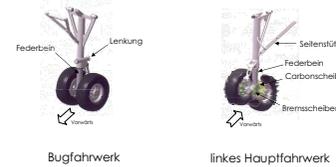
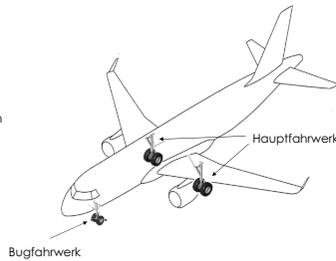


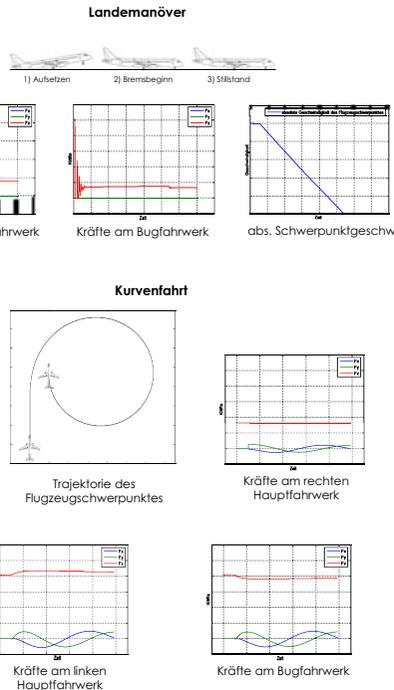
Überblick

- Aufgabenstellung**
 - Entwicklung eines Fahrwerkmodells für Flugzeuge
 - Simulation der Fahr- und Landedynamik
- Rahmenbedingungen**
 - Kennwerte und Parameter nur unvollständig vorhanden
 - einfaches modulares Konzept
 - Erweiterbarkeit
 - Schnittstellen (z.B. Sound-Modul)
 - Echtzeitfähigkeit
- Ansatz**
 - empirisch-mathematisches Reifenmodell
 - nichtlineares Federbeinmodell
 - implizite Integratoren
- Eingangsgrößen**
 - kinematische Größen (Position, Geschwindigkeit)
 - Bremsdruck
 - Lenkwinkel
 - Zeit
- Ausgangsgrößen**
 - Kräfte und Momente



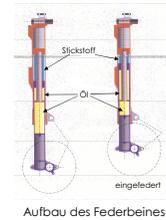
Simulationsergebnisse

- Annahmen**
 - Konstanter Reibbeiwert
 - Ebene Landebahn
 - Windstille
- Landevorgang**
 - Symmetrisches Aufsetzen des Hauptfahrwerks
 - Aussetzen des Bugfahrwerks
 - Symmetrisches Bremsen
 - Einfedern des Bugrades
 - Stillstand
 - Ausfedern des Bugrades und Nachschwingen des Flugzeugs
- Kurvenfahrt**
 - Stationäre Fahrt, ohne Triebwerksschub
 - Lenkwinkelsprung
 - Seitenkraftaufbau
 - Erhöhung der Aufstandskraft des linken Hauptfahrwerks aufgrund der Fliehkraft
 - Abnahme der Aufstandskraft des rechten Hauptfahrwerks aufgrund der Fliehkraft
 - Abnahme der Schwerpunktgeschwindigkeit aufgrund der Reibung und des Luftwiderstands

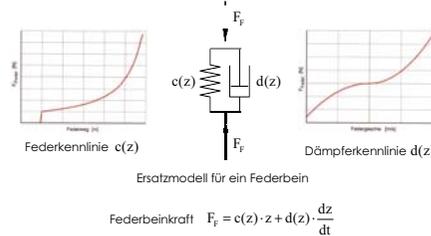


Fahrwerkmodell

- Zustandsgrößen**
 - Einfederung
 - Einfederungsgeschwindigkeit
- Kraftübertragung**
 - nichtlineare Federkennlinie
 - nichtlineare Dämpferkennlinie
- Annahmen**
 - starrs Federbein
 - Shimmy und Gear-Walk Schwingungen werden vernachlässigt
 - Ideale reibungsfreie Führung

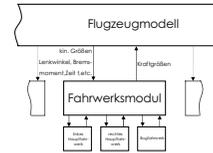


Aufbau des Federbeines



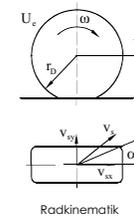
Berechnung

- Anforderungen**
 - numerische Stabilität
 - Genauigkeit
 - Rechenzeit
 - Echtzeitfähigkeit
 - einfacher Programmaufbau
 - Portierbarkeit
 - Schnittstellen
- Realisierung**
 - Abbildung der Realität auf einfache mathematische Modelle
 - Integration der Bewegungsgleichungen mittels impliziter Eulerverfahren
 - Lösen nichtlinearer Gleichungen mit dem Newton-Raphson-Verfahren
- Computer**
 - Standard PC
 - Windows Betriebssystem
 - eigens erstellte Entwicklungsumgebung in Java
 - Kommunikation mit anderen Modulen über TCP/IP
- Ergebnisse**
 - Realität und Simulationsergebnisse stimmen überein
 - Simulation von Grenzfällen, die in der Realität nicht durchführbar sind
 - Auslegung von Komponenten im vorhinein
- Ausblick**
 - Reifenschaden
 - Aquaplaning
 - Fahrerassistenzsysteme (ESP, ABS)



Reifenmodellierung

- Zustandsgrößen**
 - Radmittelpunktschwindigkeit
 - Radwinkelgeschwindigkeit
 - Hochkraft
 - Kontaktpartner Rad/Boden
 - Reifendruck
 - Umgebungstemperatur
- Kraftübertragung**
 - Durch Schlupf beim rollenden Rad
 - Haftungskraft im Stillstand
- Annahmen**
 - Konstanter Reifendruck
 - Elastischer Reifen
 - Nur rotatorische Trägheiten
 - Ebener Radquerschnitt
 - Kein Sturzwinkel
 - Stationärer Rollkontakt



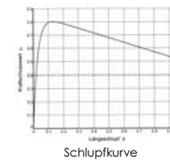
$$\text{dynamischer Reifenhalmmesser } r_D = \frac{U_c}{2 \cdot \pi}$$

Längsschlupf $s_x = s_A$ bzw. $s_x = s_B$ abhängig vom Fahrzustand

$v_x = \omega \cdot r$	$v_x < \omega \cdot r$	$v_x > \omega \cdot r$		
kein Schlupf	Antriebsschlupf	Bremsschlupf		
rollendes Rad	angetriebenes Rad	durchdrehendes Rad	gebremstes Rad	blockierendes Rad
$s_A = 0$	$s_A = \frac{\omega \cdot r_D - v_x}{\omega \cdot r_D}$	$s_A = 1$		
$s_B = 0$			$s_B = \frac{v_x - \omega \cdot r_D}{v_x}$	$s_B = 1$

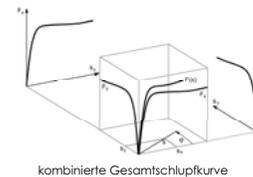
Der Querschlupf ist analog zum Längsschlupf definiert als $s_y = \frac{v_y}{r_D \cdot \omega}$ bzw. $s_y = \frac{v_y}{v_x}$

Schlupfmodell



Schlupfkurve

- Schlupfkurve i.A. durch Messungen bestimmt
- Approximation des realen Schlupfverhaltens durch entsprechende Kennwerte
- Kennwerte in Längs- und Querrichtung notwendig
- Gegenseitige Beeinflussung von Längs- und Querkraft
- Kombination beider Schlupfkurven zu einer Gesamtschlupfkurve

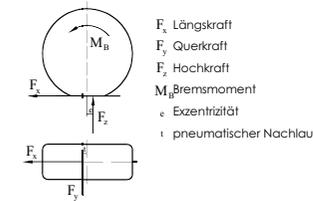


kombinierte Gesamtschlupfkurve

$$s = \sqrt{\left(\frac{s_x}{s_{sx}}\right)^2 + \left(\frac{s_y}{s_{sy}}\right)^2}$$

s Gesamtschlupf
 s_x Normierungsfaktor für Längsschlupf
 s_y Normierungsfaktor für Querschlupf

Radkräfte



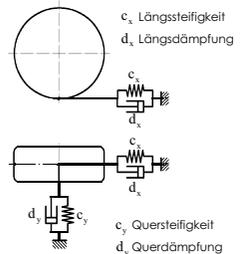
- F_x Längskraft
- F_y Querkraft
- F_z Hochkraft
- M_B Bremsmoment
- e Exzentrizität
- pneumatischer Nachlauf

- Annahmen**
 - Vernachlässigung des pneumatischen Nachlaufs bei den Hauptfahrwerken
 - Unsymmetrische Druckverteilung im Latsch ist konstant
 - Konstantes Lenkmoment im Stillstand

Berechnung der Kräfte beim Schlupfmodell

Rollwiderstand $M_R = F_z \cdot e$
 Lenkmoment $M_L = F_y \cdot t$
 Längskraft $F_x = F(s) \cdot \cos(\varphi)$
 Querkraft $F_y = F(s) \cdot \sin(\varphi)$

Stillstandsmodell



- c_x Längssteifigkeit
- d_x Längsdämpfung
- c_y Quersteifigkeit
- d_y Querdämpfung

- Stillstandsmodell bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten
- Ermöglicht stoppen auf schiefen Ebenen
- Simulation des Längs- und Querverhaltens des Reifens
- Haftungskraft entspricht der maximal möglichen Radkraft im Stillstand

Berechnung der Kräfte beim Stillstandsmodell

$$F_x = c_x \cdot x + d_x \cdot \frac{dx}{dt} \quad F_y = c_y \cdot y + d_y \cdot \frac{dy}{dt}$$

Referenzen:
 W. Hirschberg et al., User-Appropriate Tyre Modelling for Vehicle Dynamics in Standard and Limit Situations
 W. Sextro, Dynamical Contact Problems with Friction
 R. Lernbeiss, Simulation eines Flugzeugfahrwerkes bei elastischer Betrachtung des Federbeines
 G. Rill, Vehicle Modelling for Real Time Applications
 N. Lindsley et al., A Tire Model for Air Vehicle Landing Gear Dynamics