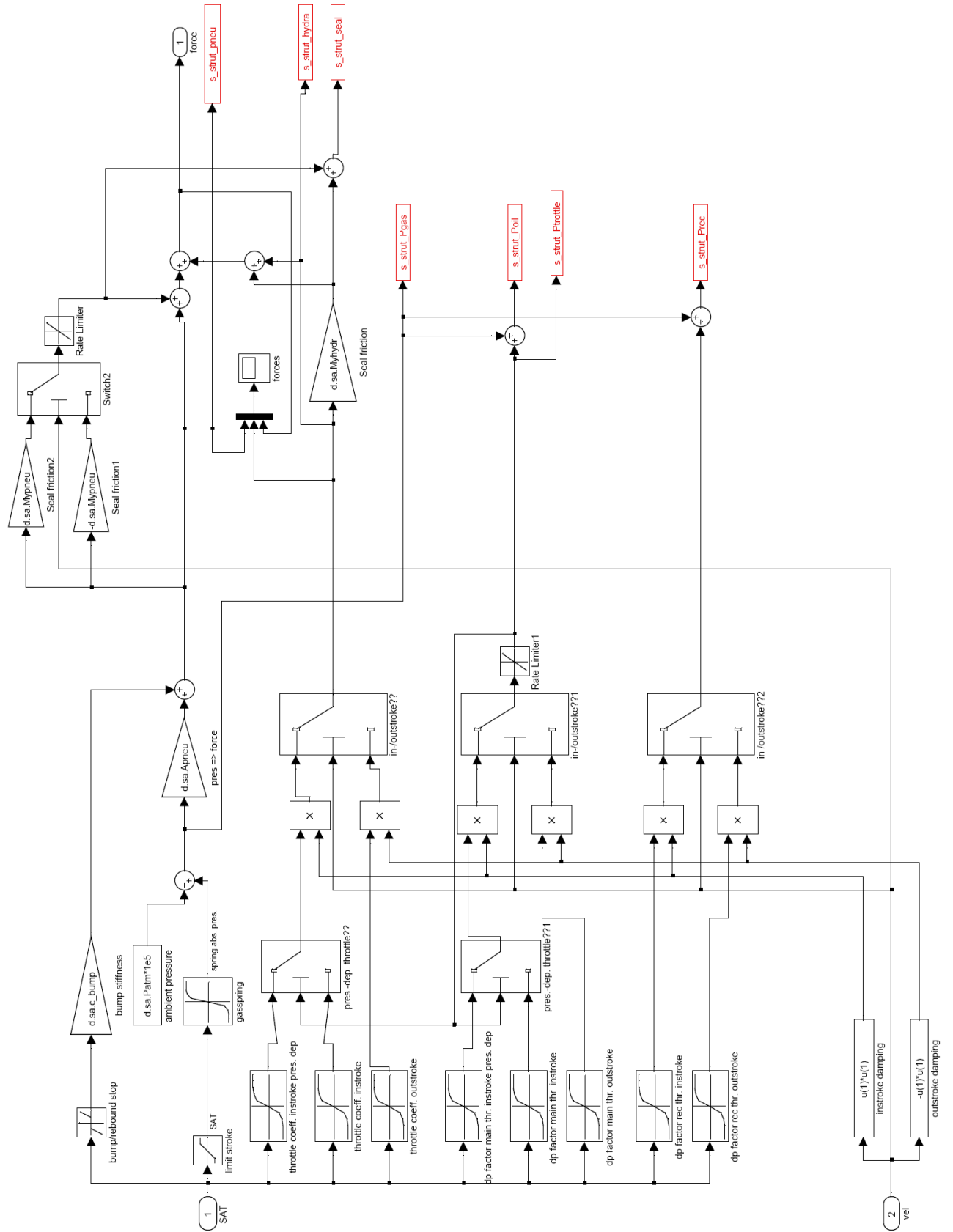


Bild 3.23 Modell des Stoßdämpfers

3.6.1 Gasfeder

Die Gasfeder ist durch ein Kennfeld in das Modell des Stoßdämpfers integriert. Die Matrix `gasspring`, die diesem Kennfeld zugrunde liegt und Einfederungen und die zugehörigen Gasfederdrücke enthält, wird im Unterprogramm `gascurve.m` berechnet. Das Vorgehen zum Berechnen des Druckes entspricht dem, wie es im Abschnitt 2.3.1 beschrieben ist. Da die Bestimmungsgleichungen 2.16, 2.17 und 2.20 beim Auflösen nach dem Druck sehr unhandlich werden würden, wird hierauf verzichtet und stattdessen iterativ vorgegangen. Das Ergebnis eines Rechenlaufs dient dabei als Eingangssparameter der nächsten Berechnung mit höherer Genauigkeit. Die Berechnung des Druckes wird so lange durchgeführt, bis die Differenz zweier aufeinander folgender Iterationsschleifen einen maximalen absoluten Fehler nicht übersteigt. Im Modell wird von dem Absolutdruck aus dem Kennfeld der Umgebungsdruck subtrahiert, um den Überdruck der Gasfeder zu erhalten. Die Multiplikation mit der pneumatischen Fläche liefert die Federkraft der Gasfeder.

Die Berechnung des Druckverlaufes über der Einfederung kann sowohl für einstufige als auch für zweistufige Stoßdämpfer erfolgen. Man deaktiviert die zweite Stufe, indem man den Druck und das Volumen der zweiten Stufe gleich Null setzt.

Parallel zur Gasfeder ist eine Anschlagsteifigkeit geschaltet, die wirkt, wenn der Dämpferweg sein Maximum oder Minimum erreicht. Dies geschieht, wenn das Gleitrohr beim Ein- oder Ausfedern an die mechanischen Stopper prallt. In diesem Augenblick wirkt dann die Steifigkeit des Materials zusätzlich zum herrschenden Dämpferdruck. Der Bereich der Einfederung für das Kennfeld der Gasfeder ist durch einen Sättigungsblock (*saturation*) begrenzt. Ein Todbereich (*dead zone*) beschränkt die Wirkung des Anschlages auf Einfederungen jenseits des Minimums und Maximums.

3.6.2 Hydraulische Drossel

Wie bereits im Abschnitt „Theoretische Grundlagen“ beschrieben, gibt es eine Vielzahl von Maßnahmen, um das Dämpferverhalten eines Fahrwerks den individuellen Bedürfnissen anzupassen. Aufgrund der Vielzahl der Möglichkeiten erscheint das Ziel einer allumfassenden Darstellung unrealistisch. Aus diesem Grunde und im Hinblick auf die Programmierung der Simulation konzentriert sich diese Arbeit auf wenige Grundbautypen, die aber breite Anwendung finden. Die folgende Abbildung zeigt die betrachteten Dämpferbauformen:

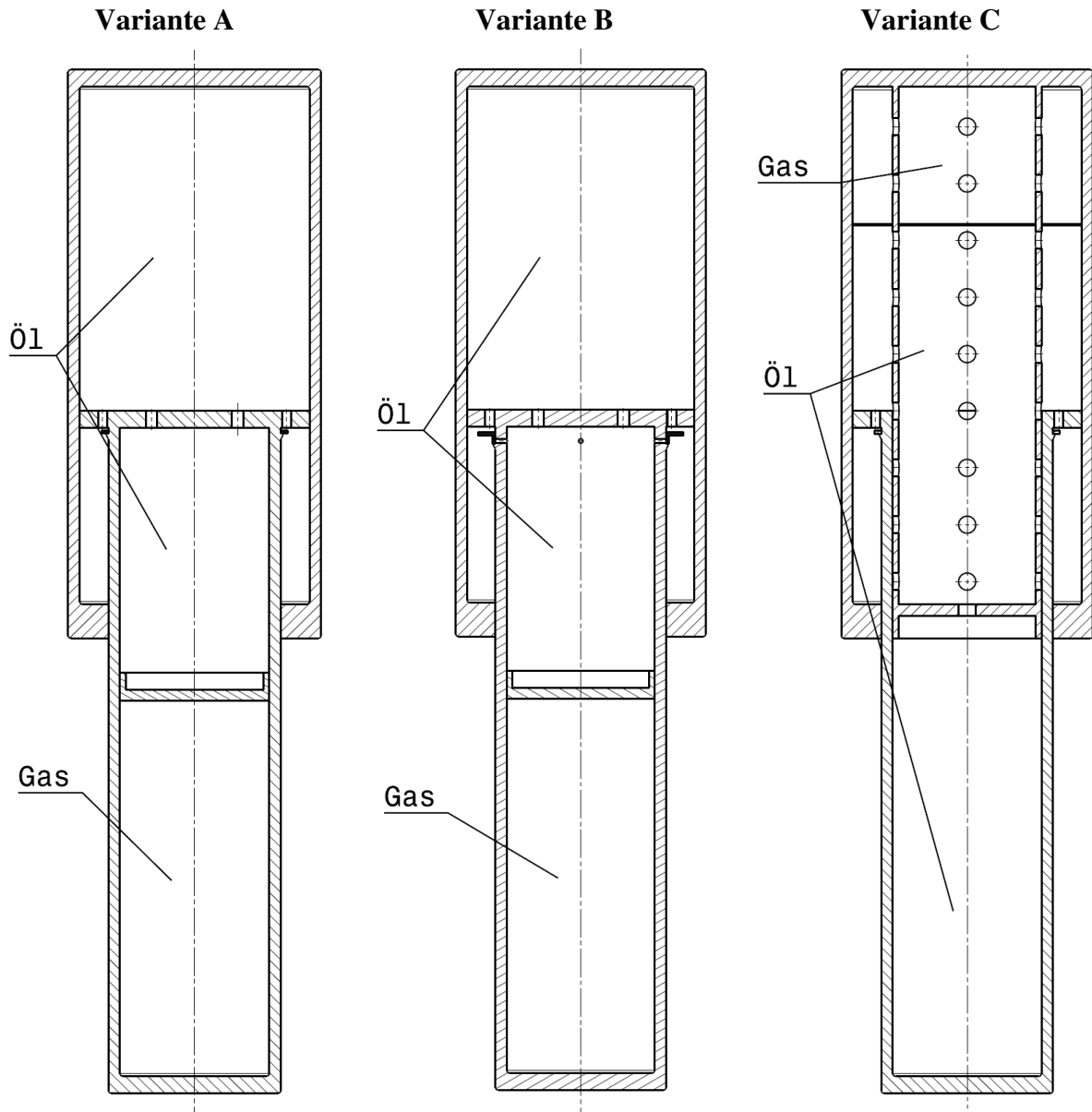


Bild 3.24 Betrachtete Dämpferbauformen

Die Varianten A und C sind weit verbreitete und relativ einfache Grundbauformen, auf deren Prinzip eine Vielzahl von Dämpfern aufbaut. Unterschiede zwischen den beiden Varianten sind der Trennkolben, der bei Variante A das Öl vom Gas separiert, und die Montage der Drossel. In Variante A ist diese am Gleitrohr befestigt, in Variante C mittels eines Stützrohres (*orifice support tube*) am oberen Dämpfergehäuse. Der Fluss durch die *recoil throttle* wird beim Einfedern weniger behindert als beim Ausfedern, da sich dann aufgrund der Druckdifferenz ein Ring teilweise über die Drosselbohrungen schiebt und so deren Fläche verringert. Variante B besitzt die Besonderheit, dass das Volumen der *recoil chamber* beim Ausfedern nicht in das Hauptgehäuse direkt zurückfließt, sondern erst in das Gleitrohr gepresst wird. Dies stellt eine Möglichkeit dar, die Dämpfung beim Ausfedern zusätzlich zu erhöhen.

Alle Bauformen in Bild 3.24 weisen eine konstante Drosselfläche der Hauptdrossel auf. In der Simulation sind jedoch alle drei Bauformen auch mit einer wegabhängigen Hauptdrossel und zusätzlich mit einer druckabhängigen Drossel kombinierbar. Durch Wahl eines Grenzdruckes, der nie erreicht wird, kann die druckabhängige Drossel deaktiviert werden. Alle Drosselflächen und Durchflusskoeffizienten können beim Ein- und Ausfedern verschieden sein.

Die Drosselkraft einer Drossel ist proportional zum Quadrat der Einfederungsgeschwindigkeit, wie bereits beschrieben (siehe „Theoretische Grundlagen“). Der allgemeine Zusammenhang kann auch in der Form $F_{hydr} = K_{quad} \cdot \dot{s}_{SAT}^2$ beschrieben werden, wobei K_{quad} der Drosselfaktor ist, der von der Einfederung abhängen kann. In `dampingfactors.m` werden die Drosselfaktoren für Haupt-, Recoil- und druckabhängige Drossel durch Aufruf des Unterprogramms `hydrDamp.m` mit den entsprechenden Flächen (siehe Tabelle 3.6) und Durchflusskoeffizienten berechnet und zu einem Gesamtdrosselfaktor addiert. Die Berechnung erfolgt schrittweise für verschiedene Einfederungen von Null bis zur maximalen Einfederung, um auch die wegabhängige Veränderung der Fläche der Hauptdrossel durch einen *metering pin* simulieren zu können. Die Ergebnisse werden in einer Matrix gespeichert. Das Programm bietet zudem die Möglichkeit, die Matrix direkt einzugeben. Diese Matrix enthält in jeder Zeile die Drosselfaktoren beim Einfedern, beim Ausfedern und beim Einfedern mit aktiver druckabhängiger Drossel zur entsprechenden Einfederung. Die Matrix dient als Grundlage für Kennfelder im Modell des Dämpfers, die den Drosselkoeffizienten über der Einfederung beschreiben. Durch Verwendung von Schaltern (*switch*) für die Geschwindigkeit (positiv oder negativ) und den Druck (größer oder kleiner als Grenzdruck der druckabhängigen Drossel) wird der entsprechende Drosselfaktor ausgewählt und mit dem Quadrat der Dämpfergeschwindigkeit multipliziert. Das gleiche Verfahren wird zur Berechnung der Druckdifferenzen an der Haupt- und Recoil-Drossel verwendet. Um Drücke zu erhalten, müssen die einzelnen Drosselfaktoren jedoch wieder durch die wirksame hydraulische Fläche geteilt werden. Als Referenz für die beiden Druckdifferenzen gilt der Druck der Gasfeder.

Die folgende Tabelle zeigt die bei der Berechnung der Drosselfaktoren eingesetzten Flächen und Durchflusskoeffizienten, mit denen das Unterprogramm `hydrDamp.m` aufgerufen wird. Grundgleichung zur Berechnung der Drosselfaktoren ist dabei:

$$K_{quad} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{A_{Vol}^2}{(C_D \cdot A_{orif})^2} \cdot A_{hydr} \quad (3.1)$$

Tabelle 3.6 Wirksame Flächen und Drosselfaktoren

Typ	Drossel- faktor	A_{Vol}	A_{hydr}	A_{orif}	C_D
A	K_1	A_{pneu}	$A_{pneu} - A_{orif\ in}$	$A_{orif\ in}$	$C_{D\ orif\ in}$
	$K_{1(p)}$	A_{pneu}	$A_{pneu} - A_{orif\ in} - A_{orif(p)}$	$A_{orif\ in} \cdot \left(1 + \frac{C_{Dorif(p)} \cdot A_{orif(p)}}{C_{Dorif\ in} \cdot A_{orif\ in}}\right)$	$C_{D\ orif\ in}$
	K_2	$A_{in\ MF} - A_{pneu}$	$A_{in\ MF} - A_{pneu} - A_{rec\ in}$	$A_{rec\ in}$	$C_{D\ rec\ in}$
	K_3	A_{pneu}	$A_{pneu} - A_{orif\ out}$	$A_{orif\ out}$	$C_{D\ orif\ out}$
	K_4	$A_{in\ MF} - A_{pneu}$	$A_{in\ MF} - A_{pneu} - A_{rec\ out}$	$A_{rec\ out}$	$C_{D\ rec\ out}$
B	K_1	A_{pneu}	$A_{pneu} - A_{orif\ in}$	$A_{orif\ in}$	$C_{D\ orif\ in}$
	$K_{1(p)}$	A_{pneu}	$A_{pneu} - A_{orif\ in} - A_{orif(p)}$	$A_{orif\ in} \cdot \left(1 + \frac{C_{Dorif(p)} \cdot A_{orif(p)}}{C_{Dorif\ in} \cdot A_{orif\ in}}\right)$	$C_{D\ orif\ in}$
	K_2	$A_{in\ MF} - A_{pneu}$	$A_{in\ MF} - A_{pneu} - A_{rec\ in}$	$A_{rec\ in}$	$C_{D\ rec\ in}$
	K_3	$A_{in\ MF}$	$A_{in\ MF} - A_{orif\ out}$	$A_{orif\ out}$	$C_{D\ orif\ out}$
	K_4	$A_{in\ MF} - A_{pneu}$	$A_{in\ MF} - A_{pneu}$	$A_{rec\ out}$	$C_{D\ rec\ out}$
C	K_1	$A_{in\ SLT}$	$A_{in\ SLT}$	$A_{orif\ in}$	$C_{D\ orif\ in}$
	$K_{1(p)}$	$A_{in\ SLT}$	$A_{in\ SLT}$	$A_{orif\ in} \cdot \left(1 + \frac{C_{Dorif(p)} \cdot A_{orif(p)}}{C_{Dorif\ in} \cdot A_{orif\ in}}\right)$	$C_{D\ orif\ in}$
	K_2	$A_{in\ MF} - A_{pneu}$	$A_{in\ MF} - A_{pneu} - A_{rec\ in}$	$A_{rec\ in}$	$C_{D\ rec\ in}$
	K_3	$A_{in\ SLT}$	$A_{in\ SLT}$	$A_{orif\ out}$	$C_{D\ orif\ out}$
	K_4	$A_{in\ MF} - A_{pneu}$	$A_{in\ MF} - A_{pneu} - A_{rec\ out}$	$A_{rec\ out}$	$C_{D\ rec\ out}$

Aus den obigen Drosselfaktoren ergibt sich die Matrix der Drosselfaktoren **quadra** wie folgt (nacheinander je Zeile: Einfederung, Drosselfaktoren beim Einfedern, Ausfedern, Einfedern mit geöffneter druckabhängiger Drossel):

$$\text{quadra} = [SAT, K_1 + K_2, K_3 + K_4, K_{1(p)} + K_2] \quad (3.2)$$

Ähnlich wie die Drosselfaktoren sind auch die Faktoren zur Berechnung der Druckdifferenzen in zwei Matrizen **dporif** und **dprec** gespeichert und werden aus Kennfeldern der aktuellen Einfederung zugeordnet. Das folgende Bild zeigt die Drosselfaktoren und Faktoren zur Berechnung der Druckdifferenz in Abhängigkeit des Weges zur Beispielrechnung in Abschnitt 4.3 für einen Dämpfer mit konstanter Drossel. Eine derartige Grafik ist auch in der Ausgabe des Simulationsprogramms zur Veranschaulichung und Korrektur der Eingabe enthalten.

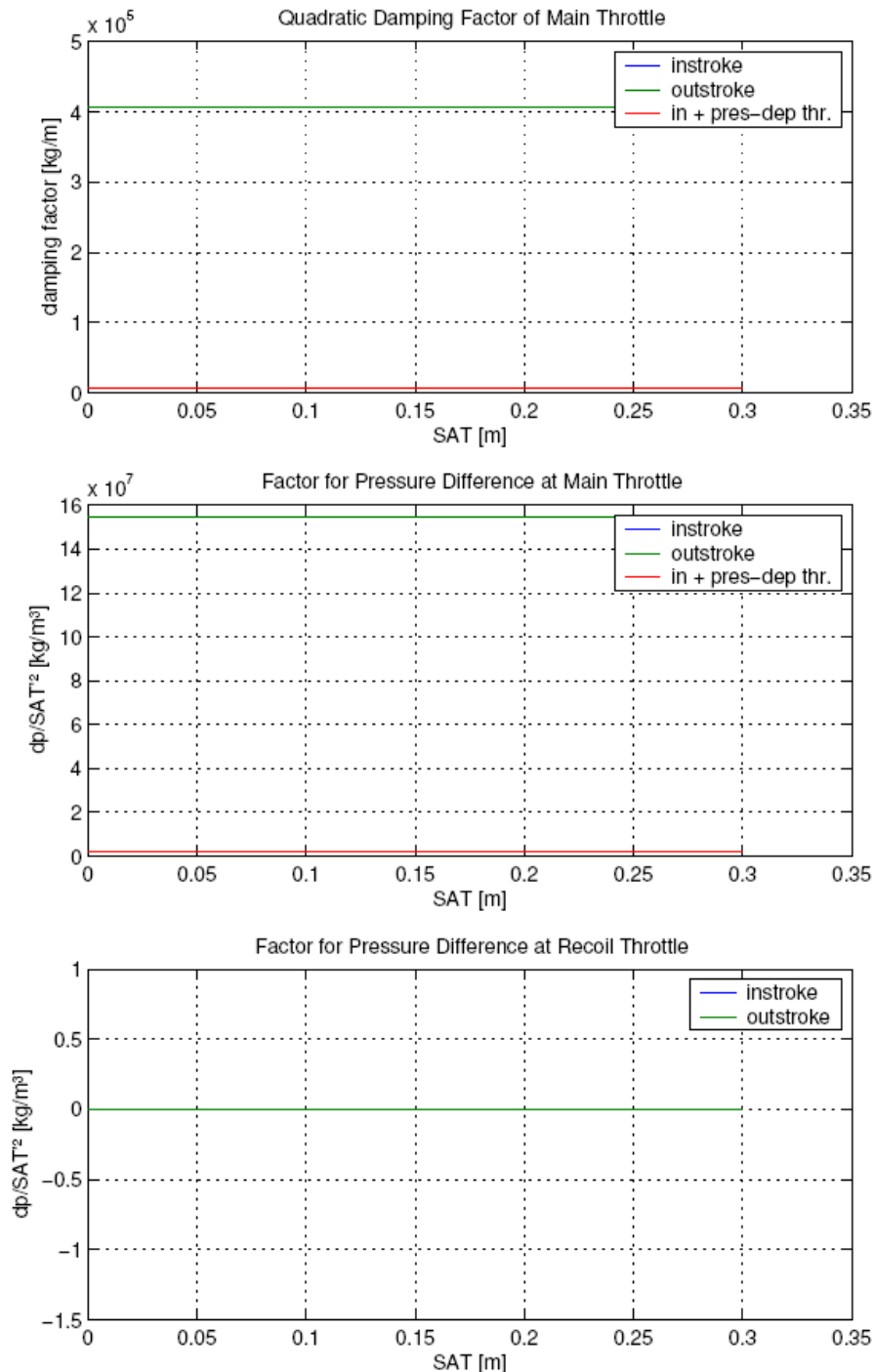


Bild 3.25 Drosselfaktoren und Faktoren zur Berechnung der Druckdifferenzen

3.6.3 Dämpferreibung

Die Modellierung der Dichtungsreibung ist in Bild 3.23 dargestellt. Vorsorge muss getroffen werden, dass die Reibung stets entgegen der Bewegungsrichtung wirkt. Die hydraulische Dichtungsreibung wirkt in dieselbe Richtung wie die Drosselkraft, bei der pneumatischen Dichtungsreibung muss ein zusätzlicher Schalter eingefügt werden, der zwischen Ein- und Ausfedern unterscheidet. Als Entscheidungskriterium dient das Vorzeichen der Dämpfergeschwindigkeit.

Die Berechnung der Lagerkräfte wird im Subsystem `bearing normal force` realisiert. Eingangsgrößen sind die Stoßdämpferkräfte und Momente entsprechend der sechs Freiheitsgrade und die Einfederung. Ebenso werden zahlreiche Parameter aus dem Arbeitsbereich (`workspace`) von `MATLAB` geladen. Bild 3.26 zeigt die Modellierung in `Simulink`:

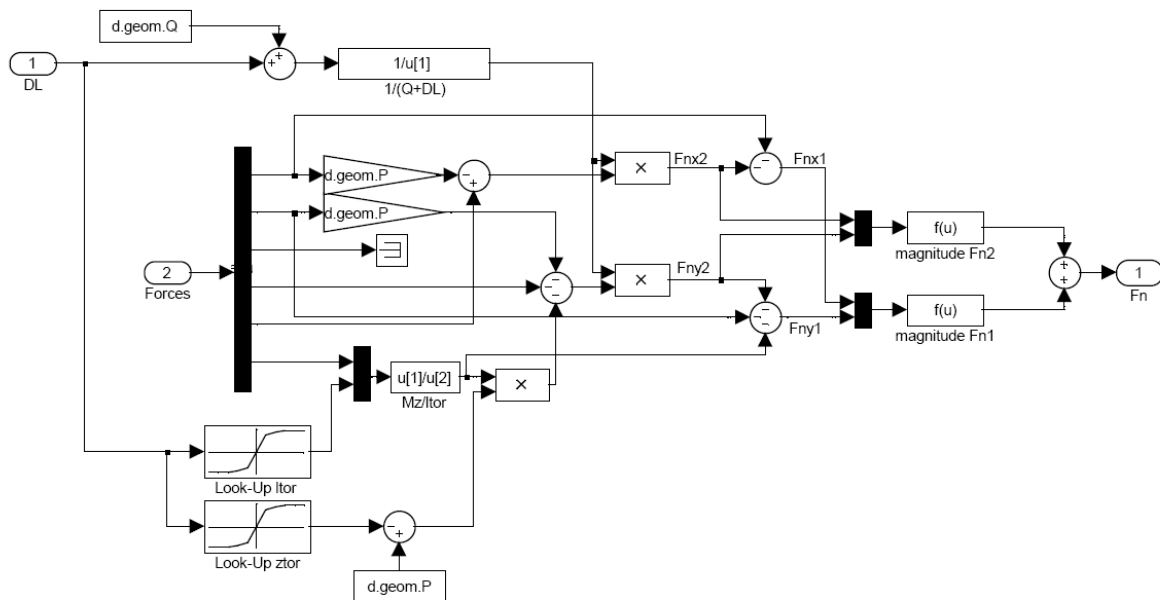


Bild 3.26 Simulink-Modell zur Berechnung der Lagerkraft

Die so berechnete Gesamtnormalkraft der Lager wird im Subsystem `friction model` weiterverwendet, um die Reibungskraft in Richtung der Dämpferachse und das Reibungsmoment um diese zu ermitteln. Das Vorgehen entspricht exakt dem im Abschnitt 2.3.3 beschriebenen und soll hier nicht weiter erläutert werden.

3.6.4 Steifigkeit und modale Dämpfung

Die Steifigkeit und Dämpfungseigenschaften des Dämpfers sind in den Untersystemen `landing gear structural stiffness` und `landing gear structural damping` modelliert. Sie sind in Kennfeldern als Abhängige der Einfederung bzw. der Einfederungsgeschwindigkeit integriert. Die Steifigkeits- und Dämpfungswerte sind in Matrizen des Formats $[5 \times 5 \times (s_{SAT_{max}} [m]+0,03)/0,01]$ für Teleskopfahrwerke und $[6 \times 6 \times (s_{SAT_{max}} [m]+0,03)/0,01]$ für Schwingen- und Halbschwingenfahrwerke hinterlegt. Bei Teleskopfahrwerken wird die Richtung der Dämpferachse ausgespart. Sie wird später mit der Dämpfercharakteristik ausgefüllt. Die Freiheitsgrade der Flexibilität werden bei Teleskopfahrwerken am unteren Ende des Stoßdämpfers zwischen Dämpfer und Radachse und im Stoßdämpferkoordinatensystem appliziert. Bei Schwingen- und Halbschwingenfahrwerken bestehen alle sechs räumlichen Freiheitsgrade, die zwischen der Schwinge und der Radachse abgenommen werden. Mit Hilfe der berechneten Steifigkeits- und Dämpfungsmatrizen werden die entsprechenden Kräfte ermittelt und auf die Verbindung zurückgeregelt.

Die Berechnung der modalen Dämpfung aus Massen- und Steifigkeitsmatrizen sowie dem Dämpfungskoeffizient findet im Unterprogramm `modaldamp.m` statt. Vorher werden aus den jeweils drei eingegebenen Flexibilitäts- und Massenmatrizen mit den zugewiesenen Einfederungen durch Inter- und Extrapolation über den gesamten Federweg die entsprechenden Matrizen gewonnen. Dies geschieht in den Unterprogrammen `get_matrix5.m` bzw. `get_matrix6.m` und `update_lg.m` bzw. `update_lg_l.m`. Die notwendigen Eingabedaten (je drei Flexibilitäts- und Massenmatrizen mit der zugehörigen Einfederung und der Dämpfungskoeffizient) werden mit Hilfe der finiten Element-Methode (FEM) gewonnen. Mit Hilfe der FEM werden die Massen und Flexibilitäten auf die Radachse reduziert. Die Steifigkeitsmatrizen sind die Inversen der Flexibilitätsmatrizen.

3.7 Reifen

Das Reifenmodell wurde aus dem Shimmy-Modell von I. Besselink übernommen (siehe **Besselink 2000**). An dieser Stelle sollen daher nur die für den Landestoß am bedeutendsten Elemente der vertikalen Federeigenschaften (Untersystem `vertical spring`) und des Drehstoßes (Untersystem `longitudinal behaviour`) erläutert werden. Ähnlich wie bei der Realisierung der Dämpferfreiheitsgrade werden über Sensoren die Position und die Geschwindigkeit der Radachse gemessen, daraus Kräfte und Momente berechnet, welche dann auf die Achse zurückgeregelt werden. Der Unterschied besteht darin, dass es sich hierbei um Sensoren an einem Körper (`body sensor`) handelt, wohingegen beim Stoßdämpfer die Sensoren an der Verbindung angebracht sind (`joint sensor`).

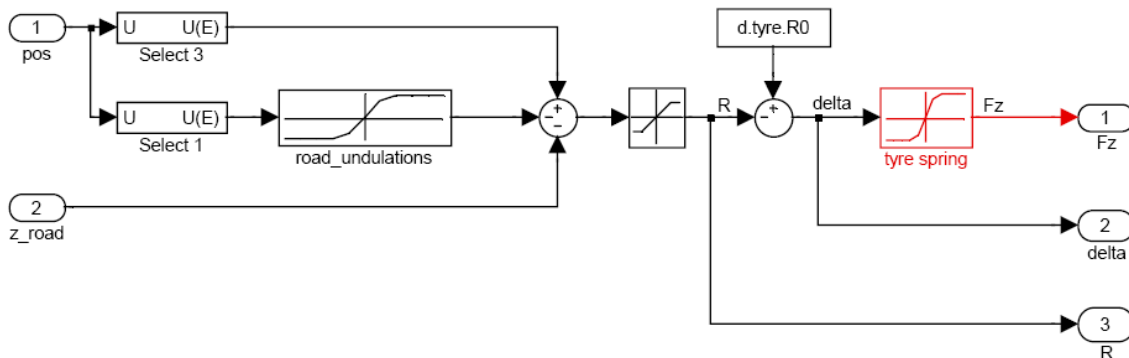


Bild 3.27 Simulink-Modell der vertikalen Federeigenschaften des Reifens

Eingangsgröße für die Berechnung der vertikalen Bodenkraft ist die Position der Radachse. Von der z-Koordinate, werden die Unebenheiten des Bodens abgezogen, welche in Abhängigkeit von der x-Position auf der Landebahn aus einem Kennfeld (Parameter `d.road.s` und `d.road.z`) entnommen werden. Der Eingang `z_road` ist auf Null gesetzt. Durch einen Sättigungsblock wird der so berechnete Abstand vom Boden auf minimal zehn Prozent oder maximal hundert Prozent des unbelasteten Reifenradius begrenzt. Anschließend wird die Reifeneinfederung als Differenz des unbelasteten Radius und dem vorher ermittelten Abstand berechnet, mit welcher in einem Kennfeld (Parameter `d.tyre.deflection`) die vertikale Bodenkraft ausgelesen werden kann.

Die Simulation des Andrehens des Reifens erfolgt entsprechend der beschriebenen Theorie. Der Zusammenhang zwischen Schlupf und Reibungskoeffizient kann über ein Kennfeld (Parameter `d.tyre.slipcurve`) oder über die Koeffizienten der Magic Formula nach Pacejka eingegeben werden. Mit einem Schalter (Parameter `d.tyre.slip`) wird zwischen den zwei Methoden entschieden.

3.8 Shimmy Damper

Der Shimmy Damper wird für die Simulation des Landestoßes nicht zwangsläufig benötigt. Daher sei an dieser Stelle auf die Literatur zur Shimmy Simulation (**Besselink 2000**) verwiesen und zusätzlich erwähnt, dass sich der Shimmy Damper in der Landestoßsimulation über einen Schalter aktivieren bzw. deaktivieren lässt.

- | | | |
|------------------------------|---|----------------|
| <code>d.sd.Switch = 0</code> | → | SD deaktiviert |
| <code>d.sd.Switch = 1</code> | → | SD aktiviert |

Die Parameter für den Shimmy Damper sind in der Unterstruktur `d.sd` gespeichert.

3.9 Besonderheiten

Das geschaffene Simulationsprogramm soll eine Vielzahl von möglichen Dämpferkonfigurationen abdecken. Zudem wurde bei der Erstellung des Programms und der Modelle Sorge getragen, dass möglichst alle bekannten Effekte, die auftreten können, berücksichtigt sind. Dementsprechend groß ist der Umfang der Eingabedaten.

Da bei der Erschaffung der Landestoßsimulation immer von den am meisten komplizierten und speziellen Fällen ausgegangen worden ist, kann es vorkommen, dass die Möglichkeiten des Programms bei bestimmten Berechnungen nicht voll ausgeschöpft werden müssen. Auch kann es sein, dass Daten zu einigen der betrachteten Effekte noch unbekannt sind, weil man sich zum Zeitpunkt der Simulation noch in der Auslegungsphase befindet. Dieser Abschnitt soll in diesen Fällen helfen, einige Besonderheiten des Programms auszuschalten oder deren Auswirkung zumindest zu minimieren.

Tabelle 3.7 Besonderheiten des Programms

Besonderheit	Hinweis
Einstufiger Dämpfer	Die Simulation ist für zweistufige Stoßdämpfer ausgelegt. Soll ein Dämpfer mit nur einer Stufe betrachtet werden, so sind Fülldruck und Füllvolumen der zweiten Stufe bei der Eingabe gleich Null zu setzen.
Metering Pin	Durch die Eingabe der Drosselfaktoren bzw. der Drosselflächen der Hauptdrossel in Matrizenform wird die Simulation einer über der Einfederung des Dämpfers veränderlichen Drossel ermöglicht. Sollte eine Fixdrossel verwendet werden, so genügt jeweils eine zweizeilige Matrix mit zwei verschiedenen Einfederungen und zweimal dem entsprechenden Wert für Drosselfaktor oder Drosselfläche.
Druckabhängige Drossel	Die druckabhängige Drossel wirkt nur beim Einfedern und kann durch Erhöhen des Einschaltdruckes auf ein unerreichbares Niveau deaktiviert werden.
Dämpfer ohne Recoil-Kammer	Die in Bild 3.24 gezeigten Dämpfer enthalten alle eine zusätzliche Recoil-Kammer mit Recoil-Drossel. Ist diese nicht vorhanden, so kann der Außendurchmesser des Gleitrohrs SLT gleich dem Innendurchmesser des Gehäuses MF sein. Die Drosselfläche und der Durchflusskoeffizient der Recoil-Drossel müssen aber ungleich Null belassen werden!

Besonderheit	Hinweis
Faktor <code>d.sa.dprec</code>	Wird die Option gewählt, den Drosselfaktor nach Eingabe der Geometrie- und Flussgrößen zu berechnen, so wird auch der Faktor zur Berechnung der Druckdifferenz an der Recoil-Drossel <code>dprec</code> berechnet. Bei der direkten Eingabe der Drosselfaktoren wird auch nach <code>dprec</code> gefragt. Da dieser Wert für keine weitere Berechnung benötigt wird und nur den ausgegebenen Druck in der Recoilkammer bestimmt, können die entsprechenden Spalten der Eingabematrix Null gesetzt werden, wenn die Informationen nicht vorliegen. In diesem Fall ist der Druck in der Recoilkammer für Fahrwerke mit Drossel am Gleitrohr derselbe wie der des Öls vor der Drossel. Bei Fahrwerken mit einer am MF befestigten Drossel ist dieser Druck gleich dem in der Gasfeder. Selbiges gilt, wenn der Dämpfer über keine Recoilkammer verfügt.
Steifes Fahrwerks	Der Einfluss der Flexibilität des Fahrwerks kann durch sehr kleine Werte (10^{-9} oder 10^{-10}) in der Diagonale der Flexibilitätsmatrix minimiert werden. Die Koppelterme können Null gesetzt werden.
Elastizität der Stoßdämpferrohre	Durch sehr hohe Werte für den E-Modul von SLT und MF wird die Volumendehnung der Stoßdämpferrohre infolge Innendrucks minimiert.
Reifenparameter	Es wurde das aufwendige Von-Schlippe-Reifenmodell von der Shimmy-Analyse übernommen. Sollte ein Landestoß ohne Seitenkraftkomponenten auf den Reifen (das heißt kein Roll- oder Gierwinkel des Flugzeugs, keine Seitenlast, keine Seitengeschwindigkeit) so können einfach die Standardwerte für die entsprechenden Parameter übernommen werden. Es genügt die Eingabe des Reifenradius, der Matrix für die Federkennlinie des Reifens und des Zusammenhangs zwischen Schlupf und Bodenreibung.
Keine Vorwärtsgeschwindigkeit	Das Reifenmodell erfordert eine Vorwärtsgeschwindigkeit ungleich Null. Sollte ein vertikaler Landestoß simuliert werden, so müssen Kompromisse eingegangen werden. Die Vorwärtsgeschwindigkeit muss ungleich Null sein. Der Andrehstoß des Rades und die daraus resultierenden Kräfte können durch einen Reibbeiwert von Null oder durch eine sehr geringe Massenträgheit des Rades aufgehoben werden.
Laden von Konfigurationen	Das Programm zeigt beim Dialog zum Laden alle Dateien an, die in dem entsprechenden Ordner hinterlegt sind. Dies müssen nicht immer zum Laden geeignete Dateien sein. Sollte eine Datei mit ungeeignetem Dateiformat gewählt werden, so erscheint eine Fehlermeldung. Die bisherige Konfiguration wird nicht überschrieben.
Solver	Es wird die Verwendung des <i>MATLAB</i> -Solvers <code>ode45</code> empfohlen, der auch als Standardsolver der Modelle gespeichert ist. Andere Solver zeigten teilweise keine Konvergenz bzw. brachten keine nennenswerten Vorteile in Sachen Rechenzeit.

4 Verifikation und Beispielrechnung

4.1 Kennlinie der Gasfeder

Die Federcharakteristik des Stoßdämpfers ist ein wesentlicher Parameter für die Landestoßsimulation. Der Vergleich der berechneten statischen Federkennlinie mit der in einem Versuch ermittelten bietet die Möglichkeit, die angewandten Berechnungsmethoden zu überprüfen. Abweichend vom realen Landestoß ist bei der Aufnahme der statischen Gasfederkennlinie der Polytropenexponent gleich eins. Um diese isotherme Zustandsänderung zu erreichen, wird der Zylinder des Stoßdämpfers sehr langsam bewegt oder die Bewegung erfolgt schrittweise mit Pausen zum Wärmeaustausch dazwischen. Der Verlauf des Gasfederdruckes über der Einfederung wird aufgezeichnet. Es werden jeweils die Kurven für das Ein- und Ausfedern aufgenommen, um die Reibungseinflüsse abschätzen zu können. Der Mittelwert aus diesen zwei Kurven sollte dann dem Verlauf ohne Reibungseinflüsse entsprechen. Die Federkennlinie wird bei verschiedenen Temperaturen aufgenommen, die den gesamten Betriebsbereich eines Flugzeugs abdecken sollen.

Betrachtet wird ein einstufiger Stoßdämpfer. Die Daten dieses Stoßdämpfers, die auch die Grundlage zur Berechnung der Gasfederkennlinie im Unterprogramm `gascurve.m` sind, enthält Tabelle 4.1. Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich der Messung mit der Berechnung. Der Einfluss der Reibung wird nicht berücksichtigt.

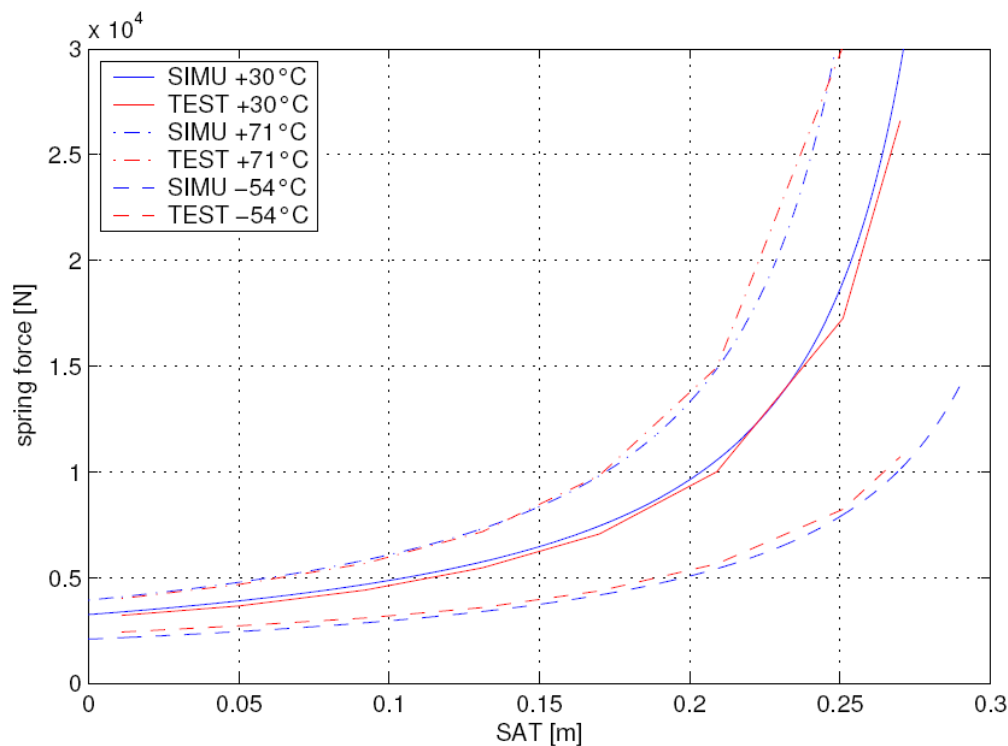


Bild 4.1 Vergleich der berechneten und gemessenen Gasfederkennlinien

Tabelle 4.1 Daten der Gasfeder für den Kennlinienvergleich

Parameter	Wert
Geometrie	
Maximaler Federweg	0,2900 m
Innendurchmesser SLT	0,0538 m
Außendurchmesser SLT	0,0642 m
Innendurchmesser MF	0,0768 m
Außendurchmesser MF	0,0960 m
Pneumatische Fläche	0,003237128 m ²
Füllvolumen des Dämpfergases	0,000971624 m ³
Drücke	
Umgebungsdruck	1,01325 bar
Fülldruck der Gasfeder	9,00000 bar
Temperaturen	
Fülltemperatur	30 °C
Temperaturen beim Versuch	-54 °C
	30 °C
	71 °C
Öl	
Füllvolumen des Öles	0,001793045 m ³
Wärmeausdehnungskoeffizient	0,000828 1/K
Referenzkompressibilitätsmodul	17926 bar
Anteil des gelösten Dämpfergases	0 %
Flexibilität der Dämpferrohre	
E-Modul SLT	2.03e11 N/m ²
E-Modul MF	7.3e10 N/m ²
Querkontraktionszahl MF	0,30
Querkontraktionszahl SLT	0,33

Die berechneten Verläufe des Druckes über der Einfederung des Stoßdämpfers zeigen gute Übereinstimmung mit den Kurven, die die Mittelwerte der Messung beim Ein- und Ausfedern darstellen. Der Einfluss der Außentemperatur auf die Gasfedercharakteristik kann mit dem angewandten Berechnungsverfahren gut beschrieben werden. Bei der Simulation realer Landestöße mit einem Polytropenexponenten ungleich eins überragen häufig die Fehler infolge der Unsicherheit über dessen wahren Betrag normalerweise die Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Gasfederkennlinie.

4.2 Zeppelin NT

Als Beispiel für die Simulation eines Schwinghebelfahrwerks wird ein Fallversuch mit dem Heckfahrwerk des Zeppelin NT betrachtet. Die Eingabe-, Simulations- und Messdaten, die diesen Vergleich erst möglich machen, wurden freundlicherweise von der Zeppelin Luftschifftechnik GmbH & Co. KG (ZLT) in Friedrichshafen zur Verfügung gestellt.

Beim Heckfahrwerk des Luftschiffes handelt es sich um ein Schwinghebelfahrwerk mit einstufiger Gasfeder, fester hydraulischer Drossel und einem Reifen. Der Stoßdämpfer verfügt über keine druckabhängige oder Recoil-Drosseln und wird auf Druck beansprucht. Anders als bei Flugzeugen ist das Fahrwerk des Luftschiffes um 360° um die Gierachse drehbar und kann sich selbst zur Fahrtrichtung ausrichten. Da beim Fallversuch keine Vorwärtsgeschwindigkeit durch Andrehen des Rades vor dem Fall oder durch einen Fall auf eine Rolle angewendet wird, ist diese Eigenschaft des Fahrwerks jedoch hier ohne Bedeutung.

Der Fallversuch ist auf dem Fallprüfstand der ZLT durchgeführt worden. Der Fallhammer mit dem montierten Fahrwerk wird mit einem Kran auf Fallhöhe gebracht und dann ausgeklinkt. Auf den Fallhammer wird dabei keine Auftriebskraft appliziert. Die Aufprallgeschwindigkeit beim betrachteten Fallversuch beträgt 1,27 m/s. Der Fallhammer mit Fahrwerk und Zusatzgewichten ist 1574 kg schwer.

Es sind, wo möglich, die Eingabedaten verwendet worden, die ZLT zur Simulation dieses Fallversuchs verwendet hat. Es soll verglichen werden, ob die beiden Simulationsprogramme bei gleicher Eingabe gleiche oder ähnliche Ergebnisse liefern. Eine genauere Anpassung an die Messdaten dieses einen Versuchs wäre durch Spielen mit einigen Parametern (z. B. Durchflussfaktor, Polytropenexponent und Reibung) durchaus möglich. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Anpassung bei ZLT bereits für eine ganze Serie von Fallversuchen durchgeführt worden ist und daher auf einer sichereren Basis steht. Eine Übersicht der Eingabeparameter bietet Tabelle 4.2. Die für die LLI-Simulation zusätzlich erforderlichen Eingaben sind so gewählt, dass deren Einfluss minimal gehalten wird. So sind die eingegebenen Flexibilitäten mit 10^{-10} m/N beziehungsweise 10^{-10} rad/Nm so gering, dass das Fahrwerk als steif betrachtet werden kann. Die Ausdehnung von MF und SLT infolge des Innendrucks wird durch Wahl eines sehr großen E-Moduls ebenfalls vernachlässigbar klein. Da das in der Simulation verwendete Reifenmodell nur für Geschwindigkeiten ungleich Null brauchbar ist, wird die Vorwärtsgeschwindigkeit von 20 m/s eingesetzt, gleichzeitig aber die Massenträgheit des Rades sehr klein gemacht, so dass die Einflüsse des Andrehstoßes gering sind. Da aufgrund der Stoßrichtung keine Seitenkräfte am Reifen auftreten, sind für den Reifen nur die Eingaben für Radius und Federkennlinie bedeutend. Alle weiteren Reifenparameter werden bei den Standardwerten belassen.

Tabelle 4.2 Eingabeparameter für Fallversuch des Heckfahrwerks des Zeppelin NT

Parameter	Wert
Allgemein	
Fallgeschwindigkeit	1,279 m/s
Obere Masse	1560,0 kg
Untere, ungefederte Masse	14,0 kg
Massenträgheitsmoment der Schwinge um Gelenk	11,4 kgm ²
Auftriebskraft	0 N
Stoßdämpfer	
Maximaler Federweg	0,365 m
Füllvolumen der Gasfeder	0,00181250 m ³
Pneumatische Fläche der Gasfeder	0,00384845 m ²
Hydraulische Fläche	0,00384845 m ²
Fläche des Volumenstroms	0,00384846 m ²
Querschnittsfläche der hydraulischen Drossel	0,00002886 m ²
Relativer Fülldruck der Gasfeder	30 bar
Dichte der hydraulischen Flüssigkeit	860 kg/m ³
Polytropenexponent	1,160
Durchflussfaktor beim Einfedern	0,8
Durchflussfaktor beim Ausfedern	1,0
Koeffizient der Dichtungsreibung	0,06
Reifen	
Unbelasteter Reifenradius	0,281 m
Zusammenhang für Reifenkennlinie	$F_{z\ Ground} = 477390 \frac{N}{m} \cdot \Delta z_{tyre} + 598300 \frac{N}{m^2} \cdot \Delta z_{tyre}^2$
Geometrie (siehe Bild 3.14)	
d.geom.PTA	[0,24960 0,00000 0,28100] m
d.geom.TA_AXLE	[0,24960 0,00000 0,28100] m
d.geom.PSTU	[0,00000 0,00000 1,84080] m
d.geom.PSTL	[0,00000 0,00000 0,72230] m
d.geom.PP_UP	[0,00000 0,00000 1,50537] m
d.geom.PPIV	[-0,40900 0,00000 0,89440] m
Richtungsvektor der Drehachse der Schwinge	[0,00000 1,00000 0,00000] m

Die folgenden Diagramme zeigen den Vergleich der Ergebnisse der im Rahmen dieser Diplomarbeit erstellten Landestoßsimulation mit der von ZLT und den Messdaten des Fallversuchs. Die Graphen sind dementsprechend mit LLI SIMU, ZLT SIMU und ZLT DROP gekennzeichnet.

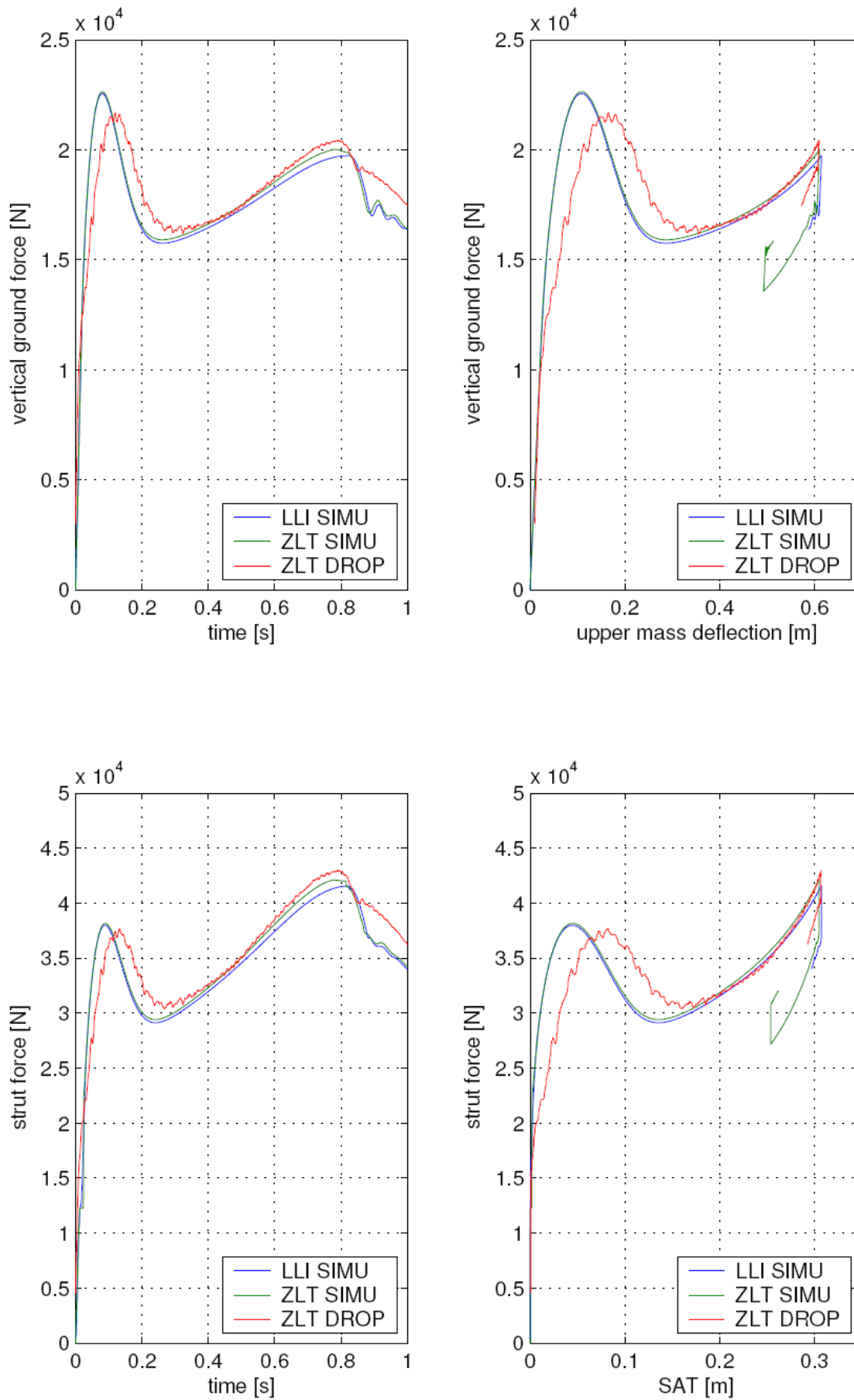


Bild 4.2 Ergebnisvergleich Zeppelin NT, Kräfte

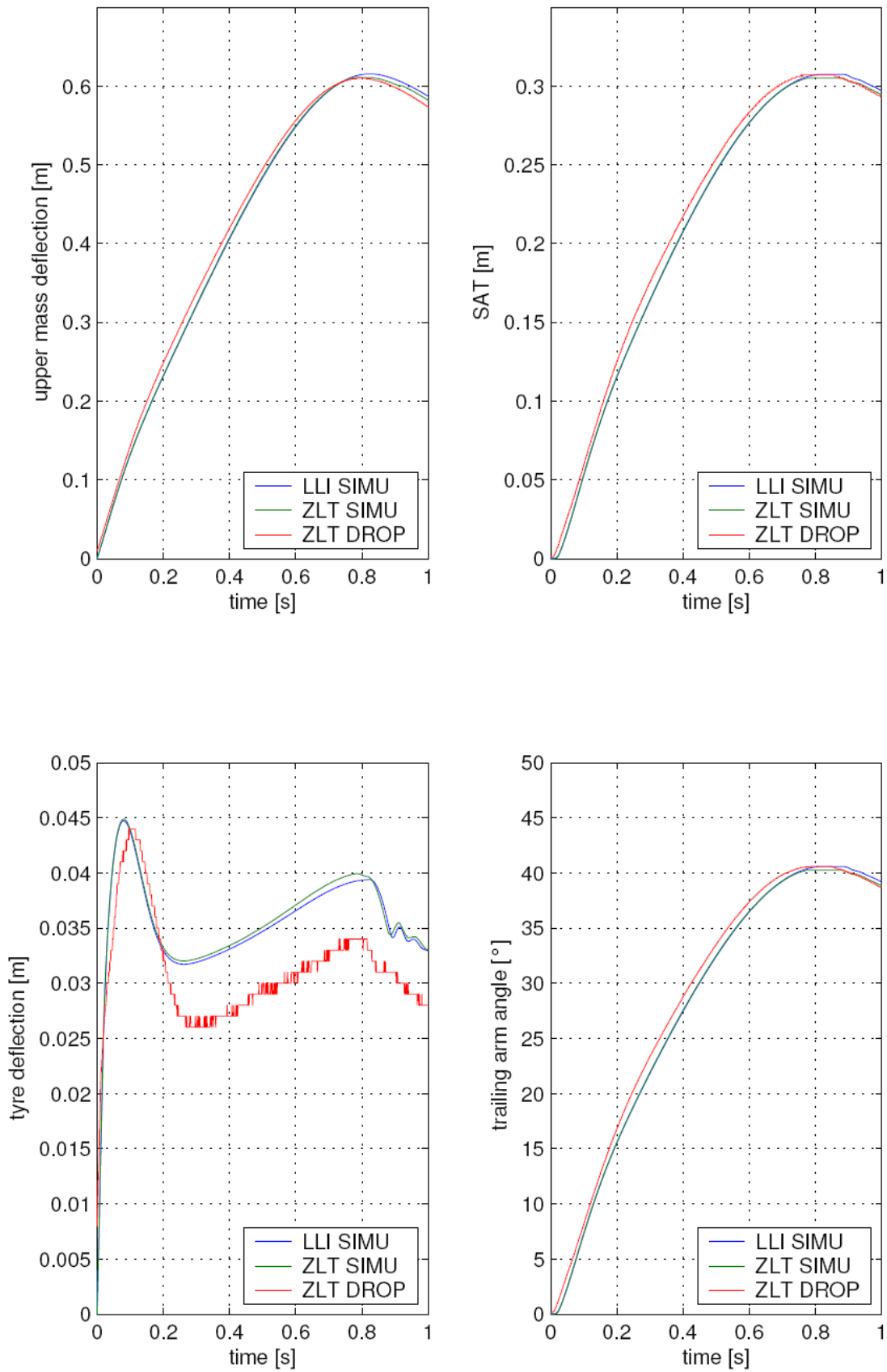


Bild 4.3 Ergebnisvergleich Zeppelin NT, Einfederungen

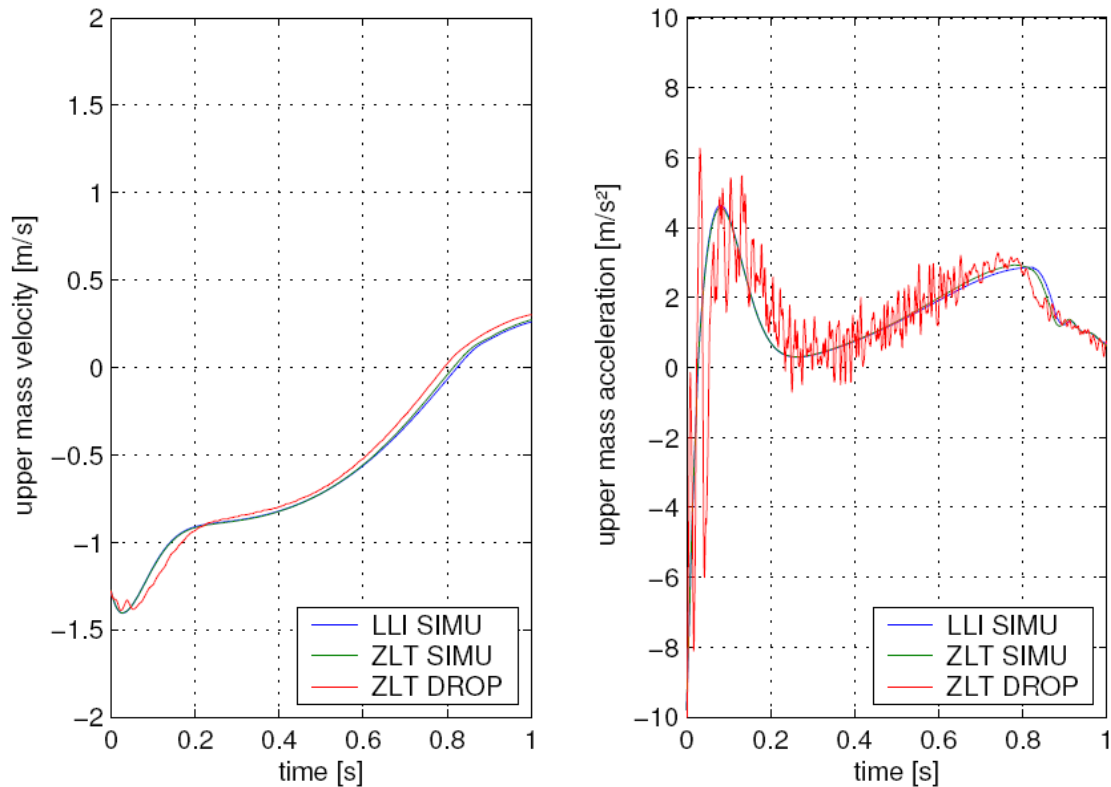


Bild 4.4 Ergebnisvergleich Zepplin NT, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen

Die Simulationsergebnisse zeigen sehr gute Übereinstimmungen mit denen der Simulation von ZLT. Im Vergleich zum Fallversuch fällt vor allem das schnellere Ansprechen der Drossel in beiden Simulationen auf. Beim Ausfedern lässt die Genauigkeit der Simulationen dann nach. Im allgemeinen stimmen die berechneten Einfederungen der oberen Masse und des Dämpfers gut mit der Realität überein. Die ermittelten Lasten fallen etwas höher aus als in der Realität. Tabelle 4.3 stellt ausgewählte Maximalwerte der beiden Simulationsprogramme denen des Fallversuchs gegenüber.

Tabelle 4.3 Vergleich der Maximalwerte (Zepplin NT)

Größe		LLI SIMU	ZLT SIMU	ZLT DROP
Vertikale Bodenkraft	[N]	22550	22635	21682
Einfederung der oberen Masse	[m]	0,615	0,611	0,610
Einfederung des Stoßdämpfers	[m]	0,307	0,305	0,307

Die Ausgabedateien der Simulation, wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, befinden sich in Anhang E.

4.3 Teleskopfahrwerk aus dem LTH

Für die Beispielrechnung eines Teleskopfahrwerkes wird **LTH BM 51 100-04** herangezogen. Der Beitrag enthält wiederum Fallversuchs- und Simulationsdaten. Da die Daten nur in Papierform vorlagen, mussten sie durch Abtasten der Diagramme mit dem *MATLAB*-Programm **grabit.m** (frei erhältlich unter **MathWorks e**) digitalisiert werden, was einige Ungenauigkeiten bedingt.

Bei dem betrachteten Fahrwerk handelt es sich um in Teleskopfahrwerk mit zweistufiger Gasfeder und verschiedenen Drosselquerschnitten beim Ein- und Ausfedern. Am Fahrwerk ist ein einzelnes Rad montiert. Der Stoßdämpfer verfügt über keine extra Recoil-Kammern und keine druckabhängige Drossel. Beim Fallversuch werden auch die Horizontalgeschwindigkeit und die Auftriebskraft berücksichtigt. Die gegebenen Parameter für den Landestoß enthält Tabelle 4.4. Für die zusätzlichen Eingaben für die Steifigkeit des Fahrwerks, die Ausdehnung der Dämpferrohre infolge Innendrucks und die Reifenparameter für Seitenkraft und Richtungsänderung gilt Gleiches wie in Abschnitt 4.2.

Bei näherer Betrachtung des Beitrags **LTH BM 51 100-04** fällt auf, dass die Arbeitsaufnahme des Fahrwerks nicht die Anfangsenergie des Fahrwerks bei der gegebenen Sinkgeschwindigkeit von 3,05 m/s abdeckt, also die angegebene vertikale Geschwindigkeit nicht mit den Diagrammen übereinstimmt. Dies zeigt der folgende Vergleich:

Die Anfangsenergie beträgt bei einer Sinkgeschwindigkeit von 3,05 m/s und einer maximalen Einfederung von 0,268 m (gemäß Gleichung 2.39):

$$E_0 = \frac{1}{2} \cdot 1248 \text{ kg} \cdot \left(3,05 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 + 1248 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot (1 - 0,667) \cdot 0,268 \text{ m} \quad (4.1)$$

$$= 6897 \text{ J}$$

Die aufgenommene Arbeit beim Landestoß ergibt sich bei einer grob geschätzten mittleren vertikalen Bodenkraft von 15 kN zu:

$$W_{LG} \approx 15000 \text{ N} \cdot 0,268 \text{ m} \quad (4.2)$$

$$\approx 4020 \text{ J}$$

Legt man eine Tangente an die Einfederungskurve im Kraft-Einfederung-Diagramm so kann man eine Sinkgeschwindigkeit von etwas über 2 m/s abschätzen. Es wird daher ein Tippfehler unterstellt und die Sinkgeschwindigkeit auf 2,05 m/s gesetzt. Die Anfangsenergie beträgt dann $E_0 = 3715 \text{ J}$, was mit der grob geschätzten Arbeitsaufnahme wesentlich besser übereinstimmt.

Tabelle 4.4 Eingabeparameter für Fallversuch aus dem LTH

Parameter	Wert
Allgemein	
Fallgeschwindigkeit	2,05 ¹ m/s
Vorwärtsgeschwindigkeit	43,20 m/s
Obere Masse	1240,00 kg
Untere, ungefederte Masse	8,63 kg
Massenträgheitsmoment der Schwinge um Gelenk	0,19 kgm ²
Auftriebsfaktor	0,667
Stoßdämpfer	
Neigung um die Nickachse (<i>rake</i>)	6,7 °
Pneumatische Fläche der Gasfeder	0,0026500 m ²
Relativer Fülldruck der ersten Gasfederstufe	1,7 bar
Füllvolumen der ersten Gasfederstufe	0,0004750 m ³
Relativer Fülldruck der zweiten Gasfederstufe	56,5 bar
Füllvolumen der zweiten Gasfederstufe	0,0004101 m ³
Hydraulische Fläche	0,0026500 m ²
Fläche des Volumenstroms	0,0026500 m ²
Drosselfläche beim Einfedern	0,0000503 m ²
Drosselfläche beim Ausfedern	0,0000063 m ²
Dichte der hydraulischen Flüssigkeit	860 kg/m ³
Polytrophenexponent	1,27
Durchflussfaktor beim Einfedern	0,70
Lagerreibungskoeffizient	0,05
Abstand der beiden Lager im unbelasteten Zustand	0,220 m
Abstand zwischen Radachse und unterem Lager	0,594 m
Reifen	
Unbelasteter Reifenradius	0,222 m
Reibungskoeffizient am Boden	0,850
Zusammenhang für Reifenkennlinie	$F_{z\ Ground} = 257000 \frac{N}{m} \cdot \Delta z_{tyre} + 900000 \frac{N}{m^2} \cdot \Delta z_{tyre}^2$
Geometrie (siehe Bild 3.13)	
d.geom.PTA	[0,00000 0,00000 0,22200] m
d.geom.SLT_AXLE	[0,00000 0,00000 0,22200] m
d.geom.UP_BEAR	[0,09497 0,00000 1,03044] m
d.geom.PP_UP	[0,11389 0,00000 1,20000] m

Den Vergleich der Simulationsergebnisse (LLI SIMU) mit den im LTH-Beitrag enthaltenen Simulationsergebnissen (LTH SIMU) und Fallversuchsmessdaten (LTH DROP) zeigen die folgenden Diagramme.

¹ Korrigiert, ursprünglich 3,05 m/s

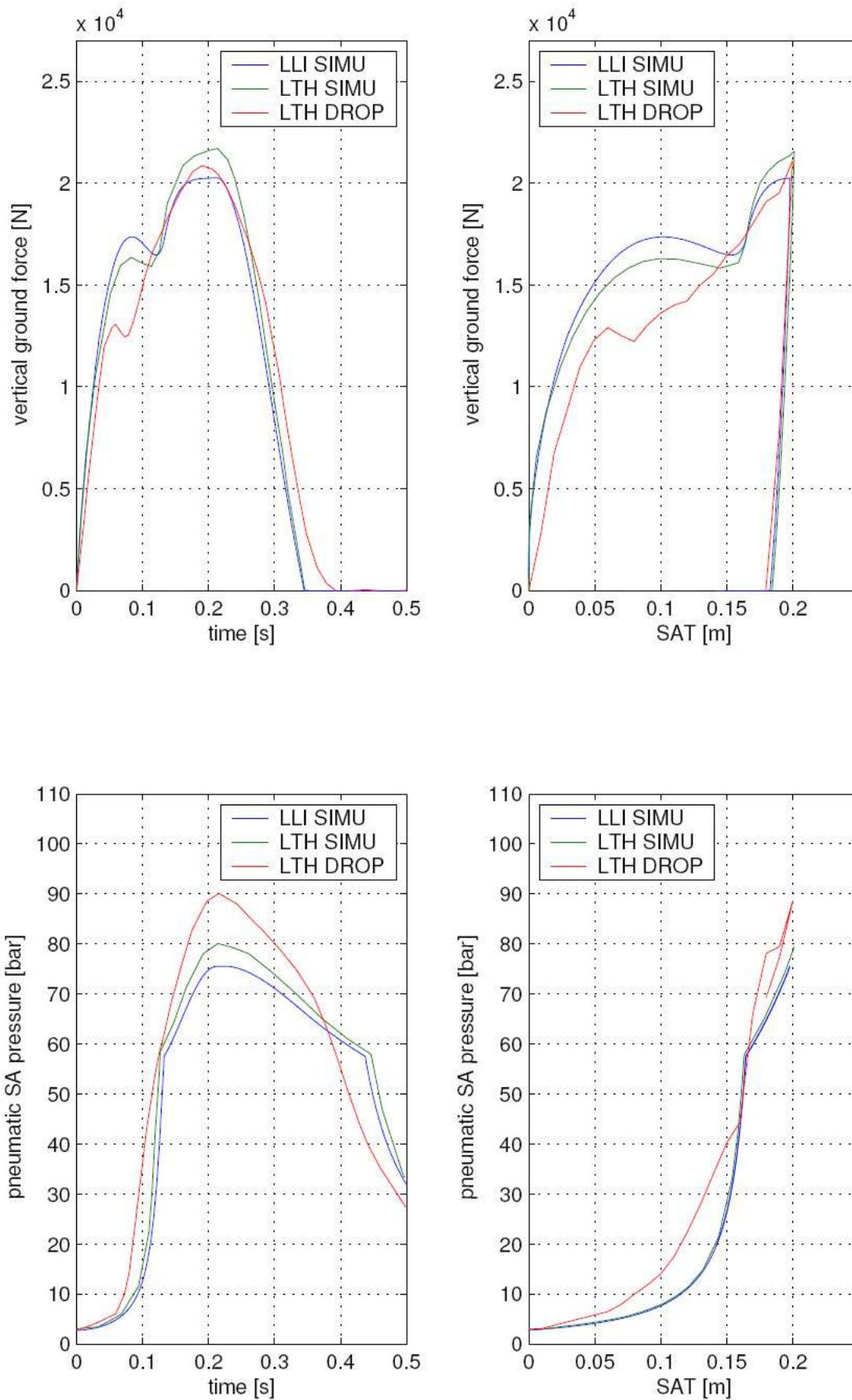


Bild 4.5 Ergebnisvergleich Teleskopfahrwerk LTH, Kräfte und (Absolut-) Drücke

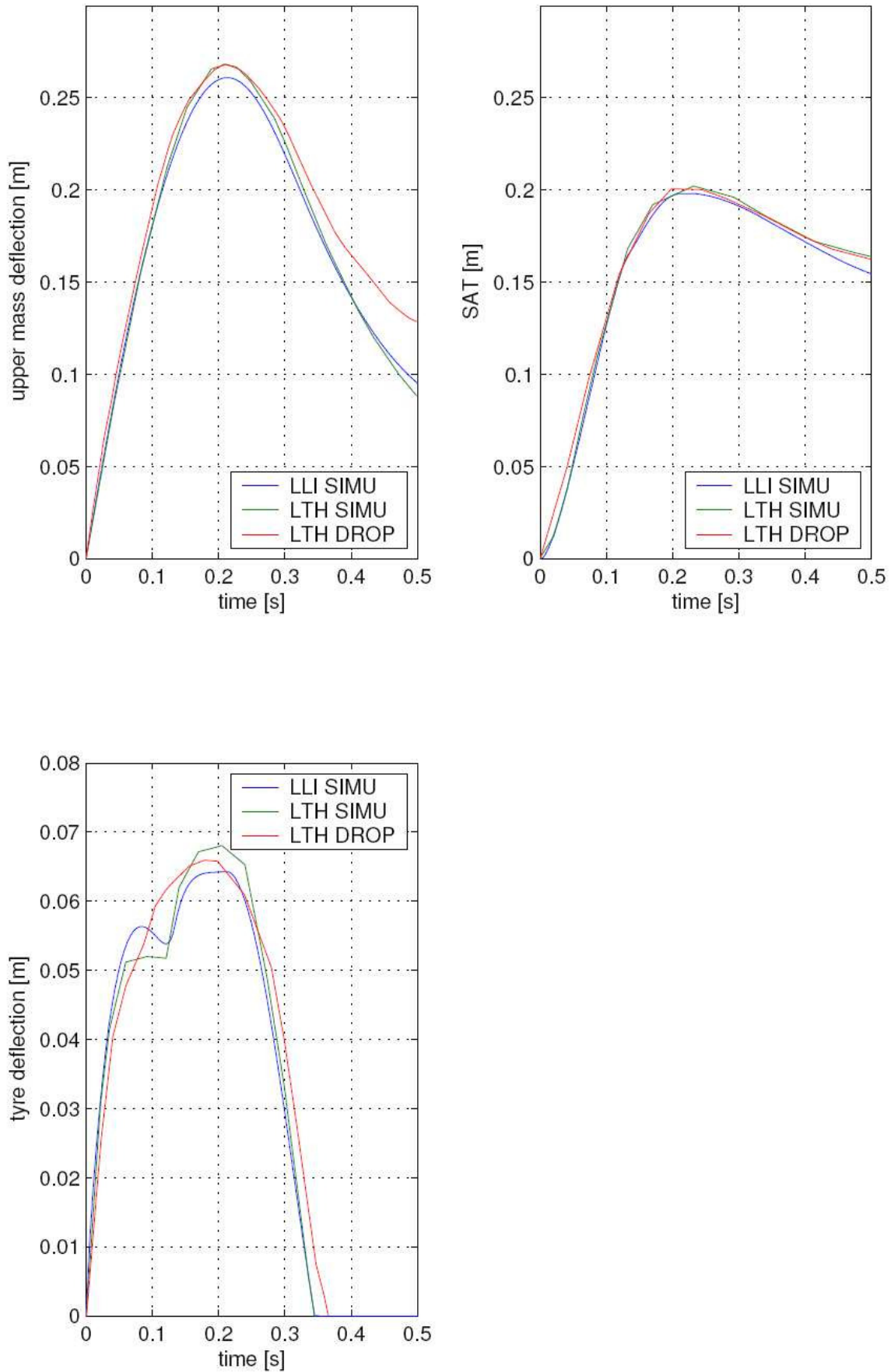


Bild 4.6 Ergebnisvergleich Teleskopfahrwerk LTH, Einfederungen

Die berechneten Kräfte der verschiedenen Simulationen weichen diesmal trotz (fast) identischer Eingabedaten mehr voneinander ab als im vorherigen Beispiel. Bei den Einfederungen sind die Abweichungen geringer. Positiv hervorzuheben ist, dass die berechneten Federkennlinien der beiden Simulationen annähernd identisch sind. Auch die Unterschiede zum Fallversuch fallen größer aus. Die folgende Tabelle stellt die Maximalwerte der verschiedenen Simulationen denen des Fallversuchs gegenüber.

Tabelle 4.5 Vergleich der Maximalwerte (Teleskopfahrwerk LTH)

Größe		LLI SIMU	LTH SIMU	LTH DROP
Vertikale Bodenkraft	[N]	20250	21553	21290
Einfederung der oberen Masse	[m]	0,261	0,268	0,268
Einfederung des Stoßdämpfers	[m]	0,198	0,202	0,201

Die Ausgabedateien zu dieser Simulation befinden sich auf der dieser Diplomarbeit beiliegenden CD-ROM.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit sind sechs *SimMechanics*-Modelle für verschiedene Fahrwerkstypen und ein Menüsystem, welches den Aufruf sowie die Ein- und die Ausgabe dieser Modelle steuert, erstellt worden. Das erarbeitete Programmpaket ermöglicht somit die Simulation des Landestoßes für Teleskop-, Schwinghebel- und Halbschwingenfahrwerke, jeweils mit Einzel- und Zwillingsbereifung. Die Funktionalität des Simulationsprogramms ist neben den hier gezeigten Beispielen auch durch den Vergleich mit anderen Versuchsdaten von LLI bestätigt worden. Durch kleinere Modifikationen der geschaffenen Basis sollte eine Vielzahl weiterer Fahrwerkskonfigurationen dargestellt werden können.

Diese Diplomarbeit dient als Dokumentation zum erstellten Programmpaket. In den theoretischen Grundlagen sind die betrachteten Fahrwerkstypen mit ihren Vor- und Nachteilen, die Kräfte am Fahrwerk und mehrere Auslegungsparameter beschrieben. Bei der Beschreibung der programmtechnischen Umsetzung werden vor allem die Bedienung und die Eingabe erläutert. Zudem werden die Modelle näher beschrieben und Unterschiede bei der Realisierung der verschieden Bauformen hervorgehoben. Die Beispielrechnung zeigt, dass mit Hilfe des erstellten Programms die Lasten und Bewegungen des Fahrwerks beim Landestoß realistisch wiedergegeben werden können. Vor allem die umfangreichen Daten im Anhang sollen bei der späteren Pflege, Weiterverwendung und -entwicklung der Programme helfen.

Die Einbindung der erzeugten Modelle der Einzelfahrwerke in ein Gesamtmodell, welches das Zusammenwirken mehrerer Fahrwerke an einem Fluggerät berücksichtigt, stellt einen nächsten logischen Schritt dar. Somit ließen sich auch zum Beispiel unsymmetrische Landungen oder Lenkmanöver simulieren. Die geleistete Arbeit schafft hierfür eine Grundlage.

Letztlich sei noch darauf hingewiesen, dass die gesamte Simulation auf einer Modellbildung beruht. Es ist nicht auszuschließen, dass bei Messungen bei Versuchen oder am Fluggerät Effekte auftreten, die nicht von dieser Simulation erfasst werden. Diese Effekte können unter anderem durch das Messverfahren, durch Versuchseinrichtungen oder durch menschliches Eingreifen, zum Beispiel des Piloten eines Fluggeräts, bedingt sein. Es muss daher beim Vergleich von Mess- und Simulationsdaten immer kritisch überprüft werden, ob bei beiden Verfahren dieselben Randbedingungen zugrunde liegen. Gegebenenfalls ist das Modell dann an die Realität anzupassen.

Literaturverzeichnis

- Backé 1994** BACKÉ, W.; MURRENHOF H.: *Grundlagen der Ölhydraulik*. 10. Auflage. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen, Um-
druck zur Vorlesung, 1994
- Besselink 2000** BESSELINK, Ignatius J. M.: *Shimmy of Aircraft Main Landing Gears*. Technische Universität Delft, Prüfschrift zur Erlangung des Doktor-
grades. Delft : DocVision , 2000
- Conway 1958** CONWAY, H. G.: *Landing Gear Design*. London : Chapman & Hall
Ltd., 1958 (A Series of Textbooks published under the authority of
The Royal Aeronautical Society)
- CS-25** EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY: *Certification Specifications for
Large Aeroplanes, CS-25*
- Currey 1988** CURREY, Norman S.: *Aircraft landing gear design : principles and
practises*. 4th printing. Washington, DC : American Institute of Aero-
nautics and Astronautics, Inc., 1988 (AIAA education series)
- ICAOdata** INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION: *Main terms and
descriptions used in civil aviation statistics* –
URL: <http://icaoata.com/Terms.aspx> (2007-05-14)
- Lee 2003** THE LEE COMPANY: *Technical Hydraulic Handbook*. Release 10.3.
Westbrook, Connecticut : The Lee Company Technical Center, 2003
- LTH BM 22 110-02** KÖNIG, Klaus.: *Elemente des Fahrwerks, Stoßdämpfer*.
LTH BM 21 110-02, 1976 (Luftfahrttechnisches Handbuch Belas-
tungsmechanik)
- LTH BM 51 100-04** VON ROTZ, A.: *Programm zur Simulation von Droptests für teleskop-
artige, ein- und zweistufige Stoßdämpfer*. LTH BM 51 100-04, 2000
(Luftfahrttechnisches Handbuch Belastungsmechanik)
- König 1979** KÖNIG, Klaus: *Die Lasten des Landestoßes*. In: *Zeitschrift für
Flugwissenschaften und Weltraumforschung*, Band 3 (1979), Heft 6,
S. 344-359

- MathWorks a** URL: <http://www.mathworks.co.uk/products/matlab/description1.html>
(2007-05-14)
- MathWorks b** URL:
<http://www.mathworks.co.uk/products/simulink/description1.html>
(2007-05-14)
- MathWorks c** URL:
<http://www.mathworks.co.uk/products/simmechanics/description1.html> (2007-05-14)
- MathWorks d** URL:
http://www.mathworks.de/support/sysreq/current_release/index.html
(2007-05-14)
- MathWorks e** URL:
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=7173&objectType=File> (2007-05-26)
- Microsoft 2005** MICROSOFT CORPORATION: *Hilfe- und Supportcenter*. Microsoft, 2005 – Hilfethemen zu Windows XP Media Center Edition 2005
- NACA 1952** MILWITZKY, Benjamin; COOK, Francis E.: *NACA Report 1154 : Analysis of Landing Gear Behavior*. Langley Aeronautical Laboratory/Langley Field, VA : National Advisory Committee for Aeronautics, 1952
- SAE 2001** SAE: *Aerospace AIR 1489 Revision B : Landing Gear Systems Terminology*. Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, 2001
- Simulink 5.1** THE MATHWORKS, INC.: *Simulink Library Browser*. MathWorks, 2003
- Young 1992&1995** YOUNG, D. W.: *Landing Gear Design*. Cranfield, Department of Aerospace Technology, 1992 & 1995

Anhang A

Übersicht der Programme und Unterprogramme

Dieser Abschnitt enthält eine Auflistung der erstellten Programmdateien mit einigen Informationen zu Funktion, Variablenübergabe, Programmaufrufen und geladenen oder gespeicherten Daten. Da für die verschiedenen Fahrwerkskonfigurationen teils sehr ähnliche Unterprogramme, aber eben nicht identische Unterprogramme mit derselben Funktion erstellt worden sind, ist der Umfang an Programmen sehr groß. Diese Programme gleicher Funktion sind in dieser Auflistung unter einer Bezeichnung zusammengefasst. Unterschiede im Programmnamen, die meist durch einen Schlüssel (siehe Tabelle 3.4) die Zuordnung zum Fahrwerkstyp ermöglichen, werden durch das Auslassungszeichen „*“ gekennzeichnet. Die Beschreibung erfolgt gleich dem Quelltext und der Menüführung in englischer Sprache.

Tabelle A.1 Übersicht der Programme und Unterprogramme

Program	Description
change_data_*.m	CONTEXT: calls the change_*.m - files corresponding to the menu inputs Called by: drop_*.m Calls: change_*.m - routines In: d, menu, choice_mm, choice_m2 Out: d Loads: / Saves: /
change_flex.m	CONTEXT: Input routine for flexibility properties (telescope) Called by: change_data_*.m Calls: isinptano.m, loadchange.m In: flex Out: flex Loads: / Saves: /
change_flex6.m	CONTEXT: Input routine for flexibility properties (lever/semilever) Called by: change_data_*.m Calls: isinptano.m, loadchange.m In: flex Out: flex Loads: / Saves: /
change_gen_*.m	CONTEXT: Input routine for general settings Called by: change_data_*.m Calls: isinptano.m In: gen Out: gen Loads: / Saves: /

Program	Description
change_geom_*.m	CONTEXT: Input routine for geometry parameters Called by: change_data_*.m Calls: isinptano.m In: geom Out: geom Loads: / Saves: /
change_mass_*.m	CONTEXT: Input routine for mass properties Called by: change_data_*.m Calls: isinptano.m, loadchange.m In: mass Out: mass Loads: / Saves: /
change_SA.m	CONTEXT: Input routine for shock absorber parameters Called by: change_data_*.m Calls: isinptano.m, loadchange.m In: sa Out: sa Loads: / Saves: /
change_sd.m	CONTEXT: Input routine for shimmy damper parameters (only telescope) Called by: change_data_*.m Calls: isinptano.m In: sd Out: sd Loads: / Saves: /
change_tyre_1w.m	CONTEXT: Input routine for Tyre Parameters (one wheel) Called by: change_data_*1w.m Calls: isinptano.m, loadchange.m In: tyre Out: tyre Loads: / Saves: /
change_tyre_2w.m	CONTEXT: Input routine for Tyre Parameters (two wheels) Called by: change_data_*2w.m Calls: isinptano.m, loadchange.m In: tyre Out: tyre Loads: / Saves: /

Program	Description
dampingfactors.m	<p>CONTEXT: - calculates the damping factors corresponding to the SAT for a look-up-table in SimMechanics. Interaction of the main throttle with a pressure dependent throttle is also intergrated (K1_p). - calculates the factors for the pressure difference at main and recoil throttle</p> <p>Called by: precalc*.m Calls: hydrDamp.m In: sa Out: quadra, dporif, dprec Loads: / Saves: /</p>
default_data.m	<p>CONTEXT: loads default settings for the LG type Called by: drop_*.m Calls: / In: / Out: d Loads: default settings (default.mat) Saves: /</p>
dist_lztor.m	<p>CONTEXT: calculates the distance between apex joint an main fitting centre line and the distance between lower torque link joint to apex joint parallel to the strut at dl (SAT)</p> <p>Called by: update_lg.m Calls: / In: dl, geom Out: ltor, ztor Loads: / Saves: /</p>
drop*.m	<p>CONTEXT: main routine for drop simulation for one type of LG Called by: DROP_SIMU.m Calls: - "type"_data.m - mainmenu.m - menu2.m - loadfile.m - change_data*.m - precalc*.m - simmech_drop_*.mdl - simplot_*.m - report_*.m</p> <p>In: / Out: / Loads: / Saves: /</p>
DROP_SIMU.m	<p>CONTEXT: Start routine for drop simulation Called by: / Calls: - drop_telescope_2tyre.m - drop_telescope_1tyre.m - drop_lever_2tyre.m - drop_lever_1tyre.m - drop_semilever_2tyre.m - drop_semilever_1tyre.m</p> <p>In/Out: / Loads/Saves: /</p>

Program	Description
gascurve.m	<p>CONTEXT: calculates the pressure of the gas spring corresponding to the SAT for a look-up-table in SimMechanics</p> <p>Called by: precalc*.m</p> <p>Calls: /</p> <p>In: sa</p> <p>Out: table</p> <p>Loads: /</p> <p>Saves: /</p>
get_matrix5.m	<p>CONTEXT: interpolates between the three 5x5 mass and flexibility matrices to create matrices with the dimension 5x5x(SAT+3)/100 (only telescope)</p> <p>Called by: update_lg_t.m</p> <p>Calls: /</p> <p>In: dl, d</p> <p>Out: Mgear, Fgear</p> <p>Loads: /</p> <p>Saves: /</p>
get_matrix6.m	<p>CONTEXT: interpolates between the three 6x6 mass and flexibility matrices to create matrices with the dimension 6x6x(SAT+3)/100 (lever/semilever)</p> <p>Called by: update_lg_l.m</p> <p>Calls: /</p> <p>In: dl, d</p> <p>Out: Mgear, Fgear</p> <p>Loads: /</p> <p>Saves: /</p>
get_struct.m	<p>CONTEXT: finds substructures and data of a structure</p> <p>Called by: save_inputdata.m, get_struct.m (recursive)</p> <p>Calls: get_struct.m</p> <p>In: struct, idx, s</p> <p>Out: substruct, idx</p> <p>Loads: /</p> <p>Saves: /</p>
hydrDamp.m	<p>CONTEXT: calculates the quadratic damping coefficient of a throttle from its geometry</p> <p>Called by: dampingfactors.m</p> <p>Calls: /</p> <p>In: sa</p> <p>Out: Dquadra</p> <p>Loads: /</p> <p>Saves: /</p>
isinptano.m	<p>CONTEXT: test routine: Is input a number? no --> ok=0; yes --> ok=1</p> <p>Called by: change_*.m</p> <p>Calls: /</p> <p>In: data</p> <p>Out: ok</p> <p>Loads: /</p> <p>Saves: /</p>

Program	Description
load_runway.m	CONTEXT: loads runway characteristics Called by: precalc*.m Calls: / In: / Out: x,Y Loads: runway file "d.gen.roadFile" Saves: /
loadchange.m	CONTEXT: loads matrices for change_*.m Called by: change_*.m Calls: / In: path1,path2 (directories below "name of directory") Out: loadname, loaddata Loads: matrices "filename" Saves: /
loadfile.m	CONTEXT: loads the file with configuration parameters Called by: drop_*.m Calls: / In: d, menu, choice_mm, choice_m2 Out: d Loads: configuration file (*.mat) Saves: /
mainmenu.m	CONTEXT: main menu of drop simulation Called by: drop_*.m Calls: / In: / Out: choice, menu Loads: / Saves: /
menu2.m	CONTEXT: second level of menu Called by: drop_*.m Calls: / In: d, menu, kmin, kmax Out: choice,menu Loads: / Saves: /
modaldamp.m	CONTEXT: calculates structural damping matrix at dl (SAT) Called by: update_lg*.m Calls: / In: Mf (mass), C (stiffness), km (damping) Out: K Loads: / Saves: /
postcalc_*.m	CONTEXT: calculates various simulation paramaters for output Called by: drop_*.m Calls: / In: d, s Out: s Loads: / Saves: /

Program	Description
postsim.m	<p>CONTEXT: creates s-structure with simulation results</p> <p>Called by: simmech_drop_*.mdl (Model Properties => Callbacks)</p> <p>Calls: /</p> <p>In: /</p> <p>Out: /</p> <p>Loads: /</p> <p>Saves: /</p>
precalc_*.m	<p>CONTEXT: calculates various simulation paramaters from the input data</p> <p>Called by: drop_*.m</p> <p>Calls: dampingfactors.m, gascurve.m, load_runway.m, update_lg*.m</p> <p>In: d</p> <p>Out: d</p> <p>Loads: /</p> <p>Saves: /</p>
protocol_*.m	<p>CONTEXT: writes protocol files: *.dat protocol in text form, *.tbl protocol as a table</p> <p>Called by: report_*.m</p> <p>Calls: /</p> <p>In: s,filename</p> <p>Out: s</p> <p>Loads: /</p> <p>Saves: "filename".dat, "filename".tbl</p>
report_*.m	<p>CONTEXT: saves result and protocol files</p> <p>Called by: drop_*.m</p> <p>Calls: protocol_*.m, save_inputdata.m</p> <p>In: /</p> <p>Out: /</p> <p>Loads: /</p> <p>Saves: "name_of_config-date".mat, "name_of_config-date".ps</p>
report_*.m	<p>CONTEXT: Output routine, creates figures</p> <p>Called by: drop_*.m</p> <p>Calls: /</p> <p>In: /</p> <p>Out: /</p> <p>Loads: /</p> <p>Saves: /</p>
save_inputdata.m	<p>CONTEXT: writes input data in a text file</p> <p>Called by: report_*.m</p> <p>Calls: get_struct.m</p> <p>In: s, filename</p> <p>Out: s</p> <p>Loads: /</p> <p>Saves: "filename".ipt</p>
savefile.m	<p>CONTEXT: saves the data of the configuration</p> <p>Called by: drop_*.m</p> <p>Calls: /</p> <p>In: d, menu, choice_mm, choice_m2</p> <p>Out: d</p> <p>Loads: /</p> <p>Saves: "name_of_config".mat</p>

Program	Description
simmech_drop_*.mdl	CONTEXT: model file of one LG type Called by: drop_*.m Calls: postsim.m In: d Out: s_* Loads: / Saves: /
update_lg_l.m	CONTEXT: calculates and rotates stiffness, damping and mass matrices (telescope) Called by: precalc*.m Calls: modaldamp.m, get_matrix6 In: d Out: d Loads: / Saves: /
update_lg_t.m	CONTEXT: calculates torque link geometry and calculates and rotates stiffness, damping and mass matrices (lever/semilever) Called by: precalc*.m Calls: dist_lztor.m, modaldamp.m, get_matrix5 In: d Out: d Loads: / Saves: /

Anhang B

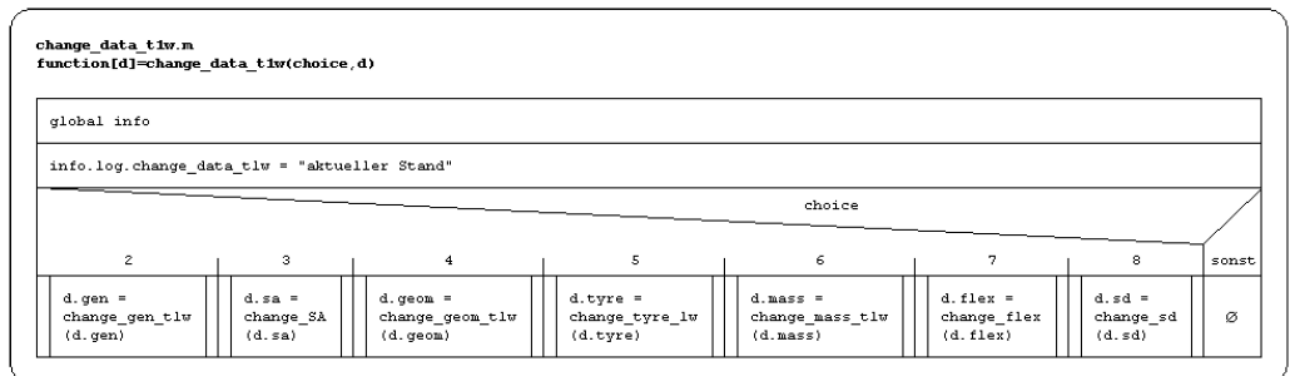
Struktogramme

Im folgenden Abschnitt verdeutlichen die Struktogramme der Programme und Unterprogramme den Ablauf der Simulation. Bei Programmen mit gleichem oder sehr ähnlichem Aufbau wird immer nur ein Struktogramm als Beispiel gezeigt. Die ähnlichen Programme werden in Klammern gesetzt aufgezählt.

Auf die Abbildung der Struktogramme für `protocol_*.m` und `simplot_*.m` wird an dieser Stelle verzichtet, da diese Programme in einer sehr einfachen Programmstruktur nur zahlreiche Ausgabebefehle enthalten.

change_data_t1w.m

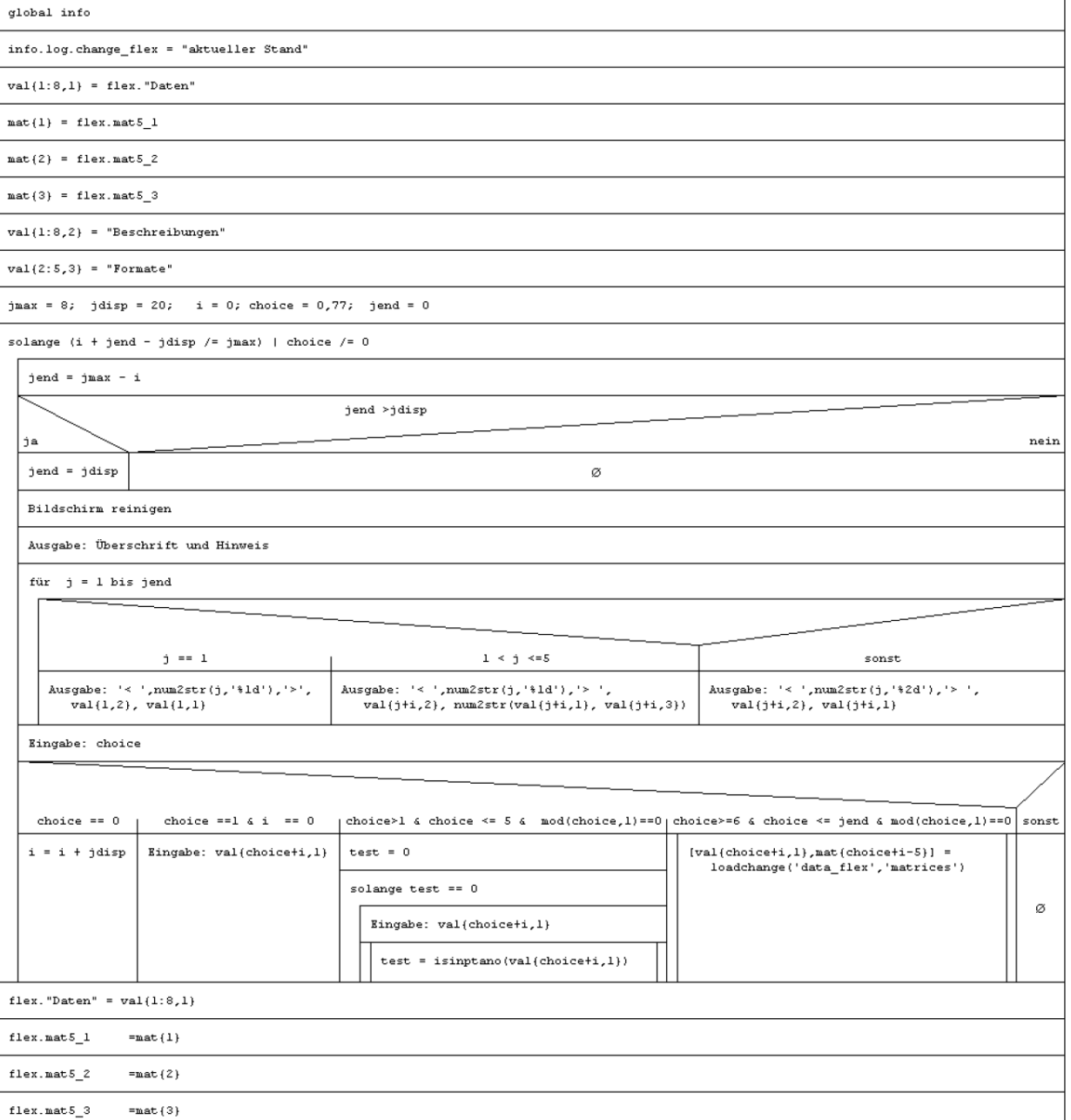
(*_t2w.m, *_l1w.m, *_l2w.m, *_sl1w.m, *_sl2w.m)



change_flex.m

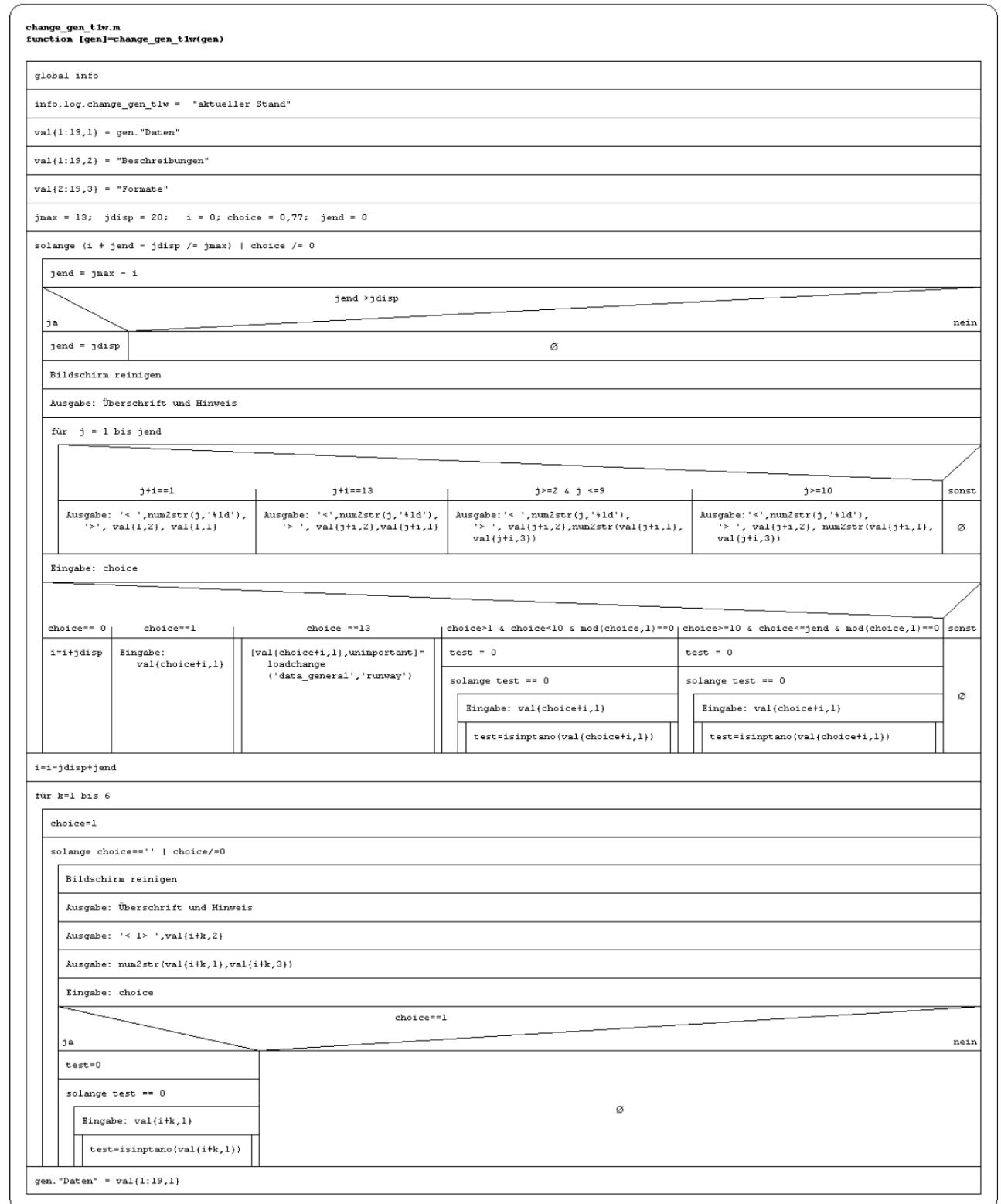
(change_flex6.m)

```
change_flex.m
function [flex] = change_flex(flex)
```



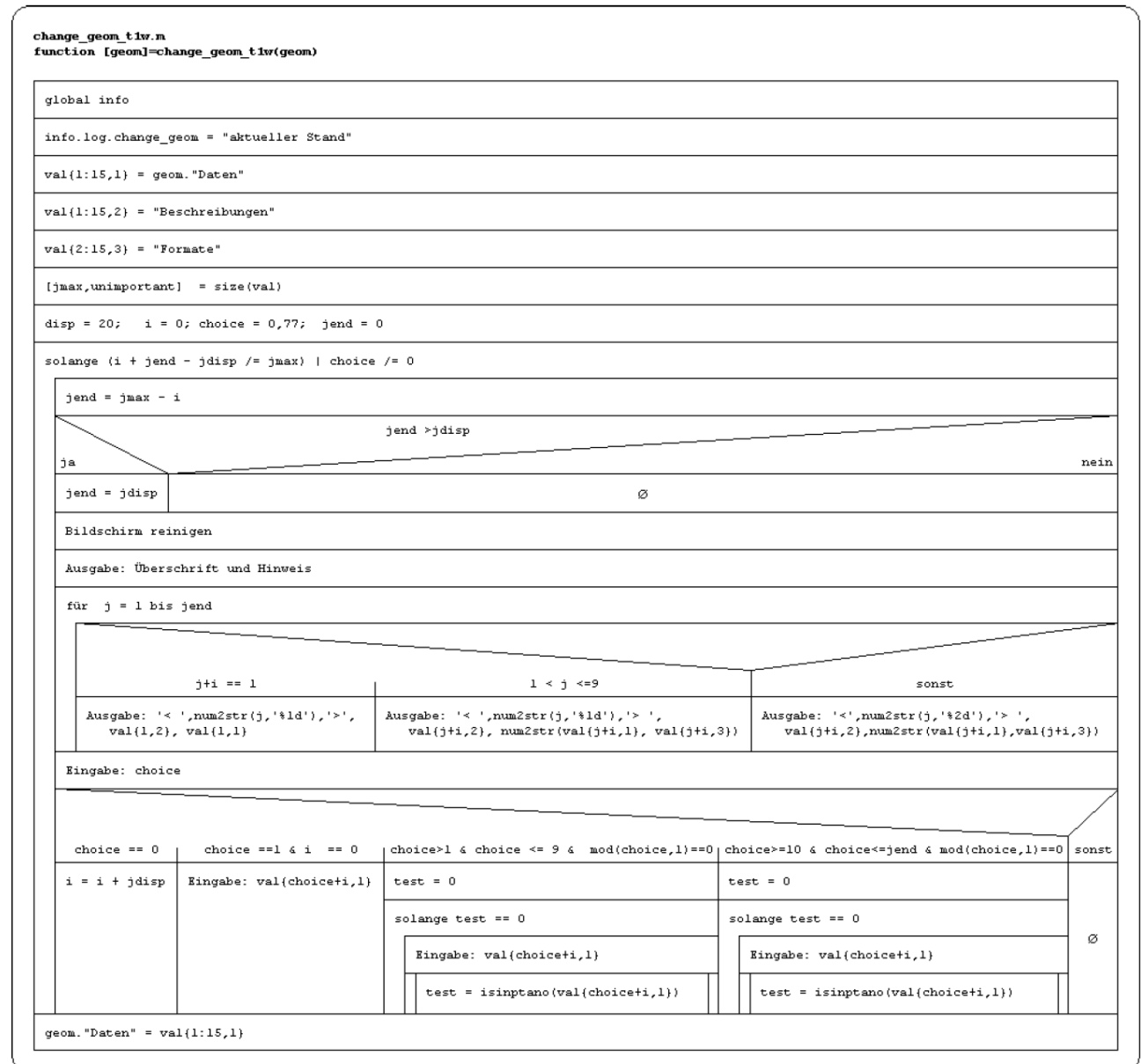
change_gen_t1w.m

(*_t2w.m, *_l1w.m, *_l2w.m, *_sl1w.m, *_sl2w.m)

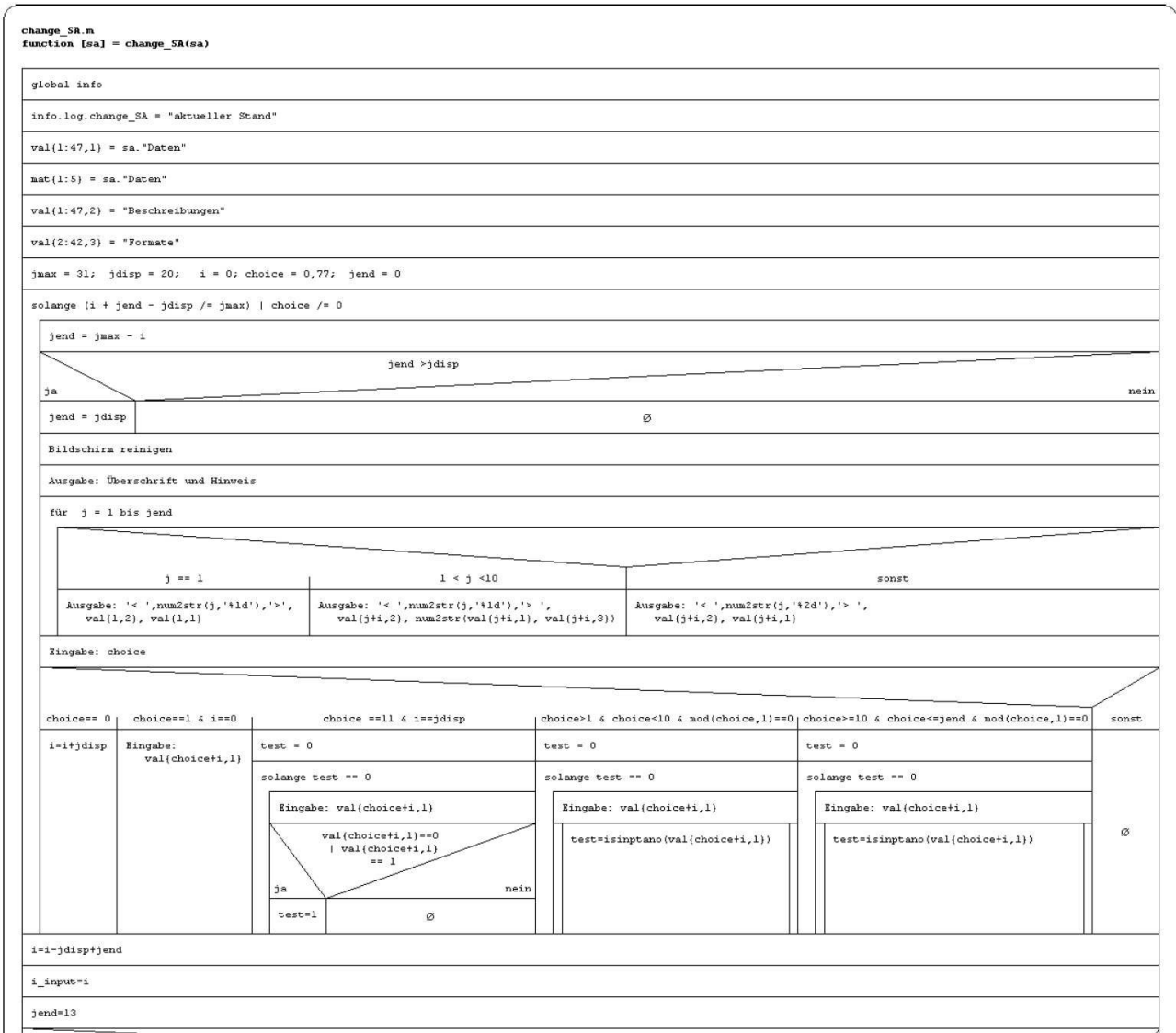


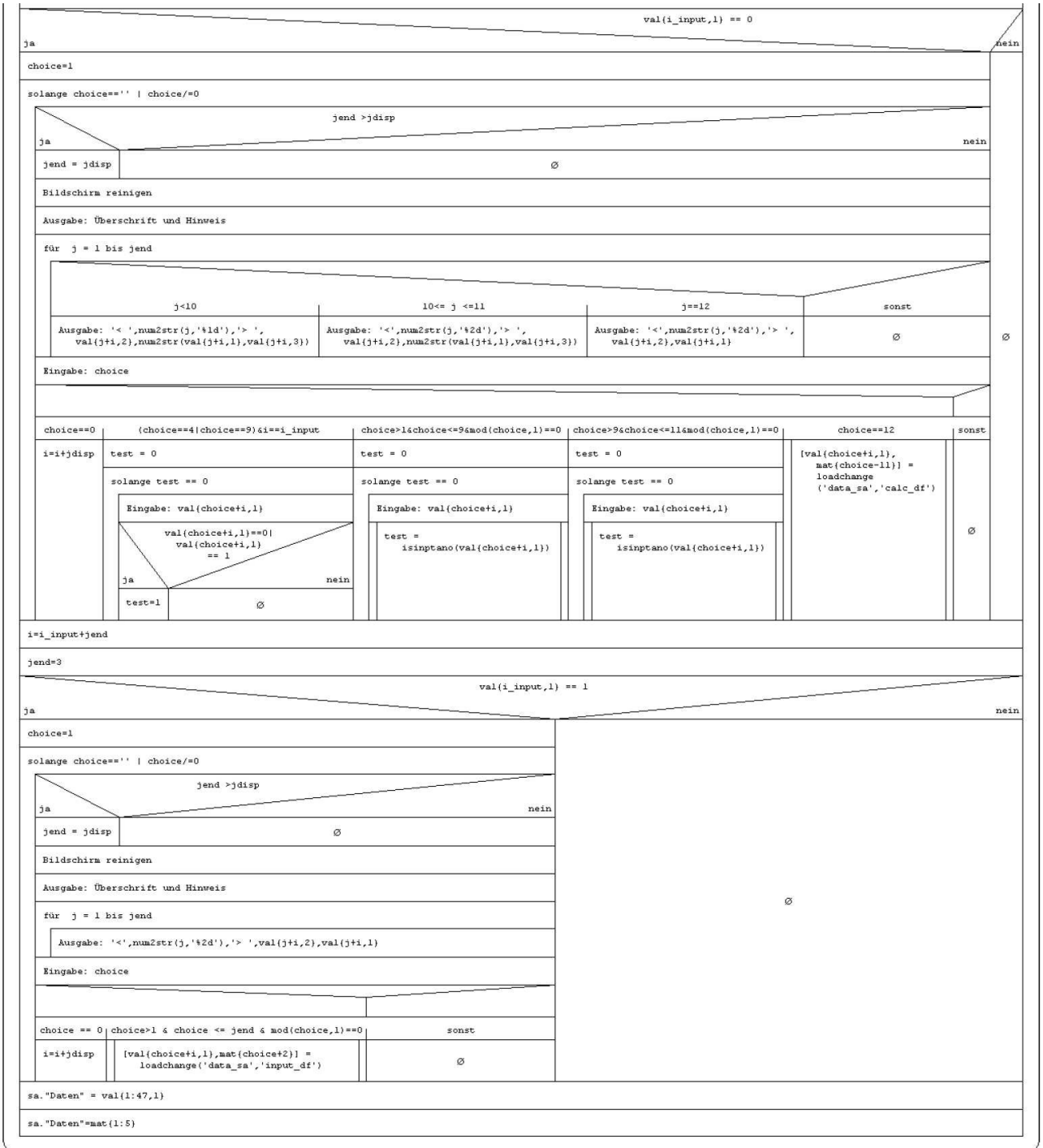
change_geom_t1w.m

(*_t2w.m, *_l1w.m, *_l2w.m, *_sl1w.m, *_sl2w.m)

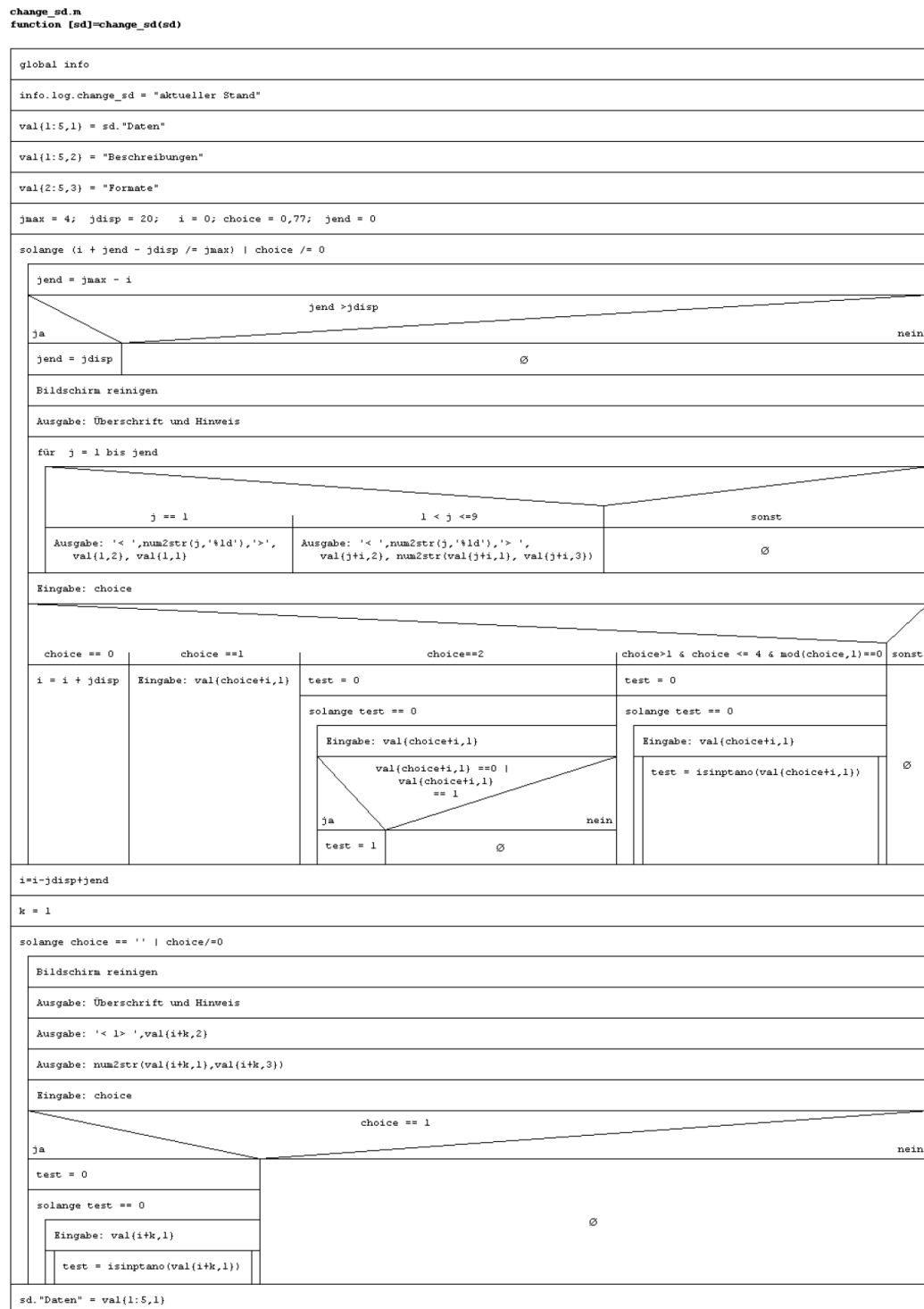


change_SA.m

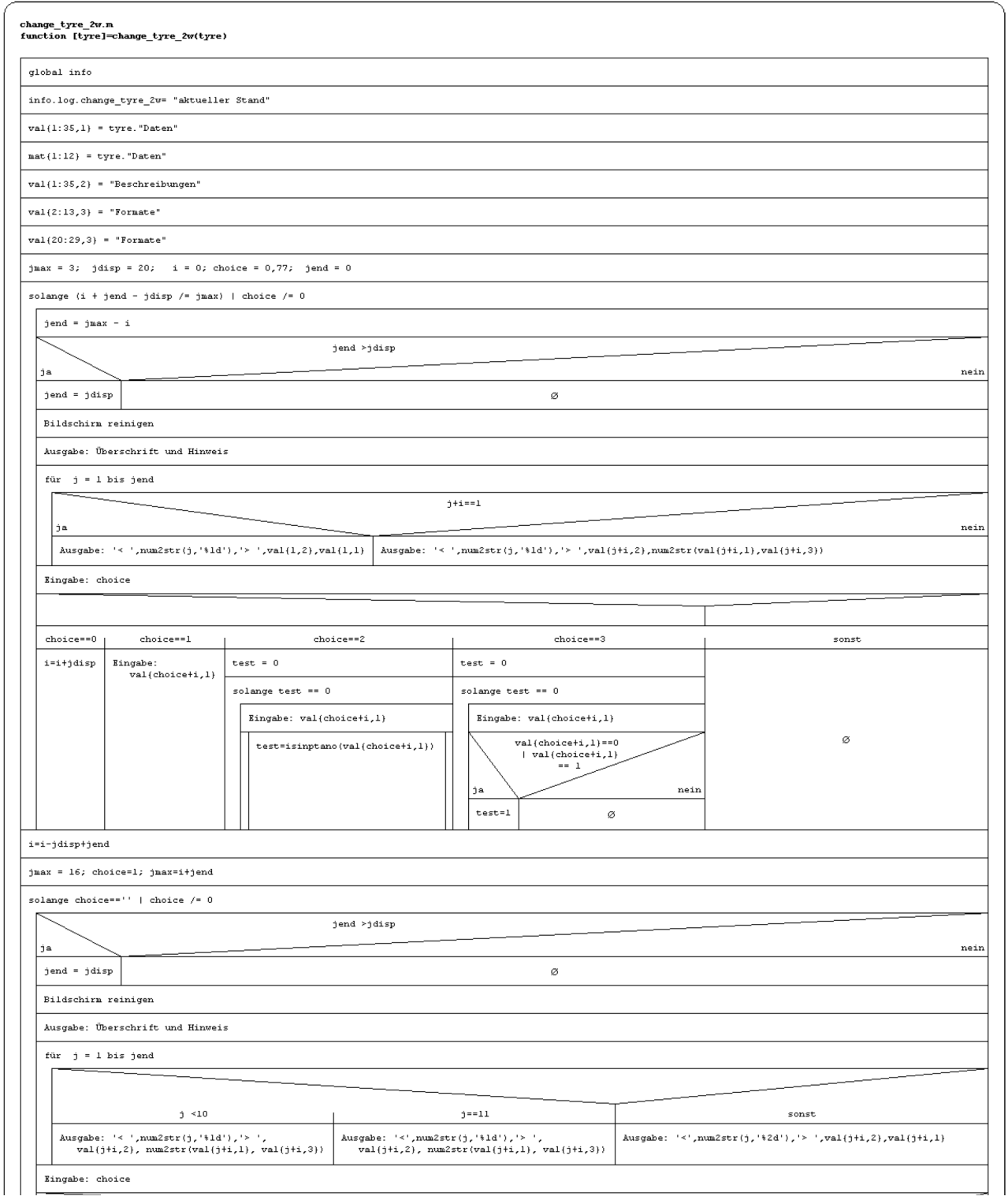


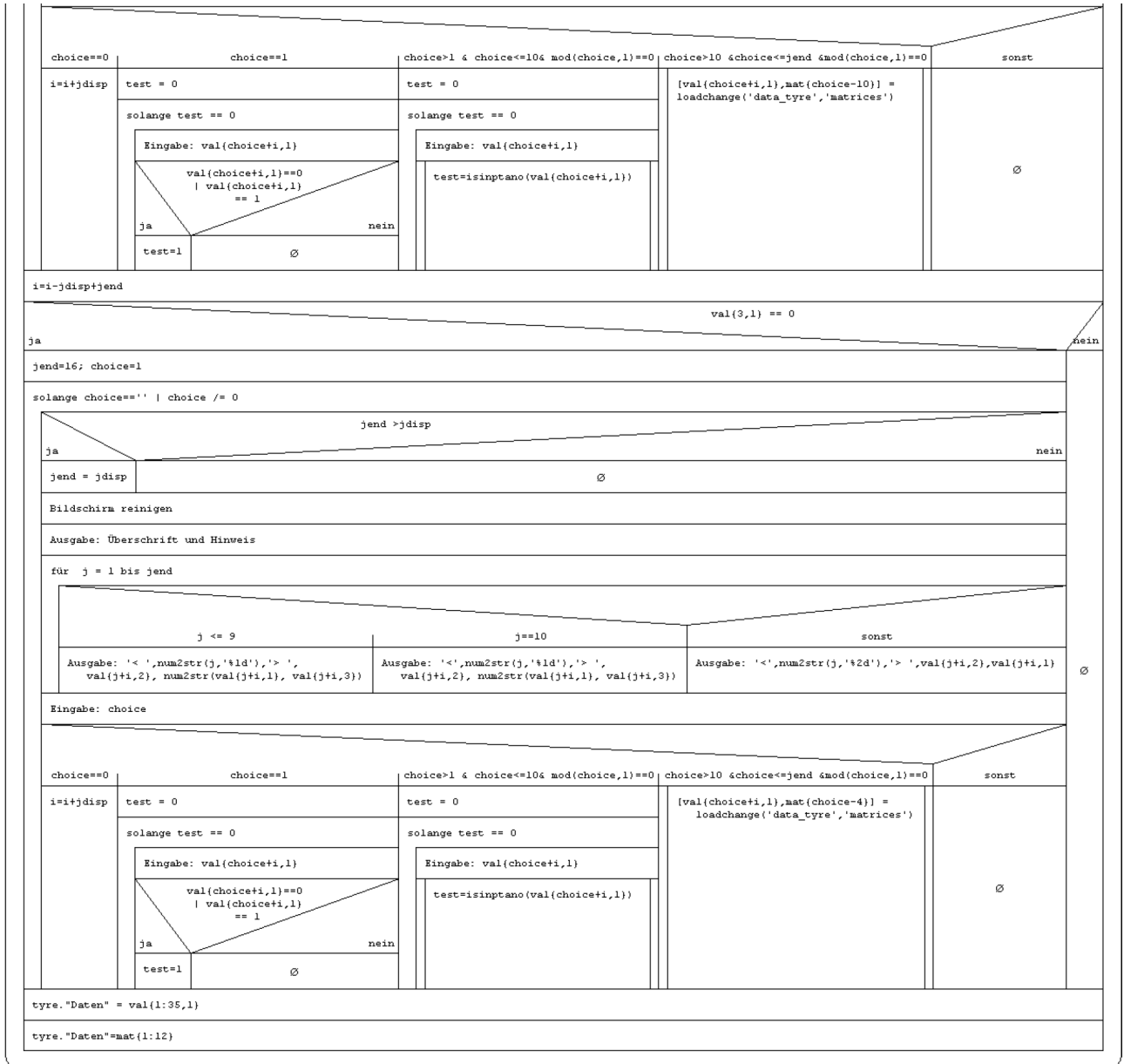


change_sd.m



change_tyre_2w.m
(change_tyre_1w.m)





dampingfactors.m

```
dampingfactors.m
function [quadra,dporif,dprec] = dampingfactors(sa)
```

global info

info.log.dampingfactors = "aktueller Stand"

Wertübergabe

[ii,unimportant] = size(Aorif_in)

SWorif == 0 & SWrec == 0		SWorif == 0 & SWrec == 1		SWorif == 1 & SWrec == 0		SWorif == 1 & SWrec == 1		sonst
für i = 1 bis ii		für i = 1 bis ii		für i = 1 bis ii		für i = 1 bis ii		
$K1(i) = \text{hydrDamp}(sa, Aout_SLT, Aout_SLT - Aorif_in(i,2), Aorif_in(i,2), Cdorif_in)$		$K1(i) = \text{hydrDamp}(sa, Aout_SLT, Aout_SLT - Aorif_in(i,2), Aorif_in(i,2), Cdorif_in)$		$K1(i) = \text{hydrDamp}(sa, Ain_SLT, Ain_SLT, Aorif_in(i,2), Cdorif_in)$		$K1(i) = \text{hydrDamp}(sa, Ain_SLT, Ain_SLT, Ain_SLT, Aorif_in(i,2), Cdorif_in)$		
$K1_p(i) = \text{hydrDamp}(sa, Aout_SLT, Aout_SLT - Aorif_in(i,2) - Aorif_p, Aorif_in(i,2) * (1 + (Aorif_p * Cdorif_p) ./ (Aorif_in(i,2) * Cdorif_in)), Cdorif_in)$		$K1_p(i) = \text{hydrDamp}(sa, Aout_SLT, Aout_SLT - Aorif_in(i,2) - Aorif_p, Aorif_in(i,2) * (1 + (Aorif_p * Cdorif_p) ./ (Aorif_in(i,2) * Cdorif_in)), Cdorif_in)$		$K1_p(i) = \text{hydrDamp}(sa, Ain_SLT, Ain_SLT, Aorif_in(i,2) * (1 + (Aorif_p * Cdorif_p) ./ (Aorif_in(i,2) * Cdorif_in)), Cdorif_in)$		$K1_p(i) = \text{hydrDamp}(sa, Ain_SLT, Ain_SLT, Aorif_in(i,2) * (1 + (Aorif_p * Cdorif_p) ./ (Aorif_in(i,2) * Cdorif_in)), Cdorif_in)$		
$K3(i) = \text{hydrDamp}(sa, Aout_SLT, Aout_SLT - Aorif_out(i,2), Aorif_out(i,2), Cdorif_out)$		$K3(i) = \text{hydrDamp}(sa, Ain_MF, Ain_MF - Aorif_out(i,2), Aorif_out(i,2), Cdorif_out)$		$K3(i) = \text{hydrDamp}(sa, Ain_SLT, Ain_SLT, Aorif_out(i,2), Cdorif_out)$		$K3(i) = \text{hydrDamp}(sa, Ain_SLT, Ain_SLT + Aout_SLT - Ain_MF, Ain_SLT + Aout_SLT - Ain_MF, Aorif_out(i,2), Cdorif_out)$		
$M1(i) = K1(i) / (Aout_SLT - Aorif_in(i,2))$		$M1(i) = K1(i) / (Aout_SLT - Aorif_in(i,2))$		$M1(i) = K1(i) / Ain_SLT$		$M1(i) = K1(i) / Ain_SLT$		
$M1_p(i) = K1_p(i) / (Aout_SLT - Aorif_in(i,2) - Aorif_p)$		$M1_p(i) = K1_p(i) / (Aout_SLT - Aorif_in(i,2) - Aorif_p)$		$M1_p(i) = K1_p(i) / Ain_SLT$		$M1_p(i) = K1_p(i) / Ain_SLT$		
$M3(i) = K3(i) / (Aout_SLT - Aorif_out(i,2))$		$M3(i) = K3(i) / (Ain_MF - Aorif_out(i,2))$		$M3(i) = K3(i) / Ain_SLT$		$M3(i) = K3(i) / (Ain_SLT + Aout_SLT - Ain_MF)$		
$K2 = \text{hydrDamp}(sa, Ain_MF - Aout_SLT, Ain_MF - Aout_SLT - Arec_in, Arec_in, Cdrec_in)$		$K2 = \text{hydrDamp}(sa, Ain_MF - Aout_SLT, Ain_MF - Aout_SLT - Arec_in, Arec_in, Cdrec_in)$		$K2 = \text{hydrDamp}(sa, Ain_MF - Aout_SLT, Ain_MF - Aout_SLT - Arec_in, Arec_in, Cdrec_in)$		$K2 = \text{hydrDamp}(sa, Ain_MF - Aout_SLT, Ain_MF - Aout_SLT - Arec_in, Arec_in, Cdrec_in)$		
$K4 = \text{hydrDamp}(sa, Ain_MF - Aout_SLT, Ain_MF - Aout_SLT - Arec_out, Arec_out, Cdrec_out)$		$K4 = \text{hydrDamp}(sa, Ain_MF - Aout_SLT, Ain_MF - Aout_SLT - Arec_out, Arec_out, Cdrec_out)$		$K4 = \text{hydrDamp}(sa, Ain_MF - Aout_SLT, Ain_MF - Aout_SLT - Arec_out, Arec_out, Cdrec_out)$		$K4 = \text{hydrDamp}(sa, Ain_MF - Aout_SLT, Ain_MF - Aout_SLT - Arec_out, Arec_out, Cdrec_out)$		
für 1 bis ii		für 1 bis ii		für 1 bis ii		für 1 bis ii		
$M2(i) = M1(i) - K2 / (Ain_MF - Aout_SLT - Arec_in)$		$M2(i) = M1(i) - K2 / (Ain_MF - Aout_SLT - Arec_in)$		$M2(i) = -K2 / (Ain_MF - Aout_SLT - Arec_in)$		$M2(i) = -K2 / (Ain_MF - Aout_SLT - Arec_in)$		
$M4(i) = M3(i) - K4 / (Ain_MF - Aout_SLT - Arec_out)$		$M4(i) = -K4 / (Ain_MF - Aout_SLT)$		$M4(i) = -K4 / (Ain_MF - Aout_SLT - Arec_out)$		$M4(i) = M3(i) - K4 / (Ain_MF - Aout_SLT)$		
quadra = Aorif_in		quadra = Aorif_in		quadra = Aorif_in		quadra = Aorif_in		
quadra(:,2) = K1' + K2		quadra(:,2) = K1' + K2		quadra(:,2) = K1' + K2		quadra(:,2) = K1' + K2		
quadra(:,3) = K3' + K4		quadra(:,3) = K3' + K4		quadra(:,3) = K3' + K4		quadra(:,3) = K3' + K4		
quadra(:,4) = K1_p' + K2		quadra(:,4) = K1_p' + K2		quadra(:,4) = K1_p' + K2		quadra(:,4) = K1_p' + K2		
dporif = Aorif_in		dporif = Aorif_in		dporif = Aorif_in		dporif = Aorif_in		
dporif(:,2) = M1'		dporif(:,2) = M1'		dporif(:,2) = M1'		dporif(:,2) = M1'		
dporif(:,3) = M3'		dporif(:,3) = M3'		dporif(:,3) = M3'		dporif(:,3) = M3'		
dporif(:,4) = M1_p'		dporif(:,4) = M1_p'		dporif(:,4) = M1_p'		dporif(:,4) = M1_p'		
dprec = Aorif_in		dprec = Aorif_in		dprec = Aorif_in		dprec = Aorif_in		
dprec(:,2) = M2'		dprec(:,2) = M2'		dprec(:,2) = M2'		dprec(:,2) = M2'		
dprec(:,3) = M4'		dprec(:,3) = M4'		dprec(:,3) = M4'		dprec(:,3) = M4'		

default_data.m

```
default_data.m
function [d] = default_data
```

global info
info.log.default_data = "aktueller Stand"
cd data_complete
load ('default.mat')
cd ..

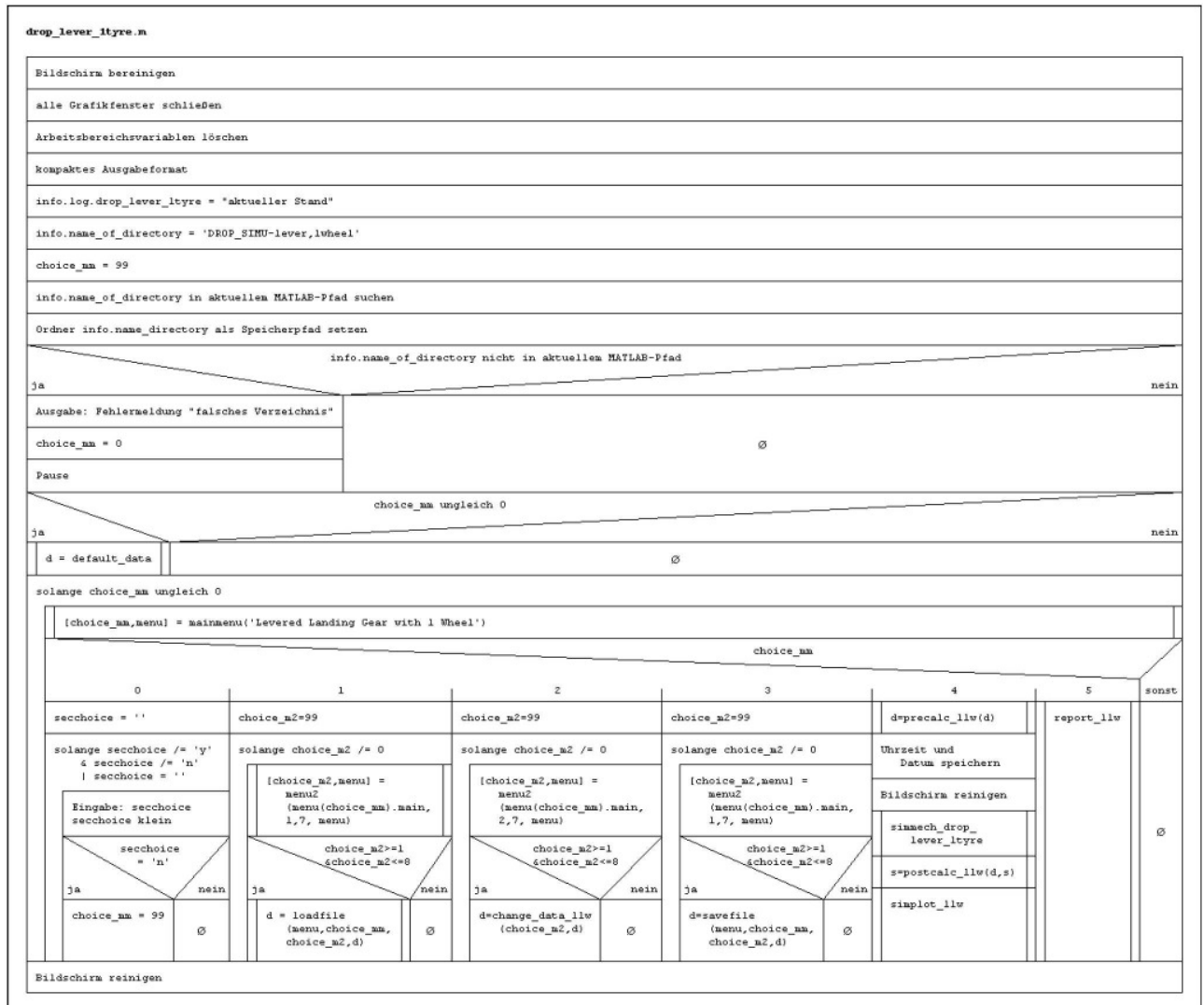
dist_lztor.m

```
dist_lztor.m
[ltor, ztor]=dist_lztor(d1, geom)
```

global info
info.log.dist_lztor = "aktueller Stand"
z=geom.tlz-dl
x=geom.tlx2-geom.tlx1
c=geom.tlu
b=geom.tll
a=sqrt(x^2+z^2)
s=0.5*(a+b+c)
h=sqrt(s*(s-a)*(s-b)*(s-c))*2/a
p=sqrt(c^2-h^2)
theta=atan(x/z)
ltor=p*sin(theta)+h*cos(theta) + geom.tlx1
ztor=z-p*cos(theta)+h*sin(theta)

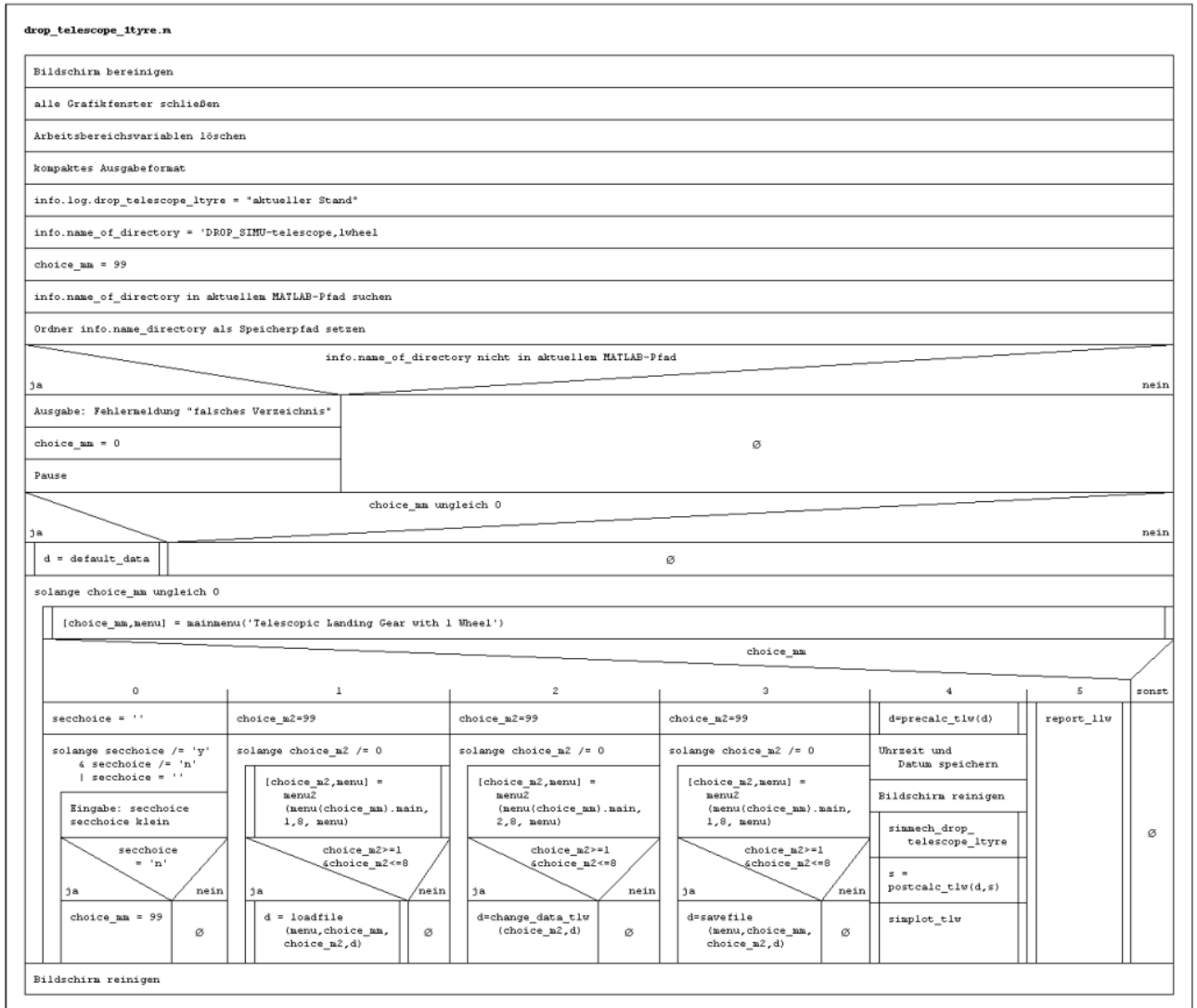
drop_lever_1tyre.m

(*_2tyre.m, drop_semilever_1tyre.m, *_2tyre.m)



drop_telescope_1tyre.m

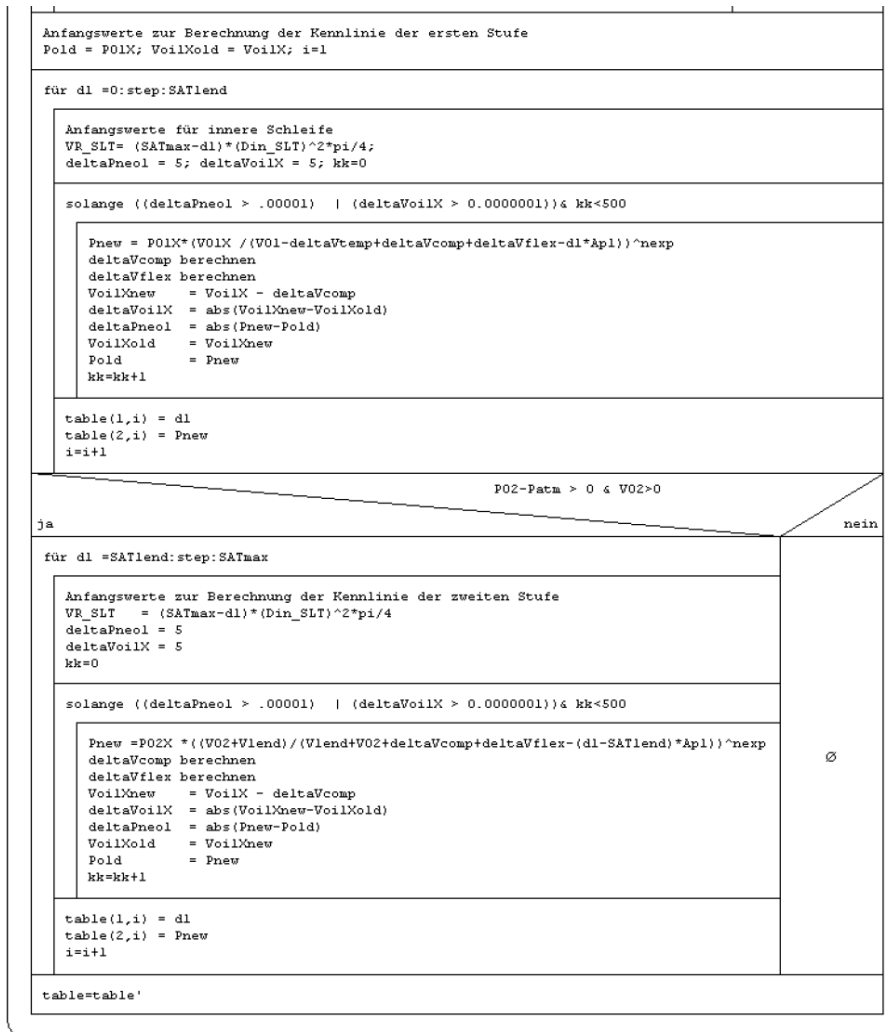
(*_2tyre.m)



gascurve.m

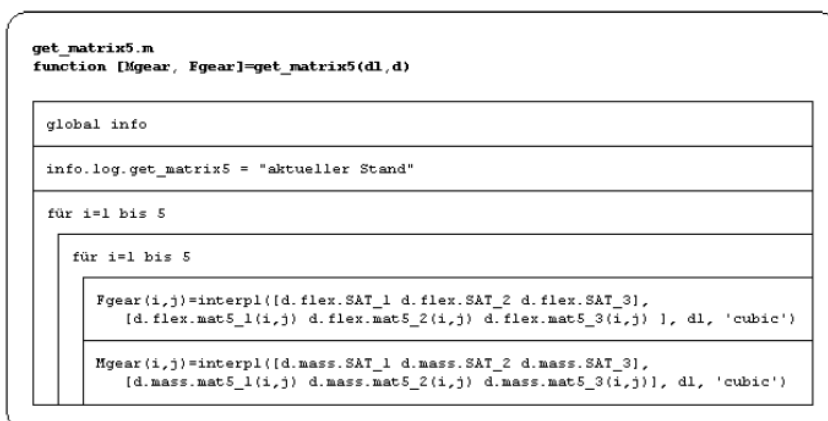
```
gascurve.m
function [table]=gascurve(sa)
```

global info	
info.log.gascurve = "aktueller Stand"	
Variablenübergabe	
Grad Celsius in Kelvin, bar in Pascal, Relativdrücke in Absolutdrücke	
$s_{MF} = (Dout_{MF} - Din_{MF})/2$; $s_{SLT} = (Dout_{SLT} - Din_{SLT})/2$	
$VR_{MF} = SAT_{max} \cdot \pi / 4 \cdot Din_{MF}^2$; $prop_{MF} = Din_{MF} / s_{MF}$;	
$beta_{MF} = Dout_{MF} / Din_{MF}$	
$factor_{MF} = R_{MF} \cdot (2 \cdot beta_{MF}^2 + (1 + ny_{MF}) + 3 \cdot (1 - 2 \cdot ny_{MF})) / (ER_{MF} \cdot (beta_{MF}^2 - 1))$	
$prop_{SLT} = Din_{SLT} / s_{SLT}$; $beta_{SLT} = Dout_{SLT} / Din_{SLT}$	
$factor_{SLT} = (2 \cdot beta_{SLT}^2 + (1 + ny_{SLT}) + 3 \cdot (1 - 2 \cdot ny_{SLT})) / (ER_{SLT} \cdot (beta_{SLT}^2 - 1))$	
$VR_{SLT} = SAT_{max} \cdot (Din_{SLT})^2 \cdot \pi / 4$	
$C_{ET} = -0.0045 \cdot (TempX - 273.15) + 1.17$	
Befüllen: deltaVcomp berechnen deltaVflex berechnen V01 = V01 + deltaVflex + deltaVcomp	
Temperaturänderung: deltaVtemp = V010 * gamma * (TempX - Temp0) V01X = V01 - deltaVtemp; V01X = V010 + deltaVtemp	
Anfangswerte für Iteration setzen deltaVcomp = 0; deltaVflex = 0; deltaV01X = 5; deltaPneol = 5; Pold = P01; V01Xold = V01X; kk=0;	
solange ((deltaPneol > .00001) (deltaV01X > 0.0000001)) & kk < 500	
<pre>Pnew = P01 * (V01 * TempX / Temp0) / (V01X + deltaVcomp + deltaVflex) deltaVcomp berechnen deltaVflex berechnen V01Xnew = V01X - deltaVcomp deltaV01X = abs(V01Xnew - V01Xold) deltaPneol = abs(Pnew - Pold) V01Xold = V01Xnew Pold = Pnew kk=kk+1</pre>	
<pre>V01X = V01Xnew; V01X = V01X + deltaVcomp + deltaVflex; P01X = Pnew; P02X = P02 * TempX / Temp0</pre>	
Restvolumen bei maximaler Einfederung? SATV = (V01X + V02) / Apl	
SATV <= SATmax	
ja	nein
SATmax = SATV - 0.01	
(P02 - Patm > 0) & (V02 > 0)	
ja	nein
Anfangswerte für Iteration zur Berechnung des Endes der ersten Stufe der Gasfeder d1 = V01X / Apl * (1 - (P01X / P02X)^(1/nexp)) Pold = P01X; V01Xold = V01X; deltaP2 = 5; i=1; kk=0	SATlend = SATmax
solange abs(deltaP2) > .00001	
Anfangswerte für innere Schleife: VR_SLT = (SATmax - d1) * (Din_SLT)^2 * pi / 4; deltaPneol = 5; deltaV01X = 5	
solange ((deltaPneol > .00001) (deltaV01X > 0.0000001)) & kk < 500	
<pre>Pnew = P01X * (V01X / (V01 - deltaVtemp + deltaVcomp + deltaVflex - d1 * Apl)) ^ nexp deltaVcomp berechnen deltaVflex berechnen V01Xnew = V01X - deltaVcomp deltaV01X = abs(V01Xnew - V01Xold) deltaPneol = abs(Pnew - Pold) V01Xold = V01Xnew Pold = Pnew kk=kk+1</pre>	
<pre>Vair = V01 - deltaVtemp + deltaVcomp + deltaVflex d1 = (Vair - V01X * (P01X / P02X)^(1/nexp)) / Apl deltaP2 = P02X - Pnew</pre>	

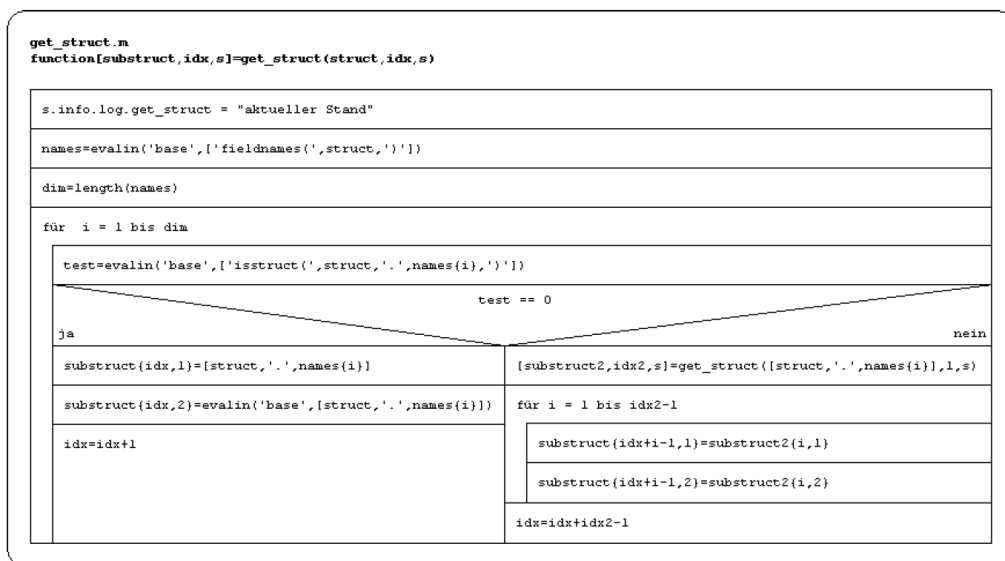


get_matrix5.m

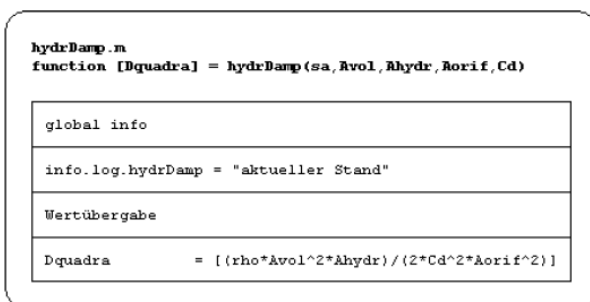
(get_matrix6.m)



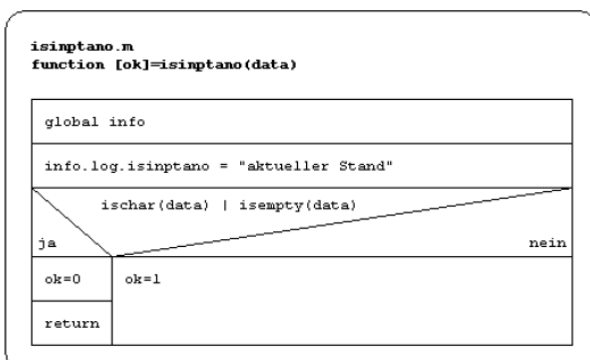
get_struct.m



hydrDamp.m



isinpntano.m



load_runway.m

```

load_runway.m
function [X,Y]=load_runway(d)

global info
info.log.load_runway = "aktueller Stand"

cd data_general
cd runway
load(d.gen.roadFile)
p=polyfit(x,Y,3)
Ycorr=polyval(p,x)
Y = Y-Ycorr
cd ..
cd ..

```

loadchange.m

```

loadchange.m
function [loadname, loaddata]=loadchange(path1,path2)

global info
info.log.loadchange = "aktueller Stand"

Versuche:
cd (path1); cd (path2)
avail=dir
[no, unimportant] =size(avail)
für ii=3:no
    Ausgabe: '<',num2str(ii-2),'> ', avail(ii).name
filename=0
solange filename='' | filename<1 | filename > no-2 | mod(filename,1)/=0
    Eingabe: filename
loaddata=load(avail(filename+2).name)
loadname=avail(filename+2).name
cd ..; cd ..

bei Fehler:
cd ..; cd ..
Bildschirm reinigen
Ausgabe: 'Fehler'
pause

```

loadfile.m

```
loadfile.m
function[d]=loadfile(menu,choice_m1,choice_m2,d)
```

global info
info.log.loadfile = "aktueller Stand"
Bildschirm reinigen
Ausgabe: Kopfzeile
choice_m2>=2
ja nein
eval(['name=d.', menu(choice_m2).lo_sa_ch.struct, '.name;']) name=d.name
Ausgabe: 'Name of current configuration: ',name
Versuche:
cd (menu(choice_m2).lo_sa_ch.dir)
avail=dir
[no, unimportant] =size(avail)
für ii=3:no
Ausgabe: '<',num2str(i-2), '> ', avail(i).name
filename=0
solange filename='' filename<1 filename > no-2 mod(filename,1)/=0
Eingabe: filename
load (avail(filename+2).name)
choice_m2>=2
ja nein
eval(['d.',menu(choice_m2).lo_sa_ch.struct, '=', menu(choice_m2).lo_sa_ch.struct, ';']) Ø
cd ..
bei Fehler:
cd ..
Bildschirm reinigen
Ausgabe: 'Fehler'
pause

mainmenu.m

```

mainmenu.m
function[choice,menu] = mainmenu(text)

global info
info.log.mainmenu = "aktueller Stand"
menu(1:5).main = "Aktion: Laden, Ändern,..."
kmax=5; choice=''
solange choice=''
    Bildschirm reinigen
    Ausgabe: Kopfzeile und Hinweis
    für i=1 bis kmax
        Ausgabe: '< ',num2str(i),'> ',menu(i).main
    Eingabe: choice

```

menu2.m

```

menu2.m
function[choice,menu] = menu2(header ,kmin,kmax, menu)

global info
info.log.menu2 = "aktueller Stand"
menu(1:8).lo_sa_ch.disp = "Beschreibung des Kriteriums der Konfiguration"
menu(1:8).lo_sa_ch.dir = "Name des Speicherordners für Konfigurationsdaten"
menu(1:8).lo_sa_ch.struct = "Speicherstruktur"
choice=99
solange ((choice<kmin | choice>kmax) & (choice~=0)) | choice=''
    Bildschirm reinigen
    Ausgabe: Kopfzeile und Hinweis
    für i=kmin bis kmax
        Ausgabe: '< ',num2str(i),'> ',menu(i).lo_sa_ch.disp
    Eingabe: choice

```

modaldamp.m

```
modaldamp.m
function [K]=modaldamp(Mf,C,km)
```

```
global info
```

```
info.log.modaldamp = "aktueller Stand"
```

```
[T,eval]=eig(C,Mf)
```

```
Diagonalmatrizen Mm und Cm aus Mf und C berechnen
```

```
Diagonalmatrix Km aus Mm, Cm und km berechnen
```

```
K =inv(T')*Km*inv(T)
```

postcalc_t1w.m

(*_t2w.m, *_l1w.m, *_l2w.m, *_sl1w.m, *_sl2w.m)

```
postcalc_t1w.m
function[s]=postcalc_t1w(d,s)
```

```
s.info.log.postcalc_t1w = "aktueller Stand"
```

```
Maximalwerte bestimmen:  
Kräfte, Einfederungen, Geschwindigkeiten
```

```
Lastfaktoren berechnen
```

```
Berechnung des Moments um PP_UP
```

```
Indizes für Spinup und Springback ermitteln
```

```
Mechanische Energien und Arbeit berechnen
```

```
Wirkungsgrad berechnen
```

```
Index für Zeitpunkte von maximalen Moment um PP_UP,  
max. Fz und max. SAT bestimmen
```

postsim.m**postsim.m**

global info

info.log.postsim = "aktueller Stand"

alte Struktur s löschen

str1=evalin('base','who(''s_*'')')

für i=1bis length(str1)

'_' durch '.' ersetzen

's_'-Variablen (Simulink-Ausgabe) löschen

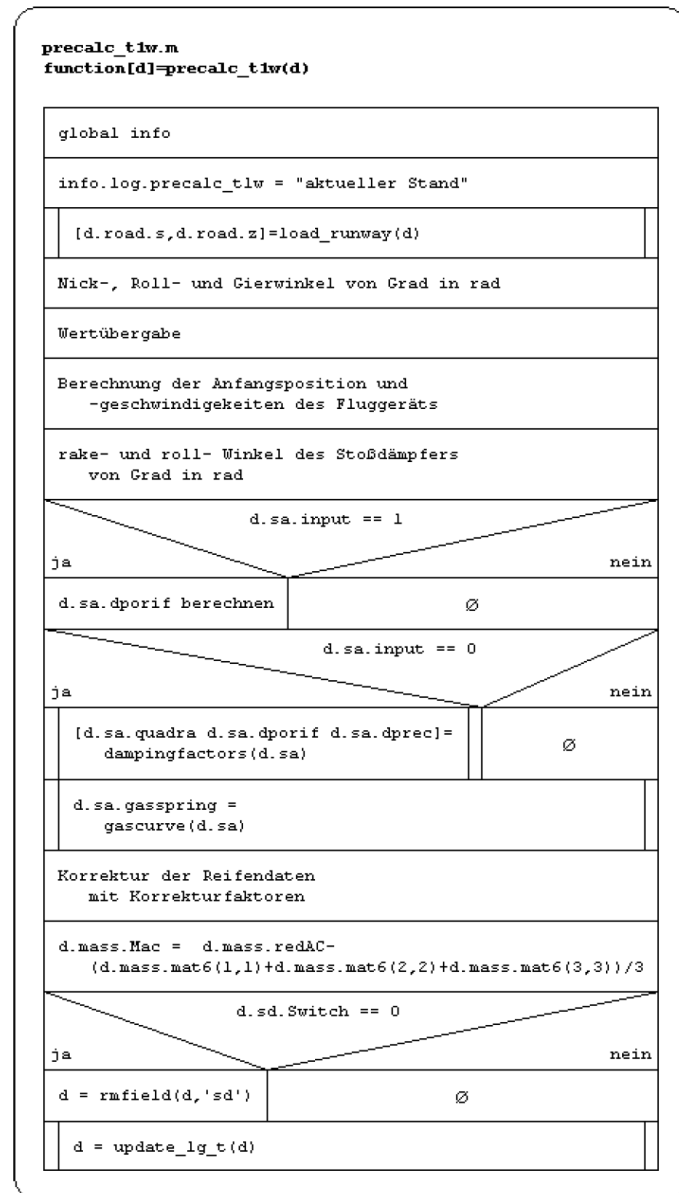
evalin('base',[' s.model.name=get_param(gcs,''Name''); '])

evalin('base',[' s.model.data=d;'])

evalin('base',[' s.info=info;'])

precalc_t1w.m

(*_t2w.m, *_l1w.m, *_l2w.m, *_sl1w.m, *_sl2w.m)



report_t1w.m

(*_t2w.m, *_l1w.m, *_l2w.m, *_sl1w.m, *_sl2w.m)

report_t1w.m	
s.info.log.report_t1w = "aktueller Stand"	
isfield(s,'model')==1	
ja	nein
dclock=s.model.data.clockstr	Bildschirm reinigen
savename=[s.model.data.name,'_',dclock(1:10),'_', dclock(12:13),'h',dclock(15:16),'m']	Ausgabe: "keine Daten zum Speichern"
Bildschirm reinigen	pause
Ausgabe: Informationsbildschirm	
pause	
s=save_inputdata(savename,s)	
s=protocol_t1w(savename,s)	
Versuche:	
cd results; cd data	
save(savename,'s')	
cd ..	
cd graph	
print ('-f1','-dpsc' ,savename)	
print ('-f2:8','-dpsc','-append' ,savename)	
cd ..; cd..	
bei Fehler:	
cd(s.info.folder)	
Bildschirm reinigen	
Ausgabe: Fehlermeldung	
pause	

save_inputdata.m

```
save_inputdata.m
function [s]=save_inputdata(filename,s)
```

```
s.info.log.save_inputdata = "aktueller Stand"
```

```
cd results; cd input
```

```
fid = fopen([filename,'.ipt'],'w')
```

```
Kopfzeile der Eingabe-Zsf.-Datei schreiben
```

```
[data,number,s]=get_struct('d',l,s)
```

```
für i=1 bis number-1
```

```
fprintf(fid,['\n',data(i,1),':\n']
```

```
data(i,2) vom Typ char
```

```
ja
```

```
nein
```

```
fprintf(fid,['%s \n'],data(i,2))
```

```
datasize=size(data(i,2))
```

```
length(datasize)>=3
```

```
ja
```

```
nein
```

```
fprintf(fid,
'!!!!multidimensional
matrix!!!! \n')
```

```
für m=1 bis datasize(1)
```

```
fprintf(fid,['%20.6f'],data(i,2)(m,:))
```

```
fprintf(fid,['\n'],data(i,2)(m,:))
```

```
fclose(fid)
```

```
cd ..; cd ..
```

update_lg_t.m

(update_lg_l.m)

```
update_lg_t.m
function [d]=update_lg_t(d)
```

```
global info
```

```
info.log.update_lg_t = "aktueller Stand"
```

```
dl=[-0.01:0.01:d.sa.SATmax+0.01]; d.flex.dl=dl
```

```
ltor=zeros(size(dl)); ztor=zeros(size(dl))
```

```
für i=1 bis length(dl)
```

```
[ltor(i),ztor(i)]=dist_lztor(dl(i),d.geom)
```

```
d.geom.ltor=[dl' ltor']; d.geom.ztor=[dl' ztor']
```

```
Definieren der Rotationsmatrizen
```

```
für i=1 bis length(dl)
```

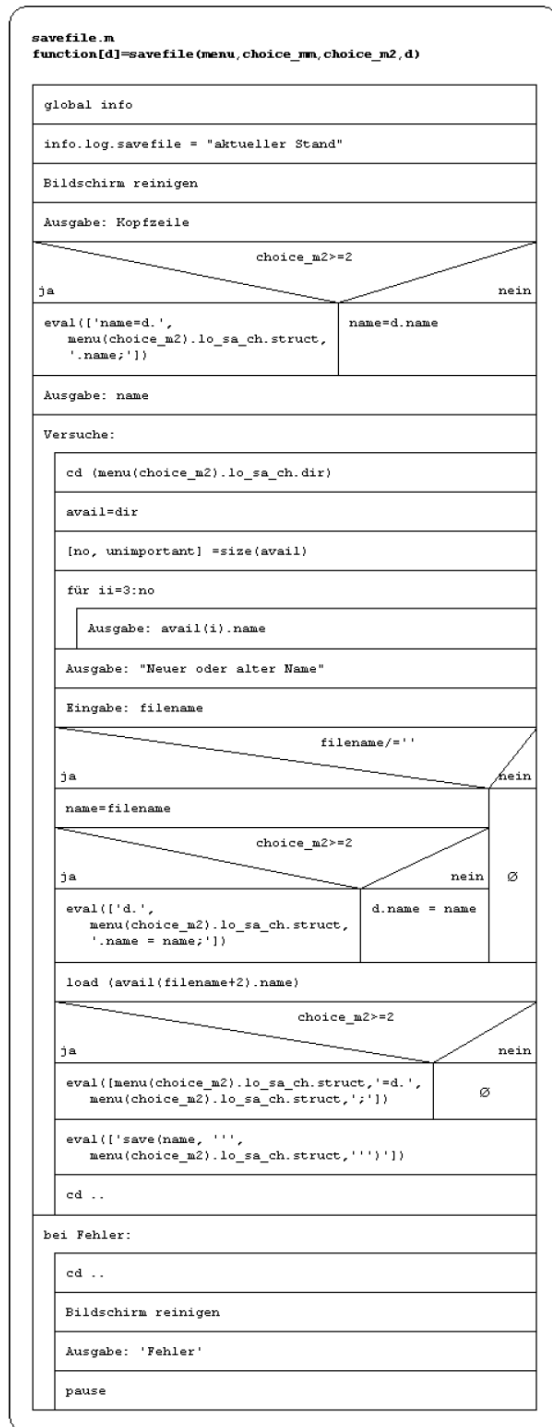
```
[Hgear Fgear] = get_matrix5(dl(i),d)
```

```
Hgear und Fgear in das
Stoßdämpferkoordinatensystem drehen
```

```
d.flex.C(:,i) = inv(Fgear)
```

```
d.flex.K(:,i) =
real(modaldamp(Hgear,d.flex.C(:,i),d.flex.damp))
```

savefile.m



Anhang C

Übersicht der Programmvariablen

In diesem Abschnitt werden die Variablen der Eingabestruktur **d** und der Ausgabestruktur **s** erklärt. Bei ersteren erfolgt dabei die Unterscheidung zwischen Parametern die direkt vom Benutzer eingegeben werden und solchen, die aus den eingegebenen Daten berechnet oder anhand dieser geladen werden. Die Zusammenstellung umfasst die Eingabeparameter für alle Fahrwerkskonfigurationen. Auf die Unterschiede zwischen diesen wird eingegangen. Vektoren und Matrizen sind durch fette eckige Klammern [...], Einheiten durch normale eckige Klammern [...] und Hinweise durch runde Klammern (...) gekennzeichnet. Zum besseren Verständnis der Eingabeformate sei an dieser Stelle auch auf die Musterdateien (**default.***) hingewiesen.

C.1 Eingabeparameter

Tabelle C.1 Eingabeparameter

Variable	Typ	Beschreibung
d.flex.damp	real	Dämpfungsverhältnis der Fahrwerksstruktur [-]
d.flex.file5_1	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der [5 x 5]-Flexibilitätsmatrix bei d.flex.SAT_1 (nur Teleskop) (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.flex.file5_2	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der [5 x 5]-Flexibilitätsmatrix bei d.flex.SAT_2 (nur Teleskop) (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.flex.file5_3	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der [5 x 5]-Flexibilitätsmatrix bei d.flex.SAT_3 (nur Teleskop) (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.flex.file6_1	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der [6 x 6]-Flexibilitätsmatrix bei d.flex.SAT_1 (nur Schwinge/Halbschwinge) (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.flex.file6_2	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der [6 x 6]-Flexibilitätsmatrix bei d.flex.SAT_2 (nur Schwinge/Halbschwinge) (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)

Variable	Typ	Beschreibung
d.flex.file6_3	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der [6 x 6]-Flexibilitätsmatrix bei d.flex.SAT_3 (nur Schwinge/Halbschwinge) (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.flex.name	char	Name der Konfiguration der Flexibilitätseigenschaften (beim Speichern auch als Dateiname verwendet, daher einige Sonderzeichen nicht zulässig)
d.flex.SAT_1	real	Einfederung des Dämpfers zugehörig zu d.flex.file5_1 bzw. d.flex.file6_1
d.flex.SAT_2	real	Einfederung des Dämpfers zugehörig zu d.flex.file5_2 bzw. d.flex.file6_2
d.flex.SAT_3	real	Einfederung des Dämpfers zugehörig zu d.flex.file5_3 bzw. d.flex.file6_3
d.gen.brake_fun	real	Matrix des zeitlichen Verlaufs des Radbremsmomentes (nur ein Rad) [Zeit [s], Bremsmoment [Nm]]
d.gen.fs	real	Abtastrate/Ausgabefrequenz der Ergebnisse [1/s]
d.gen.lbrake_fun	real	Matrix des zeitlichen Verlaufs des Radbremsmomentes (linkes Rad, bei zwei Rädern) [Zeit [s], Bremsmoment [Nm]]
d.gen.lift_fun	real	Matrix des zeitlichen Verlaufs des Auftriebes normiert mit der Gewichtskraft [Zeit [s], Auftrieb/Gewicht [-]]
d.gen.name	char	Name der Konfiguration der allgemeinen Einstellungen und Randbedingungen (beim Speichern auch als Dateiname verwendet, daher einige Sonderzeichen nicht zulässig)
d.gen.omega	real	Umfangsgeschwindigkeit des Rades bei Stoßbeginn [rad/s]
d.gen.pitch_fun0	real	Matrix zur Beschreibung des Nickwinkels ("+" = Nase hoch, im Bodenkoordinatensystem) über der Zeit [Zeit [s], Nickwinkel [°]]
d.gen.play.lat	real	seitliches Dämpferspiel, senkrecht zur Dämpferachse [m] (nur bei Teleskop)
d.gen.play.long	real	Dämpferspiel in Fahrrichtung, senkrecht zur Dämpferachse [m] (nur bei Teleskop)
d.gen.play.yaw	real	Dämpferspiel um die Dämpferachse [rad] (nur bei Teleskop)
d.gen.rbrake_fun	real	Matrix des zeitlichen Verlaufs des Radbremsmomentes (rechtes Rad, bei zwei Rädern) [Zeit [s], Bremsmoment [Nm]]
d.gen.roadFile	char	Name der mat-Datei mit den Fahrbahndaten (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)

Variable	Typ	Beschreibung
d.gen.roll_fun0	real	Matrix zur Beschreibung des Rollwinkels ("+" = links runter, , im Bodenkoordinatensystem) über der Zeit [Zeit [s], Rollwinkel [°]]
d.gen.side_fun	real	Matrix des zeitlichen Verlaufs der äußeren Seitenkraft (pos. in Fahrtrichtung nach rechts) [Zeit [s], Kraft [N]]
d.gen.time	real	Simulationsdauer [s]
d.gen.vx	real	horizontale Geschwindigkeit [m/s] zu Simulationsbeginn (in Bodenkoordinaten, daher negativ, wenn vorwärts!!!)
d.gen.vy	real	Seitengeschwindigkeit [m/s] zu Simulationsbeginn (in Bodenkoordinaten, positiv nach rechts)
d.gen.vz	real	Sinkgeschwindigkeit [m/s] zu Simulationsbeginn (in Bodenkoordinaten, daher negativ für Sinken!!!)
d.gen.x_wheel	real	Position des Radmittelpunktes in x-Richtung auf der Fahrbahn zu Simulationsbeginn [m] (in Bodenkoordinaten, daher negativ, wenn vorwärts!!!)
d.gen.yaw_fun0	real	Matrix zur Beschreibung des Gierwinkels ("+" = Nase nach links, im Bodenkoordinatensystem) über der Zeit [Zeit [s], Gierwinkel [°]]
d.gen.z_wheel	real	Abstand des Rades zur Fahrbahn in z-Richtung zu Simulationsbeginn [m] (im Bodenkoordinatensystem)
d.geom.name	char	Name der Konfiguration der Fahrwerksgeometrie (beim Speichern auch als Dateiname verwendet, daher einige Sonderzeichen nicht zulässig)
d.geom.P	real	Abstand des oberen Lagers von der Radachse (bei Teleskopfahrwerken) bzw. bis zum unteren Gelenk des Stoßdämpfers (Halbschwinge) parallel zur Dämpferachse gemessen [m]
d.geom.PP_UP	real	Befestigungspunkt des Fahrwerks am Fluggerät, auf den die Lasten bezogen werden [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.PPIV	real	Drehpunkt der Schwinge (nur bei Schwinge) [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.PPIV_MF	real	Punktkoordinaten des Gelenkes zwischen Verbinder und Hauptgehäuse beim Halbschwingenfahrwerk [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.PPIV_TA	real	Punktkoordinaten des Gelenkes zwischen Schwinge und Verbinder beim Halbschwingenfahrwerk [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.PPIVa1	real	erster Punkt für den Richtungsvektor der Drehachse der Schwinge/Halbschwinge (frei im Raum verschiebbar) [x [m], y [m], z[m]]

Variable	Typ	Beschreibung
d.geom.PPIVa2	real	zweiter Punkt für den Richtungsvektor der Drehachse der Schwinge/Halbschwinge (frei im Raum verschiebbar) [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.PSTL	real	Koordinaten des unteren Gelenks am Stoßdämpfer (nur bei Schwinge/Halbschwinge) [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.PSTU	real	oberer Befestigungspunkt des Stoßdämpfers (nur bei Schwinge/Halbschwinge) [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.PTA	real	Radmittelpunkt auf der Radachse bei nur einem Rad (z-Koordinate = Abstand der Radachse vom Boden!) [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.PTA_L	real	Radmittelpunkt auf der Radachse (linkes Rad, bei zwei Rädern) (z-Koordinate = Abstand der Radachse vom Boden!) [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.PTA_R	real	Radmittelpunkt auf der Radachse (rechtes Rad, bei zwei Rädern) (z-Koordinate = Abstand der Radachse vom Boden!) [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.pushpull	int	Schalter für die Wahl der Stoßdämpferart 1 → Druckdämpfer -1 → Zugdämpfer (nur bei Schwinghebelfahrwerk)
d.geom.Q	real	Abstand zwischen oberen und unteren Lager im unbelasteten Zustand parallel zur Dämpferachse gemessen [m] (nur Teleskop+Halbschwinge)
d.geom.rake0	real	Neigungswinkel des Dämpfers um die Nickachse ("+" = Nase hoch) im Einbauzustand [°] (nur Teleskop+Halbschwinge)
d.geom.Rb	real	mittlerer Lagerradius [m] (nur Teleskop)
d.geom.roll0	real	Neigungswinkel des Dämpfers um die Rollachse ("+" = links runter) im Einbauzustand [°] (nur Teleskop+Halbschwinge)
d.geom.SLT_AXLE	real	Schnittpunkt der Dämpferlängsachse mit der Senkrechten dazu, die durch den Mittelpunkt der Radachse verläuft (nur bei Teleskop) (z-Koordinate = Abstand der Radachse vom Boden!) [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.TA_AXLE	real	Befestigungspunkt der Radachse an der Schwinge/Halbschwinge (z-Koordinate = Abstand der Radachse vom Boden!) [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.tll	real	Länge des unteren <i>torque link</i> [m] (nur Teleskop)
d.geom.tlu	real	Länge des oberen <i>torque link</i> [m] (nur Teleskop)

Variable	Typ	Beschreibung
d.geom.tlx1	real	Abstand des Befestigungspunktes des oberen <i>torque links</i> am MF von der Dämpferachse [m] (nur Teleskop)
d.geom.tlx2	real	Abstand des Befestigungspunktes des unteren <i>torque links</i> an der ungefederten Masse von der Dämpferachse [m] (nur Teleskop)
d.geom.tlz	real	Abstand der Befestigungspunkte der <i>torque links</i> parallel zur Dämpferachse [m] (nur Teleskop)
d.geom.UP_BEAR	real	Schwerpunkt des MF (nur Teleskop/Halbschwinge) [x [m], y [m], z[m]]
d.mass.file5_1	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der [5 x 5]-Massenmatrix bei d.mass.SAT_1 (nur Teleskop) (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.mass.file5_2	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der [5 x 5]-Massenmatrix bei d.mass.SAT_2 (nur Teleskop) (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.mass.file5_3	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der [5 x 5]-Massenmatrix bei d.mass.SAT_3 (nur Teleskop) (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.mass.file6	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der [6 x 6]-Massenmatrix (nur Teleskop) (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.mass.file6_1	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der [6 x 6]-Massenmatrix bei d.mass.SAT_1 (nur Schwinge/Halbschwinge) (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.mass.file6_2	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der [6 x 6]-Massenmatrix bei d.mass.SAT_2 (nur Schwinge/Halbschwinge) (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.mass.file6_3	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der [6 x 6]-Massenmatrix bei d.mass.SAT_2 (nur Schwinge/Halbschwinge) (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.mass.grav	real	Fallbeschleunigung [m/s ²] (Bodenkoordinatensystem, d.h. negativ!)
d.mass.lp	real	Polares Trägheitsmoment der drehenden Teile um die Radachse (Rad+Bremse...) [kg·m ²]
d.mass.lp_l	real	Polares Trägheitsmoment der drehenden Teile um die Radachse (linkes Rad) [kg·m ²] (nur bei zwei Rädern)

Variable	Typ	Beschreibung
d.mass.lp_r	real	Polares Trägheitsmoment der drehenden Teile um die Radachse (rechtes Rad) [kg·m ²] (nur bei zwei Rädern)
d.mass.lp_TA	real	Polares Trägheitsmoment der Schwinge [kg·m ²] (bei Schwingenfahwerk um d.geom.PPIV, bei Halbschwinge um d.geom.PSTL)
d.mass.lzdummy	real	virtuelles, polares Trägheitsmoment von SLT um die Dämpferachse [kg·m ²] (nur Teleskop, für Shimmy-Analyse)
d.mass.name	char	Name der Massenkombifiguration (beim Speichern auch als Dateiname verwendet, daher einige Sonderzeichen nicht zulässig)
d.mass.redAC	real	reduzierte Stoßmasse des Fluggeräts [kg]
d.mass.SAT_1	real	Einfederung des Dämpfers zugehörig zu d.mass.file5_1 bzw. d.mass.file6_1
d.mass.SAT_2	real	Einfederung des Dämpfers zugehörig zu d.mass.file5_2 bzw. d.mass.file6_2
d.mass.SAT_3	real	Einfederung des Dämpfers zugehörig zu d.mass.file5_2 bzw. d.mass.file6_3
d.mass.unbal	real	unwuchtige Masse des Reifens [kg] (mit Abstand d.tyre.R0 von der Radachse)
d.mass.unbal_l	real	unwuchtige Masse des linken Reifens [kg] (mit Abstand d.tyre.R0 von der Radachse) (nur bei zwei Rädern)
d.mass.unbal_r	real	unwuchtige Masse des rechten Reifens [kg] (mit Abstand d.tyre.R0 von der Radachse) (nur bei zwei Rädern)
d.mass.unspr	real	ungefederte Masse [kg] (nur Schwinge/Halbschwinge)
d.name	char	Name der gesamten Fahrwerkskombifiguration (beim Speichern auch als Dateiname verwendet, daher einige Sonderzeichen nicht zulässig)
d.sa.AhFile	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der hydraulischen Fläche des Stoßdämpfers (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.sa.AirPerc	real	Anteil des im Dämpferöl gelösten Gases [%]
d.sa.AoinFile	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei des Querschnitts der Hauptdrossel beim Einfedern (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)

Variable	Typ	Beschreibung
d.sa.AooutFile	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei des Querschnitts der Hauptdrossel beim Ausfedern (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.sa.Aorif_p	real	Querschnittsfläche der druckabhängigen Drossel [m ²] (nur beim Einfedern aktiv)
d.sa.Apneu	real	pneumatische Fläche des Dämpfers [m ²]
d.sa.Arec_in	real	Querschnittsfläche der Recoil-Drossel beim Einfedern [m ²]
d.sa.Arec_out	real	Querschnittsfläche der Recoil-Drossel beim Ausfedern [m ²]
d.sa.Bref	real	Referenzwertes des Kompressibilitätsmoduls [bar]
d.sa.c_bump	real	Anschlagsteifigkeit des Stoßdämpfers [N/m]
d.sa.Cdorif_in	real	Durchflusskoeffizient der Hauptdrossel beim Einfedern [-]
d.sa.Cdorif_out	real	Durchflusskoeffizient der Hauptdrossel beim Ausfedern [-]
d.sa.Cdorif_p	real	Durchflusskoeffizient der druckabhängigen Drossel [-]
d.sa.Cdrec_in	real	Durchflusskoeffizient der Recoil-Drossel beim Einfedern [-]
d.sa.Cdrec_out	real	Durchflusskoeffizient der Recoil-Drossel beim Ausfedern [-]
d.sa.Din_MF	real	innerer Durchmesser MF [m]
d.sa.Din_SLT	real	innerer Durchmesser SLT [m]
d.sa.Dout_MF	real	äußerer Durchmesser MF [m]
d.sa.Dout_SLT	real	äußerer Durchmesser SLT [m]
d.sa.dprecFile	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei des Faktors zur Berechnung der Druckdifferenz zwischen Recoil-Kammer und Gasfeder (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.sa.dSATHydr	real	Schrittweite zur Berechnung der Dämpfungsfaktoren des Stoßdämpfers [m]
d.sa.dSATpneu	real	Schrittweite zur Berechnung der Kennlinie der Gasfeder des Stoßdämpfers [m]
d.sa.ER_MF	real	Elastizitätsmodul des Hauptdämpfergehäuses MF [N/m ²]
d.sa.ER_SLT	real	Elastizitätsmodul des Gleitrohres SLT [N/m ²]
d.sa.gamma	real	thermischer Volumendehnungskoeffizient der hydraulischen Flüssigkeit [1/K]
d.sa.input	int	Schalter für die Wahl des Eingabemodus für die Drosselberechnung 0 → Berechnung anhand der Eingabe 1 → direkte Eingabe

Variable	Typ	Beschreibung
d.sa.Mybear	real	Lagerreibungskoeffizient [-]
d.sa.Myhydr	real	Reibungskoeffizient für die hydraulische Dichtungsreibung [-]
d.sa.Mypneu	real	Reibungskoeffizient für die pneumatische Dichtungsreibung [-]
d.sa.name	char	Name der Stoßdämpferkonfiguration (beim Speichern auch als Dateiname verwendet, daher einige Sonderzeichen nicht zulässig)
d.sa.nexp	real	Polytropenexponent der Gasfeder [-]
d.sa.ny_MF	real	Querkontraktionszahl MF [-]
d.sa.ny_SLT	real	Querkontraktionszahl SLT [-]
d.sa.P01	real	Fülldruck der ersten Stufe der Gasfeder bei d.sa.Temp0 [bar]
d.sa.P02	real	Fülldruck der zweiten Stufe der Gasfeder bei d.sa.Temp0 [bar] (bei nur einer Stufe des Stoßdämpfers Wert zu Null setzen oder unerreichbar hoch setzen)
d.sa.Patm	real	Umgebungsdruck beim Stoß [bar]
d.sa.Porif_p	real	Druck zum Öffnen der druckabhängigen Drossel [bar] (zum Deaktivieren unerreichbar hohen Druck wählen)
d.sa.quadFile	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei des quadratischen Dämpfungsfaktors des gesamten Stoßdämpfers (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.sa.rho	real	Dichte der hydraulischen Flüssigkeit [kg/m ³]
d.sa.SATmax	real	maximaler Dämpferweg [m]
d.sa.SWorif	int	Schalter für die Platzierung der Drossel 0 → Anbringung der Drossel am Gleitrohr 1 → Anbringung der Drossel am MF
d.sa.SWrec	int	Schalter für den Fluss des Öls aus der Recoil Kammer beim Ausfedern 0 → Fluss in MF 1 → Fluss in SLT
d.sa.Temp0	real	Temperatur beim Befüllen des Dämpfers [°C]
d.sa.TempX	real	Temperatur beim Landestoß [°C]
d.sa.V01	real	Füllvolumen des Dämpfergases der ersten Stufe bei d.sa.Temp0 [m ³]
d.sa.V02	real	Füllvolumen des Dämpfergases der zweiten Stufe bei d.sa.Temp0 [m ³] (zum Deaktivieren auf Null setzen)
d.sa.Voil0	real	Füllvolumen der hydraulischen Flüssigkeit bei d.sa.Temp0 [m ³]
d.sd.damp_lin	real	lineare Dämpfung des Shimmy Damper [N·s/m]

Variable	Typ	Beschreibung
d.sd.damp_quad	real	quadratische Dämpfung des Shimmy Damper [$N \cdot s^2/m^2$]
d.sd.name	char	Name der Shimmy-Damper-Konfiguration (beim Speichern auch als Dateiname verwendet, daher einige Sonderzeichen nicht zulässig)
d.sd.spring	real	Matrix der Federkennlinie des SD [Federweg [m], Federkraft [N]]
d.sd.Switch	int	Schalter für die Aktivierung des SD 0 → deaktiviert 1 → aktiviert
d.tyre.a_c	real	dynamischer Korrekturfaktor für die halbe Kontaktlänge des Reifens [-]
d.tyre.aFile	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der halben Kontaktlänge des Reifens (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.tyre.Cfa_c	real	dynamischer Korrekturfaktor für die Kurvensteifigkeit des Reifens [-]
d.tyre.CfaFile	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der Kurvensteifigkeit des Reifens (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.tyre.Cma_c	real	dynamischer Korrekturfaktor für das Selbstausrichtungsmoment des Reifens [-]
d.tyre.CmaFile	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei des Selbstausrichtungsmoments des Reifens (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.tyre.defl_c	real	dynamischer Korrekturfaktor für die Federkennlinie des Reifens [-]
d.tyre.deflFile	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der Federkennlinie des Reifens (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.tyre.l.*	struct	Parameter für den linken Reifen (bei zwei Rädern), analog zu d.tyre.*
d.tyre.name	char	Name der Reifenkonfiguration (beim Speichern auch als Dateiname verwendet, daher einige Sonderzeichen nicht zulässig)
d.tyre.PCX1	real	Faktor PCX1 für MagicFormula der Reifenreibung
d.tyre.PDX1	real	Faktor PDX1 für MagicFormula der Reifenreibung
d.tyre.PDX2	real	Faktor PDX2 für MagicFormula der Reifenreibung
d.tyre.PKX1	real	Faktor PKX1 für MagicFormula der Reifenreibung
d.tyre.r.*	struct	Parameter für den rechten Reifen (bei zwei Rädern), analog zu d.tyre.*
d.tyre.R0	real	unverformter Reifenradius [m]

Variable	Typ	Beschreibung
d.tyre.sigma_c	real	dynamischer Korrekturfaktor für die Spannungslänge des Reifens [-]
d.tyre.sigmaFile	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei der Spannungslänge des Reifens (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.tyre.slip	int	Schalter für die Wahl der Eingabe der Reifenreibung am Boden 0 → selbst definierter Zusammenhang zwischen Reifenreibung und Schlupf (d.tyre.slipFile) 1 → MagicFormula
d.tyre.slipFile	char	Name der zu ladenden ASCII-Datei des Reibungskoeffizienten zwischen Reifen und Boden (Eingabe durch Auswahl im Menü, Daten müssen vorher in geeigneter Form abgespeichert werden)
d.tyre.sym	int	Schalter für die Reifenkonfiguration 0 → linker Reifen ≠ rechter Reifen 1 → linker Reifen = rechter Reifen (nur bei zwei Rädern)

C.2 Berechnete und geladene Parameter

Tabelle C.2 Berechnete und geladene Parameter für die Simulation

Variable	Typ	Beschreibung
d.clock	real	Vektor mit der Uhrzeit des Simulationsstarts [Jahr Monat Tag Stunde Minute Sekunde]
d.clockstr	char	Uhrzeit des Simulationsstarts, Bsp. 2007-12-31 23:59:59
d.flex.C	real	Steifigkeitsmatrizen des Fahrwerks für $-0.01 \text{ m} \leq s_{SAT} \leq s_{SAT \text{ max}} + 0.01 \text{ m}$ (bei Teleskopfahrwerken $[5 \times 5 \times (s_{SAT \text{ max}} [\text{m}] + 0,03\text{m})/0,01]$, bei Schwingen- und Halbschwingenfahrwerken $[6 \times 6 \times (s_{SAT \text{ max}} [\text{m}] + 0,03\text{m})/0,01]$)
d.flex.dl	real	Vektor der Einfederung [-0.01m ... ($s_{SAT \text{ max}} + 0.01 \text{ m}$)]
d.flex.K	real	Dämpfungsmatrizen des Fahrwerks für $-0.01 \text{ m} \leq s_{SAT} \leq s_{SAT \text{ max}} + 0.01 \text{ m}$ (bei Teleskopfahrwerken $[5 \times 5 \times (s_{SAT \text{ max}} [\text{m}] + 0,03\text{m})/0,01]$, bei Schwingen- und Halbschwingenfahrwerken $[6 \times 6 \times (s_{SAT \text{ max}} [\text{m}] + 0,03\text{m})/0,01]$)
d.flex.mat5_1	real	[5 x 5]-Flexibilitätsmatrix entsprechend d.flex.file5_1 bei Einfederung d.flex.SAT_1 (nur Teleskop, im Flugzeugkoordinatensystem)
d.flex.mat5_2	real	[5 x 5]-Flexibilitätsmatrix entsprechend d.flex.file5_2 bei Einfederung d.flex.SAT_2 (nur Teleskop, im Flugzeugkoordinatensystem)
d.flex.mat5_3	real	[5 x 5]-Flexibilitätsmatrix entsprechend d.flex.file5_2 bei Einfederung d.flex.SAT_3 (nur Teleskop, im Flugzeugkoordinatensystem)
d.flex.mat6_1	real	[6 x 6]-Flexibilitätsmatrix entsprechend d.flex.file6_1 bei Einfederung d.flex.SAT_1 (nur Schwinge/Halbschwinge, im Flugzeugkoordinatensystem)
d.flex.mat6_2	real	[6 x 6]- Flexibilitätsmatrix entsprechend d.flex.file6_2 bei Einfederung d.flex.SAT_2 (nur Schwinge/Halbschwinge, im Flugzeugkoordinatensystem)
d.flex.mat6_3	real	[6 x 6]-Flexibilitätsmatrix entsprechend d.flex.file6_3 bei Einfederung d.flex.SAT_3 (nur Schwinge/Halbschwinge, im Flugzeugkoordinatensystem)
d.gen.pitch_fun	real	Matrix zur Beschreibung des Nickwinkels ("+" = Nase hoch) über der Zeit [Zeit [s], Nickwinkel [rad]]
d.gen.roll_fun	real	Matrix zur Beschreibung des Rollwinkels ("+" = links runter) über der Zeit [Zeit [s], Rollwinkel [rad]]
d.gen.yaw_fun	real	Matrix zur Beschreibung des Gierwinkels ("+" = Nase nach links) über der Zeit [Zeit [s], Gierwinkel [rad]]
d.geom.ltor	real	Matrix mit dem Hebelarm des SD abhängig von der Einfederung für $-0.01 \text{ m} \leq s_{SAT} \leq s_{SAT \text{ max}} + 0.01 \text{ m}$ [SAT [m], ltor [m]]

Variable	Typ	Beschreibung
d.geom.PIVax	real	Richtungsvektor der Drehachse der Schwinge (nur bei Schwinge/Halbschwinge) [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.rake	real	Neigungswinkel des Dämpfers um die Nickachse ("+" = Nase hoch) im Einbauzustand [rad] (nur Teleskop+Halbschwinge)
d.geom.roll	real	Neigungswinkel des Dämpfers um die Rollachse ("+" = links runter) im Einbauzustand [rad] (nur Teleskop+Halbschwinge)
d.geom.SAdir	real	
d.geom.SARot	real	Richtungsvektor einer Drehachse des oberen Gelenkes des Stoßdämpfers (nur bei Schwinge) [x [m], y [m], z[m]]
d.geom.TA_angle0	real	Schwingenwinkel zu Stoßbeginn relativ zur Horizontalen [rad] (nur Schwinge/Halbschwinge)
d.geom.ztor	real	Matrix mit dem Abstand des SD von der Radachse, parallel zur Dämpferachse, abhängig von der Einfederung für $-0.01 \text{ m} \leq s_{SAT} \leq s_{SAT \text{ max}} + 0.01 \text{ m}$ [SAT [m], ztor [m]]
d.init.cond	real	Vektor mit der Anfangsbedingungen des Landestoßes [x [m], y [m], z[m], v _x [m/s], v _y [m/s], v _z [m/s]]
d.mass.Mac	real	Masse des Fluggeräts exkl. ungefederter Masse [kg]
d.mass.mat5_1	real	[5 x 5]-Massenmatrix entsprechend d.mass.file5_1 bei Einfederung d.mass.SAT_1 (nur Teleskop, im Flugzeugkoordinatensystem)
d.mass.mat5_2	real	[5 x 5]-Massenmatrix entsprechend d.mass.file5_2 bei Einfederung d.mass.SAT_2 (nur Teleskop, im Flugzeugkoordinatensystem)
d.mass.mat5_3	real	[5 x 5]-Massenmatrix entsprechend d.mass.file5_2 bei Einfederung d.mass.SAT_3 (nur Teleskop, im Flugzeugkoordinatensystem)
d.mass.mat6	real	[6 x 6]-Massenmatrix entsprechend d.mass.file6 (nur Teleskop)
d.mass.mat6_1	real	[6 x 6]-Massenmatrix entsprechend d.mass.file6_1 bei Einfederung d.mass.SAT_1 (nur Schwinge/Halbschwinge, im Flugzeugkoordinatensystem)
d.mass.mat6_2	real	[6 x 6]-Massenmatrix entsprechend d.mass.file6_2 bei Einfederung d.mass.SAT_2 (nur Schwinge/Halbschwinge, im Flugzeugkoordinatensystem)
d.mass.mat6_3	real	[6 x 6]-Massenmatrix entsprechend d.mass.file6_3 bei Einfederung d.mass.SAT_3 (nur Schwinge/Halbschwinge, im Flugzeugkoordinatensystem)
d.road.s	real	Vektor der Fahrbahnposition für Kennfeld mit Fahrbahnunebenheiten [m]
d.road.z	real	Vektor der Fahrbahnposition für Kennfeld mit Fahrbahnunebenheiten [m]
d.sa.Ahydr	real	Matrix mit der hydraulischen Fläche des Dämpfers abhängig von der Einfederung [SAT [m], A _{hydr} beim Einfedern [m ²], A _{hydr} beim Ausfedern [m ²]]

Variable	Typ	Beschreibung
d.sa.Aorif_in	real	Matrix mit dem Querschnitt der Hauptdrossel beim Einfedern abhängig vom Federweg [SAT [m], Aorif_in [m ²]]
d.sa.Aorif_out	real	Matrix mit dem Querschnitt der Hauptdrossel beim Ausfedern abhängig vom Federweg [SAT [m], Aorif_out [m ²]]
d.sa.dporif	real	Faktor zur Berechnung der Druckdifferenz an der Hauptdrossel $d.sa.dporif = d.sa.quadra ./ d.sa.Ahydr$ [SAT [m], dporif [Pa·s ² /m ²], dporif beim Ausfedern [Pa·s ² /m ²]]
d.sa.dprec	real	Faktor zur Berechnung der Druckdifferenz zwischen Recoilkammer und Gasfeder (für eigentliche Berechnung unerheblich, nur für Ausgabe) [SAT [m], dprec [Pa·s ² /m ²], dprec beim Ausfedern [Pa·s ² /m ²]]
d.sa.gasspring	real	Matrix mit der Kennlinie des Druckes der Gasfeder über der Einfederung [SAT [m], Gasfederdruck [Pa]]
d.sa.quadra	real	Matrix der quadratischen Drosselkoeffizienten des gesamten Stoßdämpfers abhängig von der Einfederung [SAT [m], K_{quad} beim Einfedern [N·s ² /m ²], K_{quad} beim Ausfedern [N·s ² /m ²]]
d.SAdir_norm	real	normierter Richtungsvektor des Stoßdämpfers (nur bei Schwinge/Halbschwinge) [x [m], y [m], z[m]]
d.sim.fs	real	= d.gen.fs
d.tyre.a	real	= d.tyre.a0 · d.tyre.a_c
d.tyre.a0	real	Matrix der halben Kontaktlänge des Reifens abhängig von der vertikalen Bodenkraft [Fz [N], a [m]]
d.tyre.Cfa	real	= d.tyre.Cfa0 · d.tyre.Cfa_c
d.tyre.Cfa0	real	Matrix der Kurvensteifigkeit des Reifens abhängig von der vertikalen Bodenkraft [Fz [N], Cfa [N/rad]]
d.tyre.Cma	real	= d.tyre.Cma0 · d.tyre.Cma_c
d.tyre.Cma0	real	Matrix der Selbstausrichtungssteifigkeit des Reifens abhängig von der vertikalen Bodenkraft [Fz [N], Cma [Nm/rad]]
d.tyre.defl	real	= d.tyre.defl0 · d.tyre.defl_c
d.tyre.defl0	real	Matrix der Reifeneinfederung abhängig von der vertikalen Bodenkraft [Fz [N], defl [m]]
d.tyre.sigma	real	= d.tyre.sigma0 · d.tyre.sigma_c

Variable	Typ	Beschreibung
d.tyre.sigma0	real	Matrix der Entspannungslänge des Reifens abhängig von der vertikalen Bodenkraft [Fz [N], sigma [m]]
d.tyre.slipcurve	real	Reibungskoeffizient zwischen Reifen und Boden über dem Schlupf [K, μ_{Ground}]

C.3 Ausgabeparameter

Tabelle C.3 Ausgabeparameter

Variable	Typ	Beschreibung
s.ac.ag	real	Beschleunigung der oberen, gefederten Masse (inkl. Auftrieb, im Bodenkoordinatensystem) [x [m/s ²], y [m/s ²], z[m/s ²]]
s.ac.dg	real	Position der oberen, gefederten Masse (im Bodenkoordinatensystem) [x [m], y [m], z[m]]
s.ac.force	real	Kräfte und Momente zwischen MF und oberer, gefederter Masse (im Bodenkoordinatensystem) [F _x [N], F _y [N], F _z [N], M _x [Nm], M _y [Nm], M _z [Nm]]
s.ac.vg	real	Geschwindigkeit der oberen, gefederten Masse (im Bodenkoordinatensystem) [x [m/s], y [m/s], z[m/s]]
s.axle.force	real	Kräfte und Momente an der Radachse (im Bodenkoordinatensystem, nur bei Schwinge/Halbschwinge mit einem Rad) [F _x [N], F _y [N], F _z [N], M _x [Nm], M _y [Nm], M _z [Nm]]
s.axle.pos	real	Position und Orientierung der Radachse (im Bodenkoordinatensystem, nur ein Rad) [x [m], y [m], z [m], rx [rad], ry [rad], rz [rad]]
s.axle.vel	real	(Winkel-) Geschwindigkeiten der Radachse (im Bodenkoordinatensystem, nur ein Rad) [v _x [m/s], v _y [m/s], v _z [m/s], ω _x [rad/s], ω _y [rad/s], ω _z [rad/s]]
s.flex.defl.ac	real	Einfederungen und Verdrehungen an der Radachse infolge Flexibilität (im Flugzeugkoordinatensystem, nur Schwinge/Halbschwinge) [x [m], y [m], z [m], rx [rad], ry [rad], rz [rad]]
s.flex.defl.gr	real	Einfederungen und Verdrehungen an der Radachse infolge Flexibilität (im Bodenkoordinatensystem, nur Schwinge/Halbschwinge) [x [m], y [m], z [m], rx [rad], ry [rad], rz [rad]]
s.flex.force.ac	real	Feder- und Dämpfungskräfte und -momente an der Radachse (im Flugzeugkoordinatensystem, nur bei Schwinge/Halbschwinge mit einem Rad) [F _x [N], F _y [N], F _z [N], M _x [Nm], M _y [Nm], M _z [Nm]]
s.flex.force.gr	real	Feder- und Dämpfungskräfte und -momente an der Radachse (im Bodenkoordinatensystem, nur bei Schwinge/Halbschwinge mit einem Rad) [F _x [N], F _y [N], F _z [N], M _x [Nm], M _y [Nm], M _z [Nm]]
s.flex.vel.ac	real	(Winkel-) Geschwindigkeiten an der Radachse infolge Flexibilität (im Flugzeugkoordinatensystem, nur Schwinge/Halbschwinge) [v _x [m/s], v _y [m/s], v _z [m/s], ω _x [rad/s], ω _y [rad/s], ω _z [rad/s]]

Variable	Typ	Beschreibung
s.flex.vel.gr	real	(Winkel-) Geschwindigkeiten an der Radachse infolge Flexibilität (im Bodenkoordinatensystem, nur Schwinge/Halbschwinge) [v_x [m/s], v_y [m/s], v_z [m/s], ω_x [rad/s], ω_y [rad/s], ω_z [rad/s]]
s.info.folder	char	Verzeichnis, in dem der Ordner des simulierten Fahrwerkstypes enthalten ist
s.info.log.*	char	enthält das Änderungsverzeichnis aller im Programmablauf aufgerufenen Unterprogramme
s.info.name_of_directory	char	Name des Ordners des simulierten Fahrwerkstypes
s.laxle.force	real	Kräfte und Momente am Mittelpunkt des linken Rades an der Radachse (im Bodenkoordinatensystem, nur bei zwei Rädern) [F_x [N], F_y [N], F_z [N], M_x [Nm], M_y [Nm], M_z [Nm]]
s.laxle.pos	real	Position und Orientierung des Mittelpunkts des linken Rades auf der Radachse (im Bodenkoordinatensystem, zwei Räder) [x [m], y [m], z [m], rx [rad], ry [rad], rz [rad]]
s.laxle.vel	real	(Winkel-) Geschwindigkeiten des Mittelpunkts des linken Rades auf der Radachse (im Bodenkoordinatensystem, zwei Räder) [v_x [m/s], v_y [m/s], v_z [m/s], ω_x [rad/s], ω_y [rad/s], ω_z [rad/s]]
s.link.angle	real	Winkeländerung des Verbinders beim Halbschwingerfahrwerk beim Einfedern [°]
s.ltyre.defl	real	Einfederung des linken Reifens (in-z-Richtung, Bodenkoordinaten, nur bei zwei Rädern) [m]
s.ltyre.forces	real	Kräfte und Momente am Berührungspunkt des linken Reifens mit dem Boden (im Reifenkoordinatensystem, nur bei zwei Rädern) [F_x [N], F_y [N], F_z [N], M_x [Nm], M_y [Nm], M_z [N]]
s.ltyre.omega	real	Winkelgeschwindigkeit des drehenden, linken Rades um die Radachse (nur bei zwei Rädern) [rad/s]
s.model.data.*	struct	enthält die Eingabedate; entspricht der Eingabestruktur d
s.model.name	char	Name des verwendeten <i>SimMechanics</i> -Modells
s.post.angle.TA	real	maximale Winkeländerung der Schwinge beim Einfedern (nur Schwinge/Halbschwinge) [°]
s.post.defl.ac	real	maximale Einfederung der oberen Masse senkrecht zum Boden [m]
s.post.defl.axle_hor	real	maximale Auslenkung des Mittelpunkts der Radachse in x-Richtung bezüglich des Rumpfes (im Bodenkoordinatensystem) [m]
s.post.defl.axle_lat	real	maximale Auslenkung der Radachse in y-Richtung bezüglich des Rumpfes (im Bodenkoordinatensystem) [m]
s.post.defl.ltyre	real	maximale Einfederung des linken Reifens senkrecht zum Boden (zwei Räder) [m]

Variable	Typ	Beschreibung
s.post.defl.rtyre	real	maximale Einfederung des rechten Reifens senkrecht zum Boden (zwei Räder) [m]
s.post.defl.strut	real	maximale Einfederung des Stoßdämpfers [m]
s.post.defl.tyre	real	maximale Einfederung des Reifens senkrecht zum Boden (ein Rad) [m]
s.post.dlend	int	Index der Ausgabeparameter für den Zeitpunkt der maximalen Absenkung der oberen Masse (senkrecht zum Boden)
s.post.dlend2	int	Index der Ausgabeparameter für den Zeitpunkt der maximalen Einfederung des Stoßdämpfers
s.post.Edis	real	dissipierte Energie [Edis(t ₀) [J], Edis(t ₁) [J], ...]
s.post.eff.SA	real	Wirkungsgrad des Stoßdämpfers [-]
s.post.eff.whole	real	Wirkungsgrad des gesamten Fahrwerks [-]
s.post.Ekin	real	kinetische Energie des Fahrwerks [Ekin(t ₀) [J], Ekin(t ₁) [J], ...]
s.post.Epot	real	potentielle Energie, die in Gasfeder und Reifen gespeichert ist [Epot(t ₀) [J], Epot(t ₁) [J], ...]
s.post.Epoth	real	potentielle Lageenergie des Fahrwerks [Epoth(t ₀) [J], Epoth(t ₁) [J], ...]
s.post.Epotmax	real	maximal in Gasfeder und Reifen gespeicherte Energie [J]
s.post.force.ac	real	maximale Kräfte zwischen MF und oberer, gefederter Masse (im Bodenkoordinatensystem) [F _x [N], F _y [N], F _z [N]]
s.post.force.fric	real	maximale Lagerreibungskraft (nur Teleskop/Halbschwinge, im Stoßdämpferkoordinatensystem) [N]
s.post.force.hydra	real	maximale hydraulische Dämpferkraft (im Stoßdämpferkoordinatensystem) [N]
s.post.force.ltyre	real	maximale Reifenkräfte am linken Reifen (Bodenkoordinaten, zwei Räder) [F _x [N], F _y [N], F _z [N]]
s.post.force.pneu	real	maximale pneumatische Dämpferkraft (Gasfeder, im Stoßdämpferkoordinatensystem) [N]
s.post.force.rtyre	real	maximale Reifenkräfte am rechten Reifen (Bodenkoordinaten, zwei Räder) [F _x [N], F _y [N], F _z [N]]
s.post.force.seal	real	maximale Kraft der Dichtungsreibung (im Stoßdämpferkoordinatensystem) [N]

Variable	Typ	Beschreibung
s.post.force.strut	real	maximale Dämpferkraft (im Stoßdämpferkoordinatensystem) bei Teleskop $[F_x [N], F_y [N], F_z [N]]$ bei Schwinge/Halbschwinge $F_z [N]$
s.post.force.tyre	real	maximale Reifenkräfte (Bodenkoordinaten, ein Rad) $[F_x [N], F_y [N], F_z [N]]$
s.post.LF.CG	real	Lastvielfaches im Schwerpunkt des Flugerätes $[x [-], y [-], z [-]]$
s.post.LF.CGmax	real	maximales Lastvielfaches im Schwerpunkt des Flugerätes $[x [-], y [-], z [-]]$
s.post.LF.MF	real	Lastvielfaches an der Fahrwerksaufnahme $[x [-], y [-], z [-]]$
s.post.LF.MFmax	real	zusätzliches Lastvielfaches an der Fahrwerksaufnahme $[x [-], y [-], z [-]]$
s.post.maxFz	int	Index der Ausgabeparameter für den Zeitpunkt der maximalen vertikalen Kraft an der oberen Masse
s.post.maxmom	int	Index der Ausgabeparameter für den Zeitpunkt des maximalen Momentes um die y-Achse der Fahrwerksaufnahme
s.post.maxSAT	int	Index der Ausgabeparameter für den Zeitpunkt der maximalen Einfederung des Stoßdämpfers
s.post.mom	real	Moment um die y-Achse der Fahrwerksaufnahme (PP_UP) [Nm]
s.post.mommax	real	maximales Moment um die y-Achse der Fahrwerksaufnahme (PP_UP) [Nm]
s.post.momx	real	Moment um die x-Achse der Fahrwerksaufnahme (PP_UP) [Nm]
s.post.momxmax	real	maximales Moment um die x-Achse der Fahrwerksaufnahme (PP_UP) [Nm]
s.post.pitch	real	Nickwinkel des Flugerätes so interpoliert, dass in der gleichen Abtastrate wie Simulationsergebnisse [°]
s.post.roll	real	Rollwinkel des Flugerätes so interpoliert, dass in der gleichen Abtastrate wie Simulationsergebnisse [°]
s.post.spinup	int	Vektor mit den Indizes für die Zeitpunkte des <i>Spinup</i>
s.post.springback	int	Vektor mit den Indizes für die Zeitpunkte des <i>Springback</i>
s.post.vel.ac	real	maximale Geschwindigkeiten der oberen Masse (Beträge, im Bodenkoordinatensystem) $[v_x [m/s], v_y [m/s], v_z [m/s]]$
s.post.vel.axle	real	maximale Geschwindigkeiten der Radachse (Beträge, im Bodenkoordinatensystem, nur ein Rad) $[v_x [m/s], v_y [m/s], v_z [m/s]]$

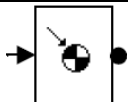
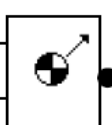
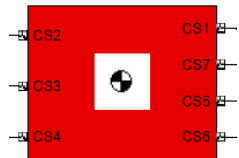
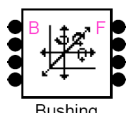

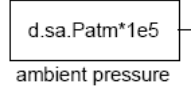
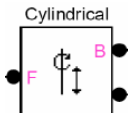
Variable	Typ	Beschreibung
s.post.vel.laxle	real	maximale Geschwindigkeiten des Mittelpunktes des linken Rades auf der Radachse (Beträge, im Bodenkoordinatensystem, zwei Räder) [v_x [m/s], v_y [m/s], v_z [m/s]]
s.post.vel.raxle	real	maximale Geschwindigkeiten des Mittelpunktes des rechten Rades auf der Radachse (Beträge, im Bodenkoordinatensystem, zwei Räder) [v_x [m/s], v_y [m/s], v_z [m/s]]
s.post.vel.strut	real	max. Einfederungsgeschwindigkeit des Dämpfers [m/s]
s.post.Work.SA	real	Arbeitsaufnahme des Stoßdämpfers [J]
s.post.Work.whole	real	Arbeitsaufnahme des gesamten Fahrwerks [J]
s.post.yaw	real	Gierwinkel des Fluggeräts so interpoliert, dass in der gleichen Abtastrate wie Simulationsergebnisse [°]
s.raxle.force	real	Kräfte und Momente am Mittelpunkt des linken Rades an der Radachse (im Bodenkoordinatensystem, nur bei Schwinge/Halbschwinge mit zwei Rädern) [F_x [N], F_y [N], F_z [N], M_x [Nm], M_y [Nm], M_z [Nm]]
s.raxle.pos	real	Position und Orientierung des Mittelpunkts des rechten Rades auf der Radachse (im Bodenkoordinatensystem, zwei Räder) [x [m], y [m], z [m], rx [rad], ry [rad], rz [rad]]
s.raxle.vel	real	(Winkel-) Geschwindigkeiten des Mittelpunkts des rechten Rades auf der Radachse (im Bodenkoordinatensystem, zwei Räder) [v_x [m/s], v_y [m/s], v_z [m/s], ω_x [rad/s], ω_y [rad/s], ω_z [rad/s]]
s.rtyre.defl	real	Einfederung des rechten Reifens (in-z-Richtung, Bodenkoordinaten, nur bei zwei Rädern) [m]
s.rtyre.forces	real	Kräfte und Momente am Berührungspunkt des rechten Reifens mit dem Boden (im Reifenkoordinatensystem, nur bei zwei Rädern) [F_x [N], F_y [N], F_z [N], M_x [Nm], M_y [Nm], M_z [Nm]]
s.rtyre.omega	real	Winkelgeschwindigkeit des drehenden, rechten Rades um die Radachse (nur bei zwei Rädern) [rad/s]
s.strut.apexload	real	Kraft im Verbindungspunkt der beiden <i>torque links</i> bei aktiviertem Shimmy Damper [N]
s.strut.defl	real	Einfederungen des Dämpfers (im Stoßdämpferkoordinatensystem) bei Schwinge/Halbschwinge z [m] bei Teleskop [x [m], y [m], z [m], rx [rad], ry [rad], rz [rad]]
s.strut.force	real	Kräfte und Momente am Stoßdämpfer (im Stoßdämpferkoordinatensystem) bei Schwinge/Halbschwinge F_z [N] bei Teleskop [F_x [N], F_y [N], F_z [N], M_x [Nm], M_y [Nm], M_z [Nm]]
s.strut.force2	real	Kräfte und Momente am Stoßdämpfer (im Bodenkoordinatensystem) [F_x [N], F_y [N], F_z [N], M_x [Nm], M_y [Nm], M_z [Nm]]

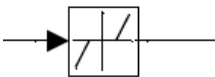

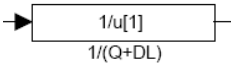
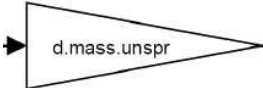
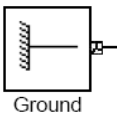

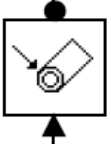

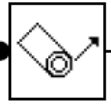
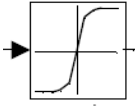
Variable	Typ	Beschreibung
s.strut.force3	real	Kräfte am Stoßdämpfer (im Bodenkoordinatensystem, nur Schwinge) [F_x [N], F_y [N], F_z [N]]
s.strut.fric	real	Lagerreibung (im Stoßdämpferkoordinatensystem) bei Halbschwinge F_{fric} [N] bei Teleskop [v_z/v_{ges} [-], v_y/v_{ges} [-], F_{fric} [N], M_{fric} [Nm], μ [-]]
s.strut.hydra	real	hydraulische Dämpferkraft (im Stoßdämpferkoordinatensystem) [N]
s.strut.Pgas	real	(Relativ-) Druck der Gasfeder [Pa]
s.strut.pneu	real	pneumatische Dämpferkraft (Gasfeder, im Stoßdämpferkoordinatensystem) [N]
s.strut.Poil	real	(Relativ-) Druck der hydraulischen Flüssigkeit in der Drosselkammer [Pa]
s.strut.Prec	real	(Relativ-) Druck in der Recoil-Kammer [Pa]
s.strut.Ptrottle	real	Differenzdruck an der Hauptdrossel [Pa]
s.strut.sd	real	Information zum Shimmy Damper (nur bei aktiviertem SD, Teleskop) [s_{SD} [m], F_{spring} [N], v_{SD} [m/s], F_{ges} [N]]
s.strut.seal	real	Dichtungsreibungskraft (im Stoßdämpferkoordinatensystem) [N]
s.strut.vel	real	Einfederungsgeschwindigkeiten des Dämpfers (im Stoßdämpferkoordinatensystem) bei Schwinge/Halbschwinge v_z [m/s]; bei Teleskop [v_x [m/s], v_y [m/s], v_z [m/s], ω_x [rad/s], ω_y [rad/s], ω_z [rad/s]]
s.TA.angle	real	Winkeländerung der Schwingenachse beim Einfedern (nur Schwinge/Halbschwinge) [°]
s.TA.force	real	Kraft an dem Gelenk des Schwinghebel, das nicht mit dem Stoßdämpfer verbunden ist (nur Schwinge/Halbschwinge) [F_x [N], F_y [N], F_z [N]]
s.time	real	Simulationszeit [s]
s.tyre.defl	real	Einfederung linken Reifens (in-z-Richtung, Bodenkoordinaten, ein Rad) [m]
s.tyre.forces	real	Kräfte und Momente am Berührungspunkt des Reifens mit dem Boden (im Reifenkoordinatensystem, ein Rad) [F_x [N], F_y [N], F_z [N], M_x [Nm], M_y [Nm], M_z [N]]
s.tyre.omega	real	Winkelgeschwindigkeit des drehenden Rades um die Radachse (bei einem Rad) [rad/s]


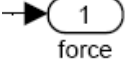
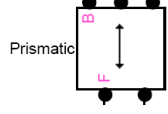
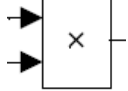

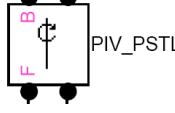
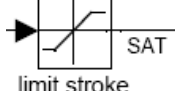
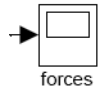
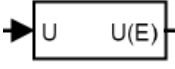
Anhang D

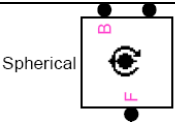
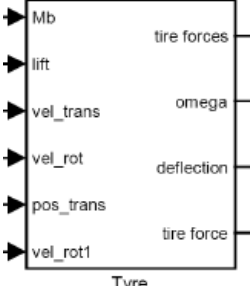
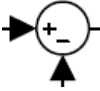
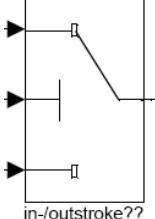

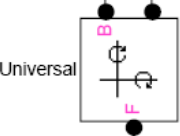
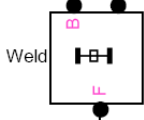
Blöcke in *SimMechanics/Simulink*

Tabelle E.1 Erklärung der verwendeten *SimMechanics/Simulink*-Blöcke

Block	Beschreibung (nach <i>Simulink 5.1</i>)
	<p>“Body Actuator: Actuates a Body with generalized force/torque signal. Vector components specified with respect to reference coordinate system. Input is a Simulink signal. For Body motion or initial condition actuation, press Help.”</p>
	<p>“Body Sensor: Measures linear/angular position, velocity, and/or acceleration of a Body with respect to a specified coordinate system. Optional rotation matrix for Body orientation. Output is Simulink signal. Multiple output signals can be bundled into one signal.”</p>
	<p>“Body: Represents a user-defined rigid body. Body defined by mass m, inertia tensor I, and coordinate origins and axes for center of gravity (CG) and other user-specified Body coordinate systems. This dialog sets Body initial position and orientation, unless Body and/or connected Joints are actuated separately.”</p>
	<p>“Bushing: Represents three rotational and three translational degrees of freedom. The follower (F) translates along three primitive prismatic axes (P1, P2, P3) and rotates around three primitive revolute axes (R1, R2, R3) relative to the base (B) Body. P1 attached to base. R3 attached to follower. Listed order of primitives is order of motion during simulation. Sensor and actuator ports can be added. Base-follower sequence and axes directions determine sign of forward motion. This joint becomes singular if two prismatics or two revolutes align.”</p>
	<p>“Clock: Output the current simulation time.”</p>
	<p>“Constant: Output the constant specified by the 'Constant value' parameter. If 'Constant value' is a vector and 'Interpret vector parameters as 1-D' is on, treat the constant value as a 1-D array. Otherwise, output a matrix with the same dimensions as the constant value.”</p>
	<p>“Cylindrical: Represents one translational and one rotational degrees of freedom. Restricts the follower (F) to move relative to the base (B) Body along and around a common axis P1-R1. Primitive axes P1 and R1 must be aligned. P1 attached to base. R1 attached to follower. Listed order of primitives is order of motion during simulation. Sensor and actuator ports can be added. Base-follower sequence and axis direction determine sign of forward motion.”</p>

Block	Beschreibung (nach <i>Simulink 5.1</i>)
 <p>bump/rebound stop</p>	<p>“Dead Zone: Output zero for inputs within the deadzone. Offset input signals by either the Start or End value when outside of the deadzone.”</p>
	<p>“Demux: Split either (a) vector signals into scalars or smaller vectors, or (b) bus signals produced by the Mux block into their constituent scalar, vector, or matrix signals. Check 'Bus Selection Mode' to split bus signals.”</p>
	<p>“Fcn: General expression block. Use "u" as the input variable name. Example: $\sin(u[1] * \exp(2.3 * -u[2]))$”</p>
	<p>“Gain: Element-wise gain ($y = K.*u$) or matrix gain ($y = K*u$ or $y = u*K$).”</p>
 <p>Ground</p>	<p>“Ground: Grounds one side of a Joint to a fixed location in the World coordinate system.”</p>
 <p>SAT</p>	<p>“In1: Provide an input port for a subsystem or model. For Triggered Subsystems, if 'Latch (buffer) input' is selected, then the Inport block produces the value of the input at the previous time step. The other parameters can be used to explicitly specify the input signal attributes.”</p>
	<p>“Joint Actuator: Actuates a Joint primitive with generalized force/torque or linear/angular position, velocity, and acceleration motion signals. Base-follower sequence and joint axis determines sign of forward motion. Inputs are Simulink signals. Motion input signals must be bundled into one signal. Connect to Joint block to see Connected to primitive list.”</p>
 <p>Joint Initial Condition</p>	<p>“Joint Initial Condition: Sets initial linear/angular position and velocity of a Joint primitive. Connect to Joint block to see Connected to primitive list.”</p>
	<p>“Joint Sensor: Measures linear/angular position, velocity, acceleration, computed force/torque and/or reaction force/torque of a Joint primitive. Spherical measured by quaternion. Base-follower sequence and joint axis determine sign of forward motion. Outputs are Simulink signals. Multiple output signals can be bundled into one signal. Connect to Joint block to see Connected to primitive list.”</p>
 <p>gasspring</p>	<p>“Look-Up Table: Perform 1-D linear interpolation of input values using the specified table. Extrapolation is performed outside the table boundaries.”</p>

Block	Beschreibung (nach <i>Simulink 5.1</i>)
	<p>“Mux: Multiplex scalar, vector, or matrix signals into a bus.”</p>
 <p>force</p>	<p>“Out1: Provide an output port for a subsystem or model. The 'Output when disabled' and 'Initial output' parameters only apply to conditionally executed subsystems. When a conditionally executed subsystem is disabled, the output is either held at its last value or set to the 'Initial output'. The 'Initial output' parameter can be specified as the empty matrix, [], in which case the initial output is equal to the output of the block feeding the output.”</p>
 <p>Prismatic</p>	<p>“Prismatic: Represents one translational degree of freedom. The follower (F) body translates relative to the base (B) Body along single translational axis connecting Body coordinate origins. Sensor and actuator ports can be added. Base-follower sequence and axis direction determine sign of forward motion.”</p>
	<p>“Product: Multiply or divide inputs. Choose element-wise or matrix product and specify one of the following:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) * or / for each input port (e.g., **/*) b) scalar specifies the number of input ports to be multiplied <p>Scalar value of '1' for element-wise product causes all elements of a single input vector to be multiplied.</p> <p>If / is specified with matrix product, compute the inverse of the corresponding input.”</p>
 <p>Rate Limiter</p>	<p>“Rate Limiter: Limit rising and falling rates of signal.”</p>
 <p>PIV_PSTL</p>	<p>“Revolute: Represents one rotational degree of freedom. The follower (F) Body rotates relative to the base (B) Body about a single rotational axis going through collocated Body coordinate system origins. Sensor and actuator ports can be added. Base-follower sequence and axis direction determine sign of forward motion by the right-hand rule.”</p>
 <p>limit stroke</p>	<p>“Saturation: Limit input signal to the upper and lower saturation values.”</p>
 <p>forces</p>	<p>“Scope: simulink/Sinks/Scope”</p>
	<p>“Selector: Select or re-order the specified elements of an input vector or matrix.</p> <p>$y = u(\text{elements})$ if input is a vector.</p> <p>$y = u(\text{rows}, \text{columns})$ if input is a matrix.</p> <p>The elements (E), rows (R), and columns (C) may be specified either in the block's dialog or through an external input port.”</p>

Block	Beschreibung (nach <i>Simulink 5.1</i>)
 <p>Spherical</p>	<p>“Spherical: Represents three rotational degrees of freedom. The follower (F) body pivots freely relative to the base (B) Body at the collocated Body coordinate system origins. Sensor ports can be added. Spherical joint cannot be actuated. Base-follower sequence determines sign of forward motion.”</p>
 <p>Tyre</p>	<p>“Subsystem: A subsystem block template containing an inport and outport block.”</p>
	<p>“Sum: Add or subtract inputs. Specify one of the following: a) string containing + or - for each input port, for spacer between ports (e.g. ++ - ++) b) scalar ≥ 1. A value > 1 sums all inputs; 1 sums elements of a single input vector”</p>
 <p>in-/outstroke??</p>	<p>“Switch: Pass through input 1 when input 2 satisfies the selected criterion; otherwise, pass through input 3. The inputs are numbered top to bottom (or left to right). The input 1 pass-through criteria are input 2 greater than or equal, greater than, or not equal to the threshold. The first and third input ports are data ports, and the second input port is the control port.”</p>
	<p>“To Workspace: Write input to specified array or structure in MATLAB's main workspace. Data is not available until the simulation is stopped or paused.”</p>
 <p>Universal</p>	<p>“Universal: Represents two rotational degrees of freedom. The follower (F) rotates with respect to the base (B) Body around two primitive revolute axes (R1, R2). R1 attached to base. R2 attached to follower. Listed order of primitives is order of motion during simulation. Sensor and actuator ports can be added. Base-follower sequence and axes directions determine sign of forward motion. This joint becomes singular if both revolutes align”</p>
 <p>Weld</p>	<p>“Weld: Represents zero degrees of freedom. Rigidly connects the base (B) and follower (F) Bodies in initial relative configuration. Sensor ports can be added. Weld joint cannot be actuated.”</p>

Anhang E

Simulationsergebnisse

Die folgenden Abschnitte zeigen den Teil der Ausgabedateien der Simulation des Fallversuchs des Heckfahrwerks des Zeppelin NT, der für die Darstellung auf Papier im Format DIN A4 geeignet ist. Dies sind die Datei mit den Diagrammen der Eingabe und Ergebnisse (Zeppelin_2007-05-25_07h53m.ps), die in PDF-Datei umgewandelt worden ist, und die ASCII-Protokolldatei (Zeppelin_2007-05-25_07h53m.dat). Die Übersicht der Eingabeparameter (Zeppelin_2007-05-25_07h53m.ipt), die Binärdatei mit der Ergebnisstruktur (Zeppelin_2007-05-25_07h53m.mat) und die Übersicht der Simulationsergebnisse in tabellarischer Form (Zeppelin_2007-05-25_07h53m.tbl) sind nur für die Bildschirmausgabe geeignet. Sie sind, wie auch die in diesem Abschnitt gezeigten Dateien auf der diesem Bericht angehängten CD-ROM gespeichert.

Da der Aufbau der Ausgabedateien für alle im Simulationsprogramm beachteten Fahrwerkstypen identisch ist, wird auf die Darstellung der Ergebnisse der Simulation zur Beispielrechnung aus dem Beitrag **LTH BM 51 100-04** an dieser Stelle verzichtet. Um dem Leser dennoch keine Eingabedaten und Simulationsergebnisse vorzuenthalten, sind auch diese Dateien mit dem Namen **Pilatus_LTH_2007-05-23_14h39m.*** auf der beigelegten CD-ROM gespeichert.

E.1 Grafische Ausgabe

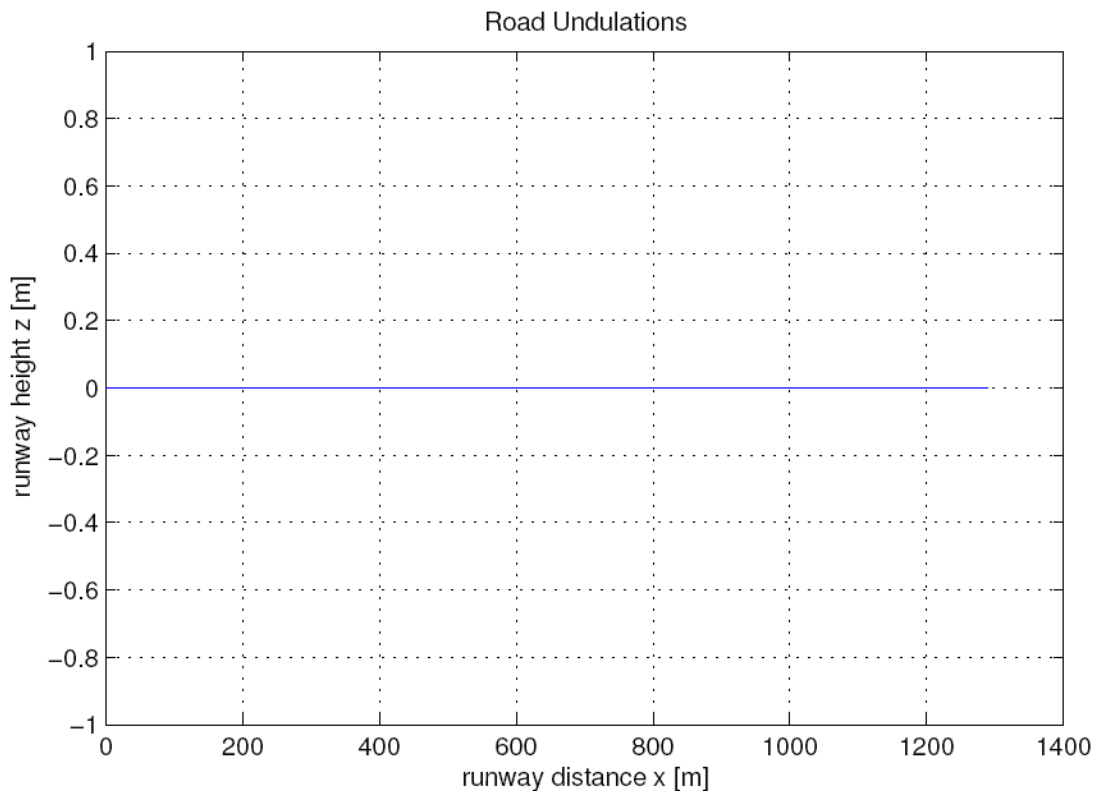
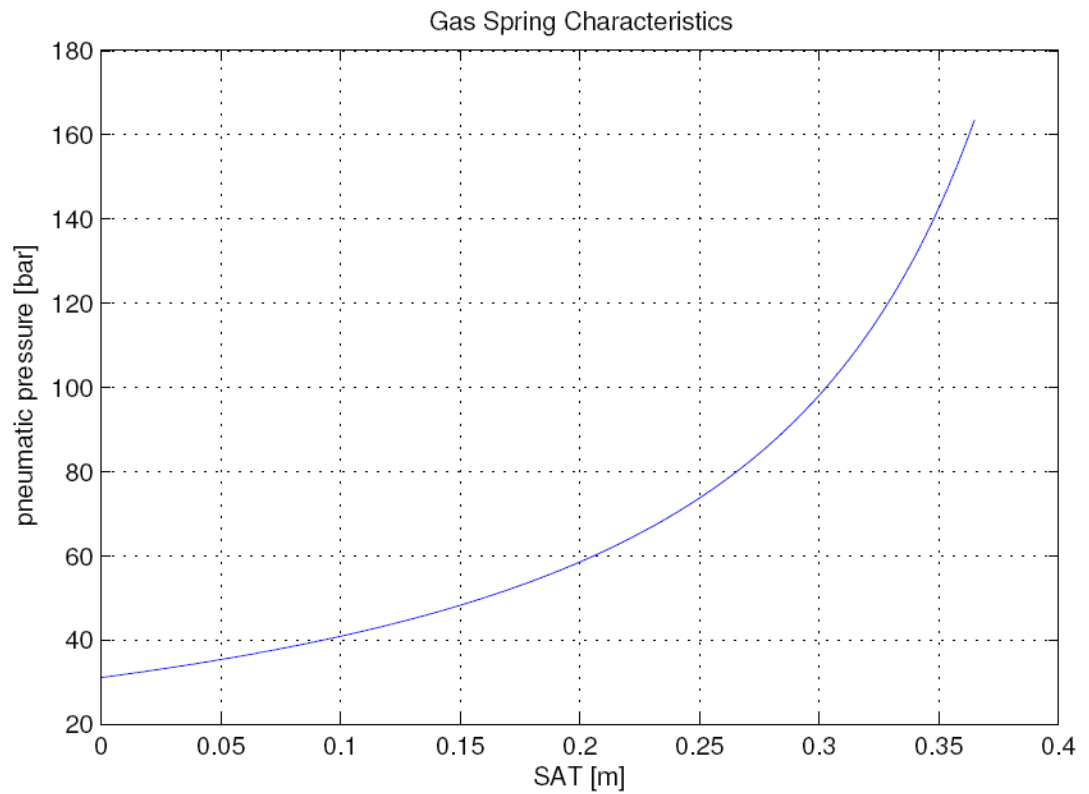


Bild E.1 Ausgabediagramme Zeppelin NT, Gasfeder und Landebahnunebenheiten

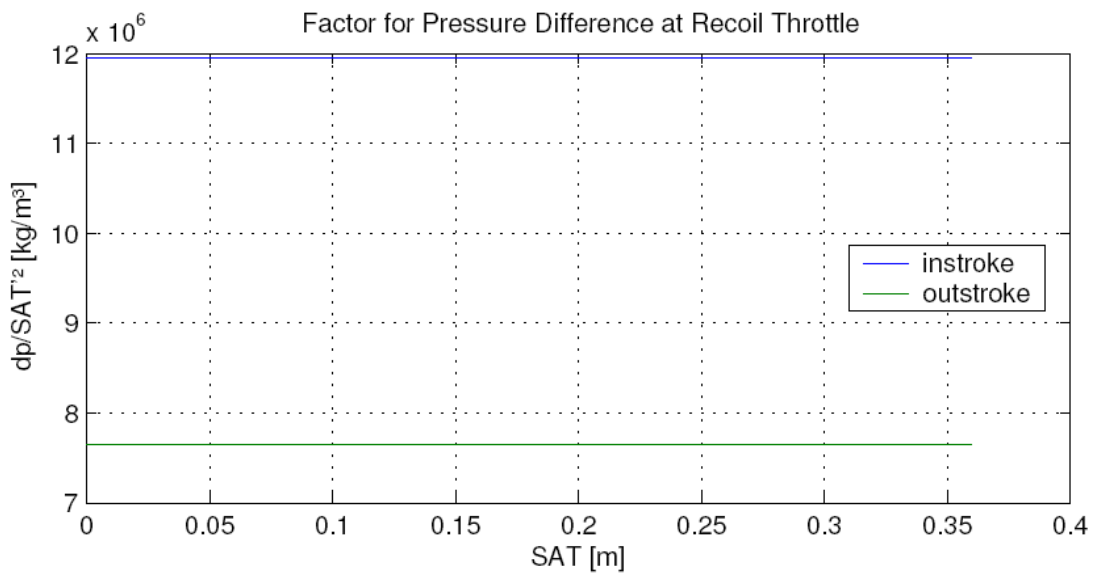
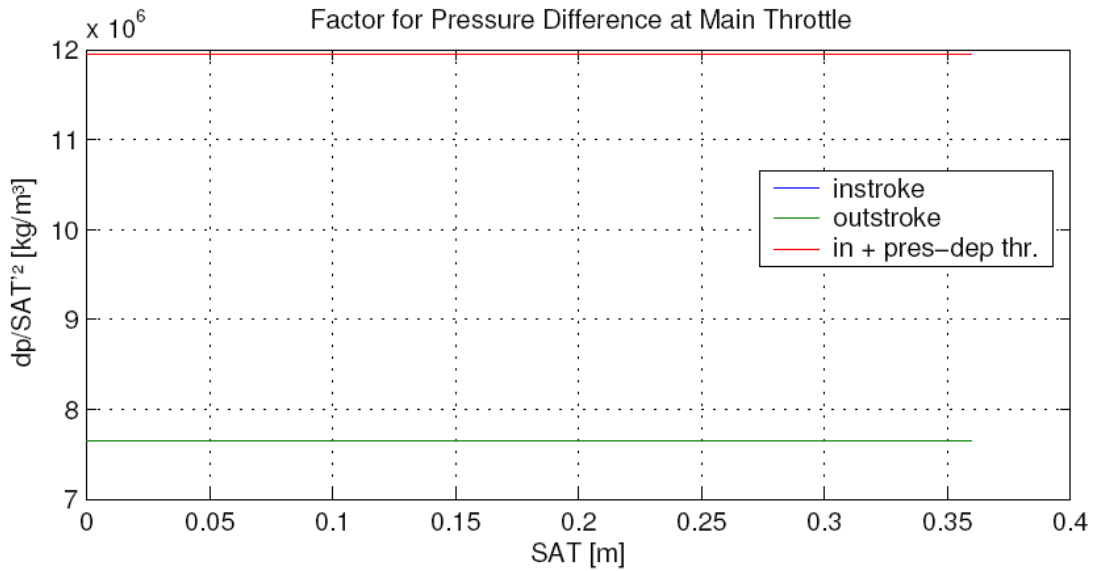
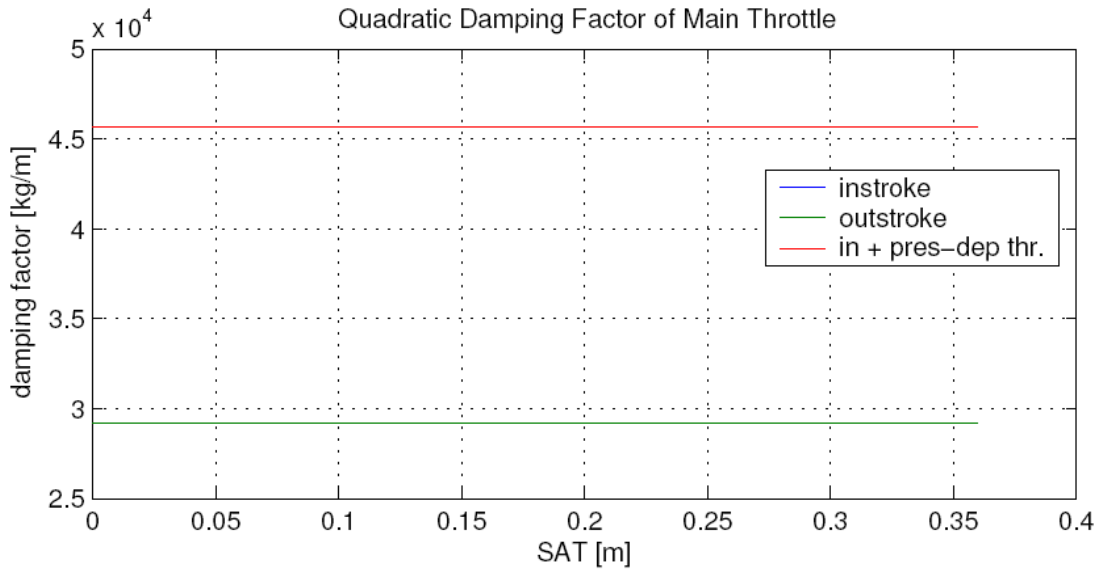


Bild E.2 Ausgabediagramme Zeppelin NT, Hydraulische Drossel

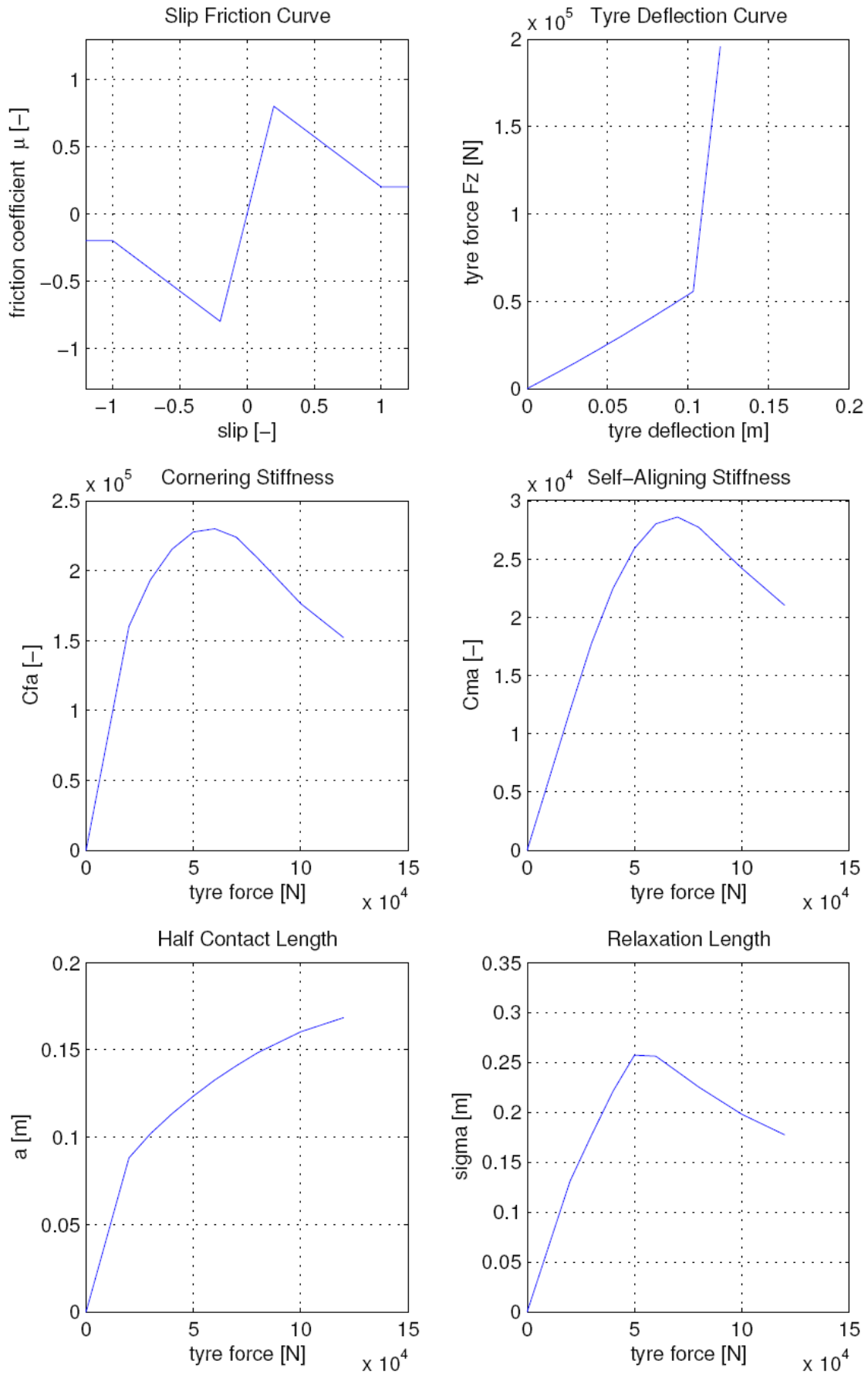


Bild E.3 Ausgabediagramme Zeppelin NT, Reifen

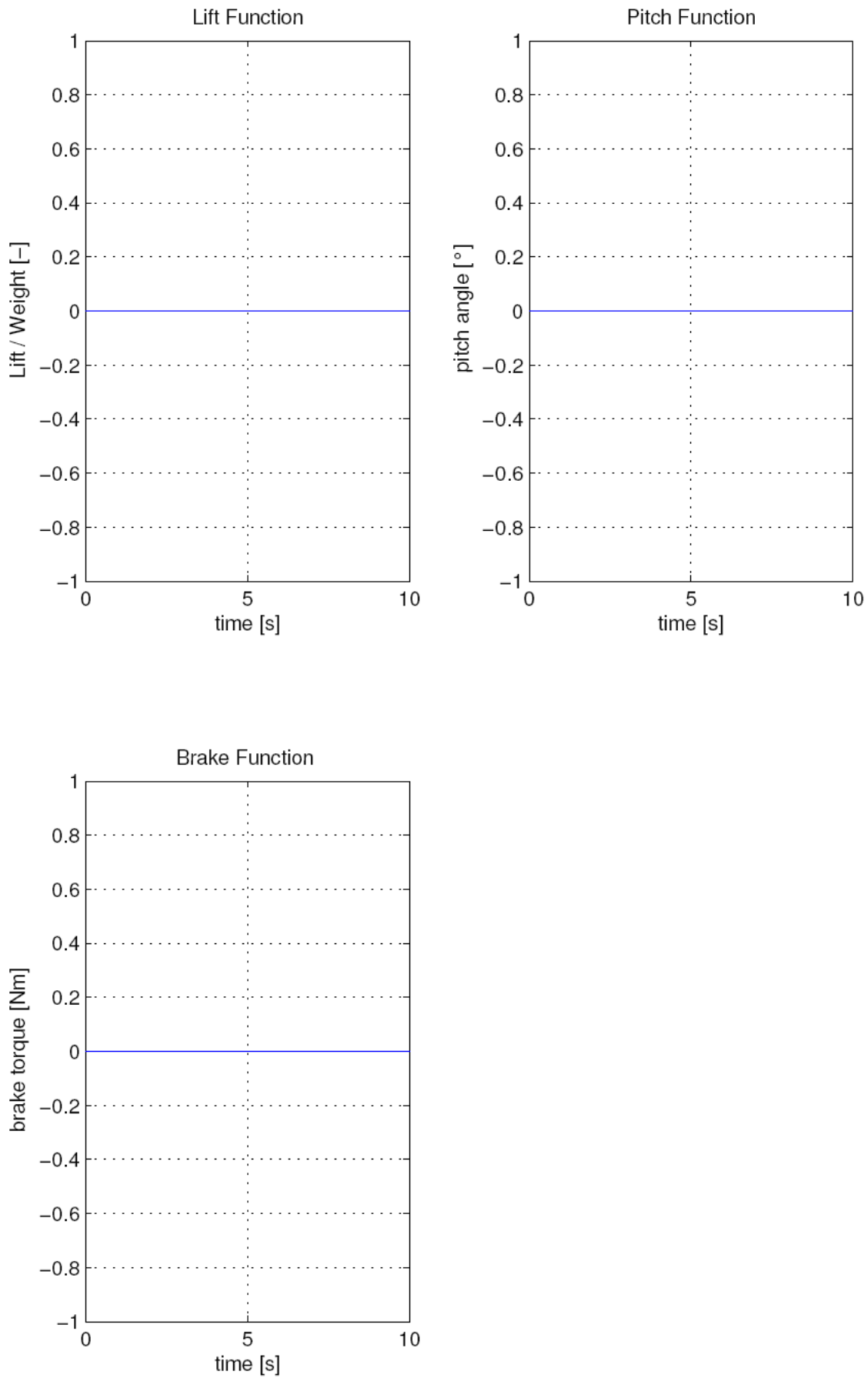


Bild E.4 Ausgabediagramme Zeppelin NT, Randbedingungen

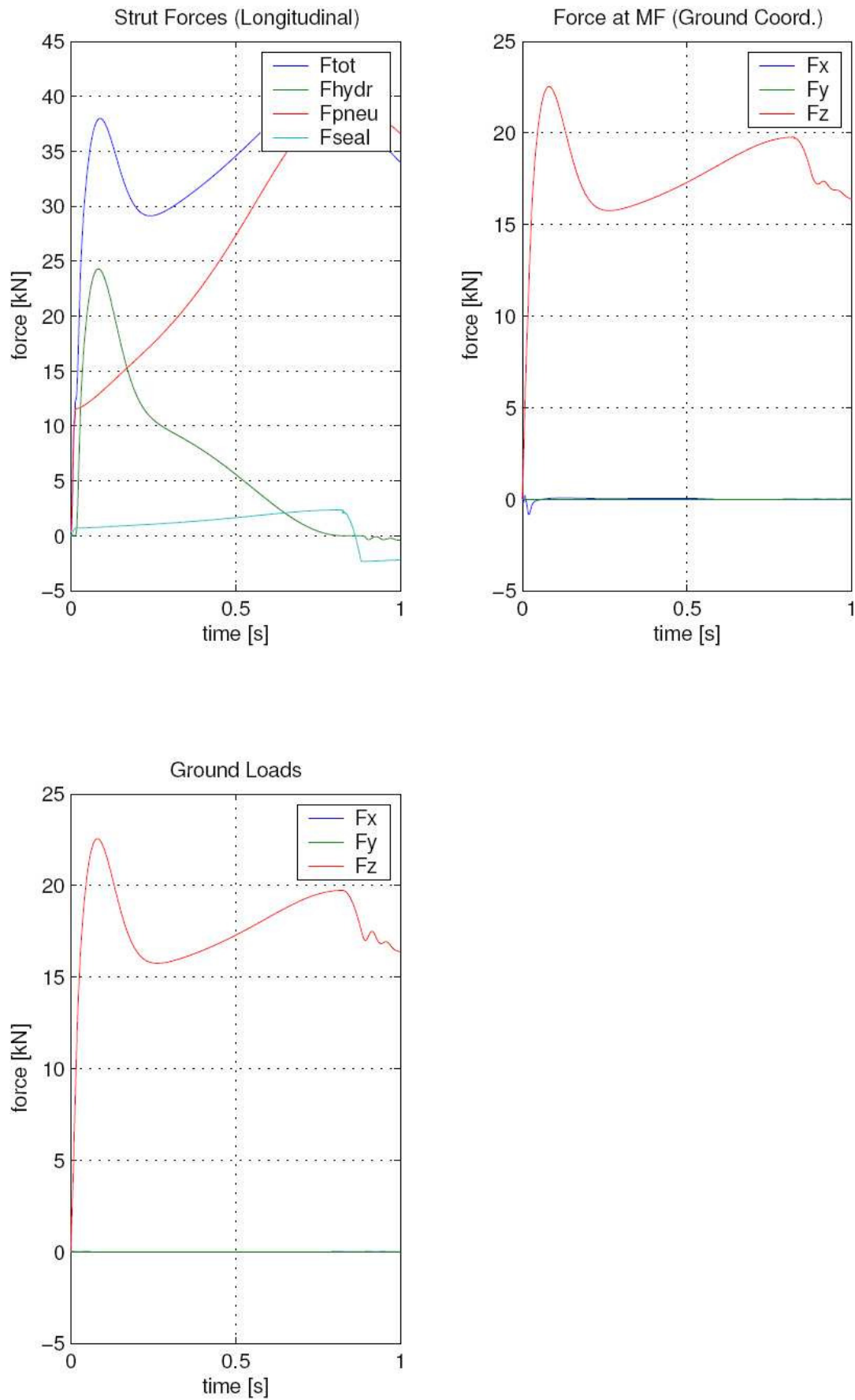


Bild E.5 Ausgabediagramme Zeppelin NT, Kräfte



Bild E.6 Ausgabediagramme Zeppelin NT, Momente

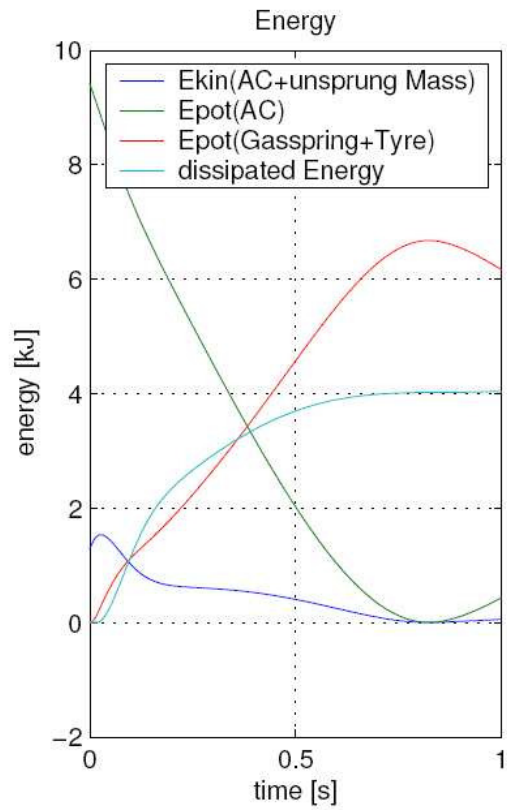
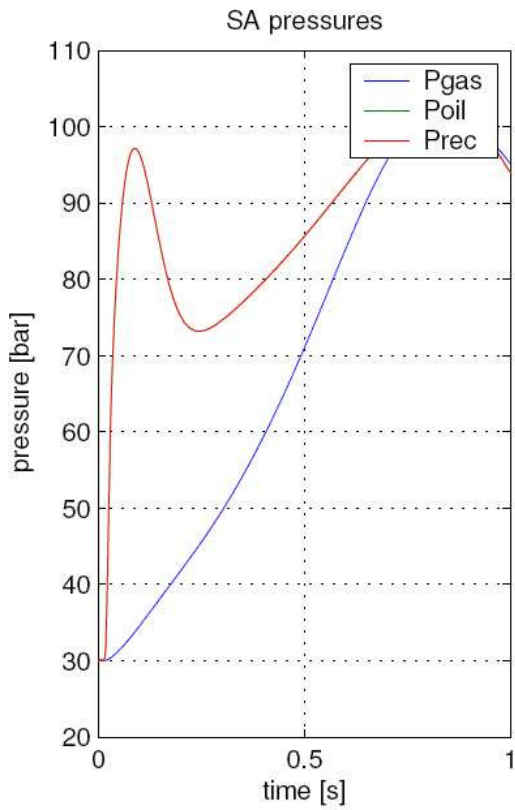
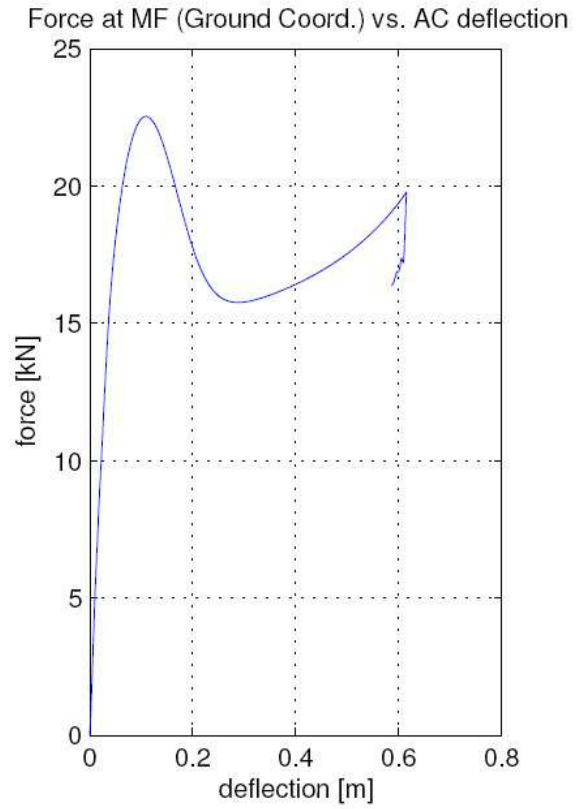
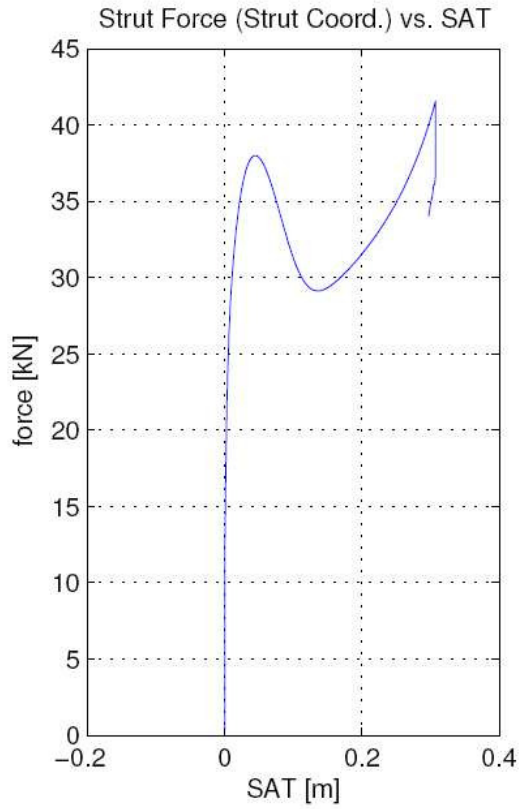


Bild E.7 Ausgabediagramme Zeppelin NT, Drücke, Energie, Arbeit

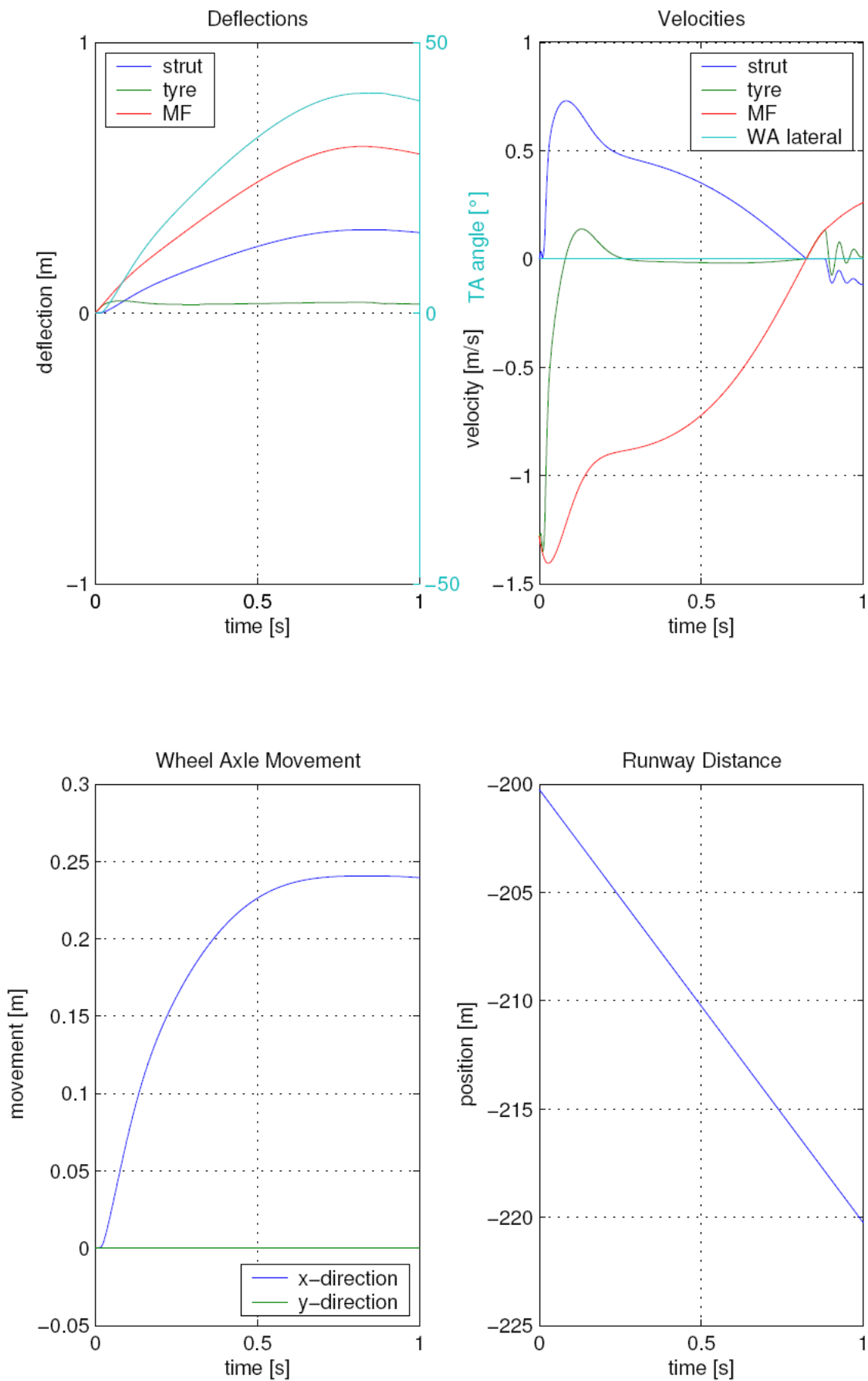


Bild E.8

Ausgabediagramme Zeppelin NT, Einfederungen und Geschwindigkeiten

E.2 Simulationsprotokoll

Protocol File
Zeppelin_2007-05-25_07h53m.dat

Related Output Files:

Zeppelin_2007-05-25_07h53m.mat
Zeppelin_2007-05-25_07h53m.ps
Zeppelin_2007-05-25_07h53m.tbl

Change Log of used Files:

drop_lever_ltyre:	A00	10.05.2007	Kai Schulze	all new
lever_ltyre_data:	A00	10.05.2007	Kai Schulze	all new
maimenu:	A00	27.03.2007	Kai Schulze	all new
menu2:	A00	28.03.2007	Kai Schulze	all new
loadfile:	A00	28.03.2007	Kai Schulze	all new
change_data_llw:	A00	10.05.2007	Kai Schulze	all new
change_gen_llw:	A00	10.05.2007	Kai Schulze	all new
change_SA:	A00	10.04.2007	Kai Schulze	all new
isinptano:	A00	27.02.2007	Kai Schulze	all new
savefile:	A00	29.03.2007	Kai Schulze	all new
precalc_llw:	A00	10.05.2007	Kai Schulze	all new
load_runway	A00	10.04.2007	Kai Schulze	all new
dampingfactors:	A00	22.03.2007	Kai Schulze	all new
hydrDamp:	A00	20.03.2007	Kai Schulze	all new
gascurve:	A00	22.03.2007	Kai Schulze	all new
update_lg_l:	based on file from A00	07.05.2007	shimmy model Kai Schulze	cleaned+comment added
get_matrix6:	original file from A00	07.05.2007	shimmy model Kai Schulze	introduce d.flex.SAT_x, d.flex.mat6_x, d.mass.SAT_x, d.mass.mat6_x corresponding to new input
modaldamp:	original file from A00	10.04.2007	shimmy model Kai Schulze	no significant change comment added
postsim:	original file from A00	11.04.2007	shimmy model Kai Schulze	no significant change cleaned, comment added s.info added
postcalc_llw:	A00	10.05.2007	Kai Schulze	all new
simplot_llw:	based on file from A00	10.05.2007	shimmy model Kai Schulze	cleaned, comment added figures added
report_llw:	A00	10.05.2007	Kai Schulze	all new
save_inputdata:	A00	19.04.2007	Kai Schulze	all new

```

get_struct:          A00      19.04.2007  Kai Schulze      all new
protocol_llw:       A00      10.05.2007  Kai Schulze      all new

```

Maximum Fz:

```

Simulation Time      [s]:      0.0810
Strut Deflection     [m]:      0.0390
TA angle             [°]:      5.3741
Tyre Deflection      [m]:      0.0447
Tyre Roll Radius     [m]:      0.2363
AC Pitch Angle       [°]:      0.000
AC Roll Angle        [°]:      0.000
AC Yaw Angle         [°]:      0.000

```

```

Moment around PP UP [Nm]:      6858.688

```

Strut Forces (Ground Coord.)

```

Fx                  [N]:      -501.84
Fy                  [N]:      0.00
Fz                  [N]:      37824.67

```

Ground Forces (Ground Coord.)

```

Fx                  [N]:      0.04
Fy                  [N]:      0.00
Fz                  [N]:      22549.81

```

Maximum Moment around PP UP:

```

Simulation Time      [s]:      0.8240
Strut Deflection     [m]:      0.3073
TA angle             [°]:      40.5781
Tyre Deflection      [m]:      0.0394
Tyre Roll Radius     [m]:      0.2416
AC Pitch Angle       [°]:      0.000
AC Roll Angle        [°]:      0.000
AC Yaw Angle         [°]:      0.000

```

```

Moment around PP UP [Nm]:      9671.560

```

Strut Forces (Ground Coord.)

```

Fx                  [N]:      -696.22
Fy                  [N]:      0.00
Fz                  [N]:      41543.95

```

Ground Forces (Ground Coord.)

```

Fx                  [N]:      0.01
Fy                  [N]:      0.00
Fz                  [N]:      19728.72

```

Maximum SAT:

```

Simulation Time      [s]:      0.8245
Strut Deflection     [m]:      0.3073
TA angle             [°]:      40.5782
Tyre Deflection      [m]:      0.0394
Tyre Roll Radius     [m]:      0.2416
AC Pitch Angle       [°]:      0.000
AC Roll Angle        [°]:      0.000
AC Yaw Angle         [°]:      0.000

```

```

Moment around PP UP [Nm]:      9671.553

```

Strut Forces (Ground Coord.)

```

Fx                  [N]:      -695.84
Fy                  [N]:      0.00
Fz                  [N]:      41521.76

```

Ground Forces (Ground Coord.)

```

Fx                  [N]:      0.00
Fy                  [N]:      0.00

```

Fz [N]: 19728.73

1. Spin Up:

Simulation Time	[s]:	0.0010
Strut Deflection	[m]:	0.0000
TA angle	[°]:	0.0000
Tyre Deflection	[m]:	0.0013
Tyre Roll Radius	[m]:	0.2797
AC Pitch Angle	[°]:	0.000
AC Roll Angle	[°]:	0.000
AC Yaw Angle	[°]:	0.000

Moment around PP UP [Nm]: 613.871

Strut Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-0.01
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	420.17

Ground Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	305.81
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	616.61

2. Spin Up:

Simulation Time	[s]:	0.0080
Strut Deflection	[m]:	0.0002
TA angle	[°]:	0.0232
Tyre Deflection	[m]:	0.0102
Tyre Roll Radius	[m]:	0.2708
AC Pitch Angle	[°]:	0.000
AC Roll Angle	[°]:	0.000
AC Yaw Angle	[°]:	0.000

Moment around PP UP [Nm]: 1239.069

Strut Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-0.59
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	9202.68

Ground Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	0.60
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	4955.67

3. Spin Up:

Simulation Time	[s]:	0.0295
Strut Deflection	[m]:	0.0046
TA angle	[°]:	0.6376
Tyre Deflection	[m]:	0.0330
Tyre Roll Radius	[m]:	0.2480
AC Pitch Angle	[°]:	0.000
AC Roll Angle	[°]:	0.000
AC Yaw Angle	[°]:	0.000

Moment around PP UP [Nm]: 4204.994

Strut Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-40.76
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	24039.37

Ground Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-0.11
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	16401.74

 4. Spin Up:

Simulation Time	[s]:	0.0335
Strut Deflection	[m]:	0.0067
TA angle	[°]:	0.9357
Tyre Deflection	[m]:	0.0351
Tyre Roll Radius	[m]:	0.2459
AC Pitch Angle	[°]:	0.000
AC Roll Angle	[°]:	0.000
AC Yaw Angle	[°]:	0.000

Moment around PP UP	[Nm]:	4544.412
---------------------	-------	----------

Strut Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-66.27
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	26741.34

Ground Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-0.01
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	17510.28

5. Spin Up:

Simulation Time	[s]:	0.0375
Strut Deflection	[m]:	0.0090
TA angle	[°]:	1.2581
Tyre Deflection	[m]:	0.0370
Tyre Roll Radius	[m]:	0.2440
AC Pitch Angle	[°]:	0.000
AC Roll Angle	[°]:	0.000
AC Yaw Angle	[°]:	0.000

Moment around PP UP	[Nm]:	4854.180
---------------------	-------	----------

Strut Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-95.44
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	28776.81

Ground Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	0.01
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	18463.27

1. Spring Back:

Simulation Time	[s]:	0.0210
Strut Deflection	[m]:	0.0012
TA angle	[°]:	0.1615
Tyre Deflection	[m]:	0.0266
Tyre Roll Radius	[m]:	0.2544
AC Pitch Angle	[°]:	0.000
AC Roll Angle	[°]:	0.000
AC Yaw Angle	[°]:	0.000

Moment around PP UP	[Nm]:	193.156
---------------------	-------	---------

Strut Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-6.58
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	15359.57

Ground Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-0.51
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	13103.60

2. Spring Back:

Simulation Time	[s]:	0.0300
Strut Deflection	[m]:	0.0048
TA angle	[°]:	0.6731
Tyre Deflection	[m]:	0.0333
Tyre Roll Radius	[m]:	0.2477
AC Pitch Angle	[°]:	0.000
AC Roll Angle	[°]:	0.000
AC Yaw Angle	[°]:	0.000

Moment around PP UP	[Nm]:	613.871
---------------------	-------	---------

Strut Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-43.71
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	24428.96

Ground Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-0.12
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	16551.28

3. Spring Back:

Simulation Time	[s]:	0.0340
Strut Deflection	[m]:	0.0070
TA angle	[°]:	0.9748
Tyre Deflection	[m]:	0.0354
Tyre Roll Radius	[m]:	0.2456
AC Pitch Angle	[°]:	0.000
AC Roll Angle	[°]:	0.000
AC Yaw Angle	[°]:	0.000

Moment around PP UP	[Nm]:	265.157
---------------------	-------	---------

Strut Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-69.74
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	27023.83

Ground Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-0.03
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	17637.59

4. Spring Back:

Simulation Time	[s]:	0.0380
Strut Deflection	[m]:	0.0093
TA angle	[°]:	1.2997
Tyre Deflection	[m]:	0.0372
Tyre Roll Radius	[m]:	0.2438
AC Pitch Angle	[°]:	0.000
AC Roll Angle	[°]:	0.000
AC Yaw Angle	[°]:	0.000

Moment around PP UP	[Nm]:	308.173
---------------------	-------	---------

Strut Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-99.31
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	29001.24

Ground Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	0.01
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	18572.61

5. Spring Back:

Simulation Time	[s]:	0.0390
Strut Deflection	[m]:	0.0099
TA angle	[°]:	1.3837

Tyre Deflection	[m]:	0.0376
Tyre Roll Radius	[m]:	0.2434
AC Pitch Angle	[°]:	0.000
AC Roll Angle	[°]:	0.000
AC Yaw Angle	[°]:	0.000

Moment around PP UP	[Nm]:	384.873
---------------------	-------	---------

Strut Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	-107.17
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	29434.44

Ground Forces (Ground Coord.)

Fx	[N]:	0.02
Fy	[N]:	0.00
Fz	[N]:	18785.30

Maximum Forces:

Force at MF (x-dir.)	[N]:	196.47
----------------------	------	--------

Force at MF (y-dir.)	[N]:	0.00
Force at MF (z-dir.)	[N]:	22527.85

Strut Force (z-dir., strut coord.)	[N]:	41551.05
------------------------------------	------	----------

Tyre Force (abs., x-dir.)	[N]:	305.81
Tyre Force (abs., y-dir.)	[N]:	0.00
Tyre Force (abs., z-dir.)	[N]:	22550.19

Hydraulic Strut Force	[N]:	24282.34
Pneumatic Strut Force	[N]:	39199.13
Seal Friction Force	[N]:	2351.95

Maximum Deflections:

Upper Mass	[m]:	0.6153
Tyre (lower Mass, vertical)	[m]:	0.0447
Lower Mass (lateral)	[m]:	0.0000
Lower Mass rel. to AC (x-dir.)	[m]:	0.2406
Strut	[m]:	0.3073
TA angle	[°]:	40.5782

Maximum Velocities (Absolute Values):

Upper Mass (x-dir.)	[m/s]:	20.0086
Upper Mass (y-dir.)	[m/s]:	0.0000
Upper Mass (z-dir.)	[m/s]:	1.4059

Tyre Axle (x-dir.)	[m/s]:	20.0160
Tyre Axle (y-dir.)	[m/s]:	0.0000
Tyre Axle (z-dir.)	[m/s]:	1.3534

Strut	[m/s]:	0.7295
-------	--------	--------

Maximum Load Factors:

Aircraft Centre of Gravity (x-dir)	[-]:	0.0130
Aircraft Centre of Gravity (y-dir)	[-]:	0.0000
Aircraft Centre of Gravity (z-dir)	[-]:	1.4854

Main Fitting (z-dir)	[-]:	1.4854
----------------------	------	--------

Work and Energy:

Energy of AC at Touch Down	[KJ]:	10.692
Maximum Energy in Gas Spring + Tyres	[KJ]:	6.675
Work of whole LG up to max. AC defl.	[KJ]:	10.707
Work of SA up to max. strut defl.	[KJ]:	10.232
Time from Touch Down to max. AC defl.	[s]:	0.8245
Time from Touch Down to max. SA defl.	[s]:	0.8245

Efficiency:

Whole Landing Gear	[-]:	0.7724
Shock Absorber	[-]:	0.8013