Kapitel 2

Stand der Forschung

Bereits kurz nach der Erfindung des Automobils begannen einige Pioniere, sich mit der Aerodynamik von Automobilen auseinanderzusetzen, getrieben von dem Wunsch nach höheren Geschwindigkeiten. Entlieh man noch zunächst verschiedene Formen aus dem Schiffs- und Flugzeugbau, um den Luftwiderstand zu reduzieren, so gewannen die Fahrzeuge mit wachsender Erkenntnis über die Aerodynamik in Bodennähe eine immer ausgeklügeltere Windschnittigkeit. Gleichzeitig begannen die Ingenieure, sich Gedanken darüber zu machen, wie die Störeinflüsse aus der Umwelt verringert werden können. Einer davon ist der Seitenwind. Zur genaueren Erläuterung folgt daher an dieser Stelle zunächst ein Überblick zu den Eigenschaften des Windes. Im Anschluss daran werden die bis dato geläufigsten Mess- und Beurteilungsverfahren für Seitenwindempfindlichkeit vorgestellt.

2.1 Seitenwind

2.1.1 Wind in Bodennähe

Die Kenntnis über den Wind in Bodennähe ist Grundvoraussetzung für die Untersuchung der Fahrzeugreaktion auf Seitenwindstörungen. Wetterstationen messen üblicherweise Windrichtung und Windstärke in einer Höhe von 10 m über dem Grund, wie auch im Beispiel aus Bild 2.1, das einen Überblick zum Jahresmittel der Windgeschwindigkeiten in der Bundesrepublik Deutschland gibt. In der Regel werden die Windgeschwindigkeiten dabei als Mittelwerte angegeben. Die lokale Windgeschwindigkeit kann aber temporär deutlich davon abweichen, da die bodennahe Grenzschicht, in der sich Fahrzeuge bewegen, stark von der Landschaftsbeschaffenheit abhängig ist [23]. Sie lässt sich mit Hilfe der Formel für das logarithmische Windprofil

$$v_w(z_G) = \frac{v_s}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z_G}{z_0}\right) \tag{2.1}$$

annähern, wobei folgende Abkürzungen verwendet werden:

- v_w Windgeschwindigkeit in der Höhe z_G
- v_s Schubspannungsgeschwindigkeit
- κ von-Kármán-Konstante
- z_G Höhe über Grund
- z_0 Rauhigkeitslänge

Da die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 10 m bekannt ist, kann v_s/κ durch

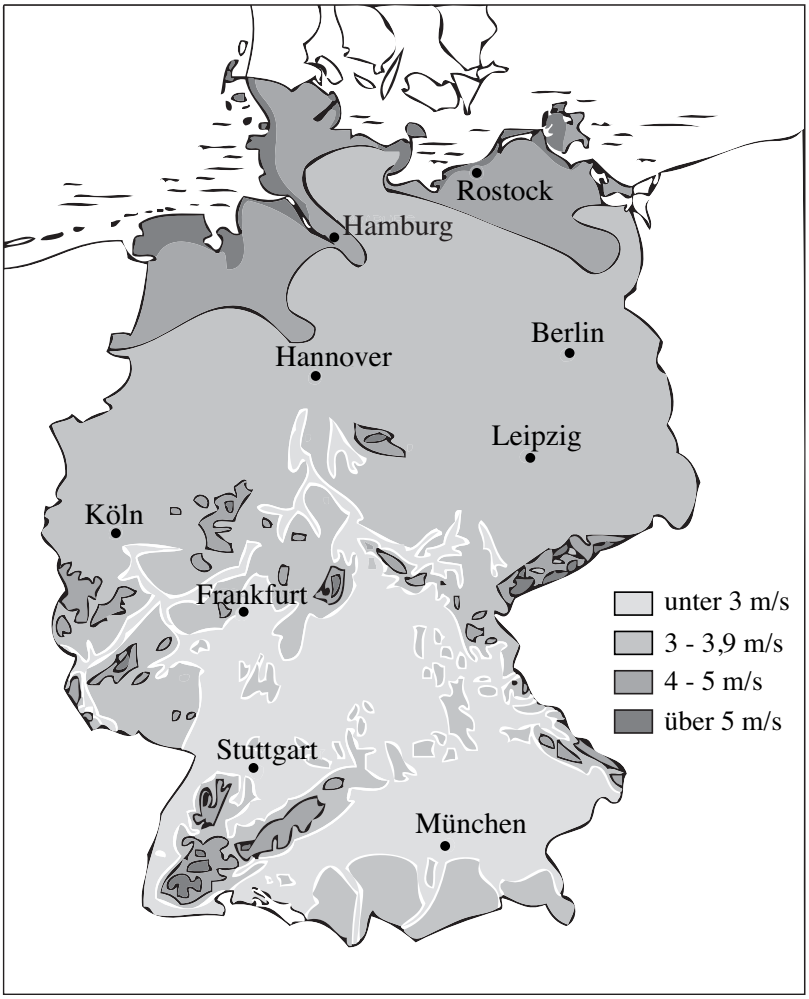

Bild 2.1: Jahresmittel der Windgeschwindigkeiten in der Bundesrepublik Deutschland 10 m über Grund nach [3] (1993)

$v_w(10\,\mathrm{m})/\ln(\frac{10\,\mathrm{m}}{z_0})$ ersetzt werden. Die Windgeschwindigkeit in der Höhe z_G aus Gleichung 2.1 wird zu

$$v_w(z_G) = v_w(10\,\mathrm{m})\frac{\ln\left(\frac{z_G}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10\,\mathrm{m}}{z_0}\right)} \tag{2.2}$$

Für typische Werte der Rauhigkeitslänge z_0 (z. B. aus Tabelle 2.1 eingesetzt) zeigt sich, wie die Geschwindigkeit mit sinkender Höhe abnimmt [57]. Im Gegensatz dazu können lokale Geschwindigkeitsüberhöhungen aber ebenso auftreten, sobald die Stromlinien des natürlichen Windes durch topologische oder bauliche Hindernisse zusammengedrängt werden: Beispielsweise tritt bei der Überströmung einer erhöhten Autobahntrasse oder Landstraße eine Verdichtung der Stromlinien in vertikaler Richtung auf. Auch an Brücken ist mit höheren Geschwindigkeiten zu rechnen, da sie oft aus der verlangsamten Grenzschicht herausragen. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Anströmrichtung bei normaler Straßenfahrt größere Winkel als 10° annimmt, ist dabei sehr gering ($< 1\%$) [94]. In [41] werden bei umfangreichen Straßenversuchen sogar nur Werte bis maximal 6° für den resultierenden Anströmwinkel gemessen.

Tabelle 2.1: Verschiedene Werte für die Rauhigkeitslänge z_0 nach [57]

Umgebungsbeschaffenheit	*Rauhigkeitslänge* z_0
Schnee	0,0001 – 0,001 m
Sand	0,001 – 0,01 m
Wiese	0,001 – 0,1 m
Getreide	0,05 – 0,5 m
Landstraße (gelegentl. Randbüsche)	ca. 0,1 m
Wohngebiet	ca. 1 m
Städte	2 m und mehr

2.1.2 Definition des Seitenwindes

Während der Fahrt wird ein Fahrzeug, wie in Bild 2.2 schematisch gezeigt, angeströmt. Dabei ergibt sich die resultierende Anströmgeschwindigkeit v_{res} und der zugehörige Anströmwinkel τ durch Vektoraddition der Fahrtwindgeschwindigkeit u (als Annäherung der Fahrgeschwindigkeit) und der Windgeschwindigkeit v_w. Durch die seitliche Anströmung stellt sich die Seitenkraft F_s im Druckpunkt DP ein. Sie ist definiert als

$$F_s = \frac{\rho}{2} \cdot c_s \cdot A \cdot v_{res}^2 \tag{2.3}$$

mit der Dichte der Luft ρ, dem Seitenkraftbeiwert c_s und der Fahrzeugstirnfläche A. Mit dem Hebelarm e_{DS} entsteht das Windgiermoment M_n im Schwerpunkt SP. Der Anstieg des

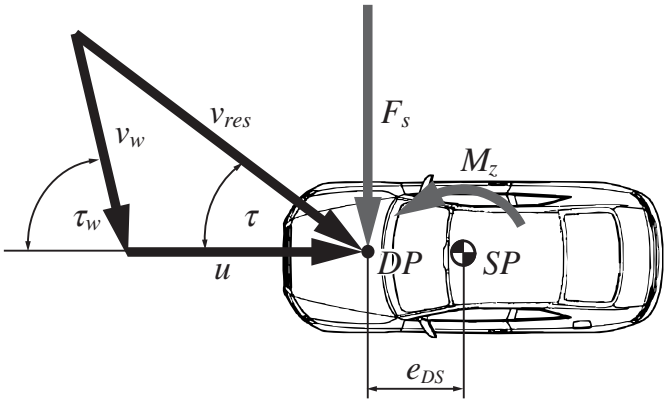

Bild 2.2: Anströmung bei Fahrt unter Seitenwind

Seitenkraftbeiwerts kann für kleine Anströmwinkel $\tau \leq 20°$ linearisiert werden [64], sodass unter Zuhilfenahme dieses linearisierten Seitenkraftbeiwerts $c_{s,lin}$ mit der Vereinfachung

$$k_s = \frac{\rho}{2} \cdot c_{s,lin} \cdot A \tag{2.4}$$

aus Gleichung (2.3)

$$F_s = \frac{\rho}{2} \cdot c_{s,lin} \cdot A \cdot \tau \cdot v_{res}^2 = k_s \cdot \tau \cdot v_{res}^2 \tag{2.5}$$

folgt. Das Produkt $\tau \cdot v_{res}^2$ ist bei konstanter Fahrt einzig vom Windwinkel τ_w und der Windgeschwindigkeit v_w abhängig — τ_w und v_w sind unkorreliert [99] — und beschreibt

daher die Fahrzeugreaktion auf die Windstörung. Der Hebelarm e_{DS} kann bis zu einem Winkel von 20° als nahezu konstant angenommen werden [90].

2.2 Mess- und Bewertungsverfahren

Sowohl zur Messung als auch zur Bewertung des Seitenwindverhaltens von Pkw wurden verschiedene Techniken entwickelt. Die gängigsten Werkzeuge und Methoden werden im Folgenden vorgestellt.

2.2.1 Messinstrumente

Für die Auswertung von Fahrten unter Seitenwind werden in Abhängigkeit der gewählten Versuchsmethode sowohl fahrdynamische als auch aerodynamische Größen aufgezeichnet. Um die Fahrdynamik eines Fahrzeugs festzuhalten werden verschiedene Messinstrumente für die maßgeblichen Messgrößen verwendet:

Kreiselstabilisierte Plattform zur Erfassung von Gierwinkel und -geschwindigkeit, Längs-, Aufwärts- und Querbeschleunigung, sowie Nick- und Wankwinkel des Fahrzeugaufbaus.

Korrelationsoptischer Sensor zur Weg- und Geschwindigkeitsmessung in Längs- und Querrichtung.

Messlenkrad zur Aufzeichnung des Lenkradwinkels und des Lenkmoments.

Um die Anströmgeschwindigkeit und den Anströmwinkel des auftretenden Windes bestimmen zu können, haben sich zwei Messverfahren etabliert:

Windmessfahne In [99; 59; 78] wird eine Windmessfahne auf das Fahrzeugdach montiert. Durch deren Konstruktionsprinzip (drehbare Windfahne mit integriertem Prandtl'schem Staurohr) dreht sich die Messeinrichtung immer in die resultierende Windrichtung (eine Winkelmessung liefert den Anströmwinkel) und misst dort den Staudruck q, über den dann die Anströmgeschwindigkeit v_{res} direkt über

$$v_{res} = \left| \sqrt{\frac{2q}{\rho}} \right| \tag{2.6}$$

bestimmt werden kann. Anstatt mit einer Prandtl-Sonde wird in [99] die Anströmgeschwindigkeit mithilfe einer Hitzdrahtsonde direkt gemessen. Der Einfluss des gesamten Messaufbaus auf die Fahrzeugaerodynamik ist insgesamt gering, allerdings muss ab einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 100 km/h ein Korrekturterm für die Geschwindigkeitsberechnung eingeführt werden [78]. Die Auswirkungen durch die Zusatzmasse der Messfahne auf die Fahrdynamik werden nicht berücksichtigt.

Druckaufnehmer Die Erfassung der gesuchten Größen Anströmwinkel und -geschwindigkeit aus der Berechnung von Differenzdrücken wird in [61; 90; 95; 96; 28] verwendet. Dabei werden am Bug des Versuchsfahrzeugs Druckaufnehmer angebracht, deren gemessene Drücke abhängig von der Anströmrichtung sind. Durch geeignete Korrelation dieser Drücke und unter Verwendung von Referenzdrücken, die aus Windkanalmessungen unter Schräganströmung mit verschiedenen Winkeln gewonnen werden, kann der Anströmwinkel bestimmt werden. Die Anströmgeschwindigkeit folgt aus der Messung

des Staudrucks im Staupunkt (auf der Symmetrieebene, meist in Höhe des vorderen Stoßfängers), der für einen ausreichend großen Bereich der Schräganströmung (±20°) nahezu konstant ist. Der Vorteil dieser Methode gegenüber der Windmessfahne ist, dass die Aerodynamik des Versuchsträgers unverändert bleibt. Der größere Vorbereitungsaufwand — verschiedene Fahrzeuge müssen im Windkanal jeweils neu „kalibriert“ werden — ist bei diesem Verfahren allerdings nachteilig.

2.2.2 Versuchsmethoden

Obwohl mit allen Versuchsmethoden dasselbe Ziel verfolgt wird — die Seitenwindempfindlichkeit eines Fahrzeugs zu bestimmen — unterscheiden sie sich doch in einem entscheidenden Kriterium: dem Windprofil der resultierenden Anströmung (vergleiche Bild 2.3).

a) Der natürliche Wind weist ein parabelförmiges Profil auf, sodass sich die resultierende Fahrzeuganströmung über der Höhe stark ändert [99].
b) Im Gegensatz dazu besitzt ein moderner Windkanal ohne Bodengrenzschicht ein über der Höhe konstantes Windprofil. Das Fahrzeug wird hier typischerweise schräg angeströmt.
c) Das Profil, das sich wiederum an einer Seitenwindanlage einstellt, ändert sich zwar über der Höhe, zeigt jedoch wegen der eingesetzten Gebläse einen typischen Verlauf mit starker Geschwindigkeitsüberhöhung in Bodennähe auf.

Wie diese Beispiele zeigen, ist der künstlich erzeugte Seitenwind nur eingeschränkt mit dem natürlichen Windprofil vergleichbar. Trotzdem findet er in der Aerodynamikentwicklung immer wieder Anwendung, da sein großer Vorteil die Reproduzierbarkeit und Verfügbarkeit ist.

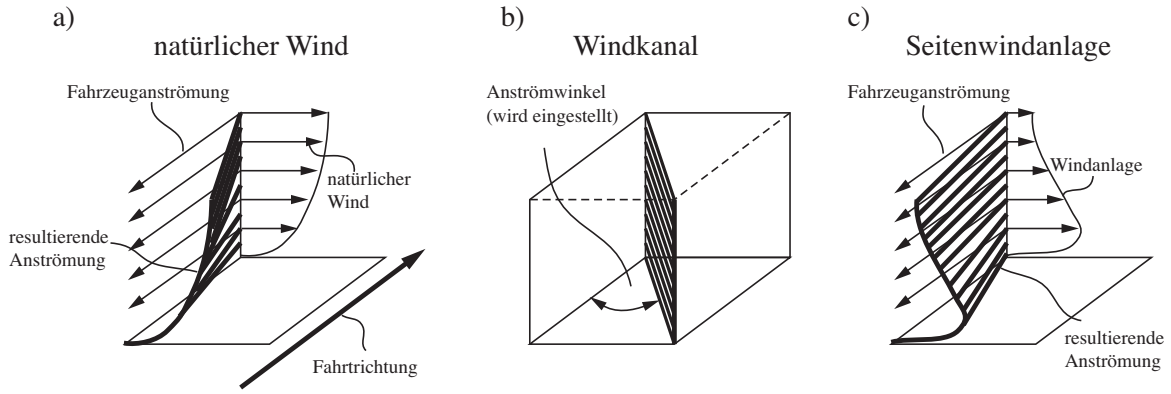

Bild 2.3: verschiedene Seitenwindprofile nach [46]

Seitenwindanlage

Die Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage ist das älteste Verfahren, um unter simulierten Bedingungen die Seitenwindempfindlichkeit eines Pkw zu bestimmen. Es ist nach wie vor das am weitesten verbreitete, wie zahlreiche Untersuchungen [33; 37; 40; 41; 78; 103; 106] und Artikel in populären Fachzeitschriften [4; 5; 6; 72] belegen. Der Hauptgrund für diese Beliebtheit liegt in der Reproduzierbarkeit der Versuche. W. Kamm führte bereits in den

30er Jahren des 20. Jahrhunderts Versuche mit Vorbeifahrten an Gebläsen durch, die so am Fahrbahnrand angeordnet waren, dass sie einen konstanten Seitenwind erzeugten [50]. Der Einfluss des Windes auf ein vorbeifahrendes Fahrzeug lässt sich an solchen Anlagen mit zwei Methoden ermitteln (siehe Bild 2.4):

open-loop -Fahrten sind Manöver, bei denen der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug offen ist, d. h. der Einfluss des Fahrers wird nicht berücksichtigt. Man unterscheidet zwei Fälle:

- free-control: das Lenkrad ist freigegeben
- fixed-control: das Lenkrad wird in der Anfangsposition gefesselt

Die ausschlaggebenden Messgrößen, die im open-loop-Verfahren ermittelt werden um die Seitenwindempfindlichkeit zu bewerten, sind die Fahrzeugreaktionen während der Ein- und Ausfahrt in den Seitenwindstrahl, wie der resultierende Gierwinkel ψ oder die Spurabweichung Δy. Nach dem Standard ISO 12021-1 [2] wird in einer Messung (open-loop, fixed-control) eine integrale Größe aus Querbeschleunigung und Gierrate als Bewertungsmaß ermittelt. Ein Fahrzeug, das geringe Werte aufweist, gilt dann als seitenwindunempfindlich. Tatsächlich ist dies die einzige Norm, die ein Verfahren zur Bestimmung der Seitenwindempfindlichkeit beschreibt. Die Arbeit an einer Erweiterung um ein closed-loop-Manöver wurde allerdings eingestellt [1].

closed-loop -Methode: Fahrer und Fahrzeug werden als Einheit betrachtet (geschlossener Regelkreis). Bei der Vorbeifahrt an der Seitenwindschleuse versucht der Fahrer, die Störung optimal auszugleichen, sodass das Fahrzeug nach Möglichkeit keine Spurabweichung erfährt. Die beobachteten Größen sind neben dem Regelaufwand des Fahrers auch die Fahrzeugreaktionen, sowohl auf die Störung als auch die Fahrereingaben.

Bei diesen Versuchen werden die Gebläse meistens in einem Winkel von 90° zur Fahrtrichtung ausgerichtet und erzeugen in der Regel einen Luftstrahl mit Geschwindigkeiten zwischen 60 und 100 km/h. Bei einer Fahrgeschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs im Bereich von 80 bis 140 km/h liegen die Werte des resultierenden Anströmwinkels bei 30° bis 45°. Wie in Kapitel 2.1.1 bereits angeführt, ist dieser Winkelbereich für Anströmungen in der Natur aber nur sehr selten größer als 10°, sodass man sich durch diese Randbedingungen noch weiter vom natürlichen Vorbild entfernt. Auch ist der natürliche Wind sowohl von seiner Intensität als auch Richtung stochastisch, wo er hingegen an einer Seitenwindschleuse konstant ist. Ein weiterer Unterschied zu realen Windverhältnissen besteht im Eintauchen des Fahrzeugs in den künstlichen Windstrahl: Zunächst wird der Vorderwagen erfasst und anschließend stückweise das restliche Fahrzeug. Auf der Straße begegnet man dieser Situation eher seltener (beispielsweise bei der Ausfahrt aus einem Tunnel); häufiger ist der Fall, dass ein Fahrzeug von einer Windböe erfasst wird, wobei diese dann die gesamte Fahrzeugbreite simultan erreicht [54]. Auf den Unterschied zum natürlichen Wind im Windprofil, wie eingangs in Kapitel 2.2.2 bereits vorgestellt, sei an dieser Stelle der Vollständigkeit halber nochmals hingewiesen (vergleiche Bild 2.3).

Um dem stochastischen Windverhalten auf der Straße besser gerecht zu werden, verwendet [59] neben der Standardanordnung (aneinandergereihte Gebläse) acht unterschiedlich ausgerichtete Windgeneratoren. Schwerpunkt dieser Untersuchung ist die Ermittlung verschiedener fahrdynamischer und aerodynamischer Einflussgrößen auf das Fahrerempfinden. Durch die unkonventionelle Anordnung der Gebläse wird der Fahrer zu ständig wechselnden Regeleingriffen gezwungen, um den Kurs zu halten. Der große Vorteil der Reproduzierbarkeit

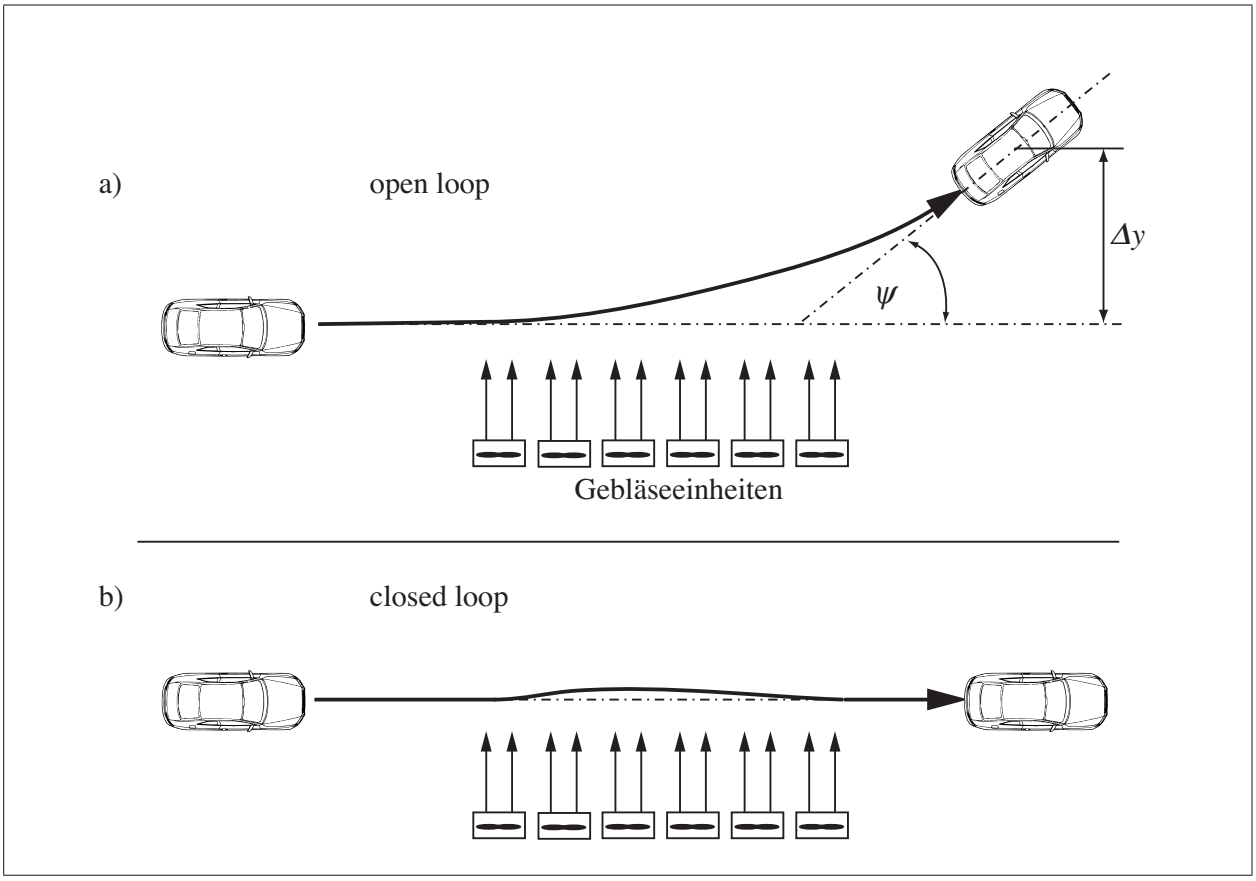

Bild 2.4: Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage im open-loop (a) und closed-loop (b)

der Gebläseversuche zeigt besonders bei diesem Verfahren auch eine seiner Hauptschwächen: Wie auch in anderen Arbeiten bestätigt wird, passt der Fahrer sein Regelverhalten schnell an die sich wiederholenden Störungen an. Er antizipiert diese regelrecht, sodass er zum Teil sogar schon vor der Störung bereits anfängt, diese abzufangen, d. h. er lenkt schon gegen, bevor er ein Gebläse passiert [56; 97].
Ein weiterer Nachteil der Messung an der Seitenwindanlage ist die Wetterabhängigkeit. Die ideale Bedingung ist (zumindest beinahe) Windstille in der Umgebung der Messstrecke, um eine bestmögliche Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Weiterhin müssen für die Dauer der Versuchsreihen die Umgebungstemperatur konstant und das Wetter trocken bleiben, um mögliche Störeinflüsse auf die Fahrdynamik der Versuchsfahrzeuge und deren Messtechnik zu vermeiden

Windkanal

Der Windkanal ist der älteste Prüfstand für die Aerodynamik: bereits 1908 baute L. Prandtl den ersten Windkanal mit geschlossenem Kreislauf und 1909 G. Eiffel auf dem Marsfeld ein Laboratorium mit einem offenen Kanal [24]. Obwohl die ersten Anlagen zur Untersuchung von Flugzeugen errichtet wurden, ist die aerodynamische Entwicklungsarbeit von Kraftfahrzeugen heutzutage ohne Windkanäle undenkbar. Dies gilt auch für die Bestimmung der Seitenwindempfindlichkeit. Das gängige Vorgehen dabei ist, das Versuchsfahrzeug so in der Messstrecke des Kanals zu platzieren, dass es der erzeugte Luftstrahl unter einem Winkel

trifft. Dieser stationäre Fall versucht einen konstanten Seitenwind zu simulieren. Die Größen, die bei solchen Experimenten bestimmt werden, sind zum einem die sich einstellende Seitenkraft und das Giermoment. A. Gilhaus et al. untersucht den Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen in Abhängigkeit der Fahrzeugform und kommt zu dem Schluss, dass schon relativ geringe Änderungen in der Seitenkraft deutliche Unterschiede im Giermoment bewirken [32].

Die größten Vorteile des Windkanals sind zum einen, dass Untersuchungen mit kleinen maßstabgetreuen Modellen durchgeführt werden können, was geringere Kosten verursacht, zum anderen, dass er durch Verwendung von geometrisch repräsentativen Modellen schon in einer sehr frühen Phase der Entwicklung eingesetzt werden kann: Man muss nicht erst auf einen fahrfähigen Prototypen warten, um damit beispielsweise Versuche an einer Seitenwindschleuse zu unternehmen.

Um die Seitenwindverhältnisse nachzubilden, wie sie bei einer Fahrt auf der Straße stattfinden, gibt es im Windkanal einige Untersuchungen mit instationären Randbedingungen. Bereits 1967 führte [7] Versuche mit bewegten Fahrzeugmodellen durch, die zeigen, dass die üblichen statischen Messungen bei Schräganströmung nicht ausreichen, um eine Aussage zum instationären Verhalten zu liefern. Darauf aufbauend wird in [20] ein Prüfstand vorgestellt, der zusätzlich zum Hauptluftstrahl einen weiteren Seitenwindluftstrahl in einem Winkel zur Hauptachse von 30° besitzt (Bild 2.5). Um den Ein- und Austritt aus einer Seitenwindböe zu simulieren, sind die beiden Luftkanäle durch ein bewegliches Bandsystem getrennt, welches parallel zur Hauptströmrichtung liegt. Das dort verwendete Band bewegt sich in den Experimenten mit derselben Geschwindigkeit wie die Hauptanströmung und besitzt Blendenöffnungen, durch die dann die Querströmung aus dem Seitenwindkanal eingebracht werden kann. Diese Messungen zeigen, dass sowohl die maximal auftretende Seitenkraft als auch die Auftriebskraft um bis zu 20% größer sind als in vergleichbaren Messungen unter stationären Bedingungen. Versuche in [73], [21] und [13] bestätigen mit einem weiterentwickelten Konzept des Windkanals diese Aussagen. Auch [60] kommt zu ähnlichen Erkenntnissen, wobei hier das Versuchsfahrzeug ähnlich wie in [7] durch die Messstrecke bewegt wird und somit verschiedene Anströmwinkel realisiert werden können.

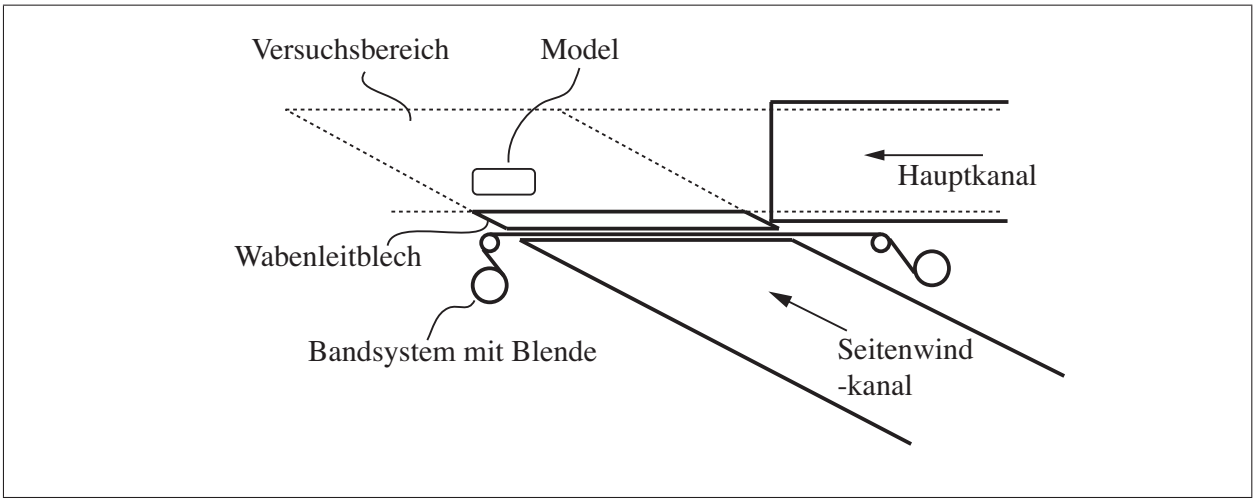

Bild 2.5: Schematische Darstellung (Draufsicht) eines Windkanals mit zusätzlichem Seitenwindkanal nach [73]