

2 Aerodynamische Grundlagen der Windkanalkorrekturmethoden

Die Aufgabe von Fahrzeugwindkanälen ist es, die reale Straßenfahrt so weitgehend nachzubilden, dass aerodynamische Größen unter kontrollierten Bedingungen mit hinreichender Genauigkeit gemessen werden können, wobei das Adjektiv „hinreichend“ an den Erfordernissen des Fahrzeugentwicklungsprozesses gemessen werden muss. In modernen Windkanälen wird dieses Ziel mit Hilfe von Bodensimulationseinrichtungen zur Darstellung der Relativbewegung zwischen Fahrbahn und Fahrzeug sowie durch Raddrehung immer besser umgesetzt. Neben der Bodensimulation gibt es allerdings in Windkanälen noch weitere Faktoren, die Einfluss auf die Qualität der Messung haben.

Die endlichen Abmessungen eines Windkanals führen stets dazu, dass die Berandung der Strömung – sei es eine feste Wand oder auch der Rand eines Freistrahls – mit dem Testobjekt interferiert und so die Messergebnisse von den Resultaten in freier Anströmung abweichen. In der Praxis ist jedes experimentelle oder numerische Simulationsmodell fehlerbehaftet. Daher muss versucht werden, die auftretenden Abweichungen durch ein geeignetes Fehlermodell zu quantifizieren und letztendlich auch zu korrigieren.

Windkanalkorrekturmethoden sind nichts anderes als ein Fehlermodell einer Windkanalumgebung. Es wird versucht, durch ein physikalisches oder empirisches Ersatzmodell, den Windkanal samt aller auftretenden Störgrößen (Interferenzen) zu modellieren. Ein derartiges Korrekturmodell ist stets eine Vereinfachung der realen Bedingungen und kann somit auch nur sinnvoll in einem limitierten Bereich eingesetzt werden und hat somit auch keine Allgemeingültigkeit. Das heißt im Umkehrschluss, jedes Korrekturmodell weist Grenzen der Anwendbarkeit auf. Beispielsweise kann ein Korrekturmodell für stromlinienförmige Körper, wie etwa einen Tragflügel, nur bedingt auf die Umströmung stumpfer Körper, wie zum Beispiel ein Fahrzeug, angewendet werden.

In diesem Kapitel werden zunächst die benötigten Grundlagen der Windkanaltechnik aufgeführt, um anschließend mit Hilfe von potentialtheoretischen Methoden grundlegende Korrekturmodelle herzuleiten. Die

geschichtliche Entwicklung sowie der aktuelle Stand der Technik zu Korrekturmethode in Freistrahwindkanälen werden im Detail erläutert. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Mercker-Wiedemann-Korrekturverfahren [48] für stumpfe Körper in Freistrahwindkanälen.

2.1 Windkanaltechnik

In der allgemeinen Windkanaltechnik zählen Fahrzeugwindkanäle zu der Klasse der Niedergeschwindigkeitswindkanäle, da sie bei sehr niedrigen Machzahlen ($Ma < 0,3$) betrieben werden, bei denen Kompressibilitätseinflüsse gering sind und Änderungen der Luftdichte weniger als drei Prozent betragen.

Je nach Art der Luftführung werden zwei grundlegende Windkanalbauformen unterschieden (siehe Abbildung 2.1). Kanäle mit offener Luftführung werden als Eiffel-Kanäle bezeichnet. Bei geschlossener Luftführung spricht man von Windkanälen Göttinger Bauart. Eiffel-Windkanäle sind in der Regel im Bau kostengünstiger, benötigen jedoch im Betrieb mehr Energie, sind abhängig von Umweltfaktoren und aeroakustische Messungen sind nur schwer möglich. Ein wesentlicher Vorteil der Windkanäle Göttinger Bauart ist die Unabhängigkeit von Umweltbedingungen sowie die Möglichkeit für aeroakustische Messungen. Demgegenüber stehen die höheren Baukosten sowie die zumeist nötige Kühlung der Strömung. Weitergehende Vor- und Nachteile der Bauformen sind in der entsprechenden Fachliteratur nachzulesen [73, 86]. In den vergangenen Jahrzehnten sind die typischen Bauformen mehr und mehr durch ergänzende Eigenschaften und Bauteile erweitert worden, so dass jeder Windkanal im Detail individuell betrachtet werden muss [3].

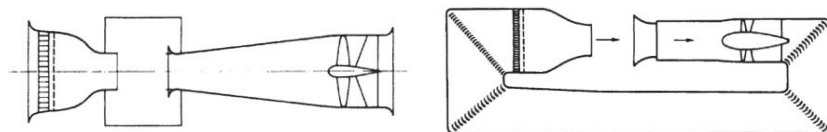


Abbildung 2.1: Windkanalbauformen: Eiffel Bauart (links) und Göttinger Bauart (rechts) [73]

Eine weitere Unterteilung der Windkanäle kann anhand deren Messstrecke erfolgen. Haupttypen stellen dabei die offene und die geschlossene Messstrecke dar (Abbildung 2.2 oben). Es wurden auch Sonderformen wie die geschlitzte, die stromlinienförmige oder die adaptive Messstrecke entwickelt. Diese Sonderformen (siehe Abbildung 2.2 unten) versuchen, die Vorteile der beiden Haupttypen (offene und geschlossene Messstrecke) zu kombinieren. Details hierzu findet man in [3, 28, 73, 86].

Bei offenen Messstrecken ist die effektiv nutzbare Strahllänge begrenzt. Mit zunehmender Messstreckenlänge breitet sich die Scherschicht am Strahlrand aus und der Potentialkern wird kontinuierlich kleiner. Darüber hinaus weiten sich die Stromlinien aufgrund der Randbedingung des Umgebungsdrucks am Strahlrand stärker auf als in freier Anströmung. Aus Kontinuitätsgründen wird das Fahrzeug in der offenen Windkanalmessstrecke folglich mit einer zu niedrigen Strömungsgeschwindigkeit angeströmt und es ergeben sich zu geringe Widerstandsbeiwerte.

Auch in geschlossenen Messstrecken nimmt der nutzbare Strahlquerschnitt infolge der Wandgrenzschichten mit zunehmender Länge ab. Dies geschieht jedoch wesentlich langsamer als in offenen Messstrecken. Da über den Rand der Messstrecke keine Strömung austreten kann, steigt durch die Verdrängungswirkung des Fahrzeugs aus Kontinuitätsgründen die Strömungsgeschwindigkeit. Entsprechend steigen die Kräfte auf das Fahrzeug und der Luftwiderstand wird als zu hoch ermittelt.

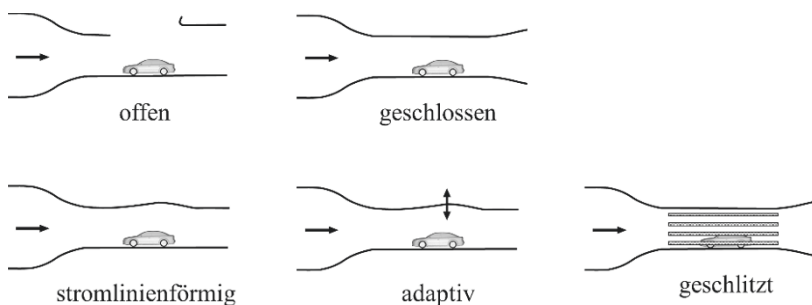


Abbildung 2.2: Unterschiedliche Messstreckenarten [73]

Bei Messstrecken mit geschlitzten Wänden wird versucht, die wesentlichen Vorteile der offenen und geschlossenen Messstrecke zu vereinigen. Der feste Teil der Messstrecke verhindert eine Vermischung des Strahls mit der Umgebung. Durch die Längsschlitze wird ein Druckausgleich mit der Umgebung hergestellt. In der Praxis kommt es allerdings durch den Versperrungseffekt des Fahrzeugs zu einem Ein- und Ausströmen durch die Schlitze, was nur schwer durch Korrekturen ausgeglichen werden kann.

Stromlinienförmige und adaptive Messstrecken können die Versperrungsproblematik beseitigen. Für Messstrecken in Stromlinienform ist dies aber lediglich für eine Modellproportion möglich. Für anderen Geometrien treten erneut Versperrungseffekte auf. Adaptive Messstrecken versuchen, auch diese Problematik zu lösen. Allerdings mit hohem konstruktiven Aufwand. Die Ermittlung der erforderlichen Kontur erfolgt iterativ. In Windkanälen, in denen überwiegend Serienentwicklung an Fahrzeugen betrieben wird, hat sich diese Technik bisher nicht durchsetzen können, wohl aber vereinzelt im Rennsportbereich, wo ein und dasselbe Fahrzeug oft langfristig in der Messstrecke verbleibt [1, 2, 10, 24, 29, 60, 73].

Die Weiterentwicklung des Fahrzeugwindkanals in den vergangenen beiden Jahrzehnten zeigte vor allem die Bedeutung, die der Bodensimulation bei der aerodynamischen Fahrzeugoptimierung zukommt [61, 84, 85]. Die Bodensimulation sollte hierbei grundsätzlich drei Kriterien genügen:

1. Entfernung der ankommenden Bodengrenzschicht
2. Simulation der Relativbewegung zwischen Fahrzeug und Straße
3. Darstellung der Raddrehung

In annähernd allen neueren Fahrzeugwindkanälen werden technische Vorrichtungen bestehend aus Laufbandsystemen, Raddreheinheiten und weiteren grenzschichtbeeinflussenden Maßnahmen vorgesehen, die die geforderten Kriterien der Bodensimulation erfüllen. Einen Überblick über verschiedene Möglichkeiten der experimentellen Bodensimulation ist in [73] zu finden.

2.1.1 Bauelemente einer Freistrahlmessstrecke

In dem folgenden Kapitel soll kurz auf die drei wesentlichen Bauelemente einer Freistrahlmessstrecke eingegangen werden. Das sind im Einzelnen die Windkanaldüse inklusive der Vorkammer, die bereits im vorherigen Kapitel angesprochene Messstrecke sowie der Windkanalkollektor.

Zur Beschreibung der Windkanalinterferenzeffekte – und somit auch der Windkanalkorrektur – ist ein detailliertes funktionales Verständnis der maßgeblichen Bauelemente einer Freistrahlmessstrecke unerlässlich. Weiterführende Details zu allen Bauelementen sind in der entsprechenden Fachliteratur zu finden [3, 73, 91].

Windkanaldüse mit Vorkammer

Die Aufgabe einer Windkanaldüse ist es, die Luft auf die gewünschte Strömungsgeschwindigkeit zu beschleunigen. Die Form einer solchen Düse, deren Kontur und deren Kontraktionsverhältnis κ bestimmen die Gleichförmigkeit der Strömungsgeschwindigkeit sowie deren Turbulenzgrad Tu^1 .

Das Kontraktionsverhältnis κ beschreibt das Verhältnis der Querschnittsflächen von Vorkammer A_{VK} und Düsenaustritt A_D :

$$\kappa = \frac{A_{VK}}{A_D} \quad \text{Gl. 2.1}$$

Mit zunehmendem Kontraktionsverhältnis nimmt in der Regel der Turbulenzgrad ab und die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit am Düsenaustritt wird gleichförmiger. Bei Windkanälen Göttinger Bauart können bereits mit $\kappa \approx 6$ ein Turbulenzgrad von weniger als 0,2 % und eine Winkelabweichung von weniger als $\pm 0,1^\circ$ erreicht werden [73].

Bei der Kontur einer Düse muss stets ein Kompromiss zwischen der Länge der Düse und dem Geschwindigkeitsgradienten gefunden werden. Bei zu starken positiven Gradienten vor dem Wendepunkt der Düsenkontur, kann es zur Ablösung der Wandgrenzschicht und somit zu einer ungleichförmigen Geschwindigkeitsverteilung kommen. In einer zu lang ausgelegten Düse baut

¹ Homogene, isotrope Turbulenz: $Tu = \frac{\sqrt{u'^2}}{u_\infty}$

sich hingegen eine dicke Wandgrenzschicht auf, die die Geschwindigkeitsverteilung am Düsenaustritt ebenfalls beeinflusst. Darüber hinaus erhöht eine lange Düse die Baukosten oder reduziert die verfügbare Messstreckenlänge.

In der Vorkammer vor der Windkanaldüse werden üblicherweise sogenannte Gleichrichter integriert. Diese wabenförmigen Luftleitgitter minimieren die auftretenden Turbulenzen in der Strömung und ermöglichen so eine gleichmäßigere Verteilung der Düsenaustrittsgeschwindigkeit.

Messstrecke

Eine Freistrahlmessstrecke kann im Wesentlichen durch die folgenden Hauptabmessungen charakterisiert werden (siehe Abbildung 2.3). Die bereits eingeführte Querschnittsfläche der Düse A_D , die Messstreckenlänge L_{MS} , also der Abstand Düse-Kollektor, der Umfang der Düse (bei nicht kreisförmigem Querschnitt) U_D und die Querschnittsfläche des Kollektors A_K . Des Weiteren ist in Abbildung 2.3 der Abstand zwischen Fahrzeugheck und Kollektoreintritt Δx_K eingezeichnet. Dieser Abstand ist maßgeblich für die auftretenden Interferenzeffekte am Kollektor und wird in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

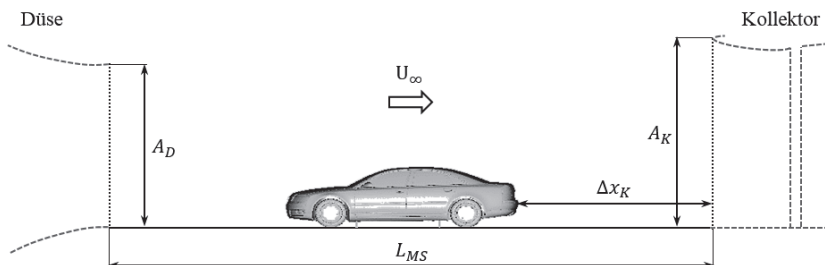


Abbildung 2.3: Hauptabmessungen einer Freistrahlmessstrecke

Mit diesen Abmessungen können folgende dimensionslosen Größen definiert werden:

- Hydraulischer Durchmesser der Düse: $d_D = \frac{4A_D}{U_D}$ Gl. 2.2

- Dimensionslose Messstreckenlänge: $\lambda = \frac{L_{MS}}{d_D}$ Gl. 2.3

- Verhältnis Kollektor- zu Düsenfläche: $\Omega = \frac{A_K}{A_D}$ Gl. 2.4

- Versperrung (A_M : Stirnfläche des Modells): $\varphi = \frac{A_M}{A_D}$ Gl. 2.5

Die Versperrung des Luftstroms durch ein Fahrzeug führt im endlichen Freistrahle des Windkanals zu einer anderen Umströmung als auf der Straße. Um straßenähnliche Verhältnisse zu simulieren, muss die Versperrung φ möglichst klein sein. Nur so lassen sich die auftretenden Interferenzeffekte klein halten.

Die dimensionslose Messstreckenlänge λ , das Verhältnis Kollektor- zu Düsenfläche Ω sowie die Größe des Plenums spielen eine entscheidende Rolle für den statischen Druckverlauf entlang der Strahlachse in der leeren Messstrecke. Bereits 1988 wurde gezeigt, dass, abhängig von der Messstreckenlänge und bei einer vorgegebenen Kollektorform, der Druckgradient bis hin zur Düse beeinflusst werden kann. Bei einer kleinen dimensionslosen Messstreckenlänge (z.B. $\lambda = 2,0$) tritt nach [49] in der Regel ein positiver Druckgradient in Strömungsrichtung auf. Dies bewirkt eine Verringerung des gemessenen Luftwiderstands. Oberhalb von dimensionslosen Messstreckenlängen von etwa $\lambda = 3,0$ ergibt sich eine Unabhängigkeit von der Kollektorgroße. Es besteht jedoch weiterhin eine Abhängigkeit von der Plenumsgröße und der Kollektorgeometrie. Daher gilt es, auf die optimale Auslegung des Kollektors und der umgebenden Plenumshalle zu achten, um Druckgradienten gering halten oder im Idealfall vermeiden zu können [9, 68, 73].

Demzufolge liegt der Schluss nahe, dass gradientenfreie Windkanäle durch entsprechend große Werte für λ ermöglicht werden. Da aber eine lange Messstrecke die Eigenschaft hat, Strahlinstabilitäten quer zur Strömungsrichtung zu erzeugen, ist dieser Weg nur bedingt empfehlenswert [66].

Kollektor

Der Windkanalkollektor steht im Fokus der in dieser Arbeit entwickelten Korrekturanteile. Von der Düse ausgehend bildet sich eine stromabwärts wachsende Scherschicht aus. Durch turbulente Mischprozesse mit der Luft im umgebenden Plenum nimmt der Volumenstrom des Freistrahls mit der Lauflänge zu. Der Kollektor muss dieses Volumenstromdelta wieder ausgleichen und dem Freistrahls Querstabilität verleihen. Üblicherweise wird dies dadurch erreicht, dass der Kollektor mit Entlüftungsöffnungen (sogenannten Brethern) ausgestattet ist und/oder einen Spalt zum stromabfolgenden Diffusor aufweist. Das vom Kollektor aufgenommene Delta an Volumenstrom kann über den Kollektorspalt oder die Breather ausgeglichen werden. Wird, beispielsweise aus Gründen der Aeroakustik, auf Öffnungen im Kollektor verzichtet, führt dies zu Rückströmungen an den Kollektorständen zurück ins Plenum. Durch diese Rückströmungen weitet sich der Freistrahls stromauf des Kollektors auf, was einen positiven Druckgradienten in der Messstrecke zur Folge hat [73, 91].

Die Geometrie des Kollektors inklusive aller Öffnungen und Spalte beeinflusst maßgeblich den statischen Druckverlauf in der Messstrecke. Grundsätzlich lassen sich konvergente und divergente Querschnittsformen des Kollektors unterscheiden. Mercker hat in [73] die Strömungsverhältnisse in konvergenten und divergenten Kollektoren schematisch veranschaulicht, siehe Abbildung 2.4.

Um die angeströmten Kollektorstände entsteht in Verbindung mit dem Kollektorspalt eine positive oder negative Strömungszirkulation. Es erhöht sich somit der Volumenstrom durch einen divergenten Kollektor und im Kollektorspalt stellt sich eine in die Plenumshalle gerichtete Strömung ein. Beim konvergenten Kollektor verhalten sich die Strömungsverhältnisse gegensinnig. Der Volumenstrom durch den Kollektor wird reduziert. Durch den Kollektorspalt strömt Luft ein [73].

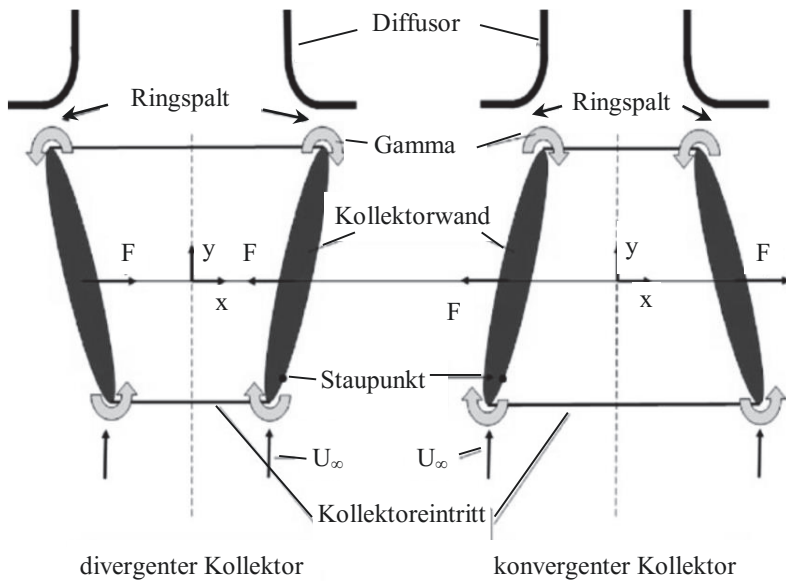


Abbildung 2.4: Strömung um einen divergenten und konvergenten Windkanal-kollektor aufgrund der Zirkulation [73]

2.1.2 Bestimmung der Anströmgeschwindigkeit im Windkanal

Im Hinblick auf die Korrektur von Interferenzeffekten ist die Bestimmung der Anströmgeschwindigkeit – und damit des dynamischen Drucks q_∞ – von besonderer Bedeutung. Sämtliche Korrekturen der Blockierungseffekte fließen als Interferenzgeschwindigkeit ε in die korrigierten Beiwerte ein. In diesem Abschnitt soll daher ein Überblick über die Messmethoden zur Geschwindigkeitsbestimmung im Windkanal gegeben werden. Weitere Details können der Fachliteratur entnommen werden [3, 9, 35, 73, 90].

In einem leeren Windkanal kann der für die Geschwindigkeitsbestimmung erforderliche Staudruck $q_{\infty, \text{leer}}$ mit einem Prandtl-Rohr gemessen werden. Aus der Druckdifferenz zwischen Totaldruck und statischem Druck ergibt sich der dynamische Druck q_∞ :

$$p_{\text{tot}} - p_{\text{stat}} = \frac{\rho_L}{2} v_\infty^2 = q_\infty \quad \text{Gl. 2.6}$$

Befindet sich jedoch ein Fahrzeug in der Messstrecke, so muss der dynamische Druck der ungestörten Anströmung an einer Stelle im Strömungsfeld bestimmt werden, die von der Umströmung des Modells unbeeinflusst ist. Daher ist es erforderlich, eine indirekte Messmethode mit vorheriger Kalibrierung in der leeren Windkanalmessstrecke anzuwenden. Hierfür haben sich zwei unterschiedliche Verfahren, die sogenannte Düsenmethode und die Plenummethode (siehe Abbildung 2.5), etabliert.

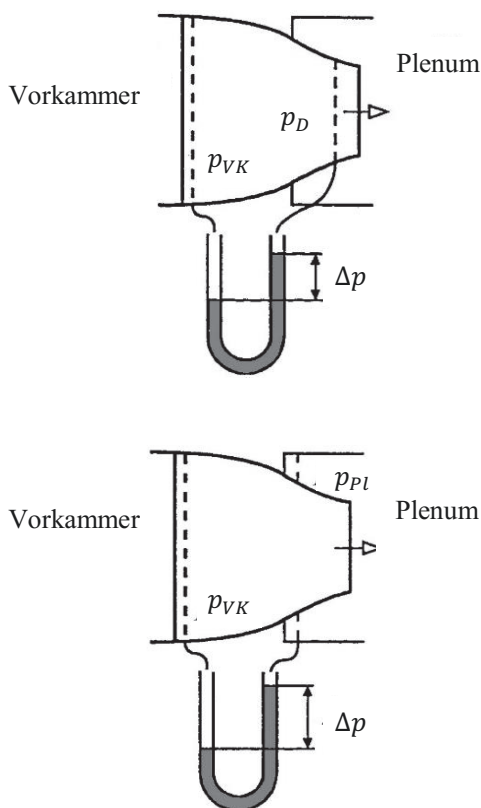


Abbildung 2.5: Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal mit der Düsenmethode (links) und der Plenummethode (rechts) [73]

Beide Methoden haben gemeinsam, dass der dynamische Druck q_∞ zu einer in der leeren Messstrecke kalibrierten Druckdifferenz Δp in Relation gesetzt wird. Es ergibt sich damit der allgemeine Zusammenhang:

$$q_\infty = k \cdot \Delta p \quad \text{Gl. 2.7}$$

Bei der **Düsenmethode** wird die statische Druckdifferenz Δp_D aus dem Vorkammerdruck p_{VK} und dem statischen Druck in der Düse p_D gebildet und mit dem dynamischen Druck in der leeren Messstrecke $q_{\infty,leer}$ ins Verhältnis gesetzt. Der Düsenfaktor k_D ergibt sich zu:

$$k_D = \frac{q_{\infty,leer}}{\Delta p_D} \quad \text{Gl. 2.8}$$

mit

$$\Delta p_D = p_{VK} - p_D \quad \text{Gl. 2.9}$$

Der dynamische Druck nach der Düsenmethode q_D mit Fahrzeug in der Messstrecke ergibt sich nach Gl. 2.7 damit zu:

$$q_D = k_D \cdot \Delta p_D \quad \text{Gl. 2.10}$$

Die **Plenumsmethode** hingegen nutzt die Druckdifferenz Δp_{Pl} aus dem Druck in der Vorkammer p_{VK} und dem statischen Druck im Plenum p_{Pl} . Mit dem dynamischen Druck in der leeren Messstrecke $q_{\infty,leer}$ ins Verhältnis gesetzt, ergibt sich der Düsenfaktor für die Plenumsmethode k_{Pl} :

$$k_{Pl} = \frac{q_{\infty,leer}}{\Delta p_{Pl}} \quad \text{Gl. 2.11}$$

mit

$$\Delta p_{Pl} = p_{VK} - p_{Pl} \quad \text{Gl. 2.12}$$

Der dynamische Druck nach der Plenumsmethode q_{Pl} mit Fahrzeug in der Messstrecke ergibt sich somit analog zu Gl. 2.7 zu:

$$q_{Pl} = k_{Pl} \cdot \Delta p_{Pl} \quad \text{Gl. 2.13}$$

Im leeren Windkanal führen beide Methoden zu demselben dynamischen Druck $q_{\infty, \text{leer}} = q_D = q_{Pl}$. Dies ändert sich jedoch, sobald sich ein Fahrzeug in der Messstrecke befindet. Der Aufstau des Fahrzeugs kann sich bis in die Düse hinein bemerkbar machen und das ursprüngliche Geschwindigkeitsprofil deformieren, so dass beide Messmethoden nicht die korrekte Anströmgeschwindigkeit liefern. Genau hier greifen die bereits angesprochenen Korrekturmethode an und versuchen rechnerisch, eine korrekte Bezugsgeschwindigkeit zu ermitteln. In welcher Weise eine Korrektur durchgeführt werden kann, wird in Kapitel 2.3.3 behandelt.

2.1.3 Bestimmung der aerodynamischen Beiwerte im Windkanal

Aus der Umströmung des Fahrzeugs resultieren Luftkräfte und -momente, die sich aus Reibungs- und Druckanteilen zusammensetzen. Diese lassen sich wiederum in die drei Raumrichtungen x , y und z zerlegen. Im Windkanal erfolgt die integrale Messung dieser Kräfte und Momente direkt über eine Waage. Durch die Darstellung der Kräfte und Momente als dimensionslose Beiwerte wird die Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit, der Dichte des strömenden Mediums sowie der Modellgröße ausgeschlossen.

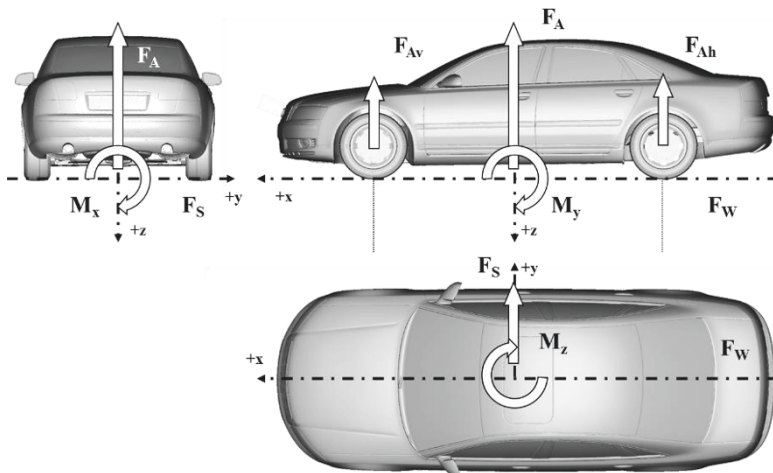


Abbildung 2.6: Koordinatensystem mit Bezugspunkt der Ersatzkräfte und Ersatzmomente für Messungen an Kraftfahrzeugen

Zur Bestimmung der dimensionslosen Kraftbeiwerte werden die gemessenen Kräfte auf den dynamischen Druck der Anströmung q_∞ sowie auf die Stirnfläche A_x bezogen. Die Normierung der dimensionslosen Momentenbeiwerte erfolgt zusätzlich auf den Radstand l_0 des Fahrzeugs.

$$\text{Luftwiderstandsbeiwert:} \quad c_W = \frac{F_W}{q_\infty \cdot A_M} \quad \text{Gl. 2.14}$$

$$\text{Auftriebsbeiwert:} \quad c_A = \frac{F_A}{q_\infty \cdot A_M} \quad \text{Gl. 2.15}$$

$$\text{Seitenkraftbeiwert:} \quad c_S = \frac{F_S}{q_\infty \cdot A_M} \quad \text{Gl. 2.16}$$

$$\text{Rollmomentenbeiwert:} \quad c_L = \frac{M_x}{q_\infty \cdot A_M \cdot l_0} \quad \text{Gl. 2.17}$$

$$\text{Nickmomentenbeiwert:} \quad c_M = \frac{M_y}{q_\infty \cdot A_M \cdot l_0} \quad \text{Gl. 2.18}$$

$$\text{Giermomentenbeiwert:} \quad c_N = \frac{M_z}{q_\infty \cdot A_M \cdot l_0} \quad \text{Gl. 2.19}$$

Entsprechend den Kraft- und Momentenbeiwerten werden die in der Aerodynamik verwendeten Drücke p ebenfalls dimensionslos dargestellt. Als statischer Referenzdruck p_∞ wird üblicherweise der Plenumsdruck p_{Pl} , der dem statischen Druck der ungestörten Anströmung entspricht, herangezogen.

$$\text{Druckbeiwert:} \quad c_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} \quad \text{Gl. 2.20}$$

Im Fachjargon der Fahrzeugaerodynamik wird bei der Quantifizierung von Änderungen der Kraft- oder Druckbeiwerte häufig von sogenannten „Punkten“ gesprochen. Ein „Punkt“ entspricht hierbei einer Änderung des Beiwerts um ein Tausendstel (0,001). Von diesem Terminus wird ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit Gebrauch gemacht.

2.2 Windkanalinterferenzeffekte in Freistrahlmessstrecken

Bevor im nächsten Abschnitt die Grundlagen der Windkanalkorrektur nähergebracht werden, soll zunächst geklärt werden, welche Interferenzeffekte in offenen Messstrecken überhaupt auftreten.

Mercker und Wiedemann [49] identifizierten fünf verschiedene Windkanalinterferenzeffekte in Freistrahlmessstrecken. Diese fünf Effekte werden im Folgenden kurz vorgestellt:

Strahlaufweitung („Jet Expansion“):

Der Interferenzeffekt der Strahlaufweitung beschreibt das Verhalten des Windkanalfreistrahls bei vorhandenem Messobjekt in der Messstrecke. Dem Freistrahls wird der Umgebungsdruck p_∞ des Plenums von außen aufgeprägt. Dies hat zur Folge, dass auf dem Strahlrand eines Windkanalfreistrahls stets $p_\infty = \text{const.}$ gilt, egal ob mit oder ohne Fahrzeug in der Messstrecke.

Befindet sich ein Fahrzeug in der Windkanalmessstrecke, führt dies durch die Verdrängungswirkung des Fahrzeugs zu einer Aufweitung der Strömung. In einer freien Anströmung kann sich diese Aufweitung bis ins Unendliche ausdehnen. Im begrenzten Freistrahls eines Windkanals muss jedoch die oben genannte Druckrandbedingung am Strahlrand erfüllt werden. Um dies zu erreichen, muss sich der Strahl stärker aufweiten als im Falle der freien Anströmung. Aus Kontinuitätsgründen führt die stärkere Aufweitung des Strömungsfelds zu einer Verlangsamung der Strömungsgeschwindigkeit und folglich zu einem geringeren Luftwiderstand. Abbildung 2.7 stellt den Effekt der Strahlaufweitung grafisch dar.

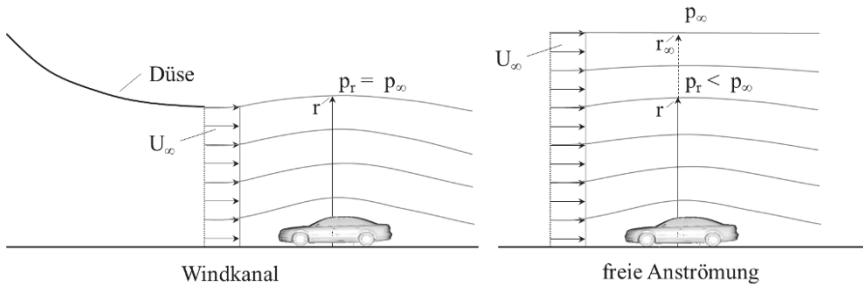


Abbildung 2.7: Darstellung der Strahlaufweitung [49]

Düsenversperrung („Nozzle Blockage“):

Der Aufstau, den ein Fahrzeug in der Messstrecke verursacht, kann sich bis in die Düse hinein bemerkbar machen. Dieses Druckgebiet beeinflusst die Geschwindigkeitsverteilung am Düsenaustritt. Zur genaueren Beschreibung der Düsenversperrung muss zwischen der Düsen- und der Plenumsmethode zur Geschwindigkeitsbestimmung im Windkanal unterschieden werden. Wie in Kapitel 2.1.2 bereits erläutert, bleibt bei der Düsenmethode der Volumenstrom durch die Düse stets konstant, unabhängig vom Messobjekt in der Messstrecke, siehe Abbildung 2.8. Bei der Plenumsmethode hingegen ist der Freistrahtrand maßgeblich, siehe Abbildung 2.9.

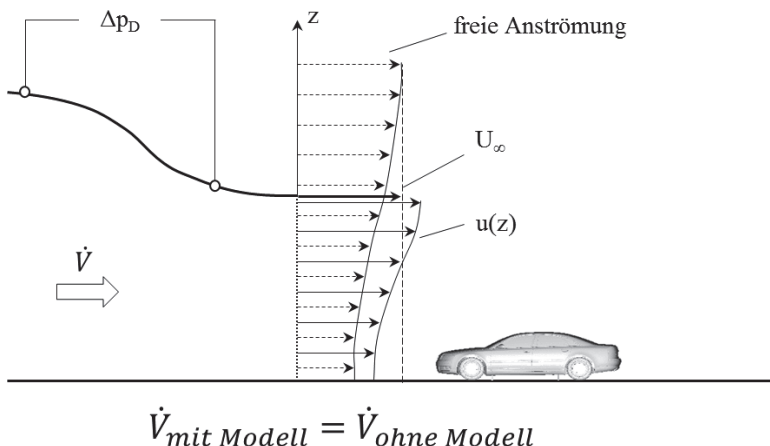


Abbildung 2.8: Darstellung der Düsenversperrung für die Düsenmethode [49]

Die Düsenmethode führt zu einer erhöhten Strömungsgeschwindigkeit am Rand der Düse. Folglich wird das Fahrzeug schneller angeströmt und erfährt einen höheren Luftwiderstand. Bei der Plenummethode verändert sich der Volumenstrom durch die Düse dagegen so, dass die gewünschte Anströmgeschwindigkeit – wegen der Druckrandbedingung $p_\infty = \text{const}$ – stets am Stahlrand erreicht wird.

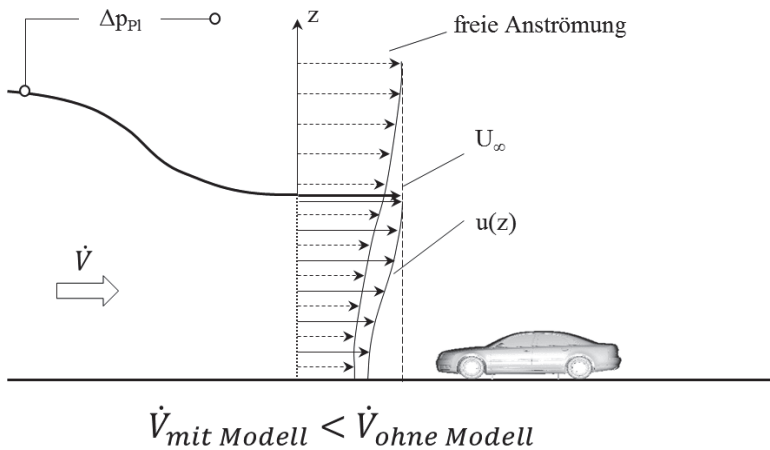


Abbildung 2.9: Darstellung der Düsenversperrung für die Plenummethode [49]

Es lässt sich festhalten, dass in beiden Fällen das erzielte Geschwindigkeitsprofil am Düsenaustritt vom Fall der freien Anströmung abweicht. Jedoch führt die Düsenversperrung stets zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten am Düsenaustritt und folglich zu einem höheren Luftwiderstand.

Strahlablenkung („Jet Deflection“):

Zusätzlich zum Interferenzeffekt der Düsenversperrung werden die Stromlinien, ähnlich wie beim Effekt der Strahlaufweitung, nach außen abgelenkt. Je näher das Fahrzeug an der Windkanaldüse steht, desto stärker ist diese Ablenkung der Strömung, siehe Abbildung 2.10.

Durch die Strahlablenkung nimmt das effektive Versperrungsverhältnis zu und damit auch die effektive Strahlaufweitung. Die Strahlablenkung führt somit – ebenso wie die Strahlaufweitung – zu einer reduzierten Strömungsgeschwindigkeit und somit zu einem niedrigeren Luftwiderstand.

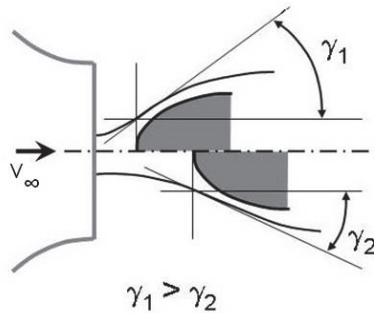


Abbildung 2.10: Darstellung der Strahlablenkung [49]

Kollektorversperrung („Collector Blockage“):

Vergleichbar mit dem Effekt der Düsenversperrung kommt es auch am Kollektor zu Interferenzeffekten. Der Nachlauf eines Fahrzeugs tritt in den Windkanalkollektor ein und es ergeben sich Zustände wie in geschlossenen Messstrecken. Aufgrund der Strömungsgradienten kann sich das Totwassergebiet deformieren. Aus Kontinuitätsgründen steigt somit die Strömungsgeschwindigkeit im Kollektor und wirkt luftwiderstandserhöhend [73]. Wie in Abbildung 2.11 ersichtlich, kommt es bei Eintritt des nahen Nachlaufs in den Windkanalkollektor zu einer zusätzlichen Versperrung im Kollektor. Dieser Effekt ist Hauptbestandteil der vorliegenden Arbeit und wird in den folgenden Kapiteln detailliert behandelt.

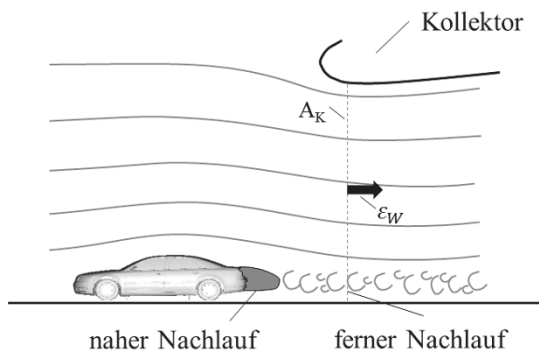


Abbildung 2.11: Darstellung der Kollektorversperrung [49]

Druckgradienten entlang der Strahlachse („Horizontal Buoyancy“):

Wie bereits in Kapitel 2.1 dargelegt, kann in Freistrahlmessstrecken auch ohne Fahrzeug ein Druckgradient vorliegen. Dieser Druckgradient wird der Fahrzeugumströmung überlagert und es entsteht eine Kraft auf das Fahrzeug, die sich aus der Wirkung des Druckgradienten über das Fahrzeugvolumen plus einer Deformation des Nachlaufgebiets zusammensetzt. Die Wirkung des Druckgradienten über das Fahrzeugvolumen lässt sich theoretisch über den Gaußschen Integralsatz berechnen. Die Deformation des Nachlaufgebiets kann nur näherungsweise bestimmt oder gemessen werden [48, 54, 73].

Weiteres zur Korrektur des Interferenzeffekts aufgrund eines Druckgradienten in der leeren Messstrecke ist in Kapitel 2.3.3 aufgeführt.

2.3 Windkanalkorrekturmethode in Freistrahlmesskanälen

Die ersten Untersuchungen zu Windkanalinterferenzeffekten gehen zurück bis auf Glauert [16, 17], Munk [55], Theodorsen [75] und Lock [38, 39] in die 1920/1930er Jahre, die damit Pionierarbeit für die heute angewandten Korrekturverfahren leisteten. Grundlage aller Korrekturverfahren ist dabei das sogenannte „Prinzip der kleinen Störungen“² [42]. Dieses Prinzip setzt unter anderem voraus, dass Ablöselinien und -flächen unabhängig von der Blockierung sind. Das heißt in anderen Worten, dass keinerlei Blockierungseffekte oder von außen aufgeprägte Druckgradienten die Charakteristika der Umströmung beeinflussen dürfen. Ist dies der Fall, wird die sinnvolle Anwendung eines Korrekturverfahrens unmöglich. Des Weiteren impliziert das „Prinzip der kleinen Störungen“, dass Versperrungseffekte durch eine frei wählbare Druckdifferenz auf der Körperoberfläche unabhängig von der Position nur durch Anpassung der Anströmgeschwindigkeit dargestellt werden kann.

Das „Prinzip der kleinen Störungen“ kann lediglich eine Annäherung an reale Strömungen sein, da der Blockierungseffekt eines Fahrzeugs üblicherweise in Strömungsrichtung variiert. Es zeigt sich jedoch, dass für kleine

² *englisch:* „Invariance under constraint“

Blockierungsverhältnisse diese Annahme legitim ist [46]. Im Gegenzug können so die Grenzen der Anwendbarkeit abhängig von der anvisierten Messgenauigkeit bestimmt werden.

In den folgenden Kapiteln wird auf die Grundlagen der Korrekturverfahren für Freistrahwindkanäle eingegangen und ein Überblick über die historische Entwicklung der Windkanalkorrektur gegeben. Anschließend wird der Stand der Technik in Form des aktuellen Mercker-Wiedemann Korrekturverfahrens für Freistrahwindkanäle erläutert. Dieses Verfahren hat sich mittlerweile im Bereich der Fahrzeugwindkanäle etabliert. Im anschließenden Kapitel folgt eine kritische Betrachtung der Korrektur hinsichtlich der praktischen Umsetzung im Bereich der Automobilentwicklung.

2.3.1 Grundlagen

Das Prinzip der theoretischen Versperrungskorrektur basiert grundlegend auf der Prandtlschen Tragflügeltheorie [30, 67]. Es wird seit Jahrzehnten in der Flugzeugaerodynamik validiert angewandt. Darüber hinaus wurden in den vergangenen 25 Jahren spezielle Verfahren für die Umströmung stumpfer Körper, wie Fahrzeuge, entwickelt. Grundsätzlich lassen sich zwei Arten von Korrekturverfahren für stumpfe Körper unterscheiden [73]:

1. „Klassische“ Korrekturverfahren:
Analytische Strömungsmodelle mit Eingabe von geometrischen Größen des Fahrzeugs und der Messstrecke
2. Wanddruckverfahren:
Messung der statischen Druckverteilung entlang der Kanalwände und der Kanaldecke; Einsatz in Windkanälen mit geschlossenen Messstrecken

Beide Typen nutzen potentialtheoretische Modelle, um die Interferenzeffekte mit Hilfe des Prinzips kleiner Störungen zu bestimmen. Die Wanddruckverfahren gelten allgemein als die Verfahren mit der höchsten Genauigkeit, können jedoch nur in geschlossenen Messstrecken und bei Blockierungsgraden $< 15\%$ zufriedenstellend eingesetzt werden. Methoden ähnlich dem Wanddruckverfahren für offene Windkanalmessstrecken wurden bislang nur

auf wissenschaftlicher Ebene praktiziert, beispielsweise von Mokhtar und Britcher [51, 52] oder Mokry und Cooper [53].

Wie bereits erwähnt, werden üblicherweise bei Korrekturverfahren potentialtheoretische Strömungsmodelle verwendet. Das heißt, Interferenzeffekte machen sich als Änderung der Geschwindigkeit Δu am Fahrzeug bemerkbar. Somit ergibt sich eine dimensionslose Interferenzgeschwindigkeit ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta u}{u_\infty} \quad \text{Gl. 2.21}$$

Für den dynamischen Druck q ergibt sich somit:

$$\frac{q}{q_\infty} = (1 + \varepsilon)^2 \quad \text{Gl. 2.22}$$

Die Superposition einzelner Interferenzeffekte wird durch den linearen Charakter der potentialtheoretischen Strömungsmodelle möglich. Wände oder auch von Freistrahlgrenzen können in der Potentialtheorie durch das Spiegelungsprinzip dargestellt werden [11, 14]. Für einen Freistrahlgilt hierbei die Forderung nach konstantem statischem Druck am Strahlrand gleich dem Umgebungsdruck. Das Spiegelungsprinzip wird in den meisten Korrekturmethode durch den sogenannten Tunnel Shape Faktor τ dargestellt. Weitere Details hierzu werden in Kapitel 2.3.3 erörtert.

Bezüglich der potentialtheoretischen Darstellung einer Freistrahlgrenze soll hier speziell auf die Literatur von Mokhtar und Britcher [51, 52] verwiesen werden, da sich diese über die allgemeine Literatur hinausgehend mit der Darstellung eines Freistrahls beschäftigt. Ein Freistrahlgwindkanal stellt die Antithese zu einem präzisen Wanddruckverfahren in einem geschlossenen Windkanal dar. Beim Wanddruckverfahren können Interferenzgrößen ohne jegliche Modellinformation bestimmt werden, da die Randbedingung und der Ort der Druckmessstellen eindeutig sind und so direkt auf Blockierungseffekte des Modells geschlossen werden kann. Im Gegensatz dazu sind die Randbedingungen einer offenen Messstrecke nicht oder nur schlecht messbar. Darüber hinaus sind stets Informationen über das gemessene Modell erforderlich, um ein analytisches Ersatzmodell aufbauen zu können. Im Allgemeinen ist die Randbedingung einer offenen Freistrahlmessstrecke zwar eindeutig, jedoch ist der Ort der Berandung zunächst unbekannt.

Daher werden in offenen Messstrecken analytische Ersatzmodelle herangezogen, die nahezu das gleiche strömungstechnische Fernfeld erzeugen wie der gemessene Körper. Die Übertragung auf ein derartiges Ersatzmodell erfolgt durch das Prinzip der „äquivalenten Sphäre“. Im Allgemeinen lässt sich eine Lösung finden, die im Fernfeld dieselbe Geschwindigkeitsverteilung liefert wie das Messobjekt. Die Berechnung dieser äquivalenten Sphäre kann dabei mit Hilfe des sogenannten Glauert-Faktors G erfolgen. Der Glauert-Faktor ist ein Formparameter und berücksichtigt das effektive Verdrängungsvolumen des Fahrzeugs V_{eff} [56].

Aufgrund des Superpositionsprinzips ist es möglich, Versperrungseffekte auf ein Fahrzeug und dessen Nachlauf getrennt zu betrachten. Ein Problem stellt dabei die Darstellung des Nachlaufs an sich dar. Die genaue Verdrängungswirkung des Nachlaufs ist a priori unbekannt und kann lediglich durch empirische oder semi-empirische Ansätze modelliert werden.

2.3.2 Historische Entwicklung und Stand der Technik

Die historische Entwicklung der Korrekturverfahren für Freistrahwindkanäle ist in der entsprechenden Fachliteratur zusammengefasst [11, 14, 17, 25, 31, 45, 49, 51, 52, 73]. Daher soll an dieser Stelle lediglich ein Überblick geliefert werden. Die Korrektur der Strahlaufweitung geht bis in die 1920er auf die Arbeiten von Lock [38] zurück. Lock nutzte das Spiegelungsprinzip, um den Einfluss der Strahlberandung auf das Messobjekt darzustellen. Glauert [17] und Maskell [42] steuerten in den nächsten Jahrzehnten wertvolle Beiträge speziell in Bezug auf die Korrektur stumpfer Körper hinzu. Mercker [44] veröffentlichte 1986 eine spezifische Korrektur für stumpfe Körper in geschlossenen Messstrecken. Das Besondere dabei war ein Ansatz zur Korrektur der sogenannten „Wake-Blockage“ – also einer Versperrungskorrektur für das Nachlaufgebiet.

Die Betrachtung eines von außen aufgeprägten statischen Druckgradienten wurde erstmals von Munk [55] und Glauert [17] in den 1920/1930er Jahren vorgenommen. Die daraus folgende Korrektur wurde ebenfalls von Erkenntnissen in geschlossenen Messstrecken abgeleitet. Dabei ist jedoch eine grundsätzliche Unterscheidung nötig, ob der Druckgradient von außen aufgeprägt wird oder Folge von Interferenzen ist.

Die in dieser Arbeit betrachtete Mercker-Wiedemann Korrekturmethode [49] wird bereits seit 1996 stetig weiterentwickelt. Es verwendet einen potential-theoretischen Ringwirbelansatz zur Modellierung der auftretenden Windkanalinterferenzen. Experimentell bestimmte Konstanten unterstützen dabei den Aufbau der benötigten Ersatzmodelle. Die Weiterentwicklung des Korrekturverfahrens wurde unter anderem durch die Untersuchungen von Gleason [19, 20], Walter et al. [76], Fischer et al. [12, 13] sowie Mercker und Cooper [47] zum Thema der Korrektur von statischen Druckgradienten vorangetrieben. Gleason und Fischer nutzten dabei CFD-Simulationen, um die Einflüsse des Horizontal Buoyancy Effekts detailliert zu untersuchen. Das numerische Modell von Fischer wird in Kapitel 3.2.2 beleuchtet.

Das Mercker-Wiedemann Korrekturverfahren hat sich in den vergangenen Jahren vor allem durch intensive Validierungsmaßnahmen zum am weitest verbreiteten Korrekturverfahren für Freistrahwindkanäle im automobilen Sektor entwickelt [8, 70]. Die Qualität der Korrektur konnte im Rahmen des EADE Correlation Tests 2010 erfolgreich geprüft werden. Durch die Anwendung der Korrekturmethode konnte die Standardabweichung zwischen den Windkanälen für alle Fahrzeuge im Mittel von sieben Widerstandspunkten vor der Korrektur auf drei Widerstandspunkte nach der Korrektur gesenkt werden. Die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Windkanäle konnte so signifikant gesteigert werden. Die detaillierten Resultate des Vergleichstests sind im EADE Correlation Test Report dargestellt [26].

Neben der Mercker-Wiedemann Korrekturmethode existieren noch weitere vielversprechende Korrekturansätze, die jedoch aufgrund des begrenzten Rahmens dieser Arbeit nur kurz gestreift werden sollen. Das Korrekturverfahren nach Wickern [57, 80, 82] baut ebenfalls auf denselben Einzelinterferenzeffekten wie die Mercker-Wiedemann Methode auf. Wickern verzichtet allerdings auf die Modellierung der Interferenzeffekte durch einen Ringwirbelansatz und baut vollständig auf dem Spiegelungsprinzip auf. In Bezug auf die Korrektur statischer Druckgradienten existieren diverse Ansätze, um den Einfluss eines Druckgradienten auf das Nachlaufgebiet eines Fahrzeugs darzustellen. Jedoch basieren annähernd alle Methoden auf den bereits von Glauert [16, 17] in den 1930er Jahren entdeckten einfachen hydrostatischen Buoyancy Gleichungen. Die Unterschiede beschränken sich zumeist auf abweichende Darstellungen des Nachlaufgebiets.

Wie bereits angedeutet, gibt es Versuche von Mokhtar und Britcher [51, 52] Korrekturmethode auf dreidimensionale Panel-Verfahren zu erweitern. Panel-Verfahren sind aktuell Standardverfahren in Windkanälen mit geschlossenen Messstrecken. Mit heutigen rechnergestützten Methoden ist es durchaus möglich, komplexe Modellansätze schnell – im Idealfall online während der Messung – aufzubauen und zu korrigieren.

2.3.3 Das Mercker-Wiedemann Korrekturverfahren

Die Mercker-Wiedemann Korrekturmethode nutzt potentialtheoretische Ansätze, um Windkanalinterferenzeffekte zu korrigieren. Für die vier Blockierungseffekte (Strahlaufweitung, Strahlablenkung, Düsenversperrung und Kollektorversperrung) werden potentialtheoretische Ersatzmodelle zur Darstellung der Interferenzen aufgebaut. Die Korrektur des statischen Druckgradienten erfolgt hingegen über ein experimentelles Verfahren, bei dem durch zwei Messungen in unterschiedlichen Druckgradienten auf die Deformation des Nachlaufgebiets geschlossen werden kann.

Die **Korrektur der Strahlaufweitung** kann durch das klassische Spiegelungsprinzip [17] dargestellt werden. Um die Verdrängungswirkung des Fahrzeugs und seines Nachlaufs zu berechnen, wird das Fahrzeug zunächst am Messstreckenboden gespiegelt, um so ein Duplex-Fahrzeug mit dem Messstreckenboden als symmetrische Strömungsebene zu schaffen (siehe Abbildung 2.12 rechts). Anschließend kann mit Hilfe von potentialtheoretischen Quellen und Senken der Verdrängungseffekt dieses Duplex-Fahrzeugs modelliert werden. Da für die Korrektur der Strahlaufweitung die Randstromlinie des Freistrahls maßgeblich ist, genügt es, das Fernfeld des Fahrzeugs wiederzugeben. Zur Darstellung des Fernfelds kann in guter Näherung die Quell-Senken-Verteilung aufsummiert werden und durch einen Dipol beziehungsweise eine „äquivalente Sphäre“ [11, 45, 80] dargestellt werden. Um die Randbedingungen des Freistrahls entlang der Randstromlinie ($p_\infty, u_\infty = \text{const.}$) abzubilden, muss das Spiegelungsprinzip für das Duplex-Fahrzeug in der Duplex-Messstrecke mit Hilfe einer doppelt unendlichen Reihe mit wechselnden Vorzeichen fortgesetzt werden. Nur so ergeben sich die korrekten induzierten Interferenzgeschwindigkeiten an den Spiegelungsebenen und es entsteht kein Druckgradient am Strahlrand. Für rechteckige Messstrecken ergibt sich ein Spiegelungssystem wie in Abbildung 2.12 dargestellt [80].

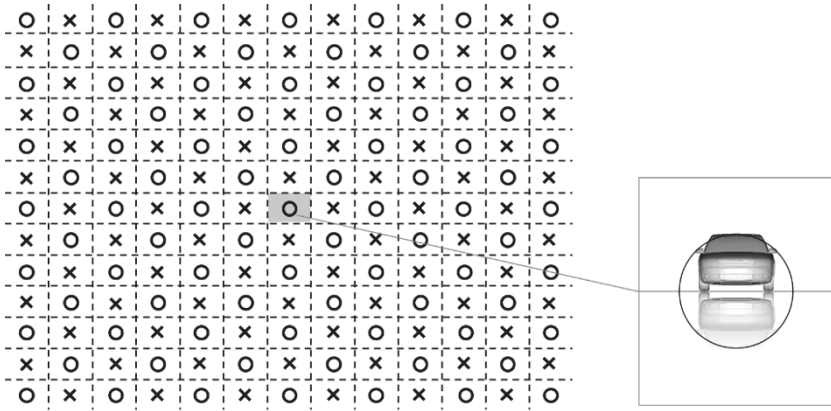


Abbildung 2.12: Spiegelungsprinzip zur Darstellung einer Freistrahlmessstrecke [80]

Mathematisch konvergiert die doppelt unendliche Reihe gegen einen festen Wert, den sogenannten Windkanalformfaktor τ [11, 14, 80]. Der Windkanalformfaktor τ berücksichtigt das Seitenverhältnis der Freistrahlmessstrecke und kann im Vorhinein für den jeweiligen Windkanal bestimmt werden. Die Stromlinien im Abstand H und $B/2$ vom Fahrzeug entsprechen den Rändern des Freistrahls.

$$\tau = \frac{1}{2\pi^{3/2}} \left(\frac{2H}{B} \right)^{3/2} \sum_{\substack{n=-\infty \\ \text{ohne} \\ n=m=0}}^{n=\infty} \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} (-1)^{m+n} \frac{1}{\left[n^2 + \left(m \frac{2H}{B} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad \text{Gl. 2.23}$$

Die Interferenz an der Position des Fahrzeugs lässt sich aus der Interferenzgeschwindigkeit des Dipols berechnen. Unter Berücksichtigung der Fahrzeugstirnfläche A_M , der Fahrzeuglänge L_M sowie des Fahrzeugvolumens V_M ergibt sich nach Mercker und Wiedemann [49] für die induzierte Interferenzgeschwindigkeit aufgrund der Strahlaufweitung:

$$\varepsilon_S = \frac{\Delta u}{u_\infty} = \tau \sqrt{\frac{V_M}{L_M \cdot A_M}} \left(\frac{A_M}{A_D} \right)^{3/2} \quad \text{Gl. 2.24}$$

Die **Korrektur der Düsenversperrung** erfolgt mit Hilfe eines potential-theoretischen Ringwirbelansatzes, wie in Abbildung 2.13 schematisch angedeutet. Die Windkanaldüse wird durch einen Ringwirbel ersetzt, dessen Zirkulation Γ der Interferenzgeschwindigkeit der Düsenversperrung in der Düsenaustrittsebene ε_Q entspricht.

Hierbei muss zwischen der Düsen- und Plenumsmethode zur Bestimmung der Anströmgeschwindigkeit unterschieden werden. Je näher sich das Fahrzeug an der Windkanaldüse befindet, desto mehr divergieren beide Methoden aufgrund der wirkenden Interferenzeffekte voneinander. Das Korrekturverfahren nutzt beide Methoden zur Bestimmung der Anströmgeschwindigkeit, um iterativ die tatsächliche Geschwindigkeit in der Düsenaustrittsebene bestimmen zu können.

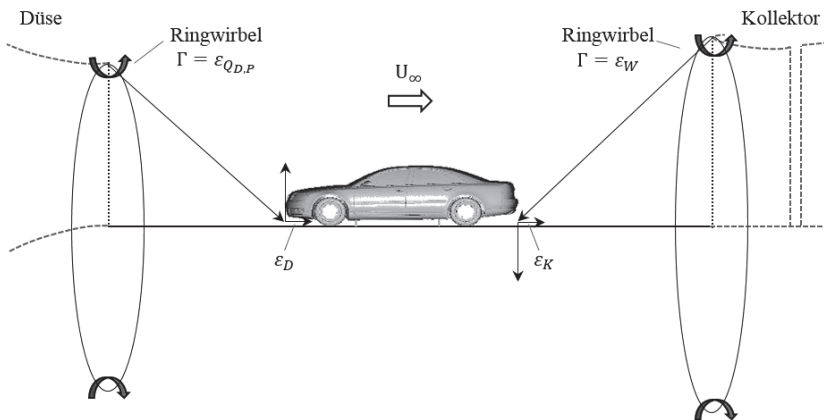


Abbildung 2.13: Ringwirbelmodell für Düse und Kollektor (nach [73])

Mit Hilfe des Biot-Savart'schen Gesetzes lässt sich die Wirkung der Düsenversperrung an der Fahrzeugposition berechnen. Die induzierte Interferenzgeschwindigkeit aufgrund der Düsenversperrung am Ort des Fahrzeugs ergibt sich für die Düsenmethode (Gl. 2.25) beziehungsweise die Plenumsmethode (Gl. 2.26) zu:

$$\varepsilon_{D_D} = \varepsilon_{Q_D} \left[\frac{r_D^3}{\left(r_D^2 + \left(x_M - \frac{L_M}{2} \right)^2 \right)^{3/2}} \right] \quad \text{Gl. 2.25}$$

$$\varepsilon_{D_P} = \varepsilon_{Q_P} \left[\frac{r_D^3}{\left(r_D^2 + \left(x_M - \frac{L_M}{2} \right)^2 \right)^{3/2}} \right] \quad \text{Gl. 2.26}$$

mit

$$r_D = \sqrt{\frac{2A_D}{\pi}} \quad \text{Gl. 2.27}$$

als äquivalenter Düsenradius r_D .

Für die Bestimmung der Zirkulation des Ringwirbels für die Düsen- und die Plenumsmethode – und somit der Interferenzgeschwindigkeit der Düsenversperrung in der Düsenaustrittsebene ε_{Q_D} und ε_{Q_P} – wird ein potentialtheoretischer Quellterm angenommen, so dass ein halbunendlicher Rotationskörper entsteht, dessen Querschnittsfläche im Unendlichen der Stirnfläche des Duplex-Fahrzeugs entspricht. In der Düsenebene liefert die Integration des induzierten Geschwindigkeitsfelds Interferenzgeschwindigkeiten ε_{Q_D} für die Düsenmethode (Gl. 2.28) und ε_{Q_P} für die Plenumsmethode (Gl. 2.29).

$$\varepsilon_{Q_D} = \frac{\frac{A_M}{2A_D} \left(1 - \frac{x_S}{\sqrt{x_S^2 + r_D^2}} \right)}{1 - \frac{A_M}{2A_D} \left(1 - \frac{x_S}{\sqrt{x_S^2 + r_D^2}} \right)} \quad \text{Gl. 2.28}$$

$$\varepsilon_{Q_P} = \frac{\frac{A_M}{2\pi} \left(\frac{x_S}{\sqrt{x_S^2 + r_D^2}^3} \right)}{1 - \frac{A_M}{2\pi} \left(\frac{x_S}{\sqrt{x_S^2 + r_D^2}^3} \right)} \quad \text{Gl. 2.29}$$

Die genaue Position des Quellterms x_S ist zunächst unbekannt und muss durch Vergleich beider Methoden iterativ bestimmt werden (siehe auch Anhang A.2). Hierzu wird x_S solange iteriert bis gilt:

$$(1 + \varepsilon_{D_D})^2 \cdot q_D = (1 + \varepsilon_{D_P})^2 \cdot q_P \quad \text{Gl. 2.30}$$

Details zur genauen Vorgehensweise beim oben erwähnten Iterationsprozess sind bei Mercker [46] sowie bei Mercker und Wiedemann [49] nachzulesen.

Mit Hilfe der oben definierten Interferenzgeschwindigkeit in der Düsenaustrittsebene für die Düsenmethode ε_{Q_D} kann nun die **Korrektur der Strahlableitung** erfolgen. Aufgrund der Düsenversperrung kommt es erst zu dem zusätzlichen Interferenzeffekt der Strahlableitung. Die Versperrung wirkt wie eine Verkleinerung der Windkanaldüse. Aus Kontinuitätsgründen lässt sich eine reduzierte Düsenfläche A^* definieren:

$$A^* = \frac{A_D}{(1 + \varepsilon_{Q_D})} \quad \text{Gl. 2.31}$$

Mit dieser verkleinerten Düsenfläche A^* kann die zusätzliche Strahlableitung bestimmt und der bereits definierten Strahlaufweitung überlagert werden. Hierzu wird zur Bestimmung der Strahlaufweitung (Gl. 2.24), anstatt der Düsenfläche A_D , die reduzierte Düsenfläche A^* verwendet:

$$\varepsilon_S = \tau \sqrt{\frac{V_M}{L_M \cdot A_M}} \left(\frac{A_M}{A^*} \right)^{3/2} \quad \text{Gl. 2.32}$$

Genaugenommen muss mit der Reduzierung der Düsenfläche ebenfalls der Windkanalformfaktor τ neu berechnet werden. Dieser Effekt ist jedoch zu vernachlässigen, da die sich hieraus ergebenden Änderungen sehr klein sind.

Für die **Korrektur der Kollektorblokierung** wird ein ähnlicher Ringwirbelansatz gewählt wie für die Korrektur der Düsenblockierung (siehe Abbildung 2.13). Das Nachlaufgebiet des Fahrzeugs tritt in den Kollektor ein und führt zu ähnlichen Versperrungseffekten wie in geschlossenen Messstrecken. Äquivalent zur Düsenversperrung muss zunächst die Zirkulation des Ringwirbels quantifiziert werden. Hierfür muss die Interferenzgeschwindigkeit ε_W am Kollektoreintritt – der sogenannte Nachlaufterm – bestimmt werden. Nach Biot-Savart ergibt sich anschließend die Interferenzgeschwindigkeit ε_K am Ort des Fahrzeugs aufgrund der Kollektorblokierung zu:

$$\varepsilon_K = \varepsilon_W \left[\frac{r_K^3}{\left(r_K^2 + \left(L_{MS} - x_M + \frac{L_M}{2} \right)^2 \right)^{3/2}} \right] \quad \text{Gl. 2.33}$$

mit

$$r_K = \sqrt{\frac{2A_K}{\pi}} \quad \text{Gl. 2.34}$$

als äquivalenter Kollektorradius r_K .

Die Bestimmung des Nachlaufterms ε_W basiert auf denselben Ansätzen von Maskell [42] und Glauert [17], wie sie in geschlossenen Messstrecken klassisch angewendet werden. Mercker und Wiedemann [49] definieren den Nachlaufterm zu:

$$\varepsilon_W = \frac{A_M}{A_K} \left(\frac{c_{W,unkorrigiert}}{4} + \frac{A_{sep}}{A_M} \eta_W \right) \quad \text{Gl. 2.35}$$

mit

$$\eta_W = 0,41 \quad \text{Gl. 2.36}$$

Der erste Term in Klammern von Gl. 2.35 beschreibt die Kollektorversperrung des fernen Nachlaufs, der in jedem Fall immer in den Kollektor eintritt. Dahingegen definiert der zweite Term den nahen Nachlauf oder auch das Totwassergebiet, das nicht oder nur teilweise in den Kollektor eindringen kann. Der empirische Faktor $\eta_W = 0,41$ für den nahen Nachlauf wurde von Mercker [44] auf Basis von experimentellen Ergebnissen für stumpfe Körper in Windkanälen mit geschlossener Messstrecke hergeleitet.

Die Berücksichtigung des nahen Nachlaufs bei der Korrektur der Kollektorblockierung war lange unklar. Bei langen Messstrecken kann auf die Berücksichtigung des nahen Nachlaufs verzichtet werden. Für kurze Messstrecken ist der Term dringend nötig. Die Abschätzung, ob der nahe Nachlauf in den Kollektor eintritt oder nicht, ist jedoch oftmals für Fahrzeuge nicht eindeutig. Erst 2011 präsentierten Hennig und Mercker [26] ein Entscheidungskriterium zur Berücksichtigung des nahen Nachlaufs. Dieses Kriterium basiert auf einer Abschätzung der Nachlaufänge L_{wake} von Serienfahrzeugen von Schultz-Hausmann und Vagt [68]:

$$L_{wake} = k \cdot \sqrt{A_{sep}} \quad \text{Gl. 2.37}$$

mit

$$k = 2,6 \quad \text{Gl. 2.38}$$

Der empirische Faktor k wurde auf experimenteller Basis als guter Mittelwert für typische Serienfahrzeuge der heutigen Zeit festgelegt [26, 46]. Die Ablösefläche A_{sep} kann entweder durch Strömungssichtbarmachung im Windkanal bestimmt werden oder durch Expertenabschätzung erfolgen. Hierbei ist es jedoch völlig ausreichend, zwischen den Fahrzeugtypen Vollheck ($A_{sep} \approx A_M$), Fließheck ($A_{sep} \approx 0,75 \cdot A_M$) und Stufenheck ($A_{sep} \approx 0,5 \cdot A_M$) zu unterscheiden. Die Berücksichtigung des nahen Nachlaufs innerhalb der Korrektur der Kollektorblokierung sowie der Nutzen eines derartigen Entscheidungskriteriums bilden den Kern der vorliegenden Arbeit und werden im Folgenden noch detailliert diskutiert.

In Kapitel 2.2 wurde bereits angesprochen, dass in Freistrahlmessstrecken eine **Korrektur von Druckgradienten** entlang der Strahlachse nötig ist. Durch die Wirkung eines äußeren Druckgradienten kommt es unter anderem zu einer Deformation des Fahrzeugnachlaufs. Dies hat zur Folge, dass sich die Ablösegeschwindigkeit am Fahrzeug und folglich auch der Totwasserdruck ändern (siehe dazu Gürtler [22]). Die Deformation des Fahrzeugnachlaufs lässt sich potentialtheoretisch, wenn überhaupt, nur näherungsweise abbilden. Mercker und Cooper [47] haben daher ein experimentelles Verfahren entwickelt, dass sich als hinreichend genau erwiesen hat [19, 20, 26, 46, 54, 76]. Die Grundannahme dieses Verfahrens ist die Existenz einer zunächst unbekannten Sensitivitätslänge L_{sens} – einer charakteristischen Nachlaufänge, die zwar fahrzeugabhängig ist, sich jedoch unabhängig vom statischen Druckgradienten in der leeren Messstrecke verhält. Müller [54] konnte 2014 anhand eines einfachen potentialtheoretischen Modells aufzeigen, dass die Annahme einer vom statischen Druckgradienten unabhängigen Sensitivitätslänge L_{sens} für moderate Gradienten, wie sie üblicherweise in Fahrzeugwindkanälen vorherrschen, durchaus legitim ist. Für massivere Druckgradienten ist diese Annahme jedoch nicht mehr zulässig.

Die Deformation des Nachlaufs und die Buoyancy Kraft auf das Fahrzeugvolumen können gemeinsam bestimmt werden, indem die Druckdifferenz im leeren Kanal zwischen der Position der Nachlaufänge $x_{Heck} + L_{sens}$ und der

Fahrzeugfront x_{Front} für zwei unterschiedliche statische Druckverläufe in der leeren Messstrecke betrachtet wird.

$$\Delta c_W(x) = c_p(x_{Heck} + L_{sens}) - c_p(x_{Front}) \quad \text{Gl. 2.39}$$

Berücksichtigt man noch die oben aufgeführten Interferenzeffekte der Düse, des Kollektors, der Strahlaufweitung sowie der Strahlablenkung, so ergibt sich eine Korrekturformel, die alle Windkanalinterferenzeffekte in einer Freistrahlmessstrecke berücksichtigt. Bei der Messung eines Fahrzeugs in (mindestens) zwei unterschiedlichen Druckgradienten (Index „1“ bzw. „2“ in Gl. 2.40), kann der korrigierte Luftwiderstandsbeiwert $c_{W,korrigiert}$ durch das folgende Gleichungssystem bestimmt werden:

$$c_{W,korrigiert} = \frac{c_{W,1,unkorrigiert} + (c_{p,1}(x_{Heck} + L_{sens}) - c_{p,1}(x_{Front}))}{(1 + \varepsilon_S + \varepsilon_D + \varepsilon_K)^2|_1}$$

$$= \frac{c_{W,2,unkorrigiert} + (c_{p,2}(x_{Heck} + L_{sens}) - c_{p,2}(x_{Front}))}{(1 + \varepsilon_S + \varepsilon_D + \varepsilon_K)^2|_2} \quad \text{Gl. 2.40}$$

Somit liegen zwei Gleichungen vor, um die zwei Unbekannten $c_{W,korrigiert}$ und L_{sens} aufzulösen. Die Sensitivitätslänge L_{sens} kann hierbei als freier Parameter angesehen werden. Details zu den einzelnen Iterationsschritten sind in Anhang A.2 zu finden.

Dieser Iterationsprozess kann ebenso grafisch umgesetzt werden, wie in Abbildung 2.14 dargestellt. Der korrigierte Luftwiderstandsbeiwert $c_{W,korrigiert}$ ergibt sich aus dem Schnittpunkt der zwei (oder mehr) Korrekturkurven. Diese Art der grafischen Korrektur wird in den folgenden Hauptkapiteln angewandt.

Aufbauend auf der Bestimmung der Sensitivitätslänge durch Messungen in zwei unterschiedlichen Druckgradienten wird von Walter et al. [76] ein Korrelationsprozess vorgeschlagen, mit dem die Messungen in einem zweiten Druckgradienten vermieden werden können. Auf Basis einer Korrelationsdatenbank verschiedener Fahrzeuge wird versucht, durch lineare

Regression die Resultate der Messung in einem zweiten Druckgradienten vorherzusagen. Hierdurch wird die Anwendung des Korrekturverfahrens ohne zeitliche Einbußen durch zusätzliche Messungen ermöglicht und kann im Idealfall parallel zur Windkanalmessung „online“ ausgeführt werden. Ein derartiges Korrelationsverfahren bietet allerdings Nachteile bezüglich der Genauigkeit der Korrektur, da die Bestimmung der Sensitivitätslänge lediglich auf Basis der Korrelationsdatenbank erfolgt und nicht individuell für jedes Fahrzeug bestimmt wird. Darüber hinaus muss vor der Anwendung eines solchen Korrelationsverfahrens eine solide Datenbasis als Grundlage für den Prozess erzeugt und validiert werden.

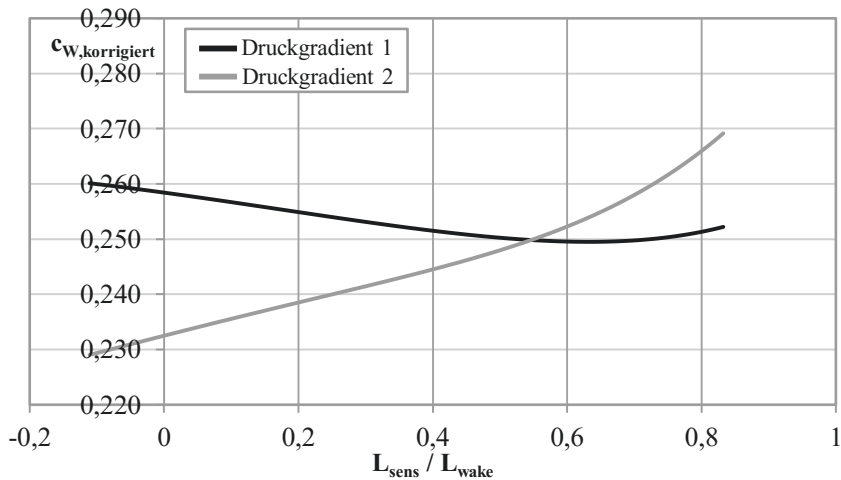


Abbildung 2.14: Grafische Windkanalkorrektur: Bestimmung des korrigierten Luftwiderstandsbeiwerts $c_{W,korrigiert}$ aus zwei Messungen in zwei unterschiedlichen Druckgradienten nach Gl. 2.40. Die Sensitivitätslänge L_{sens} ist hier relativ zur (abgeschätzten) Nachlaufweite L_{wake} aufgetragen

2.3.4 Diskussion des aktuellen Stands der Technik

Zum Ende dieses Hauptkapitels soll eine kritische Diskussion zum aktuellen Stand der Technik in Bezug auf die praktische Anwendung der Korrektur erfolgen. In den vergangenen Jahren wurde des Öfteren wissenschaftlich nachgewiesen, dass die Mercker-Wiedemann Korrekturmethode ein robustes

Verfahren darstellt. Es wurde ebenfalls gezeigt, dass das Verfahren zur Korrektur aller integralen Beiwerte geeignet ist.

Ein ausschlaggebender Nachteil des Korrekturverfahrens in der praktischen Anwendung stellt die Bestimmung der Sensitivitätslänge L_{sens} dar. Um diese Größe bestimmen zu können, sind Messungen in zwei unterschiedlichen Druckgradienten und ansonsten identischen Bedingungen im Windkanal nötig. Dies verdoppelt die benötigte Messzeit im Windkanal und macht eine standardmäßige Anwendung des Korrekturverfahrens in der Automobilentwicklung damit beinahe unmöglich.

Darüber hinaus gibt es jedoch auch offene Fragen zur Korrekturmethode an sich. Insbesondere die angesprochene Korrektur des Druckgradienten steht dabei im Fokus diverser Forschungsarbeiten. Die folgenden zwei Fragen kommen zumeist in Verbindung mit der Druckkorrektur auf:

- Warum funktioniert eine derart simple Korrektur bei einem sehr komplexen Strömungsphänomen wie der Deformierung eines Nachlaufgebiets aufgrund äußerer Druckgradienten?
- Was ist die physikalische Interpretation der Sensitivitätslänge L_{sens} ?

Die erste Frage kann nur schwer zufriedenstellend beantwortet werden, obgleich es wünschenswert ist, komplexe physikalische Vorgänge durch einfache Gleichungen darstellen zu können. Für eine weitreichendere Akzeptanz der Korrekturmethode in der Automobilaerodynamik ist es jedoch dringend nötig, die physikalischen Hintergründe näher zu erläutern.

Die zweite Frage hängt eng mit der ersten zusammen. In der Literatur wurde bereits versucht, die Sensitivitätslänge auf eine physikalische Bezugsgröße – zumeist die Länge des Nachlaufgebiets – zu beziehen. Nach Meinung des Autors ist dies aber eine zu starke Vereinfachung des komplexen Strömungsvorgangs. Bezüglich der Korrektur des Widerstandsbeiwerts spielt mit Sicherheit die Größe des Nachlaufgebiets eine entscheidende Rolle. Darüber hinaus gibt es noch andere Faktoren, die offensichtlich mit einfließen müssen. Die sich verändernde Nachlaufblase kann nur über die Ablösefläche auf die Fahrzeuggeometrie wirken. Somit führt ein äußerer Druckgradient beispielsweise bei einem Stufenheckfahrzeug stets zu einem geringeren Einfluss als bei einem Vollheckfahrzeug [26]. Des Weiteren bestimmen die Strömungsverhältnisse an der Ablöselinie, wie sich das Nachlaufgebiet unter

Einfluss eines Druckgradienten verhält. Verändert sich die Ablöselinie aufgrund des äußeren Gradienten (oder anderer Interferenzeffekte), wird eine Korrektur unmöglich, da das grundsätzliche Prinzip der kleinen Störungen nicht mehr gültig ist. Die genannten Einflussfaktoren sind nur einzelne Aspekte und können immer noch nicht die komplexen Vorgänge in einem Ablösegebiet beschreiben. Ebenso können diese Faktoren nur schwer quantifiziert werden und lassen demnach nur qualitative Aussagen zu. Gerade deswegen ist ein experimentelles Verfahren, das die Sensitivität eines Fahrzeuges auf äußere Druckgradienten mit lediglich einer einzigen Größe – der Sensitivitätslänge L_{sens} – bestimmt, sehr attraktiv.

Ein weiterer Kritikpunkt an der Korrekturmethode ist die Korrektur der Nachlaufblockierung, die den hauptsächlichsten Aspekt der vorliegenden Arbeit ausmacht. Da die genaue Form eines Nachlaufgebiets unbekannt ist, bedient sich das Korrekturverfahren einer empirischen Eingangsgröße. In Abbildung 2.11 ist das Prinzip der Nachlaufblockierung bereits schematisch dargestellt worden. Eine Beschreibung des Interferenzeffekts der Kollektorblockierung erfolgte in Kapitel 2.2. Bereits 1996 wurde bei der erstmaligen Veröffentlichung des Korrekturverfahrens angemerkt, dass für lange Messstrecken der nahe Nachlauf des Fahrzeuges vernachlässigt werden kann. Jedoch finden sich in der Literatur keinerlei Hinweise darauf, was lange Messstrecken sind. Der Anwender der Korrektur muss a priori entscheiden, ob das Nachlaufgebiet in den Kollektor eintritt oder nicht. Einfache Ansätze zur Abschätzung der Länge eines Nachlaufgebiets wurden vom Autor dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit Mercker im Rahmen des EADE Correlation Tests 2010 [26] veröffentlicht. Aber dies war ebenfalls nur eine Übergangslösung und kann eine detaillierte Untersuchung des Phänomens der Kollektorblockierung nicht ersetzen.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass sich die größten Kritikpunkte an der Korrektur auf deren praktische Anwendung beziehen. Es wird vom Anwender verlangt, die Sensitivität und die Größe des Nachlaufgebiets abzuschätzen sowie die nötigen Anpassungen an der Korrekturmethode vorzunehmen. Ein derartiges Vorgehen stellt stets eine potentielle Fehlerquelle dar und macht eine Allgemeingültigkeit der Korrekturmethode unerreichbar.

Ziel dieser Arbeit ist es, diese Allgemeingültigkeit des Korrekturverfahrens zu verbessern und Fehlerquellen in der Anwendung zu minimieren. Nach Meinung des Autors ist ein Versagen der Korrekturmethode in den meisten

Fällen auf eine falsche Anwendung der Korrektur oder auf mangelnde Qualität der Eingangsgrößen zurückzuführen. Eine typische, qualitativ unzureichende Eingangsgröße kann beispielsweise ein zu starker Druckgradient sein, der die Strömungstopologie am Messobjekt ändert und somit eine Korrektur unmöglich macht. Aber auch Messungenauigkeiten in den Eingangswerten der Korrekturmethode können die Qualität der Korrektur signifikant beeinträchtigen.

Eine erweiterte Methode zur Korrektur von
Interferenzeffekten in Freistrahwindkanälen für
Automobile

Hennig, A.

2017, XXXI, 129 S. 67 Abb., 24 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-17826-0