



Vorlesung Fahrzeugmechanik (Kap. 9: Luftwiderstand)

Hochschule Ulm, WS 2017/18

Theodor Großmann



Vorlesungsinhalte Fahrzeugmechanik

Kapitel:

1. Einführung Fahrzeugmechanik
2. Reifen
3. Federn, Dämpfer,...
4. Einmassenschwinger
5. Achsen
6. Lenkung
7. Regelsysteme
8. Längsdynamik
9. **Luftwiderstand**
10. Querdynamik
11. Vertikaldynamik&Strassen
12. Fahrzeugmodelle
13. Gesamtfahrzeug
14. menschliche Wahrnehmung /Sitze
15. Sleeping Policeman/Schlagloch
16. Fahrzeugentwicklung mit DPT

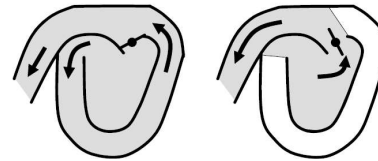
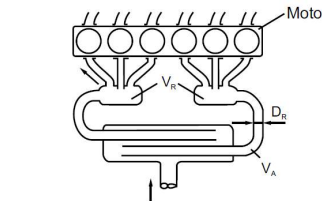


Einsatzgebiete der Aerodynamik im Fahrzeug

Luftkräfte



Luftkräfte: Längsdynamik
Querdynamik
Vertikaldynamik



Motor:
Landungswechselberechnung

Windgeräusche



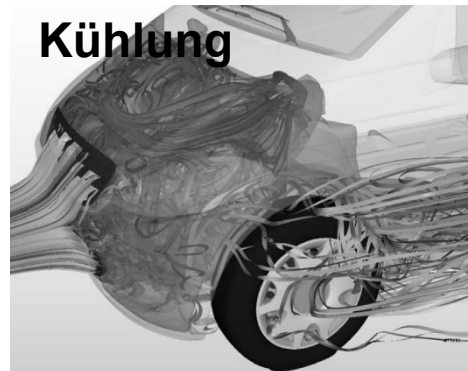
Geräusche:
Innengeräusche
Außengeräusche

Schmutzfreihaltung



Verschmutzung:
Frontbereich
Heckbereich
Außenspiegel

Kühlung



Bauteilkühlung:
Motorraumkühlung
Bremsenkühlung

Zugfreihaltung



Innenraum:
Kühlung
Heizung

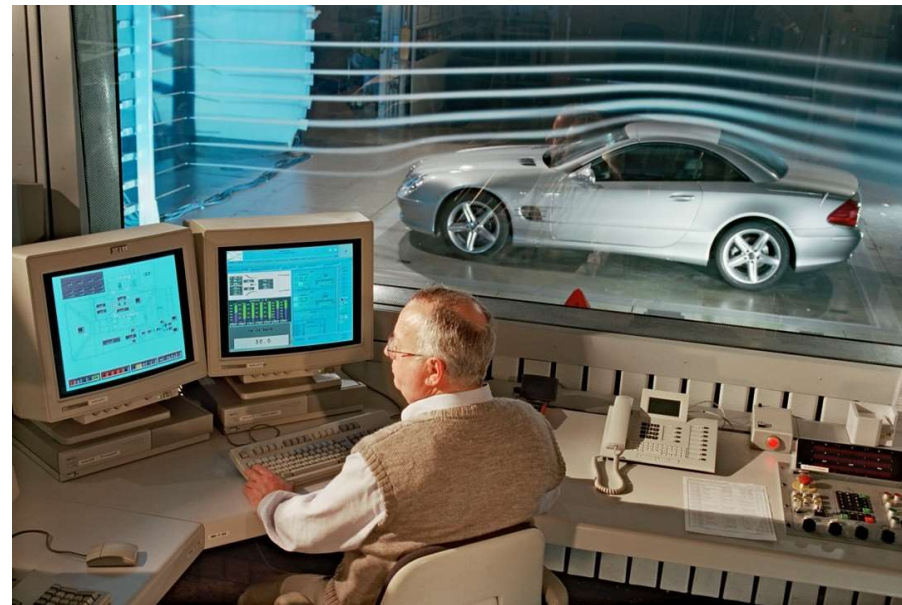


Luftwiderstand

Aerodynamik

Für die Aerodynamik von Kraftfahrzeugen sind zwei Effekte wichtig:

- Bernoullische Effekt: ideales Gas mit unterschiedlichen statischen Drücken
- Wirbelbildung und dadurch Arbeitsverrichtung, d.h. das reale Gas erzeugt ebenfalls unterschiedliche statische Drücke



Längsdynamik:

- ⇒ niedriger Luftwiderstand
- ⇒ gute Fahrleistung

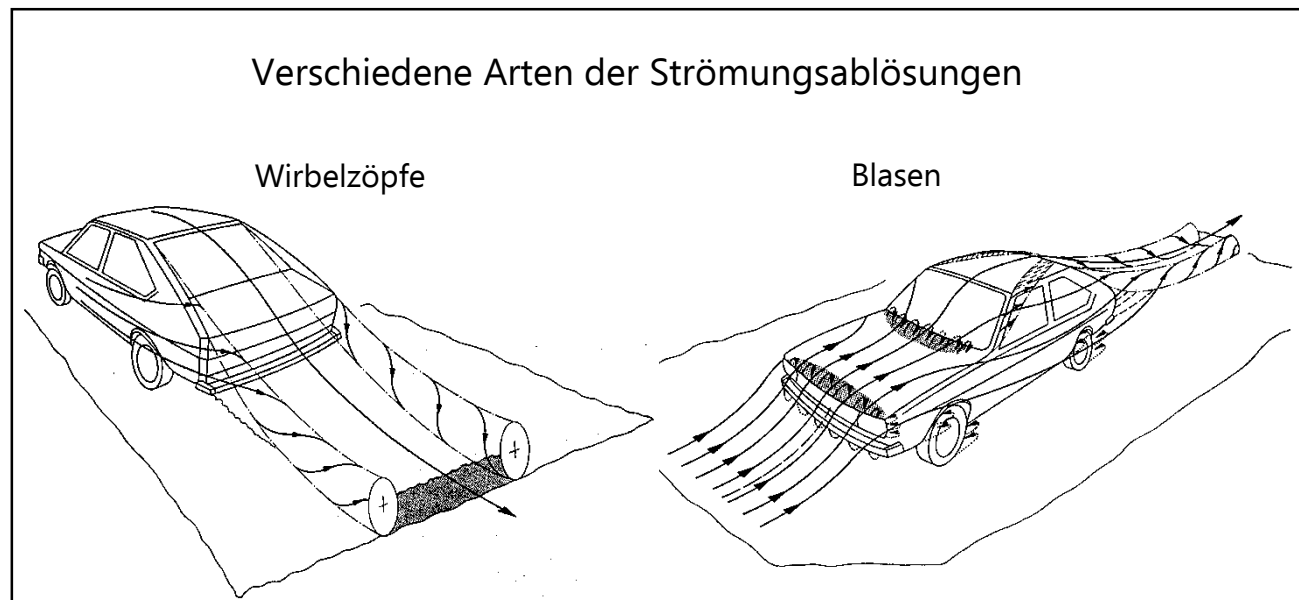
Querdynamik:

- ⇒ niedriger Vor- und Hinterachsauftrieb
- ⇒ gute Fahrstabilität
- ⇒ niedrige Giermomenten- und Seitenkraftbeiwerte
- ⇒ geringe Seitenwindempfindlichkeit



Umströmung eines Fahrzeuges:

Die Umströmung von Autos wird von Ablösungen der Strömung geprägt. Überall dort, wo sich der Strömung ein zu steiler Druck entgegenstellt, löst sie wegen dem Energieverlust infolge Reibung von der Kontur ab und geht ihre eigenen Wege.



Aufgabe des Fahrzeug-Aerodynamiker:

Die Fahrzeugablösungen, wenn sie schon nicht vermeidbar sind, dann doch so zu beeinflussen, dass sie die Strömung nicht „stören“. Dabei steht „stören“ für Widerstand generieren, Windgeräusche anregen, Schmutz oder Wassertropfen ablagern.

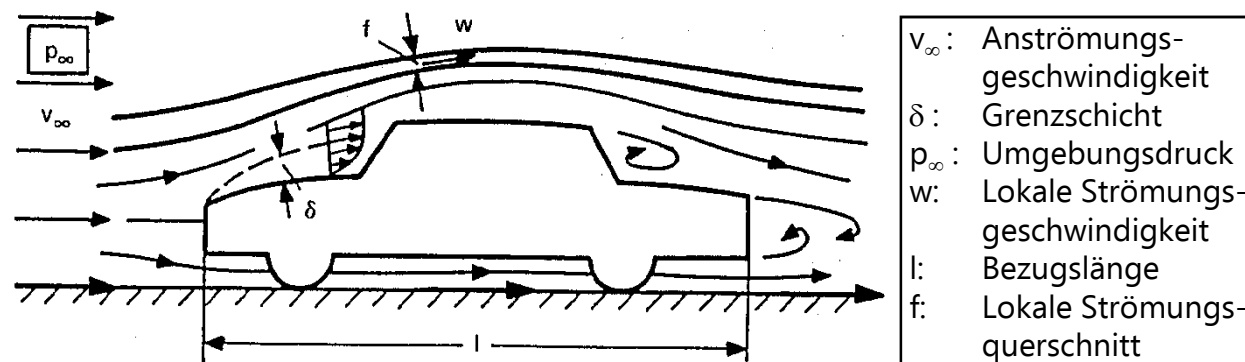


Luftwiderstand

Umströmung

Der aus den reibungslosen Außenströmung resultierende Druck ist der wandnahen Grenzschicht aufgeprägt. In der Grenzschicht fällt die Geschwindigkeit vom Wert in der Außenströmung auf Null an der Wand ab.

Im hinteren Bereich des Fahrzeuges löst sich die Strömung ab. Es entstehen Rückströmgebiete und Totwasserzonen. In diesem Bereichen des Strömungsfeldes ist dann der gesamte Strömungsverlauf durch die Reibungseffekte bestimmt.



Die Aufteilung des Strömungsfeldes in eine reibungslose Außenströmung und eine reibungsbehaftete wandnahe Strömung ist nur möglich, wenn für die dimensionale Kennzahl Reynolds-Zahl „Re“ gilt:

$$Re = \frac{v_{\infty} \cdot l}{\nu} > 10^4 \quad \nu: \text{ kinematische Zähigkeit}$$

Strömungen um geometrisch ähnliche Körper heißen mechanisch ähnlich, wenn die „Re“ für verschiedene Körperlängen l , Anströmungsgeschwindigkeit v_{∞} der Stoffeigenschaften ν den gleichen Zahlenwert besitzt.



Luftwiderstand

kleiner aerodynamischer Exkurs

Ein inkompressibles Medium erhöht bei Durchströmung eines verengten Rohrquerschnittes die Durchflußgeschwindigkeit und verringert den statischen Druck p . Für die potentielle und kinetische Arbeit W gilt: (Erhöhung der kinetischen Energie und Verringerung der potentiellen Energie):

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m (v_2^2 - v_1^2)$$

$$W_{\text{pot}} = (p_1 - p_2) \cdot V$$

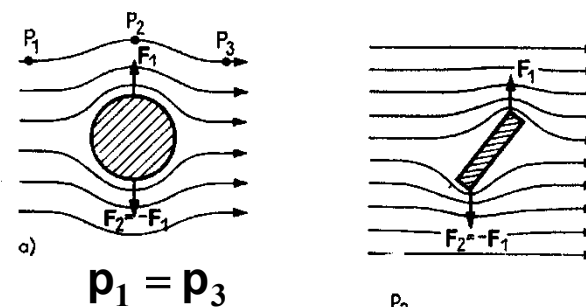
Aufgrund der Energieerhaltung für dieses ideale Medium müssen beide Energieänderungen gleich groß sein und es ergibt sich daraus das Gesetz von Bernoulli:

$$p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 = p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = \text{konst.}$$

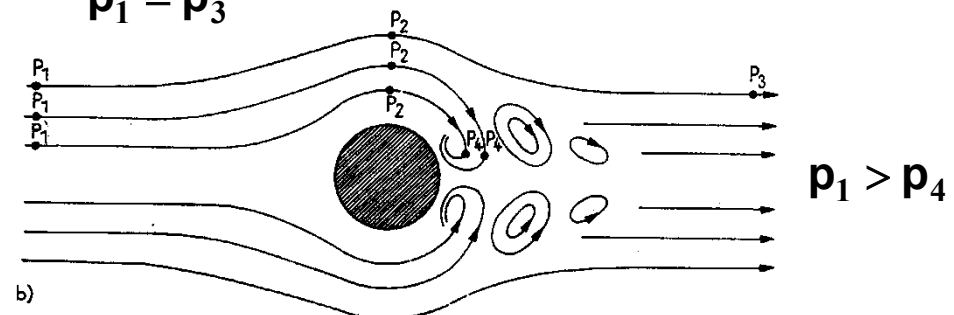
statischer
Druck

Staudruck

ideale Strömung: in den gezeigten Fällen entsteht keine Widerstandskraft.



reale Strömung: es entstehen Wirbel durch Arbeitsverrichtung, und damit ein Strömungswiderstand





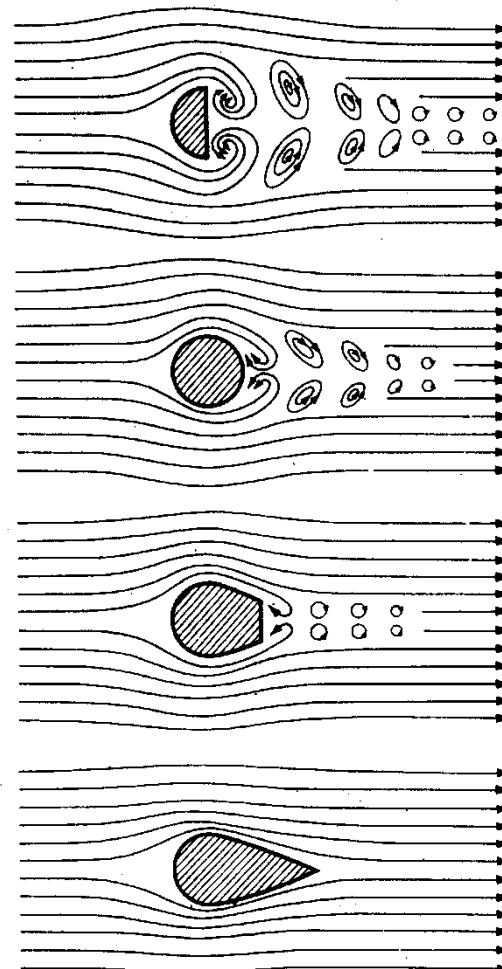
Luftwiderstand

kleiner aerodynamischer Exkurs

Die Reduktion der Wirbelbildung hat eine Verringerung des aerodynamischen Widerstandes zur Folge.

Für diese Optimierungen werden insbesondere im hinteren Teil der Form Optimierungen durchgeführt (siehe Abbildung für die reale Strömung).

Widerstandskraft nimmt ab





Luftwiderstand

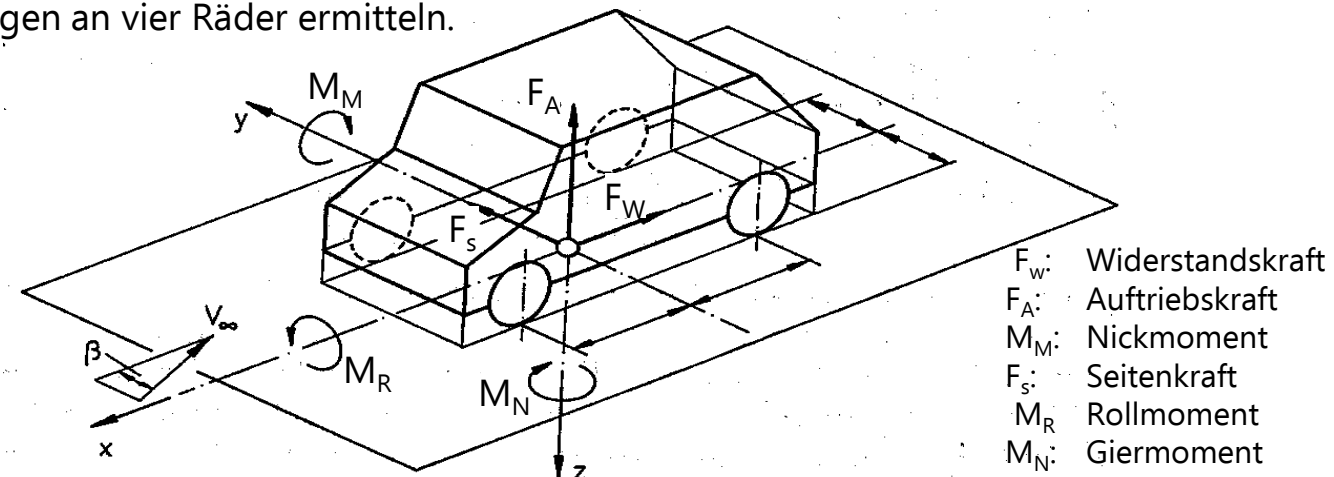
Gesamtkräfte und -momente

Bei symmetrischer Anströmung ($\beta=0$) ergibt sich:

- Widerstandskraft F_W in Längsrichtung
- Auftriebskraft F_A in Vertikalrichtung
- Nickmoment M_M um die Querachse

Bei schräger Anströmung ($\beta \neq 0$) ergibt sich:

- Seitenkraft F_s senkrecht zur Radebene
- Rollmoment M_R um die Längsrichtung
- Giermoment M_N um die Hochachse
- Durch die sechs Komponenten F_W , F_A , M_M und F_s , M_R , M_N ist die resultierende Luftkraft nach Größe und Angriffspunkt festgelegt
- Bei bekannter Lage des Momentanbezugspunktes in der Bodenebene, jeweils in der Mitte des Radstandes und des Achsabstandes, lassen sich dann auch die aus der Umströmung resultierenden Belastungsänderungen an vier Räder ermitteln.





Luftwiderstand

Aerodynamische Beiwerte

Windkanalmessungen:

F_W , F_A , M_M und F_S , M_R , M_N lassen sich im Windkanal durch direkte Kraftmessungen an Fahrzeug oder an verkleinerten Modellen ermitteln.

Für die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse ist wieder wesentlich, dass die Reynolds-Zahl des Modelles und des realen Fahrzeuges gleich ist.

Von den Abmessungen bildet man dimensionslose Beiwerte:

<p>Auftriebsbeiwert :</p> $c_A = \frac{F_A}{\frac{\rho}{2} \cdot v_\infty^2 \cdot A}$	<p>Widerstandsbeiwert :</p> $c_W = \frac{F_W}{\frac{\rho}{2} \cdot v_\infty^2 \cdot A}$
<p>Nickmomentenbeiwert :</p> $c_M = \frac{M_M}{\frac{\rho}{2} \cdot v_\infty^2 \cdot A \cdot l}$	<p>Seitenkraftbeiwert :</p> $c_s = \frac{F_s}{\frac{\rho}{2} \cdot v_\infty^2 \cdot A}$
<p>Rollmomentenbeiwert :</p> $c_R = \frac{M_R}{\frac{\rho}{2} \cdot v_\infty^2 \cdot A \cdot l}$	<p>Giermomentenbeiwert :</p> $c_N = \frac{M_N}{\frac{\rho}{2} \cdot v_\infty^2 \cdot A \cdot l}$

ρ : Dichte	M_M : Nickmoment	F_W : Widerstandskraft
A : Stirnfläche	M_R : Rollmoment	F_S : Seitenkraft
l : Bezugslänge	M_N : Giermoment	F_A : Auftriebskraft

Im Modellwindkanal wird der aerodynamische Feinschliff an der Karosserie ausgeführt.





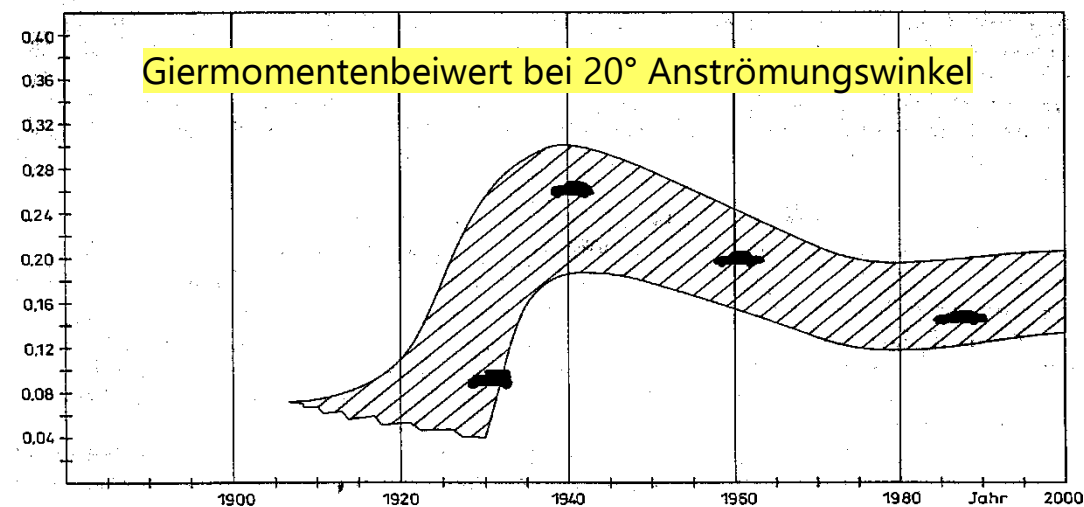
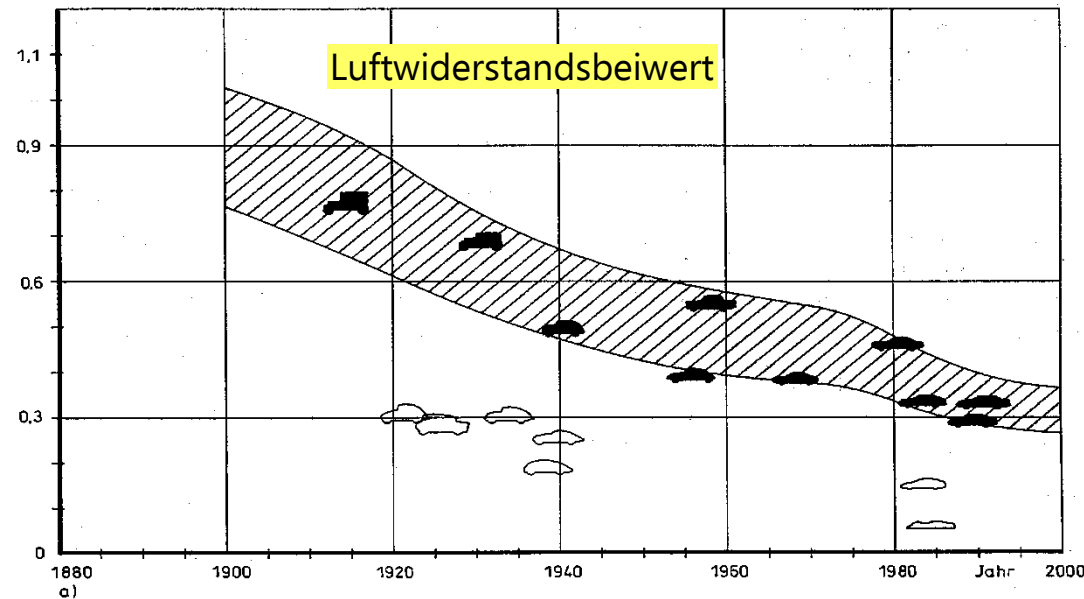
Luftwiderstand

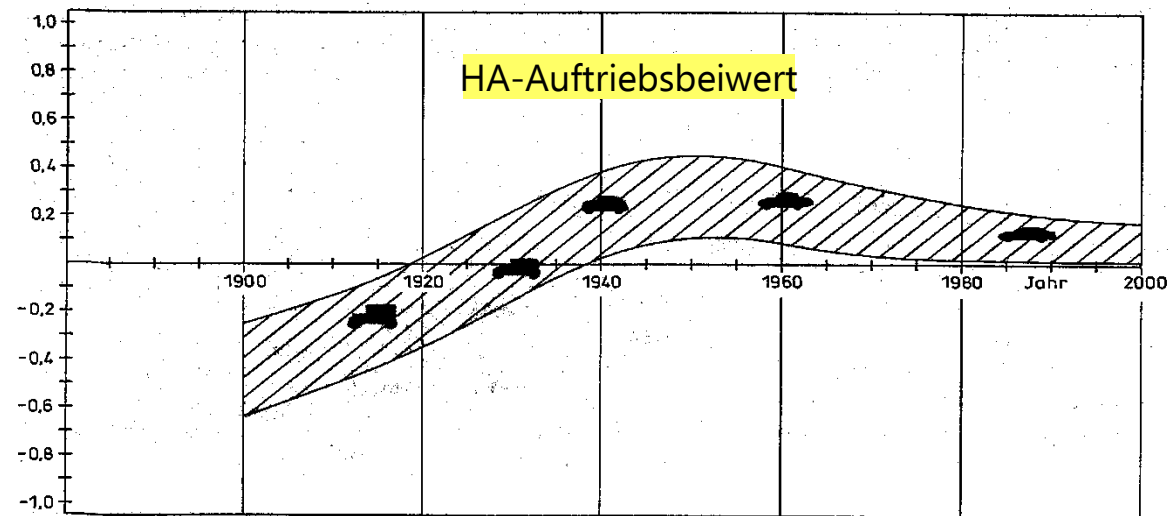
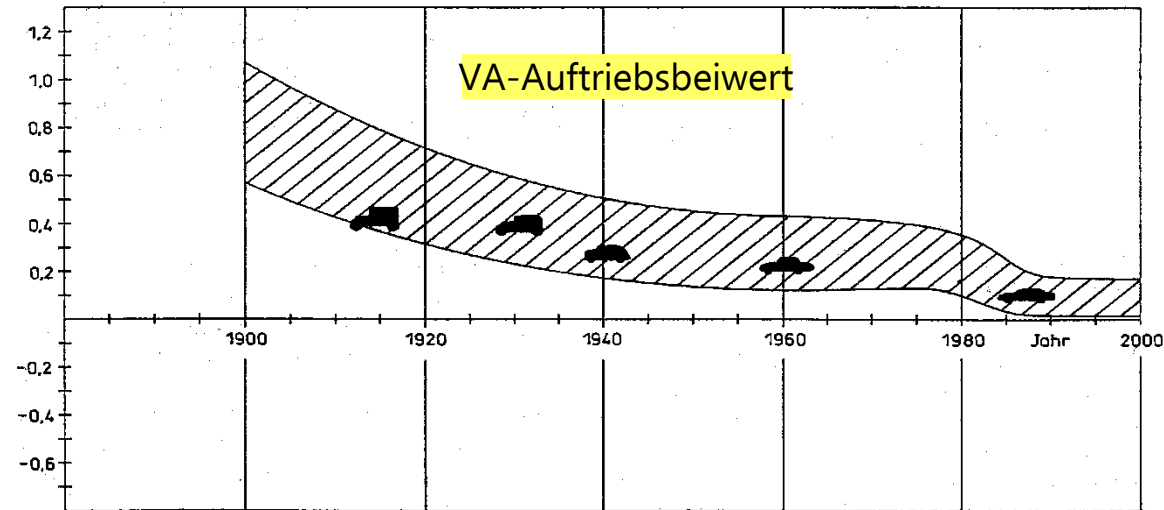
Richtungsstabilität durch Fahrtwind

Die durch die Umströmung des Fahrzeuges entstehende Luftkräfte und Momente beeinflussen die Fahrstabilität. Bei hoher Fahrgeschwindigkeit sind deren Auswirkungen auf den Fahrkomfort spürbar, und im Extremfall sind auch Sicherheitsaspekte betroffen.


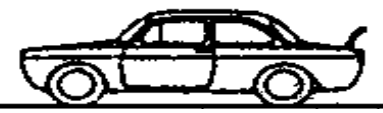
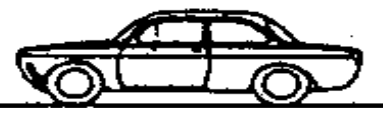
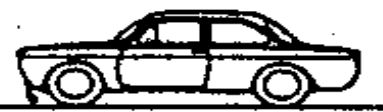
Der eigene Fahrtwind erzeugt Auftriebskräfte und ein Nickmoment. Daraus resultieren veränderte Radlasten und als Folge davon geänderte Haftbedingungen der Reifen. Das Wechselspiel dieser Kräfte und Momente am Fahrzeug beeinflusst sowohl dessen Richtungsstabilität bei Geradeausfahrt wie auch sein Eigenlenkverhalten bei Fahrtrichtungsänderungen.

Durch den natürlichen Umgebungswind und bei Überholvorgängen wird die Umströmung des Fahrzeuges unsymmetrisch. Es entsteht eine Seitenkraft, ein Gier- und ein Rollmoment, und auch Auftrieb und Nickmoment werden verändert. Dies führt zur Kursabweichungen, die vom Fahrer durch Lenkkorrekturen kompensiert werden müssen.





Beispiel:
Widerstands- und
Auftriebsbeiwert

	Widerstandsbeiwert	Auftriebsbeiwert
A  Ausgangsmodell	0,34	0,38
B  Heck-Spoiler	0,33	0,18
C  Seiten-Spoiler	0,38	0,48
D  Bug-Spoiler	0,38	0,29

Vergleich „A“ und „B“:

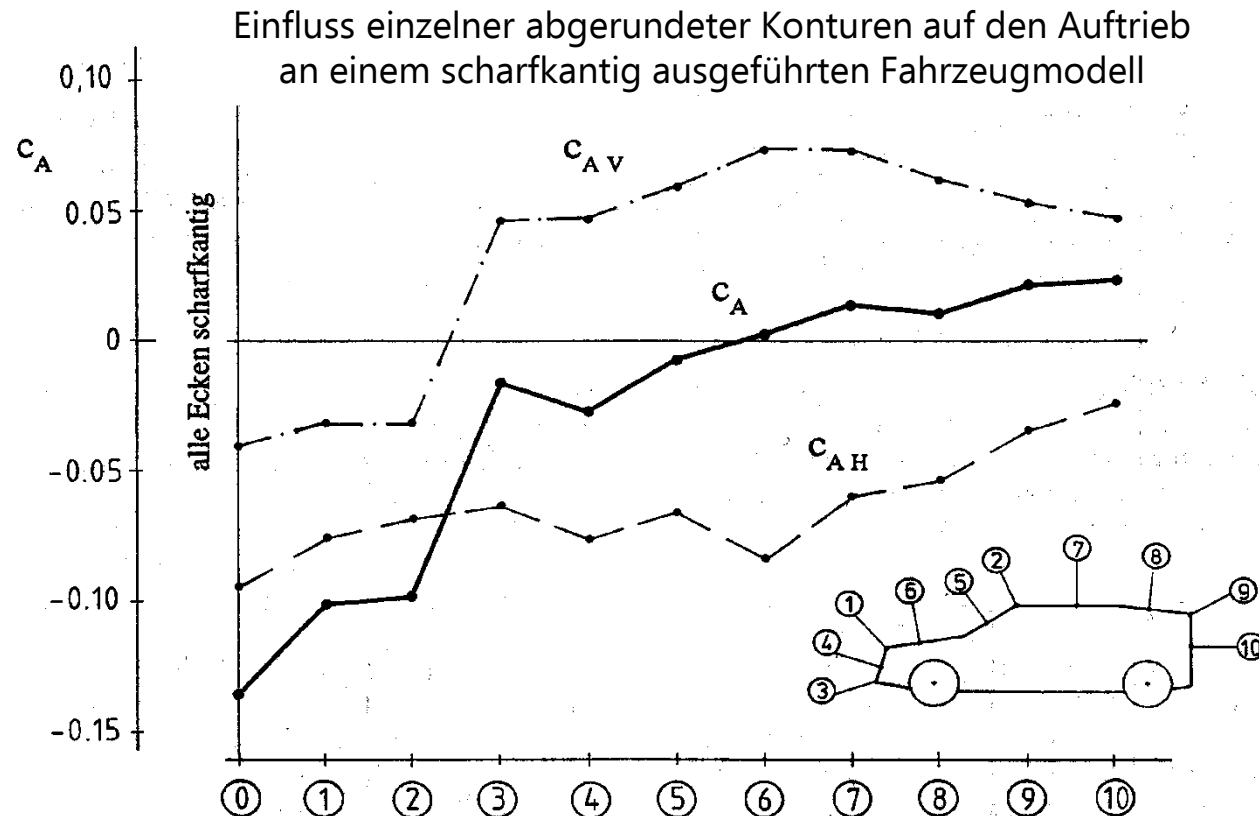
bei annähernd gleich niedrigem Widerstand ist der Auftrieb bei „B“ durch Heck-Spoiler weniger als halb so groß als bei „A“

Vergleich „A“ und „C“:

Auftriebs-- und Widerstandsbeiwerte verändern sich gleichläufig

Vergleich „A“ und „D“:

Auftriebs-- und Widerstandsbeiwerte verändern sich gegenläufig



Große Unterschiede zwischen VA- und HA-Auftrieb können zu einer Änderungen des Eigenlenkverhaltens mit steigender Fahrgeschwindigkeit führen. Ist z.B. der Auftrieb an der Hinterachse deutlich größer als an der Vorderachse, so ergibt sich eine Tendenz in Richtung Übersteuern. Leichter beherrschbar bleibt ein Fahrzeug mit ausgeglichener Auftriebsverteilung

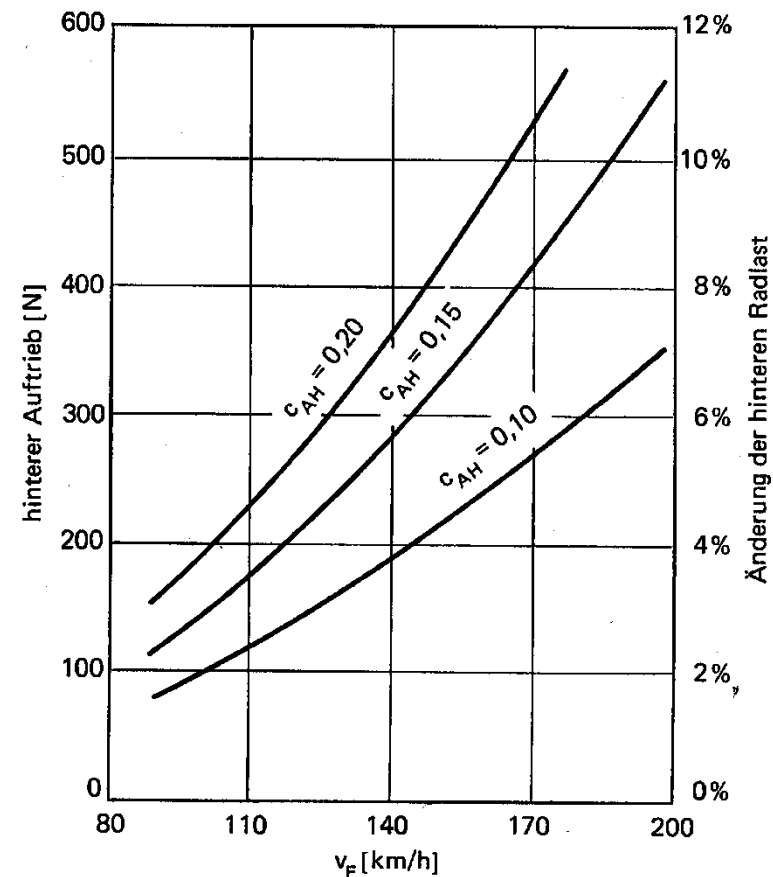


Luftwiderstand

Auftrieb bei Geradeausfahrt

Bei ungestörter Geradeausfahrt bis hin zu mittleren Geschwindigkeiten ist der Auftrieb von untergeordneter Bedeutung.

Bei Geschwindigkeiten oberhalb etwa 150 km/h werden die Radlasten durch Auftriebskräfte deutlich verändert.



- a) Gierverstärkung
- b) Bremsen i.d.Kurve
- c) Seitenwindempfindlichkeit

Bestimmung der Auftriebsbeiwerte-Grenzwerten

Zur Bestimmung der Grenzwerte für die aerodynamischen Auftriebsbeiwerte wird in der Regel das Manöver „Sinuslenken“ für die verschiedene Geschwindigkeiten mit der Lenkfrequenz von 0.2 Hz durchgeführt.

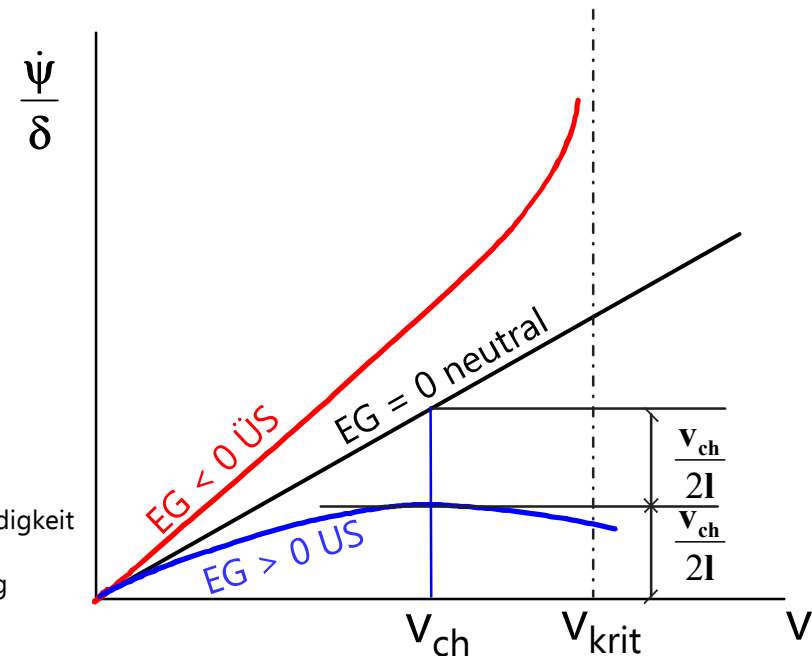
Beschreibung des Manövers „Sinuslenken“:

Das Manöver Sinuslenken wird mit Konstruktionsbelastung (KO-Beladung) für niedrige Lenkfrequenz (z.B. 0.2 Hz) simuliert oder gefahren. Dabei wird die Fahrgeschwindigkeit zwischen 25 und 250 km/h variiert, wobei die Amplitude des Lenkradwinkels wird jeweils so angepasst, dass sich die Querbeschleunigung von 4 m/s² ergibt.

Gierverstärkung:

$$\left(\frac{\dot{\psi}}{\delta} \right)_{\text{stat}} = \frac{v}{1 + EG \cdot v^2}$$

v_{ch} : charakteristische Geschwindigkeit
 v_{krit} : kritische Geschwindigkeit
 US : untersteuerendes Fahrzeug
 ÜS : übersteuerendes Fahrzeug



Manöver-Beschreibung:

- a) Gierverstärkung
- b) Bremsen i.d.Kurve
- c) Seitenwind-empfindlichkeit

- mit einer Fahrgeschwindigkeit von 140 km/h
- bei einer Windgeschwindigkeit von 75 km/h
- Windwinkel zur Sollbahn 90°

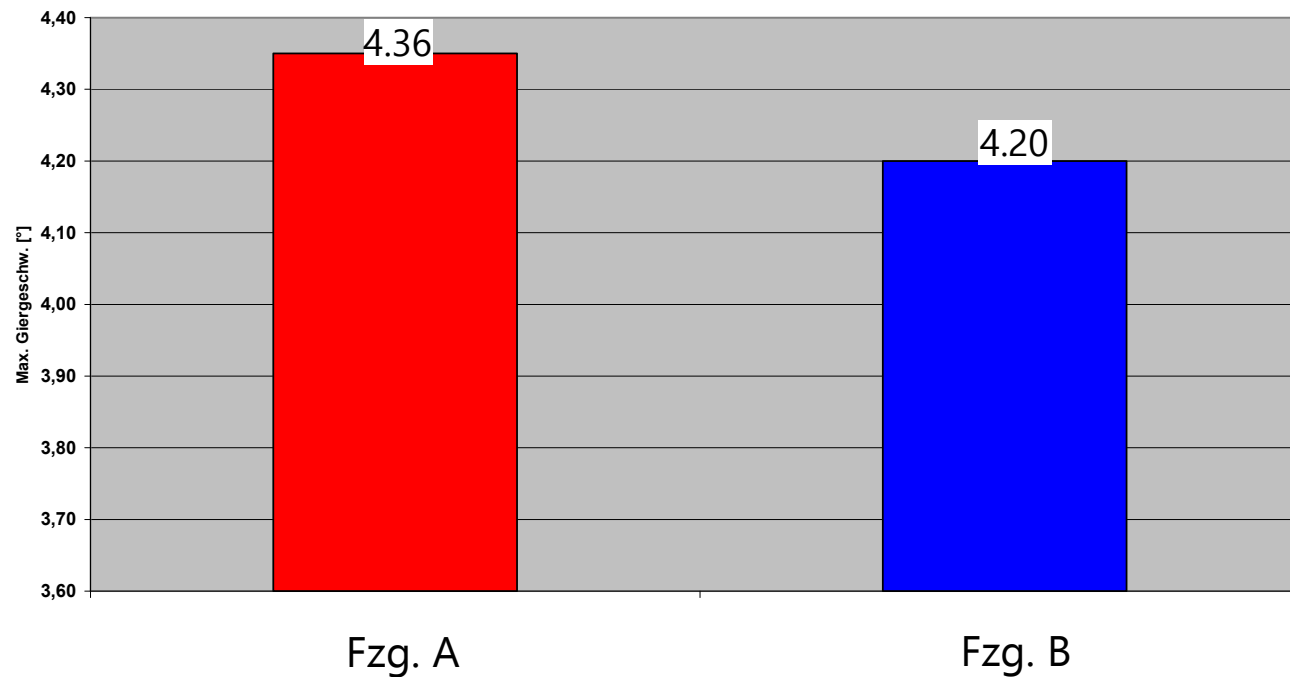


Fahrzeugdaten für die Simulation

	Fzg. A	Fzg. B
Gewicht KO [kg]	2050	2020
Radstand [mm]	3040	2960
Spurweite [mm]	1600	1550
Beladung	KO	KO
Stirnfläche [m ²]	2,34	2,31
Auftriebsbeiwert VA [-]	0,04	0,09
Auftriebsbeiwert HA [-]	0,09	0,09
Giermomentenbeiwert [-]	0,190	0,170
Seitenkraftbeiwert [-]	0,64	0,61
Reifen	225/60 R16	225/60 R16

→ Fzg. A günstiger: Achslasten, Radstand und Spurweite
Fzg. A ungünstiger: Stirnfläche und Giermomentenbeiwert

Vergleich Fahrzeug A mit Fahrzeug B



➔ Stand Fzg. A bezüglich dem Seitenwindverhalten schlechter als Fzg. B

Zusammenfassung:

Es gelten zur Verbesserung der maximalen Giergeschwindigkeit bei „Vorbeifahrt an Seitenwindgebläse“:

- Minimierung des Giermomenten-Beiwertes
- Kleine Stirnfläche
- Reifen mit erhöhter Cornering Stiffness
- Monitoring der Elastokinematik

- Entwicklung Aerodynamik bei Mercedes-Benz
- Luftkraftoptimierung
 - Prozess Luftkraftoptimierung
 - Charakteristika von Luftkraftsimulationen
 - Aerodynamik der aktuellen A-Klasse
- Aeroakustikberechnung
- Digitale Optimierung der Strömung in geöffneten Fahrzeugkabinen
- Zusammenfassung

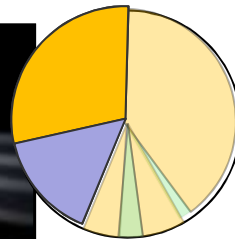
Aufgabenfelder Aerodynamikentwicklung

Luftkräfte und Zugfreihaltung werden zu erheblichen Anteilen auf Basis von Strömungsberechnungen optimiert.

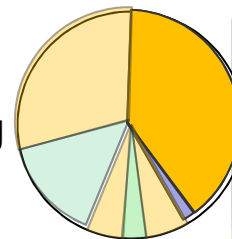
Hochschule Ulm



Luftkräfte



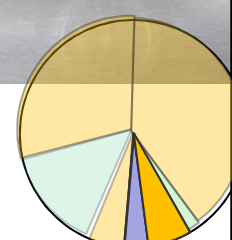
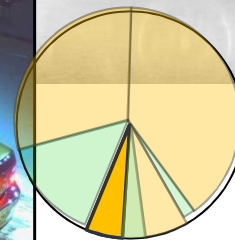
Experiment
Berechnung



Windgeräusche



Schmutzfreihaltung



Zugfreihaltung

Die Aerodynamikentwicklung von Fahrzeugen im Windkanal und in der Simulationen muss unter Modellierung der Strömungssituation bei Straßenfahrt erfolgen

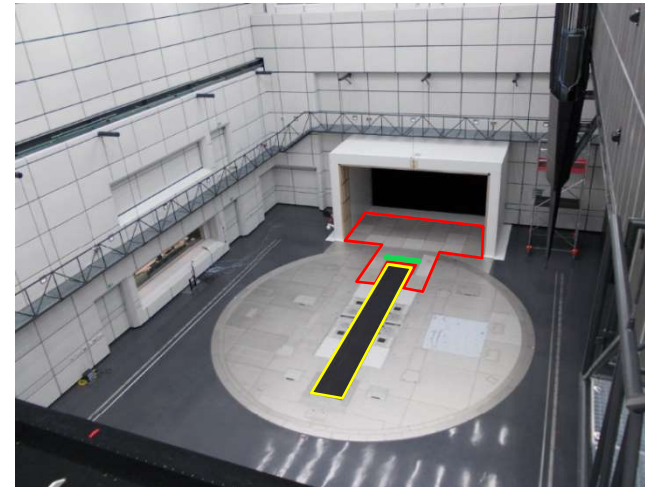
Straße



Windkanal stehender Boden und Räder



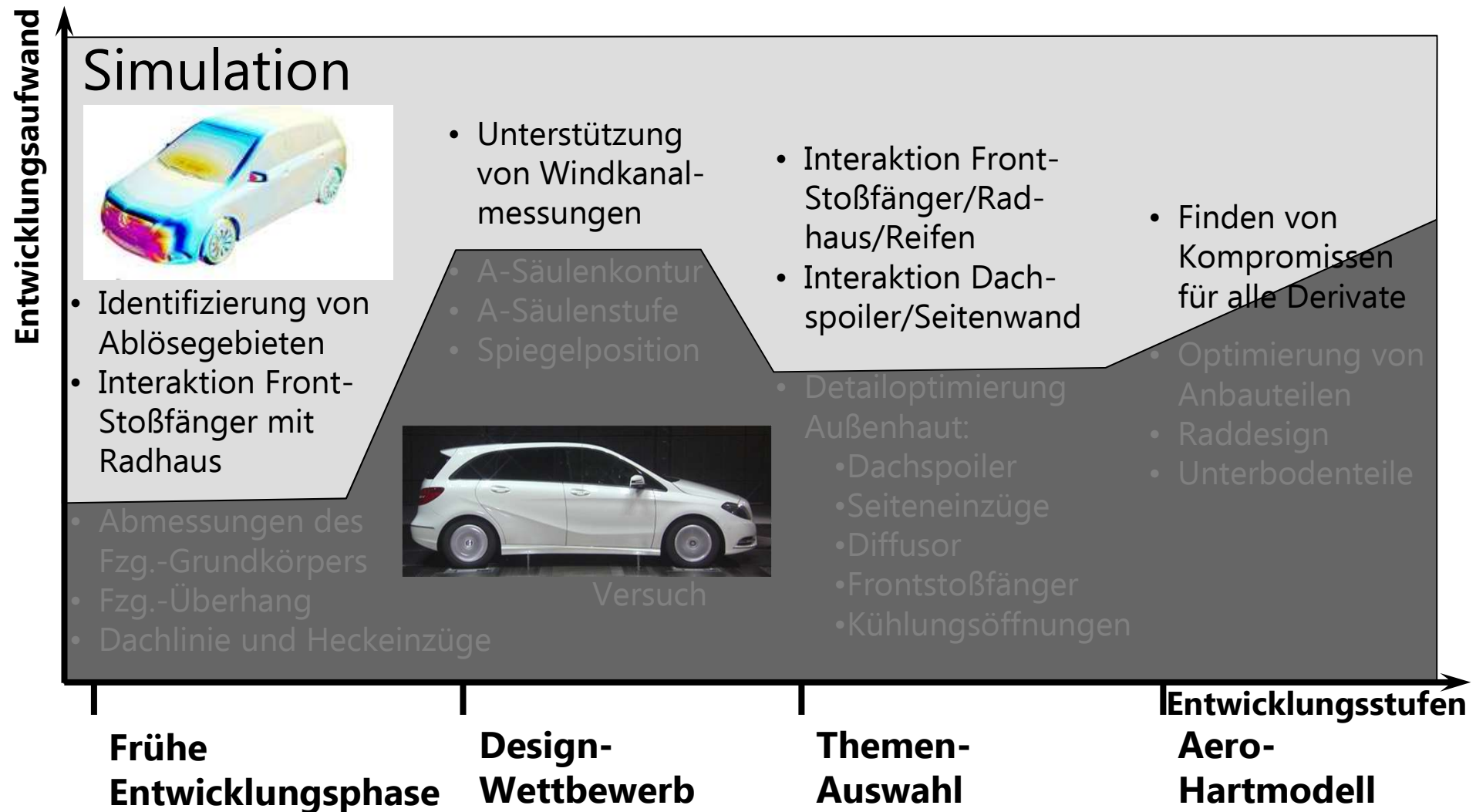
Windkanal mit Straßensimulation



- großflächige verteilte Vorabsaugung bereits in der Düse
- tangentielle Ausblasung vor dem Laufband
- Mittenlaufband mit rauher Beschichtung

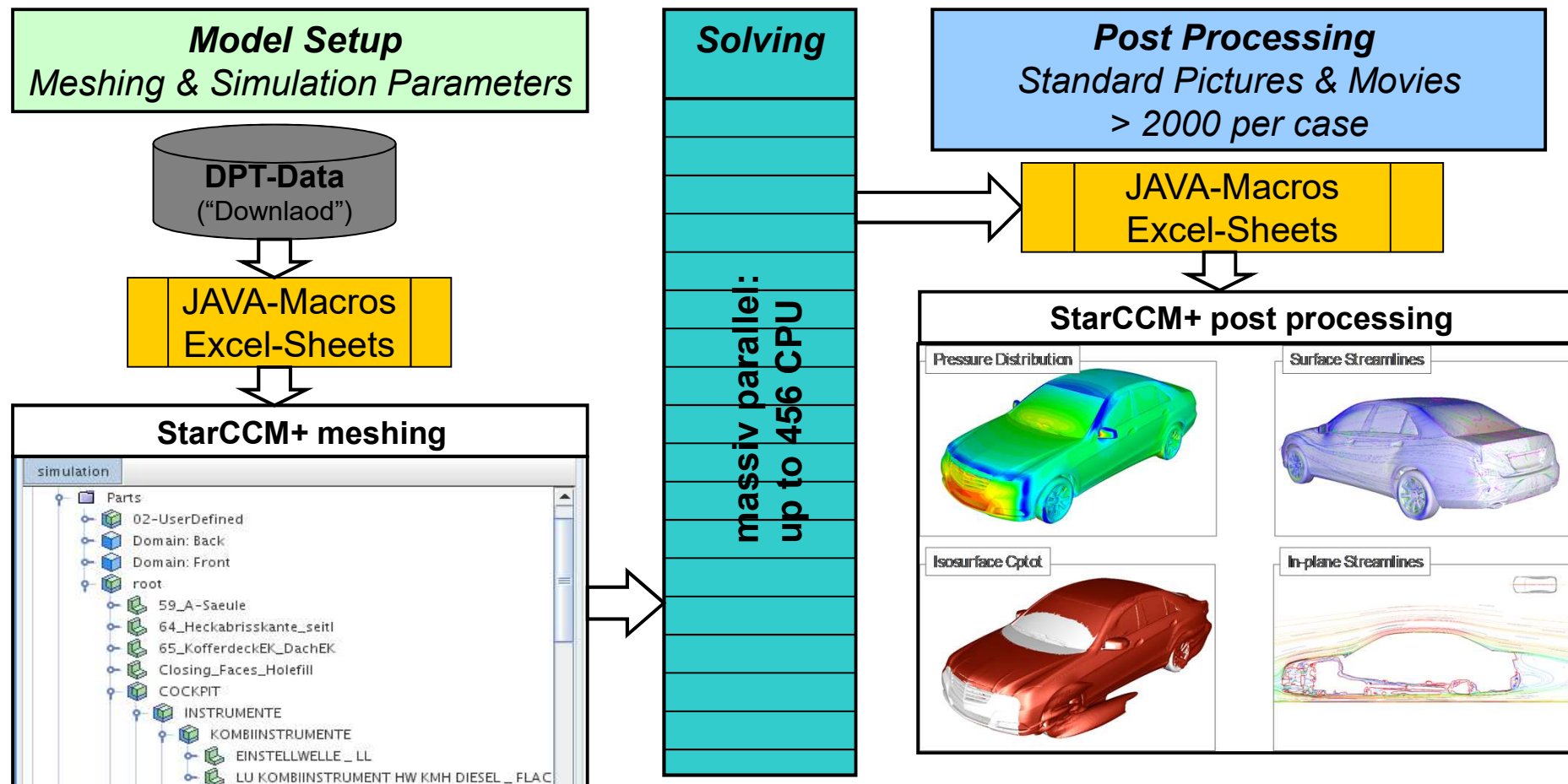


Simulation und Versuch ergänzen sich in den verschiedenen Entwicklungsstadien der Aerodynamik-Optimierung





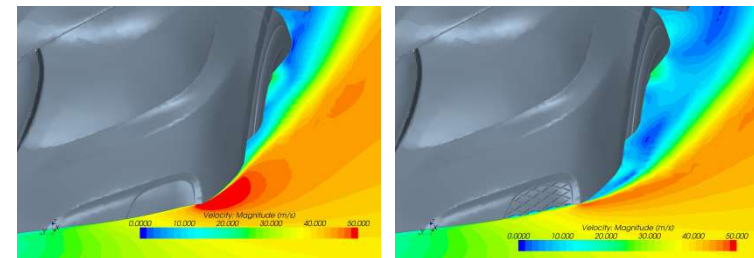
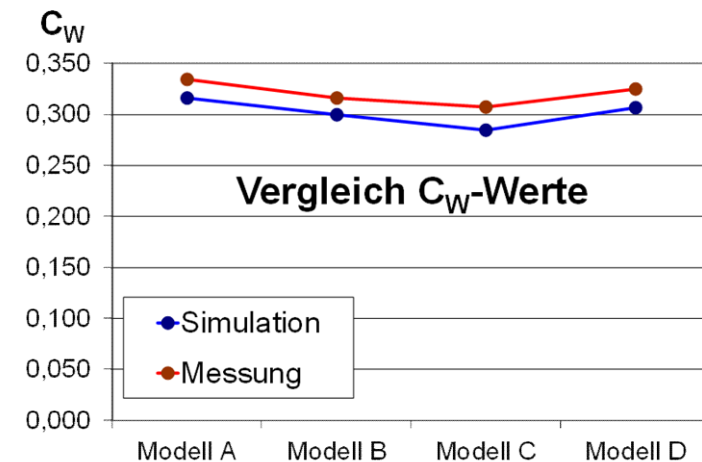
Der Simulationsprozess ist standardisiert, Geometrieaufbereitung, Vernetzung sowie Postprocessing sind weitgehend automatisiert





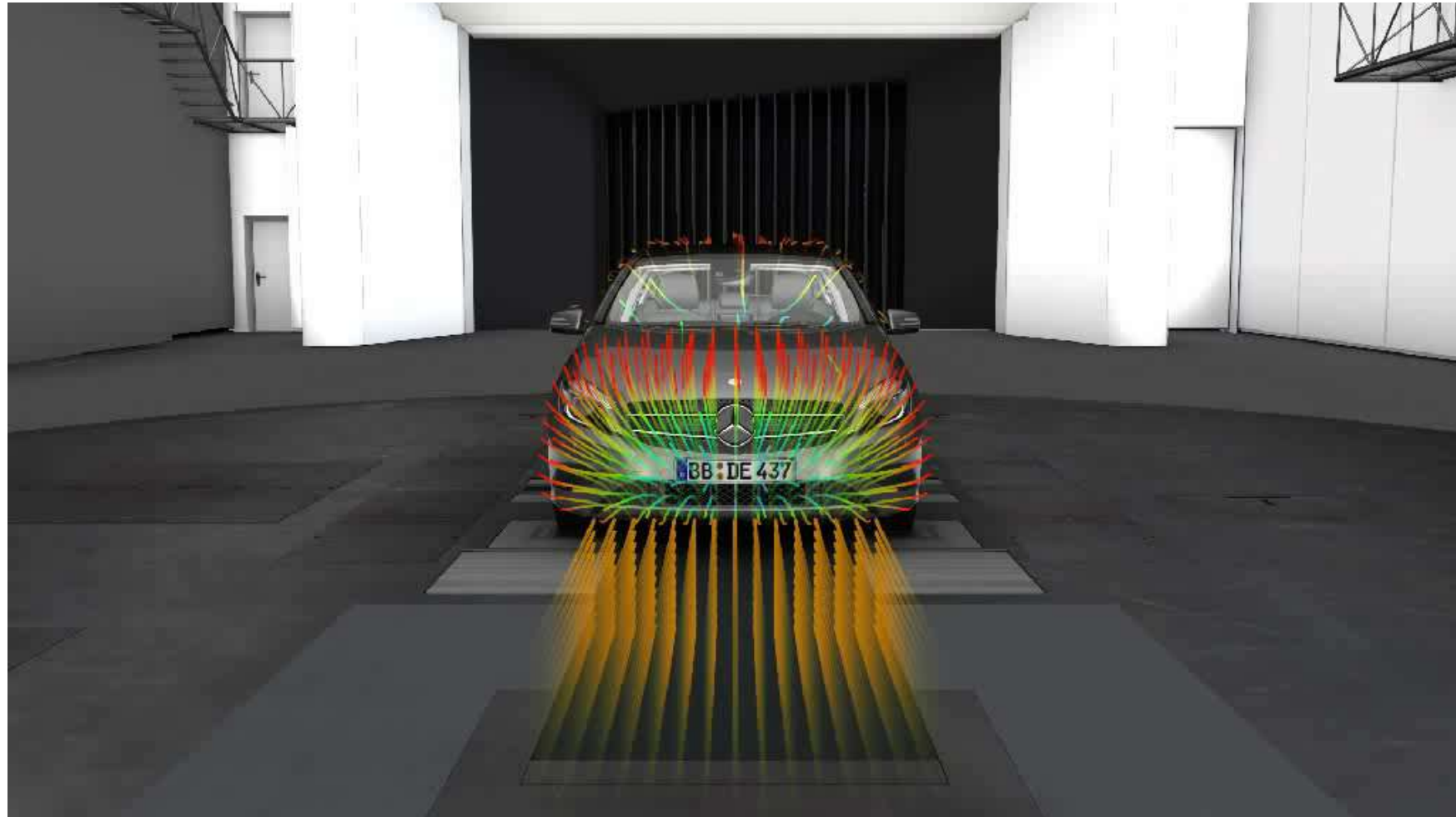
Die Berechnung zeigt nicht nur Trends, sondern liefert auch gute Luftkraft-Prognosen auf Referenzmodell-Basis

- Über den Vorgänger als Referenz kann der Luftwiderstandsbeiwert c_W neuer Fahrzeug-formen gut prognostiziert werden.
- Die Variantenbewertung der Auftriebsbeiwerte c_{av} und c_{ah} gelingt mittels CFD in der Tendenz.
- Die Bauteiloptimierung im Detail (z.B. Rautengittertiefe oder Radspoiler) gelingt heute in enger Verzahnung von Simulation und Windkanal.



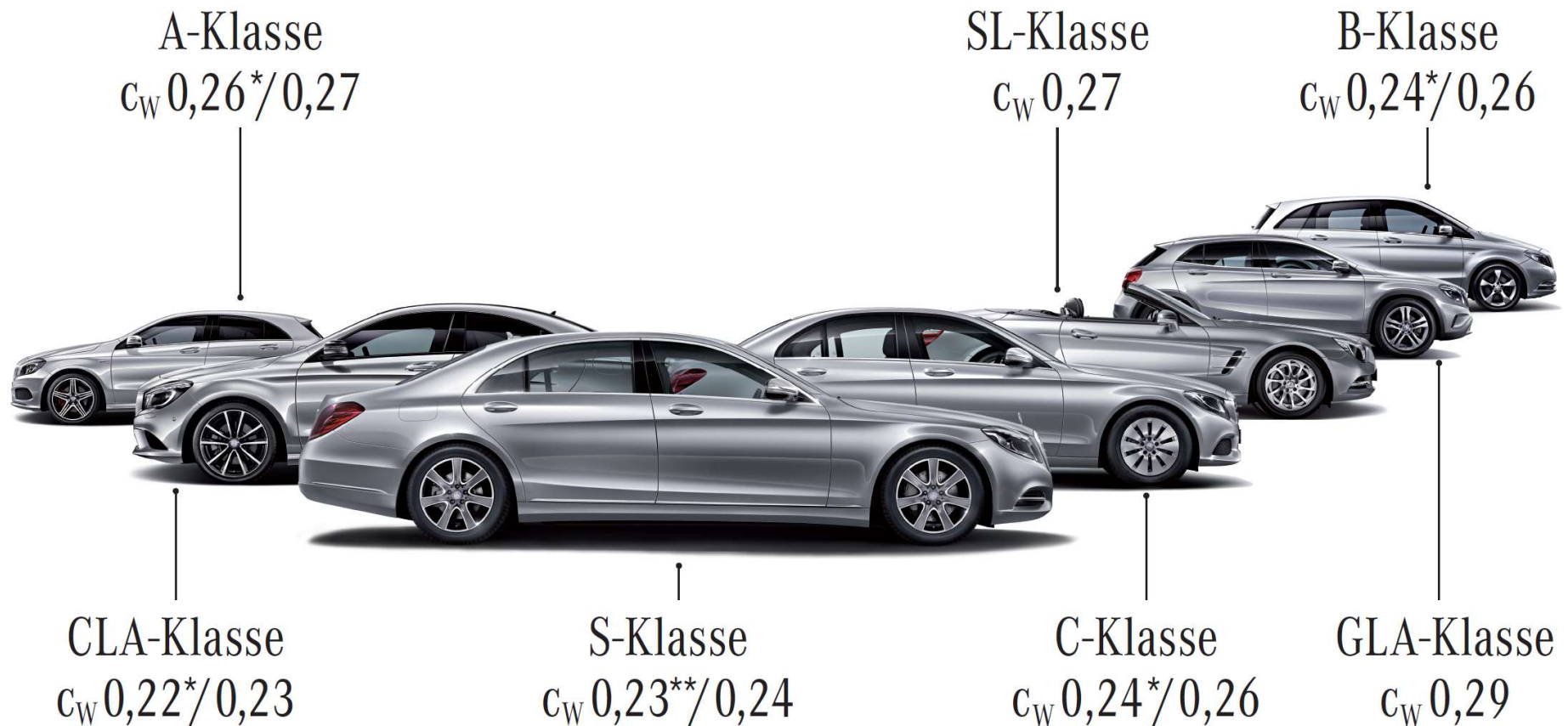


Aerodynamik der A-Klasse





Der niedrigste Luftwiderstand in jedem Segment



* BlueEFFICIENCY Edition Modelle

** S 300 BlueTEC HYBRID



Aerodynamikentwicklung bei Mercedes-Benz

Luftkräfte



Windgeräusche



Schmutzfreihaltung



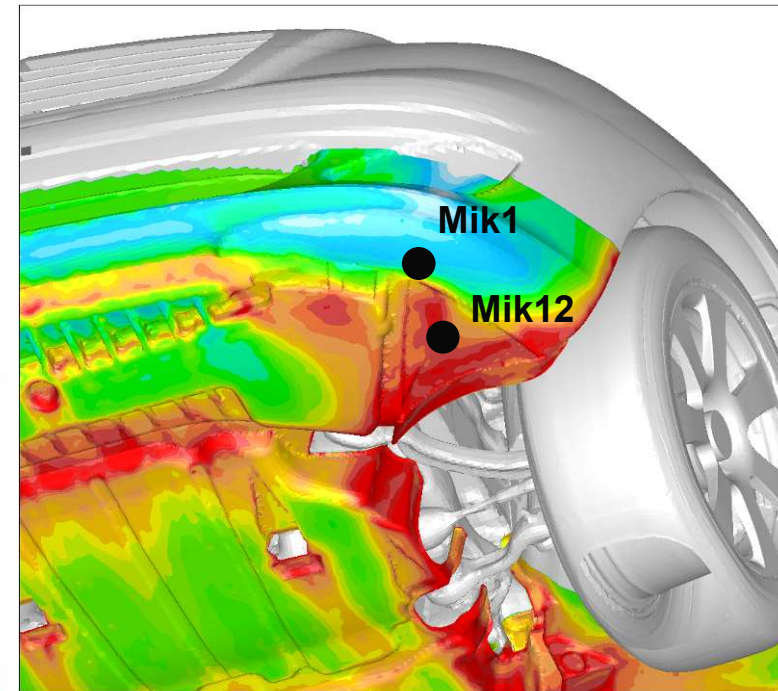
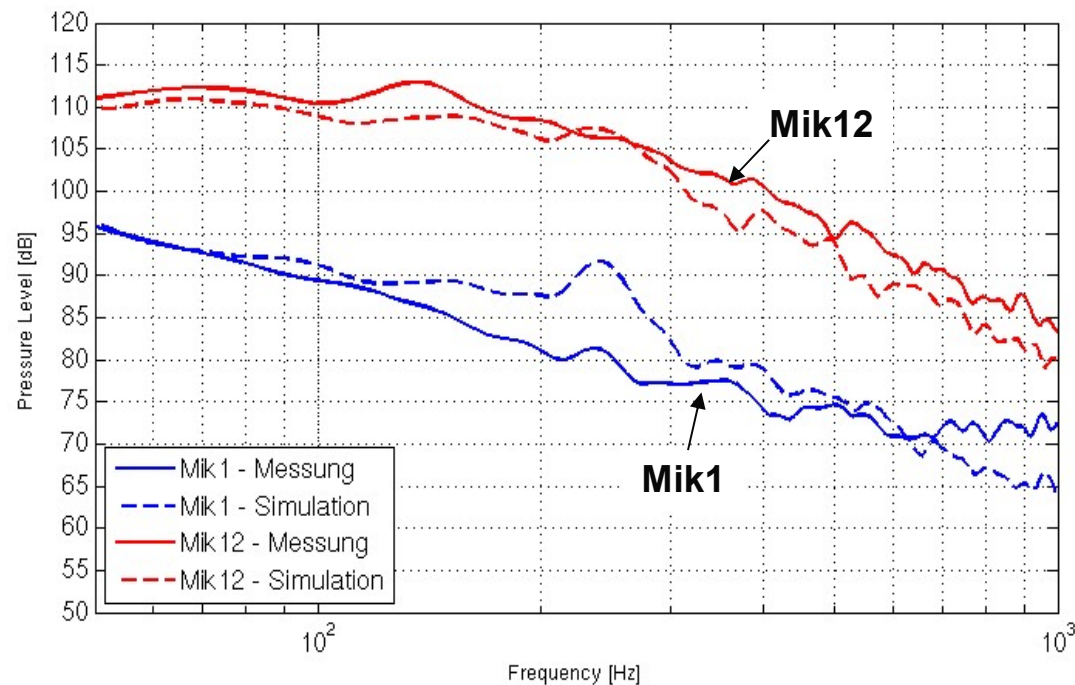
Zugfreihaltung





Dynamik der Fahrzeugunterströmung

- gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung
- hohe Simulationszeiten





Zusammenfassung

- ▶ Die Aerodynamiksimulation ist heute ein unverzichtbares Werkzeug in der Aerodynamik, dessen Bedeutung mit zunehmender Digitalisierung der Fahrzeugentwicklung weiter wächst
- Eine enge Verzahnung von Simulation und Versuch ermöglichen ein effizientes Erreichen von Bestwerten in der Luftkraftentwicklung
- Die Simulation Aeroakustik ist sehr aufwendig und heute noch im Pilotstadium
- Instationäre Simulationen zur Reduktion von Zugeffekten in geöffneten Kabrios /Roadstern ermöglichen gezielte Optimierungen
- Simulation der Fahrzeugverschmutzung bei Regenfahrt ist noch im Forschungsstadium