2 Stand der Technik

Seitdem die Strömungsbeeinflussung erstmals in den Untersuchungen zur Entwicklung der Grenzschicht-Theorie von Prandtl erwähnt wurde, entwickelte sich diese Technologie mit großem Erfolg stetig weiter [1]. Im Rahmen der Strömungsbeeinflussung sind zahlreiche Forschungen zum Zwecke der Verkleinerung der Ablöseblase zu finden. Im Automobil ist das Ziel der Strömungsbeeinflussung jedoch, den Luftwiderstand eines Fahrzeugs zu minimieren.

Je nachdem ob zusätzliche Energie zur Beeinflussung benötigt wird, lässt sich zwischen den passiven und aktiven Methoden unterscheiden [5]. Bei den passiven Methoden wird die Strömung ohne Zufuhr externer Energie beeinflusst, wie beispielsweise durch die Formänderung des angeströmten Körpers. Solche Änderungen sind in der Regel permanent, deswegen kann die passive Beeinflussung im gesamten Betriebsbereich nicht immer das Optimum erreichen.

Im Gegensatz dazu kann die Zufuhr von externer Energie bei aktiven Methoden manuell gesteuert oder automatisch geregelt werden. Die aktive Beeinflussung ermöglicht, den günstigsten Strömungszustand des Systems trotz ständig veränderter Strömungssituation zu erreichen. Dabei ist stets die Energiebilanz zu beachten. Das Ziel der aktiven Beeinflussung zur Energieeinsparung kann nur dadurch erreicht werden, dass es mehr Energie am Fahrzeug eingespart wird als für die aktive Beeinflussung aufzuwenden ist.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden im nachfolgenden Abschnitt die wichtigen Forschungsergebnisse in den Bereichen der passiven und aktiven Beeinflussung exemplarisch vorgestellt. Da das Hauptaugenmerk dieser Arbeit in der aktiven Strömungsbeeinflussung liegt, wird im Folgenden nur auf einige Beispiele der passiven Methoden eingegangen.

J. Gong, *Grundlagenuntersuchung zur aktiven Beeinflussung der abgelösten Strömung,*
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart, DOI 10.1007/978-3-658-12219-5_2,
© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

2.1 Passive Methoden

Mit dem Ziel, dass sich die abgelöste Strömung so früh wie möglich wieder anlegt, wurden zahlreiche Methoden zur passiven Strömungsbeeinflussung an einer Stufe in den letzten Jahren untersucht.

Im Allgemeinen beruht das Prinzip der Untersuchungen zur Verkürzung der Wiederanlegelänge darauf, dass durch die Erhöhung der Wechselwirkung zwischen der Scherschicht und dem Totwasser die abgelöste Strömung früher wiederanlegen kann. Im Experiment von Westphal und Johnston wurden kleine Deltaflügel stromaufwärts der Ablösekante angebracht [6]. Die Bewegungen des Fluids in der turbulenten Grenzschicht der ankommenden Strömung vor der Ablösung wurden intensiviert. Die Ablöseblasen wurden dadurch signifikant verkleinert, dass die Wechselwirkungen im Ablösebereich verstärkt wurden [6].

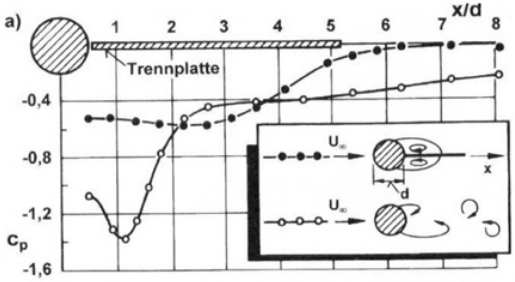


Abbildung 2: Erhöhung des Basisdrucks durch das Einbringen einer Trennplatte [7][15]

Zur Anhebung des statischen Drucks an der Basis dienen passiven Methoden, die in die Ablösestrukturen eingreifen. In der Untersuchung von Roshko wurde der Basisdruck eines Kreiszylinders durch das Einbringen einer Trennplatte an der Basis angehoben [7]. Der Luftwiderstand wird dadurch reduziert, dass die zweiseitigen Ablösungen durch die Trennplatte in zwei einseitige Ablösungen aufgeteilt und dadurch vollständig von einander entkoppelt werden.

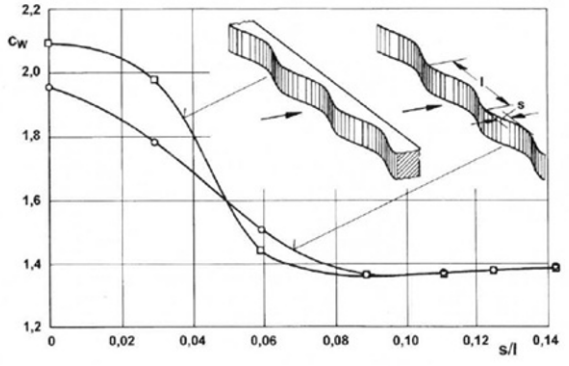


Abbildung 3: Einfluss der sinusförmigen Vorder-/Hinterkante auf den Widerstande eines stumpfen Körpers [8][15]

Die großen alternierenden Wirbel, die vorher durch die Wechselwirkung der oberen und unteren Ablösungen entstehen, werden verhindert. Der induzierte Basisdruck wird erhöht und der Luftwiderstand wird folglich reduziert. Eine weitere Möglichkeit zur Unterbindung der Wirbel in den oberen und unteren Scherschichten besteht davon, die Vorder- und/ oder Hinterkante eines stumpfen Körpers wellenförmig zu gestalten [8].

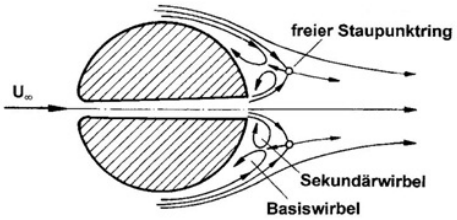


Abbildung 4: Passive Belüftung des Nachlaufs einer Kugel [9]

Im Experiment von Suryanarayana et al. konnte der Nachlauf einer Kugel durch passive Belüftung beeinflusst werden, wobei die der Basis zugeführte Strömung aus dem Druckunterschied entsteht [9]. Durch einen Kanal zwischen dem vorderen Staupunkt und der Basis wird die angeströmte Luft beschleunigt und ins Totwasser der Kugel geleitet, wobei nur 2 % der Stirnfläche der Kugel für die Durchströmung geöffnet wurden. Der austretende Luftstrom drängt die

Wirbel nach außen ab. In der Nähe der Basis bilden sich Sekundärwirbel. Der negative Einfluss der Wirbel auf den Basisdruck wird geschwächt und folglich sinkt der Luftwiderstand der Kugel. Allerdings erfolgt die Reduzierung des Luftwiderstands in dem Experiment nur im überkritischen Bereich. Im Gegensatz dazu lässt sich der Luftwiderstand im unterkritischen Bereich kaum beeinflussen.

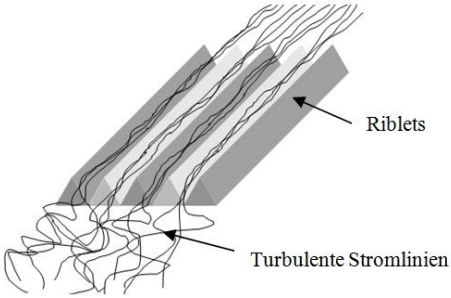


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Stromlinienänderung durch Riblets

Zur passiven Strömungsbeeinflussung sind z.B. die Anwendung von kleinen Rillen, die sog. Riblets, auf dem Tragflügel eines Flugzeugs zu finden. Der Reibungswiederstand wird dadurch reduziert, dass die turbulente Grenzschicht in den Rillen laminarisiert wird. Daraus resultiert eine gesamte Luftwiderstandsreduzierung. In der Untersuchung von Sareen et al. wurde der Luftwiderstand eines Flügels durch die Optimierung der Größe und Position der Rillen um bis zu 5% reduziert. [10].

Die Strömungsbeeinflussung ist auch in der Windkanaltechnik bekannt und gebräuchlich. Als Beispiele der passiven Methode sind die sog. Seiferth-Flügel an den Rändern des Windkanaldüsenaustritts in die Freistrahlmessstrecke zu nennen. Die Seiferth-Flügel bestehen aus kleinen Metallblechen, die an den Rändern des Düsenaustritts montiert werden und deren Geometrie experimentell abgestimmt werden muss. Die großskaligen Turbulenzstrukturen in der Scherschicht an den Düsenrändern werden durch die Seiferth-Flügel zerkleinert. Dadurch wird die Kohärenz der Wirbelstrukturen schwächer. Somit werden die Schwingungen der Scherschicht bei Resonanzfrequenzen im Kanal verringert. Der Freistrahl wird stabilisiert [11]. Allerdings verursachen die kleinen Wirbel

ein hochfrequentes Geräusch. Deswegen sind die Seiferth-Flügel für aeroakustische Messungen aufgrund ihres hohen Eigengeräusches nicht geeignet [12].

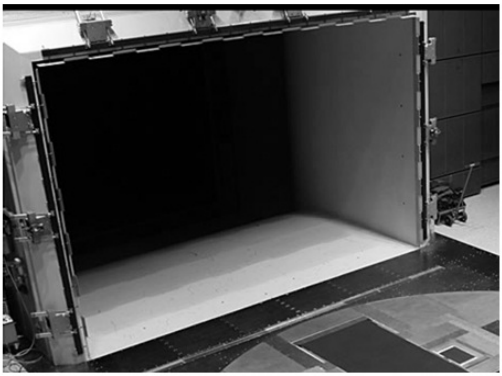


Abbildung 6: Die Düse mit Seiferth-Flügel von IVK/FKFS-Windkanal [13]

In der Formel-1 sind viele Strömungsbeeinflussungsmaßnahmen zur Reduzierung des Luftwiderstands bzw. zur Erhöhung des Fahrzeugabtriebs zu finden. Besonders erwähnenswert sind die sog. F-Schacht (eng: F-duct) -Systeme, die in den vergangenen Jahren viele Diskussionen hervorriefen.

Interessant ist, dass die Funktion der F-Schacht-Systeme zur Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften der Rennwagen nicht auf das Verhindern der Ablösung beruht. Im Gegensatz dazu wird die Ablösung bei der Fahrt gezielt erzeugt und genutzt. Da es nicht erlaubt war, das System zur Strömungsbeeinflussung bei der Fahrt durch den Fahrer aktiv zu steuern, entwickelte das Team von Mercedes das F-Schacht-System im Frontflügel zur passiven Beeinflussung. In Abbildung 7 wird die Funktionsweise des F-Schacht-Systems anhand der Zeichnung von Piola dargestellt [14]. Wenn die Geschwindigkeit des Rennwagens auf der Geraden ausreichend groß ist, übersteigt der Staudruck an der Front einen bestimmten Wert. In diesem Fall wird ein Ventil im oberen Teil der Nase geöffnet. Die Luft strömt durch die Nase bis zum Frontflügel. Am Austritt der Luft an der Unterseite des Flügels löst die Strömung ab. Theoretisch wird die ursprüngliche Strömungsgeschwindigkeit unter dem Unterboden verringert. Daraus resultiert eine Luftwiderstandsreduzierung [14]. Im Gegensatz zum aktiven F-Schacht-System (vgl. Kapitel 2.2), kann die Strömung bei der passiven Beeinflussung nicht an unterschiedlichen Strömungssituationen

angepasst werden. Es besteht das Risiko, dass der Rennwagen aufgrund des Abtriebsverlusts auf der Vorderachse bei der Fahrt durch eine Kurve ausbrechen kann.

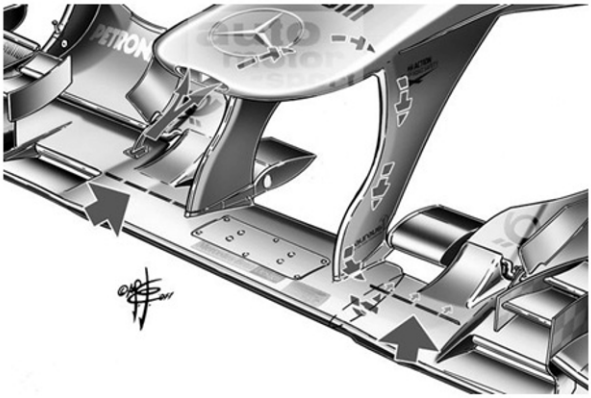


Abbildung 7: Strömungsverlauf durch das passive F-Schacht-System im Frontflügel [14]

Eine Reihe von experimentellen Maßnahmen wurde von Hucho zusammengestellt [15]. Bei den passiven Methoden wird die Widerstandsminderung durch einfache Modifikation des Körpers erzielt. Allerdings kann die optimale Wirkung nur unter Auslegungsbedingungen erreicht werden. Ein weiterer Nachteil passiver Methoden in der Automobilaerodynamik ist der oft erhebliche und inakzeptable Eingriff in das Fahrzeugdesign. Auch Sicherheitsaspekte führen dazu, dass viele passive Maßnahmen, wie z. B. die Trennplatte, an Kraftfahrzeugen keine Aussicht auf Realisierung haben. Wegen dieser Nachteile steht die passive Beeinflussung nicht mehr im Vordergrund des Forschungsinteresses.

2.2 Aktive Methoden

Im Gegensatz zu den passiven Methoden zeichnen sich die aktiven Methoden durch hohe Flexibilität aus. Einen Überblick über die aktive Strömungsbeeinflussung in den verschiedenen Anwendungsbereichen gibt das Fachbuch von Gad-el-Hak. [16].

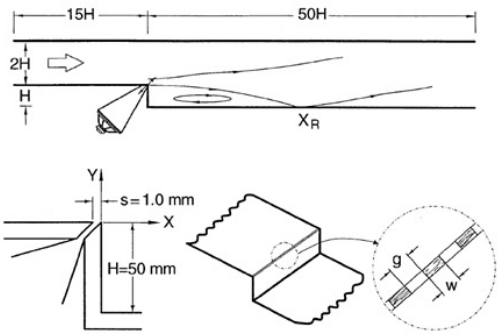


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus [17]

Die Beeinflussbarkeit der abgelösten Strömung kann durch die Veränderung der Strukturen des Nachlaufs dargestellt werden. Eine Verkürzung der Wiederanlegelänge bedeutet die frühere Wiederanlage der Strömung nach der Ablösung. Zur aktiven Beeinflussung der abgelösten Stufenströmung wurde eine monofrequente akustische Anregung an einer Stufe in der Untersuchung von Chun et al. verwendet. Der Aktuator wurde durch einen Lautsprecher, der an der Ablösekante eingebauten wurde, realisiert. Die Ablöseblase der Stufenströmung wurde durch die Verstärkung der Instabilitäten der Scherschicht verkleinert [17]. Allerdings wurde die Widerstandsänderung der Stufe nicht erwähnt. In Abbildung 8 wird der Versuchsaufbau skizziert.

Erwähnenswert sind die Untersuchungen zur aktiven Belüftung von Bearman, die ein wichtiger Beitrag im Bereich der aktiven Strömungsbeeinflussung sind [18][19]. In Abbildung 9 sind die Messergebnisse zusammengestellt. Die Luft aus der Umgebung wird mit Hilfe von zwei seitlichen Gebläsen in das Modell eingelassen. Anschließend wird diese Luft durch die poröse Basis des Modells in den Nachlauf ausgeblasen, wobei aufgrund der geringen Geschwindigkeit des Luftstrahls der zusätzliche Impuls vernachlässigt werden darf. Dadurch wird der Nachlauf eines 2D-Modells durch eine aktive Belüftung beeinflusst. In der Nähe der Basis werden die Wechselwirkungen zwischen den beiden Scherschichten des 2D-Modells durch die austretende Luft unterbunden. Die Bildung der großen Wirbel wird nach stromabwärts verlagert. Somit wird der Basisdruck durch die aktive Belüftung angehoben und der Luftwiderstand des 2D-Modells erfolgreich reduziert.

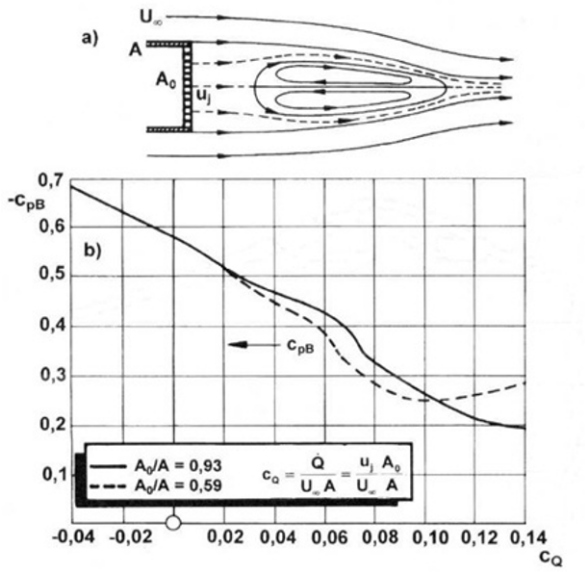


Abbildung 9: Erhöhung des Basisdrucks durch die aktive Belüftung eines Totwassers [18][19][15]

Im Experiment von Kim et al. wurde eine Anregungsstrategie für die variablen Amplituden in der Spannweite vorgestellt [20]. Die an den oberen und unteren Hinterkanten eines 2-dimensionalen stumpfen Körpers angebrachte Anregung ist stationär. Allerdings haben die Amplituden der Anregung eine sinusförmige Verteilung über die Spannweite, wobei die positiven Amplituden durch das Ausblasen und die negativen durch das Absaugen realisiert wurden (Abbildung 10). Durch Unterdrückung der Wirbelbildung in der Ablösung wurde eine Widerstandsreduktion erzielt. Diese Ergebnisse wurden mit der dazugehörigen numerischen Simulation durch das Large Eddy Verfahren bestätigt [20].

Die aktive Methode wurde im Experiment von Krentel et al. zur Beeinflussung des Nachlaufs eines 3-dimensionalen Ahmed-Körpers getestet [21]. Der sog. Ahmed Körper wurde von Ahmed et al. zur Darstellung des Einflusses der Heckform auf die wesentlichen Wirbelstrukturen vorgestellt [22]. Zwei Konfigurationen- ein Fließheck mit einem Heckneigungswinkel von 25° und ein Vollheck- wurden untersucht und sind in Abbildung 11 dargestellt.

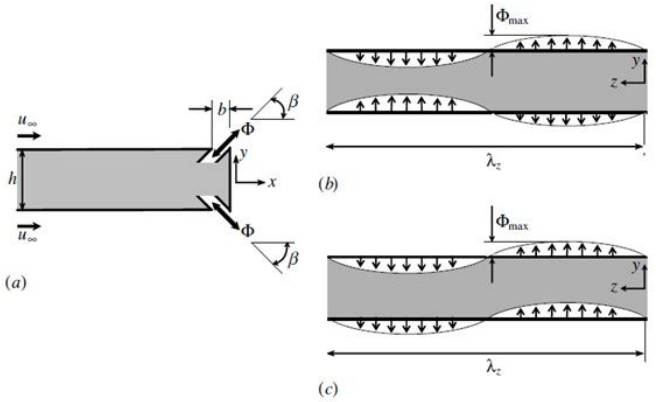


Abbildung 10: Schematische Darstellung der spannweitigen Verteilung der Anregungsamplitude an den Hinterkanten eines 2D-Modells (a) Seitenansicht (b) Heckansicht: gegenphasige Anregung (c) Heckansicht: gleichphasige Anregung [20]

Drei Schlitze an den Hinterkanten des Fließhecks (P1, P2 und P3) sind zur Anregung vorgesehen. Ein periodisches positives Rechtecksignal mit dem Tastgrad von 50% wurde für die Aktuatoren generiert. Zusätzlich sind zwei Öffnungen (S1) für das stationäre Ausblasen der Luft, deren Richtung senkrecht zur Außenströmung ist, an den Ecken des Daches vorhanden. Das beste Ergebnis wurde erzielt, wenn ausschließlich die Aktuatoren an der oberen Hinterkante aktiviert wurden. Der Luftwiderstandsbeiwert wurde um 5,7 % reduziert. Ein Netto-Leistungsgewinn von 2,6 % wurde erreicht [21].

Bei der zweiten Konfiguration handelt sich um einen Ahmed-Körper mit Voll-Heck. An den Hinterkanten der Basis befinden sich die Kammern für die Aktuatoren (P1 bis P4). Jede Kammer wird mit der Druckluft verbunden und kann individuell aktiviert werden. Mit einem Ventil wird ein periodisches positives Rechtecksignal mit dem Tastgrad von 50 % erzeugt. Durch die Schlitze werden die abgelösten Strömungen an den Hinterkanten beeinflusst. Die Anregungsströmungen an den oberen und unteren Hinterkanten (P1 und P4) richten sich nach innen. Gleichzeitig sind die seitlichen Anregungen (P2 und P3) ausge-

schaltet. In diesem Fall wurde eine Luftwiderstandsreduzierung von 2,2 % erreicht. Der Energiebedarf des Modells sank um 2,1 % [21].

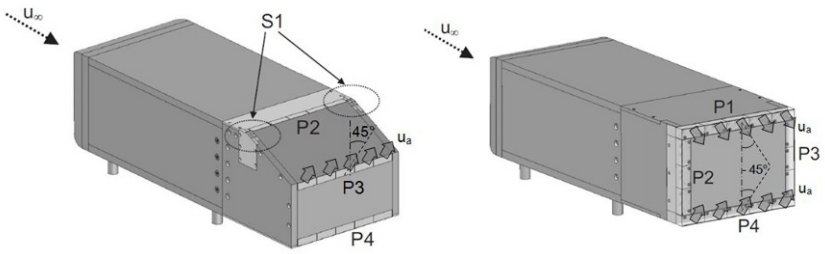


Abbildung 11: Aktive Strömungsbeeinflussung an dem Ahmed-Körper [21]: (a): Fließheck mit einem Heckneigungswinkel von 25° (b): Vollheck. P1 bis P4: Anregungskammer für den periodischen Puls. S1: Öffnungen für das stationäre Ausblasen

Nähert sich ein Freistrahl einer konvexen Oberfläche, haftet der Strahl an der Oberfläche und folgt deren Kontur. Dieses Verhalten wird als der Coanda Effekt bezeichnet. In der Untersuchung von Geropp wurde die aktive Methode mit dem Coanda Effekt kombiniert, um die Querwirbel im Nachlauf eines 2-dimensionalen Fahrzeugmodells in der Nähe der Basis zu verhindern [23][24]. Die Luft aus der Umgebung wird durch die auf dem vorderen Körper positionierte Öffnung, an der der statische Druck am größten ist, mit Hilfe der aktiven Mechanismen beschleunigt und in das Totwasser hinter der Basis tangential geblasen. Die Scherschichten beider Seiten werden von den Strahlen mitgerissen und folgen den gekrümmten Oberflächen. Die beiden Strömungen treffen sich in die Mitte der Rückseite und bilden einen zusätzlichen Staupunkt. Die 2-dimensionalen Querwirbel im Nachlauf werden somit verhindert, was zur Reduktion der Dissipation und folglich zur Erhöhung des Basisdrucks führt. Diese Methode wurde im Windkanal getestet [25]. In Abbildung 12 wird das Versuchsmodell dargestellt. Die Verläufe der Strömung werden mit schwarzen Pfeilen gekennzeichnet. An einem vereinfachten 2-dimensionalen Fahrzeugmodell wurde eine Widerstandsminderung bis zu 10 % bei $\mathrm{Re} = 9{,}9 \cdot 10^5$ erzielt.

http://www.springer.com/978-3-658-12218-8

Grundlagenuntersuchung zur aktiven Beeinflussung der abgelösten Strömung

Gong, J.

2016, XVI, 134 S. 66 Abb., 9 Abb. in Farbe., Softcover
ISBN: 978-3-658-12218-8