

# ENTWICKLUNG UND BAU EINES MITLAUFENDEN BANDES FÜR WINDKANALMESSUNGEN AN TIEFFLIEGENDEN FLUGZEUGEN, PNEUMATISCHE LAGERUNG UND SCHMIERUNG DES BANDES

J. Frey, J. Brechling, R. Grundmann

TU Dresden, Institut für Luft- und Raumfahrttechnik, Niedergeschwindigkeitswindkanal  
MommSENstraße 13, 01062 Dresden

## 1. KURZFASSUNG

Am Windkanal der TU Dresden wurde im Laufe der vergangenen fünf Jahre ein mitlaufendes Band zur Modellierung von Fahrzeugunterströmungen entwickelt und weitestgehend in Eigenleistung gebaut. Wichtige Konstruktionsmerkmale sind an einem verkleinerten Funktionsmodell erprobt und auf die Originalausführung übertragen worden. Testmessungen an einem Flügelmodell belegen die Funktionsfähigkeit der Anlage.

Aufgrund der für Untersuchungen am Flugzeug erforderlichen großen Baubreite haben die Walzen eine zylindrische Form und die Seitenlage des Bandes muss mit Hilfe einer aktiven Regelung sichergestellt werden.

Ein grundsätzlich neuer Weg wurde bei der Lagerung des Gurtbandes auf dem Messtisch beschritten. Um Probleme mit starker Wärmeentwicklung und hohem Bandverschleiß zu umgehen, wird das Dresdener Laufband auf dünnen Luftspalten über dem Messtisch geführt. Dieser ist ähnlich einem hydrodynamischen Gleitlager mit abgestuften Segmenten ausgeführt, so dass sich verengende Schmierpalte ausbilden und tragfähige Polster erzeugen.

Die sich über der Anlaufkontur ausbildende Grenzschicht wird separat abgesaugt.

## 2. PROBLEMSTELLUNG UND LÖSUNGSANSATZ

### 2.1. Der Windkanal der TU Dresden

Das Institut für Luft und Raumfahrttechnik (ILR) der TU Dresden verfügt unter anderem über einen 3-m-Windkanal Göttinger Bauart mit offener Messstrecke (Bild 1). Dieser wurde in der 1950er Jahren an der Fakultät für Luftfahrt der damaligen TH Dresden begonnen und 1962 der Nutzung übergeben. Obwohl für Luftfahrtanwendungen ausgelegt, wurde er lange Zeit hauptsächlich für Gebäude- und Umweltaerodynamische Aufgaben verwendet. Erst nach der Gründung des ILR 1996 hielt allmählich die Fliegerei Einzug.

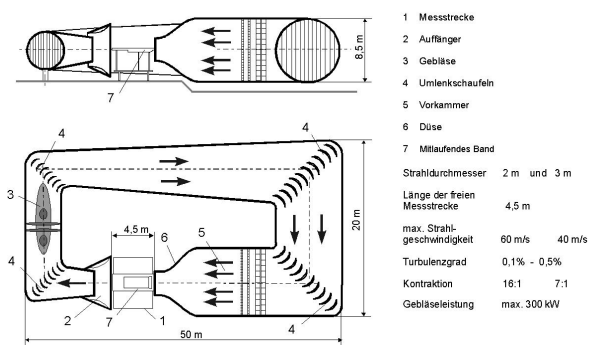


BILD 1. Windkanal der TU Dresden

Der Kanal wird von einem zweistufigen Axialverdichter mit einer Gesamtleistung von 300 kW angetrieben, womit sich Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 40 m/s erzeugen lassen. Für höhere Geschwindigkeiten bis 60 m/s steht eine auswechselbare Düse mit 2 m Durchmesser bereit. Ein großes Kontraktionsverhältnis von 7:1 bzw. 16:2 sorgt für eine recht turbulenzarme Zuströmung, wie sie ein Flugzeug im Freiflug vorfindet.

### 2.2. Das mitlaufende Band zur Simulation des Bodeneffektes bei Boden- und Luftfahrzeugen

Ebenso wie in der Aerodynamik der Bodenfahrzeuge treten bei Windkanalmessungen an Flugzeugen im Bodeneffekt Verfälschungen durch die Grenzschicht über einer stehenden Bodenplatte auf. Um diese Inkonsistenz zu beheben, werden mitlaufende Bänder eingesetzt, welche die Bodenrandbedingung gewährleisten (Bild 2).

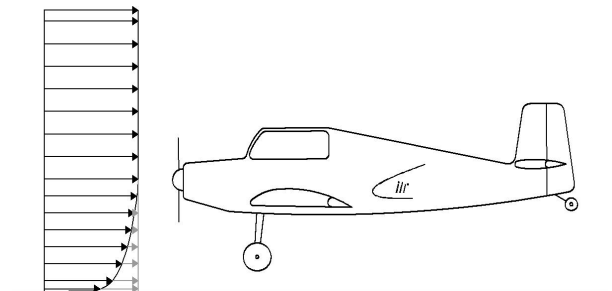


BILD 2. Zuströmung zu einem Flugzeug in Bodennähe im Windkanal mit festem Boden sowie im Freiflug bzw. mit bewegtem Grund

Als sich der Bedarf abzeichnete, solche Untersuchungen am Windkanal der TU Dresden durchführen zu können, wurde die Entwicklung einer entsprechenden Versuchseinrichtung in Angriff genommen. Es erfolgte zunächst der Bau eines verkleinerten Funktionsmodells, mit Hilfe dessen die prinzipielle Eignung der Konstruktion sowie der Regelalgorithmen erprobt werden konnte. Dieses Modellband ist mittlerweile an einem kleineren Strömungskanal des Institutes eingebaut (Bild 3). Es wurde dort bereits zur Untersuchung der Umströmung von schnell bewegten Maschinenbauteilen verwendet [1].

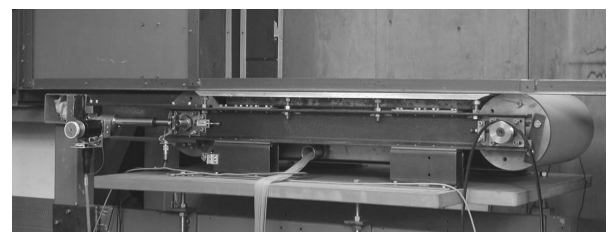


BILD 3. Modellband im Saugkanal

### 3. KONSTRUKTIVE BESONDERHEITEN

Vom grundsätzlichen Aufbau handelt es sich um ein Laufband auf zwei Walzen, wobei die vordere angetrieben wird, während die hintere zur Einstellung der Bandspannung und zur Regelung des Seitenlaufs verstellbar ist. Die Fläche des bewegten Bodens ist 1.8 m breit sowie 3.6 m lang. Das Band ist für Geschwindigkeiten bis über 40 m/s ausgelegt. Angetrieben wird es von einem Drehstrom-Asynchronmotor über einen Rippenkeilriemen. Die Drehzahlvorgabe erfolgt durch einen Frequenzumrichter, die Bandsteuerung rechnergestützt. Eine Übersicht der Versuchsanlage ist in Bild 4 und 5 dargestellt.

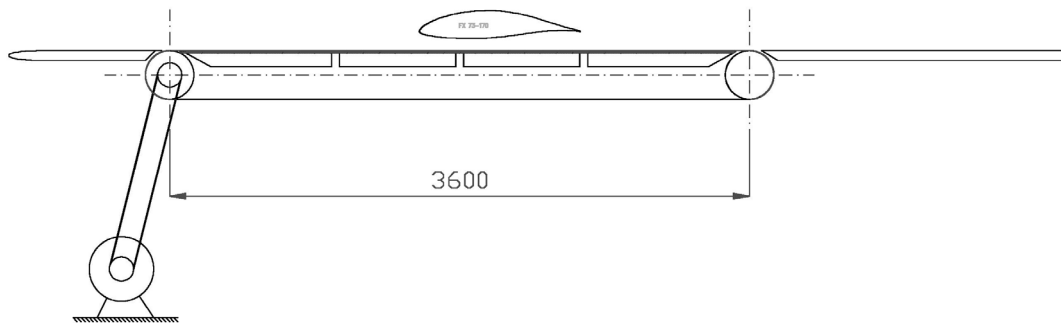


BILD 4. Aufbau des Laufbandes (Seitenansicht) mit Flügelmodell

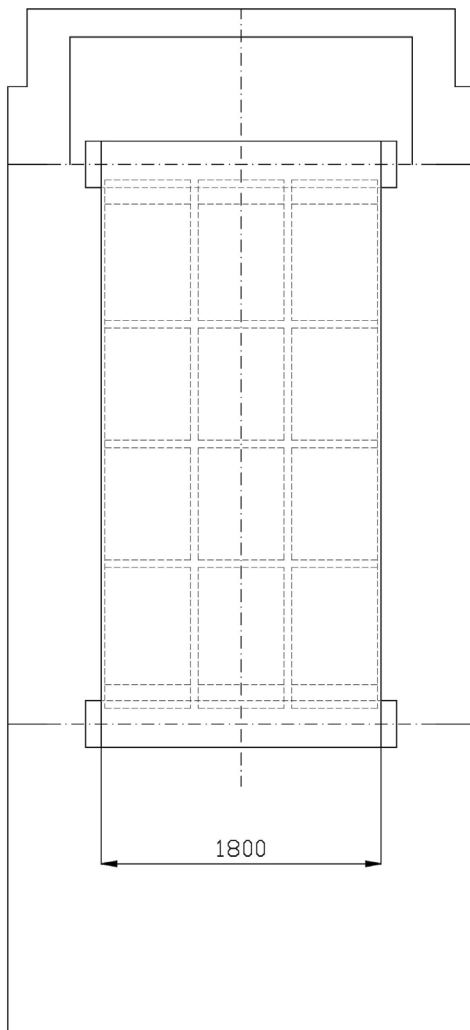


BILD 5. Aufbau des Laufbandes (Draufsicht)

#### 3.1. Aktive Bandlaufregelung

Da das mitlaufende Band vorrangig für Messungen an tieffliegenden Fluggeräten eingesetzt werden soll, wurde auf eine ausreichende spannweiteige Ausdehnung Wert gelegt. Dadurch ist es prinzipiell nicht mehr möglich, die Walzen so ballig auszuführen, dass sich das Gurtband ähnlich einem Flachriemen selbst stabilisiert. Deshalb musste eine aktive Bandlaufregelung vorgesehen werden, welche die Seitenlage des Bandes ständig überwacht und korrigiert.

Eine unzulässige Lage wird über Lichtschranken detektiert, woraufhin der Steuerrechner ein geeignetes Korrektursignal generiert. Entsprechend stellen zwei Aktuatoren die hintere

Walze schräg, so dass das Band in seine Mittellage zurückläuft. Bei größeren Abweichungen, für welche eine zweite Reihe Lichtschranken vorhanden ist, verdoppeln sich die Steuerauslässe. Außerdem wird ständig die Bandspannung als Summe beider Lagerkräfte gemessen und durch Verschieben der gesamten Walze in den vorgegebenen Schranken gehalten.

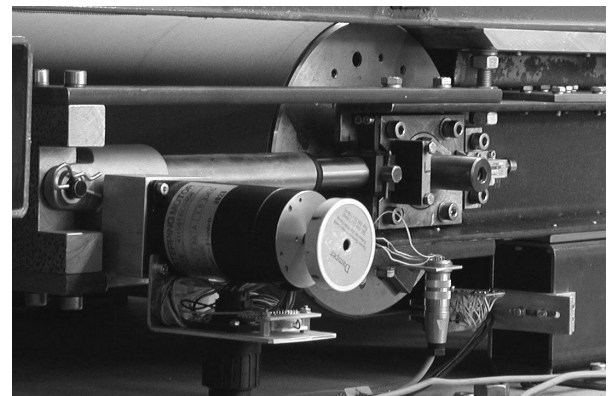


BILD 6. Rechte Lagerverstellung der hinteren Walze und Lichtschranke am Modellband

Wenn gar eine der ganz außen angeordneten Schranken abgedeckt wird, hält das Band automatisch an.

Es hat sich gezeigt, dass für ein stabiles Arbeiten des Regelalgorithmus nicht der Erfolg einer Korrektur eingabe abgewartet werden kann, sondern die verkippte Walze nach einer gewissen Bandlauflänge wieder geradegestellt und das Manöver gegebenenfalls wiederholt wird. Da sich das Band bei Geschwindigkeitsänderungen nicht ganz symmetrisch dehnt, ändert sich auch die „Mittellage“ der Walze, bei der das Band gerade läuft. Grundsätzlich ist diese Gleichgewichtslage auch nicht genau bekannt. Um sich ihr aber anzunähern, beinhaltet der Regler eine integrierende Komponente, welche die Mittellage entsprechend der häufigeren Korrekturrichtung verschiebt. Es wurden bereits Betriebspunkte erreicht, bei denen das Band bis zu 20 km lief, ohne dass ein Regeleingriff erforderlich wurde.

### 3.2. Pneumatische Lagerung und Schmierung

Um ein Abheben des Laufbandes und Anlegen an die Modellunterseite bei starken Übergeschwindigkeiten zu vermeiden, muss es an die Unterlage angesaugt werden können. Die Ansaugung ist in zwölf separate Zonen unterteilt (Bild 5) und soll zukünftig staudruckgeregelt selbsttätig arbeiten können. Die durch die Ansaugung stark ansteigende Reibung verursacht bei herkömmlichen Anlagen zum Teil erhebliche Probleme mit hohem Bandverschleiß sowie starker Erwärmung.

Deshalb wurde für die Lagerung des Bandes ein abgestufter Messtisch gebaut, der in der Struktur einem hydrodynamischen Axial-Gleitlager ähnelt. Zwischen dem Gurtband und der Segmentweise ansteigenden Unterlage bilden sich verengende Schmierspalt aus, die auch bei Ansaugung nicht gänzlich verschwinden. Durch Druckmessungen am Modellband konnte die prinzipielle Funktion entsprechend der Theorie belegt werden.

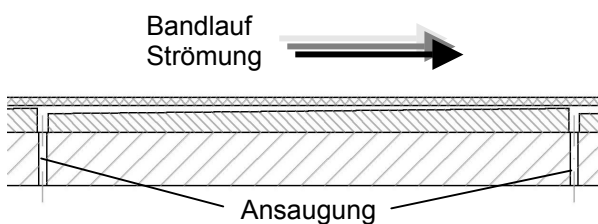


BILD 7. Darstellung der Lagersegmente



BILD 8. Unterlage mit Absaugbohrungen vor dem Einbau

Ein ähnlicher Schmiereffekt trat anfänglich an der Antriebswalze auf. Man musste feststellen, dass die gemessene Bandgeschwindigkeit ab etwa 35 m/s deutlich hinter der Drehzahlvorgabe des Frequenzstellers zurückblieb. Die Ursache des Problems ließ sich darin finden, dass zwischen Walze und Gurtband Luft mit eingesaugt wird, die ab einer gewissen Geschwindigkeit das Band zum Aufschwimmen bringt, da sie wegen der großen Spannweite nicht mehr seitlich entweichen kann. Als Lösung wurden im 50-mm-Abstand umlaufende Nuten in die Antriebswalze eingestochen, in denen die eingesaugte Luft verschwinden kann.

### 3.3. Absaugung der Anlaufgrenzschicht

Stromauf von der vorderen Bandwalze befindet sich eine verstellbare Anlaufkontur mit elliptischer Nase, welche in die Windkanaldüse hineinragt und mit deren Hilfe die Zuströmbedingungen zum Band, besonders die vertikale Verteilung des örtlichen Druckes, eingestellt werden können. Selbstverständlich bildet sich schon über dem Anlauf eine

Grenzschicht, deren Wirkung nur sehr langsam abklingt. Die Geschwindigkeitsdelle entfernt sich dabei von der Wand und bleibt über der ganzen Bandlänge messbar.

Aus diesem Grunde wurde in die Anlaufnase eine Absaugung (GSA) integriert. Die Oberfläche ist dafür mit insgesamt 9300 kleinen Löchern perforiert. Die Wirkung der Absaugung ist in den Bildern 10..13 deutlich zu erkennen, selbst bei stehendem Band zeigt sich ein Effekt wegen des später einsetzenden Grenzschichtwachstums.



BILD 9. Anlaufkontur mit Grenzschichtabsaugung

Durch leichte Übergeschwindigkeit des Laufbandes lässt sich sogar die trotz Absaugung noch vorhandene Restgrenzschicht soweit kompensieren, dass die Verdrängungsdicke rechnerisch null wird (Bild 14). Hierfür wird aber noch eine elegantere Lösung angestrebt. Da mit einer Grenzschichtabsaugung immer auch die Wandschubspannung ansteigt, welche letztlich wieder zu Grenzschichtwachstum führt, ist die Absaugung großer Flächen relativ ineffizient. Stattdessen wird noch nach konstruktiven Möglichkeiten gesucht, einen neuen Ansatz zu schaffen, indem vor der vorderen Walze mittels einer Schneide die verzögerte Strömung abgetrennt wird und nur eine ganz kurze Lauflänge für erneutes Grenzschichtwachstum zur Verfügung steht.

## 4. REFERENZMESSUNGEN

### 4.1. Experimenteller Aufbau

Als Messobjekt zum Nachweis der Auswirkung der geänderten Bodenrandbedingung wurde ein vorhandenes Flügelmodell mit dem Wortmann-Profil FX 73-170 verwendet. Die Messungen fanden im Rahmen einer studentischen Belegarbeit statt [2]. Das Modell dient primär der Untersuchung einer Auftriebsbeeinflussung durch Absaugung [3, 4], steht aber auch für andere Experimente zur Verfügung. (Auf eine Messung mit Hinterkantenabsaugung über dem Band musste verzichtet werden.) Der rechteckige Flügel hat 2 m Spannweite sowie 1 m Tiefe und kann mit großen runden Endscheiben zur Sicherstellung ebener Strömung ausgerüstet werden. Für die Auftriebsmessung ist er mit insgesamt 284 Druckmessstellen versehen, die Widerstandsbestimmung erfolgt durch eine Nachlaufmessung. Ausgeführt wurde er in klassischer Holm-Rippen-Bauweise, wobei ein sehr großzügig dimensionierter Stahl-Kastenträger alle Lasten aufnimmt. Die Profilkontur wird durch Sperrholzrippen mit einer ebenfalls sperrhölzernen Beplankung erzeugt. Der Absaugekasten ist mit GFK beplankt.

Zur leichteren Einstellung kleiner Bodenabstände wurde der Flügel über dem Laufband ohne Endscheiben montiert (Bild 10).

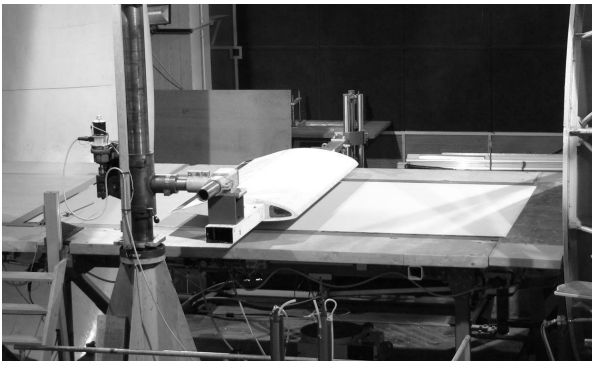


BILD 10. Flügelmodell über dem Laufband

#### 4.2. Grundströmung über dem bewegten Boden

Parallel zu den Referenzmessungen am Flügel wurde exemplarisch auch die Grundströmung an der Position für die Nachlaufmessung ( $x=4000$  mm von Anlaufnase) untersucht. Ohne Bandbetrieb und GSA bildet sich bei typischen Kanalgeschwindigkeiten eine an der Messstelle etwa 90 mm starke Grenzschicht aus (Bilder 11..14). Es zeigt sich nur eine sehr geringe Re-Zahl-Abhängigkeit. Die Verdrängungs- bzw. Impulsverlustdicke liegen dann bei  $\delta_1 \approx 13$  mm bzw.  $\delta_2 \approx 10$  mm (Bild 14). Die Grenzschichtdicke nach dem 99%-Kriterium zeigt eine auffällige Unabhängigkeit gegen den Betrieb des Bandes allein. Sie geht dann lediglich auf  $\delta \approx 75$  mm zurück, was darin begründet liegt, dass die von der Anlaufkontur herrührende Delle im Geschwindigkeitsprofil von der Wand wegschwimmt und nach oben hin eine ähnliche Entwicklung nimmt wie die Grenzschicht über unbewegtem Boden. Die integralen Parameter  $\delta_1$  und  $\delta_2$  hingegen sinken beide auf unter 5 mm ab. Wird zusätzlich die GSA in Betrieb genommen, so lässt sich, abhängig von der Absaugmenge,  $\delta$  auf etwa 25 mm drücken,  $\delta_1$  und  $\delta_2$  bis unter 1 mm. Erwartungsgemäß geht die Wirkung der Absaugung mit steigender Kanalgeschwindigkeit etwas zurück, da der Vorkammerdruck im Verhältnis zum gegebenen Vordruck der GSA ansteigt. Dieser Effekt ist aber deutlich kleiner als der durch die Absaugung mögliche Einstellbereich (Bild 12).

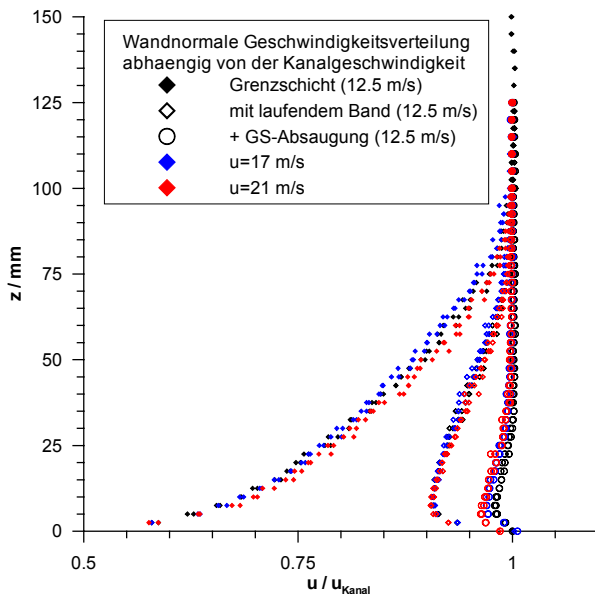


BILD 11. Wandnormale Geschwindigkeitsverteilung abhängig von der Grundgeschwindigkeit

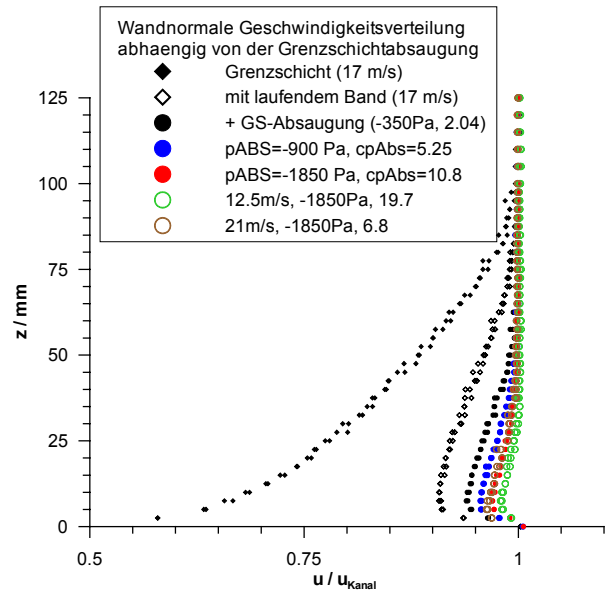


BILD 12. Wandnormale Geschwindigkeitsverteilung abhängig von der Grenzschichtabsaugung

Es zeigt sich natürlich auch eine Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen Band- und Kanalgeschwindigkeit. Mit einer leichten Übergeschwindigkeit des Bandes lässt sich die Wirkung der „Anlaufdelle“ auf die integralen Grenzschichtgrößen vollständig kompensieren, rein rechnerisch sind sogar negative Verdrängungsdicken möglich. Dabei hat die „überbeschleunigte Unterschicht“ Dicken von ein bis zwei Millimetern (Bild 13).

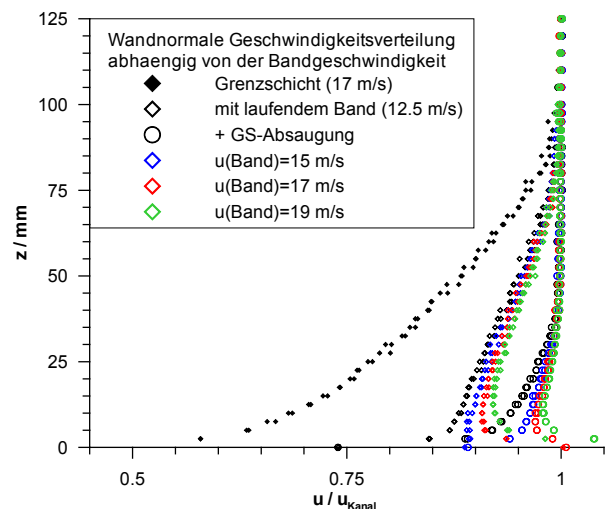


BILD 13. Wandnormale Geschwindigkeitsverteilung abhängig von der Bandgeschwindigkeit

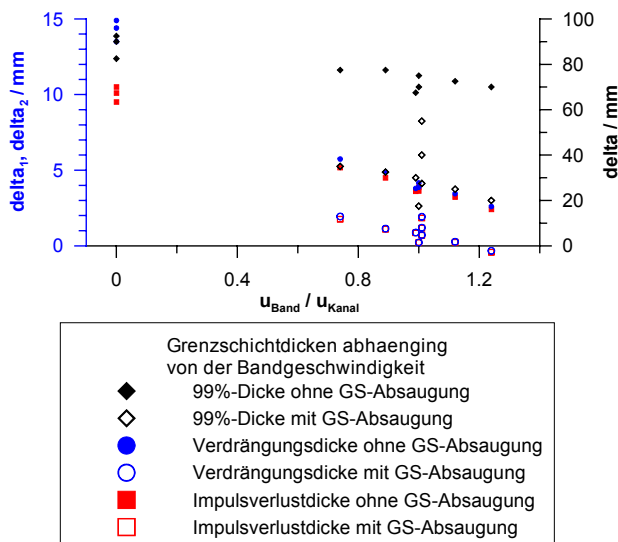


BILD 14. Grenzschichtdicken abhängig von den Versuchsparametern

#### 4.3. Wirkung des Bodens auf den Auftrieb

Durch die Verwendung des Flügels sehr geringer Streckung ohne Endscheiben ist auch die Wirkung des Bodeneffektes auf die induzierten Anstellwinkel deutlich. Selbst ohne korrigierte Bodenrandbedingung nimmt der Auftriebsanstieg bei Annäherung an den Boden leicht zu (Bild 15, 16).

Als grundsätzlicher Effekt des bewegten Bodens ist erwartungsgemäß eine weitere Vergrößerung des Auftriebsanstiegs zu beobachten (Bild 17). Der höhere dynamische Druck der Unterströmung verstärkt sowohl Unterdrücke bei kleinen als auch Überdrücke bei größeren Anstellwinkeln. Dabei ist die Wirkung auf die Saugspitzen weitaus deutlicher, bis etwa  $c_A=0.6$  ist der Auftrieb mit bewegtem Boden geringer. Dieser Auftriebsbeiwert stellt sich auch Unabhängig vom Wandabstand bei einem Sehnenanstellwinkel von  $\alpha \approx 2.5^\circ$  ein, der Nullauftriebswinkel ist im Bodeneffekt generell größer als im Freistrah.

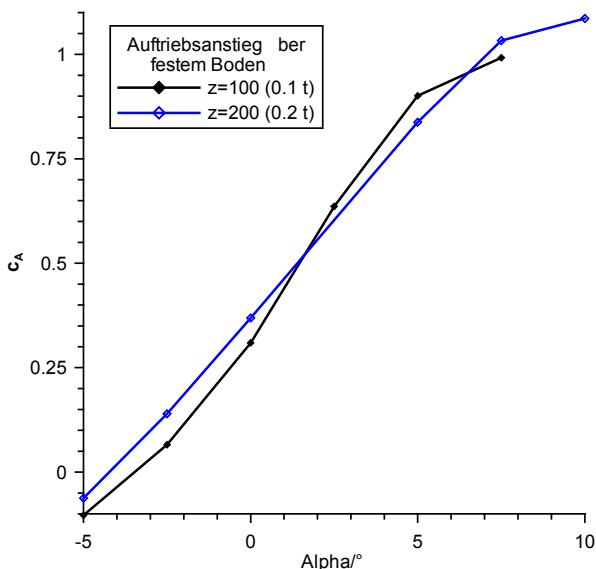


BILD 15. Auftriebsanstieg bei verschiedenen Bodenabständen

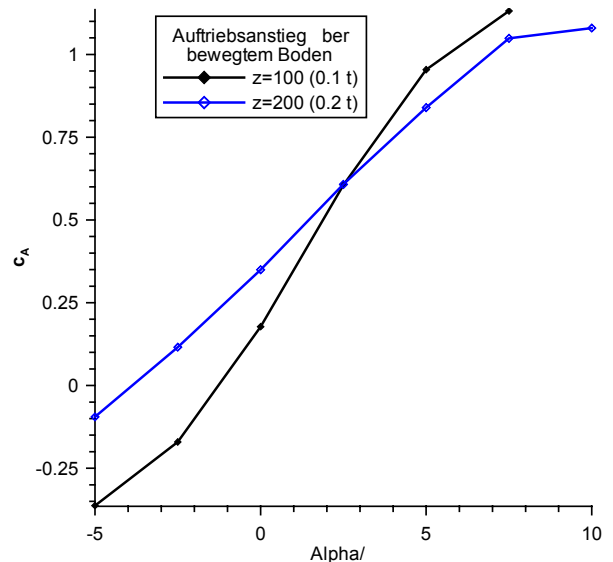


BILD 16. Auftriebsanstieg bei verschiedenen Bodenabständen

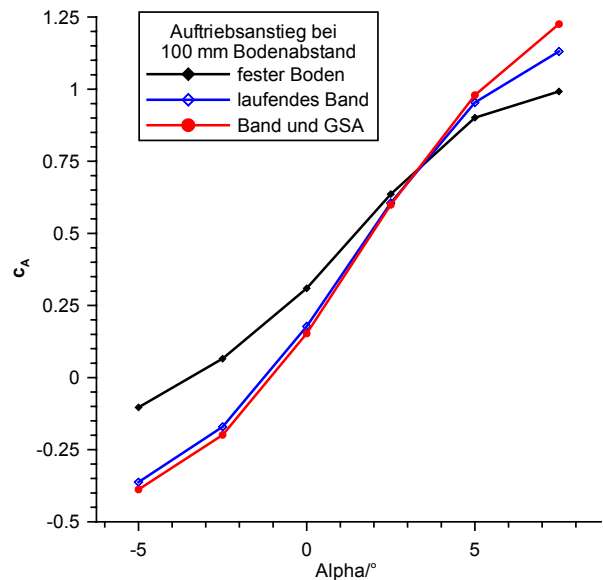


BILD 17. Abhängigkeit des Auftriebsanstiegs vom Bandbetrieb

Man kann daraus schlussfolgern, dass es für eine korrekte Auftriebsmessung nicht statthaft ist, bei unbewegtem Boden den Wandabstand um die zu erwartende Verdrängungsdicke der Bodengrenzschicht zu vergrößern, sofern das Modell potentiell in diese Grenzschicht hineinragt. Der Impulsverlust hat eine der Verdrängung entgegengesetzte und ggf. stärkere Wirkung.

#### 4.4. Wirkung auf den Widerstand

Die Widerstandsmessung im Nachlauf birgt bei dem kurzen Flügel in Bodennähe einige besondere Unwägbarkeiten. Bei geringen Bodenabständen gehen die Grenzschicht über unbewegtem Boden und die Nachlaufdecke nahezu nahtlos ineinander über, weshalb die Bestimmung des reinen Flügelwiderstandes aus der Nachlaufmessung dann schwierig wird (Bild 18). Die Wandschubspannung der Grenzschicht wird sicher vom Flügel auch beeinflusst, so dass eine

Subtraktion des Impulsverlustes der Grundströmung nicht ganz zulässig scheint.

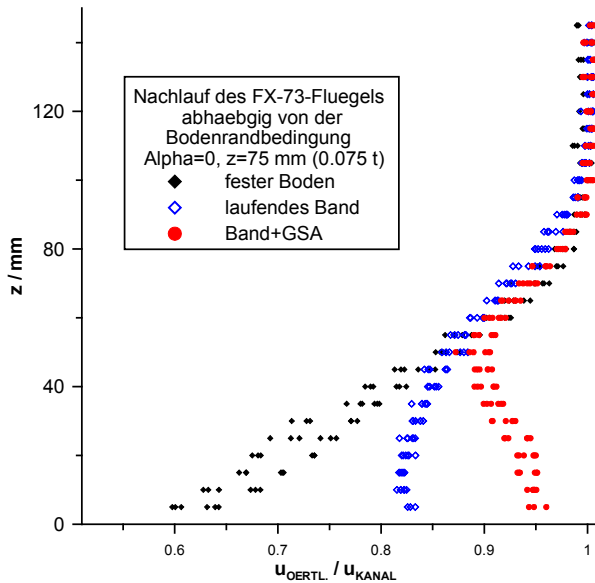


BILD 18. Nachlaufdele und Bodengrenzschicht bei geringem Abstand

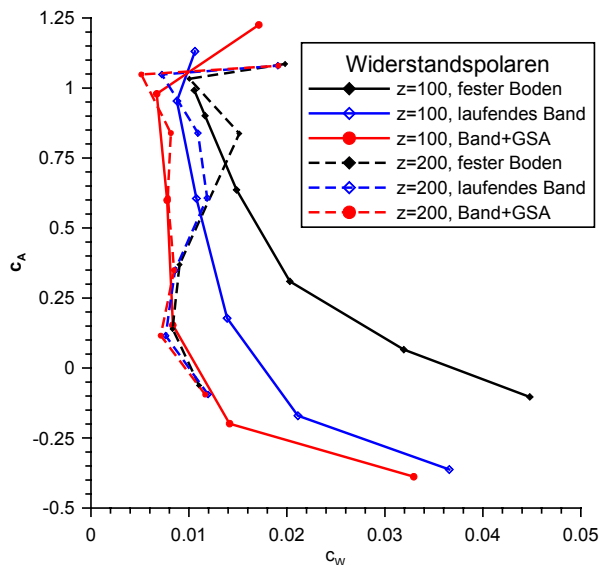


BILD 19. Widerstandspolaren

## 5. EINE ALTERNATIVE MÖGLICHKEIT ZUR BEEINFLUSSUNG DER BODENGRENZSCHICHT

Der hohe mechanische Aufwand des bewegten Bodens lässt die Suche nach anderen Möglichkeiten einer Korrektur der Bodenrandbedingung lukrativ erscheinen. Die Absaugung der Grenzschicht auf der gesamten Fläche ist ein im Prinzip anerkanntes Verfahren, nur ist durch die fortwährende Entnahme von Fluid aus der Strömung die Kontinuität verletzt. Analoges gilt für Ausblasungen, mit denen der Grenzschicht immer wieder Energiereiches Material zugeführt wird. In einer weiteren Diplomarbeit wurde ein Verfahren untersucht, dass Absaugung und Ausblasung kombiniert und damit die Kontinuität wieder herstellt [5].

Ein Prinzipexperiment dazu fand auf einer Platte an einem 200-mm-Kanal statt. Die Oberfläche war schachbrettartig mit einer Anordnung aus 10 x 30 mm großen Feldern mit

Absaugöffnungen und nahezu tangential endenden Ausblassehlitz versehen (Bilder 20..21). Diese waren über ein Labyrinth von Kanälen unter dem Boden mit zwei Gebläsen verbunden, welche energiearmes Material aus der Grenzschicht absaugen und mit höherer Geschwindigkeit der Strömung wieder zuführen.

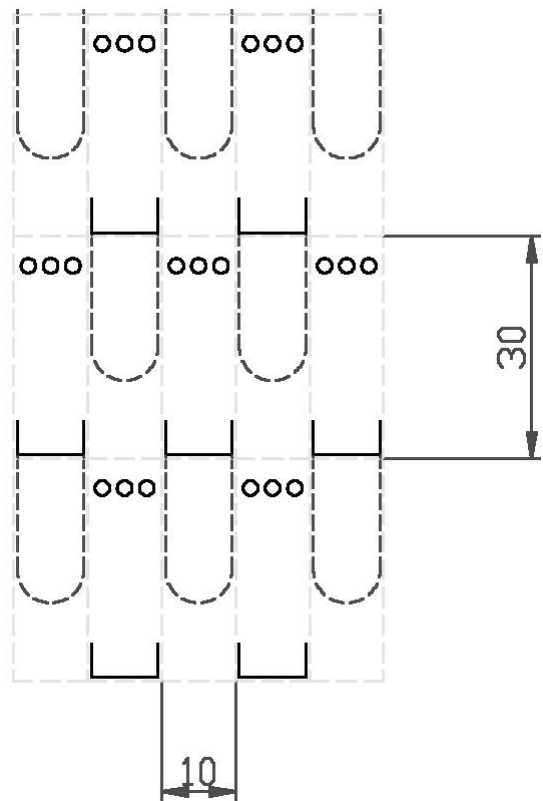


BILD 20. Anordnung von Absaugöffnungen und tangentialen Ausblassehlitz

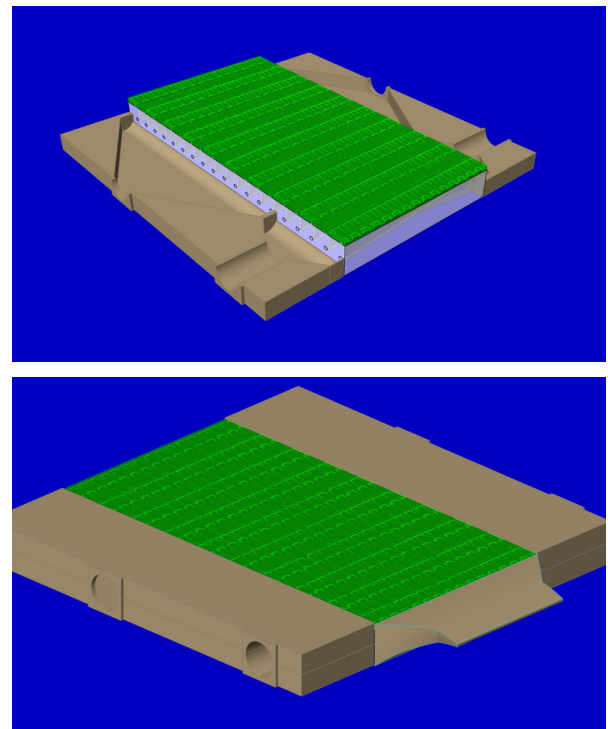


BILD 21. Versuchsaufbau zu Absaugung/Ausblasung

Die Verdrängungsdicken konnten damit stabil unterhalb von 1 mm eingestellt werden. Da zur Sicherstellung der Volumenstromkonstanz die abgesaugte Luft im geschlossenen Kreislauf an der Ausblasung wieder zugegeben wurde, traten Probleme mit starker Erwärmung der Ausblasluft auf. Für einen Anwendungsfall wäre also ggf. ein Kühler vorzusehen.

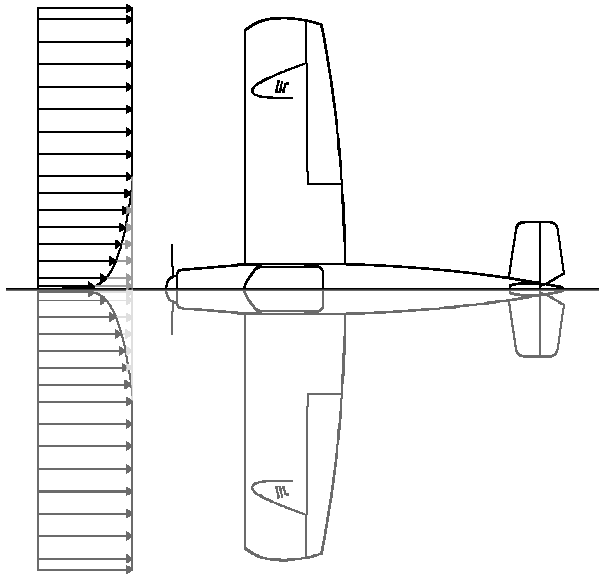


BILD 22. Zuströmung zu einem Halbmodell im Windkanal verglichen mit dem Freiflug

An eine Großausführung ist wegen des enormen fertigungstechnischen Aufwandes bisher nicht gedacht. Besonders interessant scheint der Ansatz zur Verbesserung der Randbedingung an der Symmetrieebene bei Halbmodellmessungen, da dort aus Zugänglichkeitsgründen keine bewegte Wand eingesetzt werden kann, zum anderen das Modell aber in jedem Fall in die Grenzschicht hineinragt (Bild 22).

## 6. NOMENKLATUR

TAB 1. Übersicht über verwendete Symbole

Symbol	Einheit	Erklärung
$b$	m	Spannweite
$c_A$	1	Auftriebsbeiwert
$c_W$	1	Widerstandsbeiwert
$Re$	1	Reynoldszahl; $Re = v_\infty \cdot l / \nu$
$t$	m	Flügelteufe
$v_\infty$	m/s	Anströmgeschwindigkeit
$x, y, z$	m	Koordinaten in Hauptstrom- Auftriebs- und Spannweitenrichtung
$\alpha$	$^\circ, 1$	Anstellwinkel
$\nu$	$m^2/s$	Kinematische Viskosität, $\nu_{Luft} = 15 \cdot 10^{-6} m^2/s$

Abkürzungen:

GSA Grenzschichtabsaugung

## 7. QUELLEN

- [1] Schubert, S.: Aerodynamische Untersuchungen an Greiferwagenprofilen unter Nutzung eines mitlaufenden Bandes; Großer Beleg, TU Dresden, Windkanal, 2003
- [2] Göing, M.: Bestimmung von Auftrieb und Widerstand eines Flügelprofils im Tiefstflug in Abhängigkeit der Bodenrandbedingungen mit Hilfe eines mitbewegten Bandes; Großer Beleg, TU Dresden, Windkanal, 2006
- [3] Boden, F.: Konstruktion und Bau eines Flügelmodells mit Laminarprofil und Hinterkantenabsaugung für Messungen im Windkanal der TU Dresden; Großer Beleg, TU Dresden, Windkanal, 2004.
- [4] Brüning, O.: Messung von Auftrieb und Widerstand an einem Flügelmodell mit Laminarprofil und Hinterkantenabsaugung; Diplomarbeit, TU Dresden, Windkanal, 2006.
- [5] Grüneberger, R.: Verbesserung der Bodenrandbedingung bei fahrzeugaerodynamischen Windkanaluntersuchungen durch eine verteilte Ausblasung und Rücksaugung; Diplomarbeit, TU Dresden, Windkanal, 2003.