

30 JAHRE RIBLET-FORSCHUNG AM BERLINER ÖLKANAL DES DLR

Dr.-Ing. W. Hage
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik (AT-TRA)
Müller-Breslau-Straße 8
10623 Berlin
Deutschland

Zusammenfassung

Die Forschung an widerstandsvermindernden Riblet-Strukturen hat eine über 40jährige Geschichte in Deutschland, erst in Göttingen und später in Berlin wurde an diesen Mikrorillen (Riblets) geforscht. Die Riblets reduzieren den turbulenten Reibungswiderstand um bis zu 10% gegenüber glatten Flächen. Erste Experimente fanden in Windkanälen statt, wegen der Kleinheit der Strukturen wurde ein mit Öl befüllter Kanal gebaut. Dieser Kanal ermöglicht mit einer differentiell messenden Waage hochgenaue Widerstandsmessungen an stark vergrößerten Modellen. Mit einem theoretischen Ansatz und Parameterstudien wurden die Rillenstrukturen optimiert und eine anwendungstaugliche Geometrie für den Flugbetrieb entwickelt. Die Riblets kamen 2021 in den kommerziellen Betrieb für Verkehrsflugzeuge.

1. MOTIVATION

Die Forschung an widerstandsvermindernden Riblet-Strukturen hat zwei Wurzeln. In Anbetracht der steigenden Ölpreise durch die Ölkrise im letzten Jahrhundert wurden im Rahmen von US-amerikanischen Forschungsaktivitäten zur Treibstoffeinsparung durch Beeinflussung der turbulenten Reibung kleine Rillenstrukturen (Riblets) entwickelt. Gleichzeitig wurde in Deutschland durch Beobachtungen von kleinen scharfen Rillen auf Schuppen fossiler Haie Strömungsexperimente motiviert, um deren Eigenschaften zu klären. Diese Rillenstrukturen haben ein Widerstandsverminderungspotential von 10% gegenüber einer ideal glatten Oberfläche. Erste Experimente fanden in Windkanälen statt. Durch die Kleinheit der Rillenstrukturen bedingt wurde der Bau einer neuen Versuchseinrichtung, dem Berliner Ölkanal durchgeführt. Dieser Ölkanal ermöglicht mit einer eigens entwickelten differentiell messenden Kraftwaage hochgenaue Messungen der Wandreibung von ebenen Oberflächen. Die Verwendung von Öl als strömendes Medium erlaubt eine starke Vergrößerung der zu untersuchenden Strukturen im Vergleich zu Luft oder Wasser. Die Dicke der viskosen Unterschicht der turbulenten Strömung im Ölkanal beträgt bis zu 4 mm. Somit lässt sich eine typische Rillenweite für den Flugbetrieb von 0,1mm auf bis zu 10 mm für das Experiment im Ölkanal vergrößern. Deshalb können Testobjekte mit kleinen Geometrieunterschieden mit vergleichsweise einfachen Mitteln für das Experiment gefertigt werden. Parallel zu Experimenten mit dem neuen Prüfstand wurde ein theoretischer Ansatz zur Klärung des widerstandsvermindernden Mechanismus der Mikrorillen entwickelt.

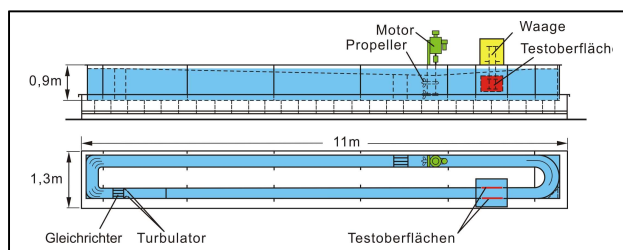


BILD 1. Ölkanal des DLR AT-TRA in Berlin

2. THEORETISCHE VORBEREITEN DER RIBLET-OPTIMIERUNG

Die Entwicklung der Riblet-Forschung lässt sich in zwei Sparten unterteilen: Die heuristische Findung der Rillenstrukturen auf versteinerten Schuppen Jahrmillionen alter Hai-Fossile [18], [4] und die davon abgeleiteten frühen Experimente an innen gerillten Rohren [8] sowie der Ansatz, dass die Rillenstruktur vergleichbar mit miniaturisierten Grenzschichtzäunen die turbulenten Strukturen in der Wandnähe beeinflussen [24] die in den USA entwickelt wurde.

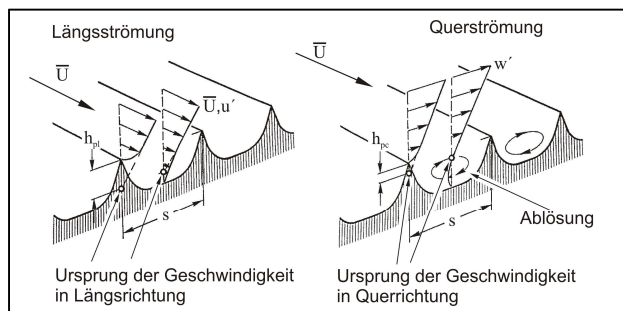


BILD 2. Wirkweise der Riblets auf die wandnahe Strömung, Aufgeteilt in Längs- und Querströmung werden

unterschiedliche Ursprünge der Geschwindigkeitsprofile gefunden.

Nachdem die widerstandsvermindernde Wirkung von Riblet-Strukturen in voneinander unabhängigen Messungen bestätigt war, wurde ein theoretischer Ansatz zur Wirkung der Rillenstruktur entwickelt [5]. Dieser beruht auf der Annahme, dass in direkter Wandnähe die viskosen Eigenschaften der turbulenten Grenzschicht dominieren. Die als rein viskos angenommene Strömung über den Riblets wird in eine Längs- und Querkomponente aufgeteilt. Es ist einleuchtend (wie in BILD 2 dargestellt), dass die Längsströmung einen tiefer liegenden Geschwindigkeitsursprung hat im Vergleich zur Querströmung. Die Querströmungskomponente der turbulenten Strukturen an der Wand werden also stärker behindert als die der Längsströmung. Die Querströmung ist ein Effekt der turbulenten Strömung, die als gegenläufig rotierende Wirbelwalzen in Wandnähe verstanden werden können. Als starke Vereinfachung kann davon ausgegangen werden, dass die Querkomponente für einen erheblichen Anteil der zusätzlichen Reibung im Vergleich zu einer laminar überströmten Oberfläche ursächlich ist. Die Riblets behindern diese Querströmungskomponente und verschieben damit die turbulenten Strukturen weiter von der Wand weg – es kommt zu einer Aufdickung der viskosen Unterschicht was mit einem geringeren Widerstand einher geht.

Die unterschiedliche Ursprungslagen der Geschwindigkeitsprofile für Längs- und Querströmung hängen von der Rillengeometrie ab. In frühen Arbeiten [3] wurden die notwendigen Rechnungen mit konformen Abbildungen für die Längsströmung und für die Querströmung mit mechanischen Analogie-Experimenten durchgeführt. Seit längerer Zeit ist dies sehr einfach mit kommerzieller CFD möglich [13]. Es hat sich gezeigt, dass die ideale Riblet-Geometrie unendlich dünne Rippen haben, die halb so hoch wie die Rillenweite sind. In Experimenten im Ölkanal wurden diese Rippen durch dünne, gespannte Stahlbänder dargestellt, die zusätzlich noch geschärfte, zur Strömung weisende Kanten haben. Für technische Anwendungen wurde eine Rillengeometrie mit trapezförmigen Rillentälern entwickelt. Diese stellen einen guten Kompromiss zwischen der optimalen Widerstandsverminderung der geschärften Stahlbänder und einer für den Flugbetrieb geeigneten Riblet-Oberfläche mit einer Rillenweite in der Größenordnung von 0,1 mm dar. Diese vom DLR entwickelten Riblet-Strukturen kamen 2021 in den kommerziellen Betrieb bei Lufthansa Cargo, wo mit der Ausrüstung der Boeing 777 Flotte mit treibstoffsparender Riblet-Folie begonnen wurde [21]. Seit 2022 wird die 777-Flotte der Swiss ebenfalls mit Riblets ausgestattet [20].

3. ALTERNATIVE MESSVERFAHREN ZUR WIDERSTANDSMESSUNG AN EBENEN OBERFLÄCHEN.

Für die Messung von Reibungseigenschaften kommt neben dem hier beschriebenen Ölkanal eine Vielzahl von Verfahren in Frage, die sich im Aufwand, der Genauigkeit und der jeweils verwendeten Fluide unterscheiden:

- Fallrohr-Experimente: In einem mehrere Meter hohen, wassergefüllten Plexiglasrohr kann die Fallzeit eines lang gestreckten Fallkörpers

gemessen werden. Die Widerstandseigenschaften werden anhand der mit einer Lichtschranke gemessene Fallzeit ermittelt [17].

- Druckverlustmessungen in Rohrleitungen mit Wasserströmung [14] oder Luftströmung Dinkelacker [8] [16] sind ein vergleichsweise einfach zu bewerkstelligen Versuchsaufbau, wo Rohrleitungen mit rundem oder rechteckigem Querschnitt verwendet werden. Die Strömung über Rauheiten zeigt einen unterschiedlichen Druckverlust. Um verschiedenen Rauheiten zu untersuchen, können Rohrelemente ausgetauscht werden.
- Der einem Couette-Viskosimeter ähnelndem Aufbau ist eine weitere sehr elegante Methode, um Wandschubspannungen zu messen. In einem Taylor-Couette-Apparat stellt sich eine turbulente Strömung zwischen zwei rotierenden koaxialen Zylindern ein. Bei höheren Reynoldszahlen weist diese Strömung zwischen diesen als unendlich lang wirkenden Platten in azimuthaler Richtung eine voll entwickelte turbulente Scherströmungsgrenzschicht auf. Das Fluid erzeugt an den Oberflächen eine Schubspannung, die durch Messung des Drehmoments des inneren Zylinders bestimmt werden kann [12].
- Ebene Waagen-Elemente in Windkanälen Windkanal-Waagen mit und ohne Druckgradientensteuerung an NASA, ONERA, DLR, NLR und zahlreichen universitären Forschungseinrichtungen.

Außerdem gab es im Zusammenhang von Riblet-Untersuchungen eine Vielzahl von Windkanalversuchen mit Flügelprofilen [22], Flugzeugmodellen [23] und Freiflugversuchen [25]. Außerdem gibt es die Möglichkeit, in Flugversuchen entweder über die Messung des Treibstoffverbrauchs, Wandschubspannungsmessungen mit Waagen-Elementen, Grenzschichtprofilmessung oder mittels quantitativer Öl-Interferometrie [9] zur Wandschubspannungsmessung um so die Wirksamkeit von Riblets im Flugversuch zu bestimmen.

4. DER BERLINER ÖLKANAL

Der hier betrachtete Ölkanal hat gegenüber konventionellen Strömungskanälen mit Kraftwaagen den großen Vorteil einer differentiell messenden Wandschubspannungswaage. Der Wechsel zwischen Testobjekt und Referenzobjekt, das mit Einbaufehlern einen zufälligen Fehler ergeben kann entfällt. Die Referenzfläche wird gleichzeitig mit der Testoberfläche mit gemessen. Dies ist insbesondere bei einem mit einer Flüssigkeit gefüllten Kanal vorteilhaft, da der Modellwechsel mit dem damit verbundenen Entleeren und Befüllen einen wichtigen Zeitfaktor darstellt.

Vorbild für den Berliner Ölkanal war der Kanal am MPI in Göttingen, an dessen Grundzügen die Konstruktion angelehnt wurde [10]. Anders als bei dem Göttinger Kanal des MPI wurde der Antrieb über zwei mit einem Getriebe

verbundenen Schiffspropeller gelöst. Die Druckgradientensteuerung, die aufwändig gestalteten Umlenkecken sowie die eigens entwickelte differentiell messende Wandschubspannungswaage waren neu.

4.1. Eigenschaften des verwendeten Öls

Als Fluid wird ein technisches Weißöl verwendet, das eine kinematische Viskosität $\nu = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ und eine Dichte von $\rho = 836 \text{ kg/m}^3$ hat. Die kinematische Viskosität ähnelt der von Luft, die Dichte ähnelt der von Wasser. Bei diesem Öl handelt es sich um ein Erdölraffinat, das aus aliphatischen Kohlenwasserstoffen besteht. Das technische Weißöl ist geruchlos, ungiftig und durchsichtig. Die chemischen Eigenschaften des Öls ermöglichen es, ohne eine Gesundheitsgefährdung an dem in BILD 1 dargestellten Versuchsstand zu hantieren. Die Verwendung dieses Öls als Versuchsfluid bewirkt, dass in Abhängigkeit der eingestellten Strömungsgeschwindigkeit eine Dicke der viskosen Unterschicht zwischen 1 mm und 4 mm eingestellt werden kann. So wird es möglich, widerstandsvermindernde Oberflächen zu untersuchen, die einen Rillenabstand zwischen 3 mm und 10 mm haben. Dies bedeutet eine dreißigfache Vergrößerung der Rillenweite im Vergleich zu einer Testoberfläche für einen Niedergeschwindigkeitswindkanal und eine etwa hundertfache Vergrößerung der Rillenweite von 0,1 mm, die auf einem Verkehrsflugzeug zum Einsatz kommt. Aufgrund des verwendeten Öls wirken große Kräfte auf die Testplatten, so wird eine hohe Messgenauigkeit erzielt. Die Strömungsgeschwindigkeiten, bei denen die Messungen durchgeführt werden, ermöglichen relativ kurze Integrationszeiten.

4.2. Kanaleigenschaften

Der Kanal hat einen Querschnitt von 0,25 m x 0,85 m und ist 11 m lang. Bei einer Füllhöhe von 0,7 m beträgt das Ölvolumen 4,2 m³. Als Antrieb dient ein Elektromotor, der über dem Kanal angebracht ist. Über zwei Kegelradgetriebe werden zwei kleine Schiffspropeller angetrieben, die das Öl in Bewegung versetzen. Es können Geschwindigkeiten zwischen 0,3 m/s bis 1,5 m/s erreicht werden. Mit diesen Geschwindigkeiten, der Kanalweite von 0,25 m und der Viskosität des verwendeten Öls $\nu = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ errechnen sich Kanal-Reynoldszahlen zwischen $Re_{\text{Kanal}} = 8.000$ bis $Re_{\text{Kanal}} = 35.000$. Der Ölkanal ist so konstruiert, dass in der Messstrecke des Kanals eine voll ausgeprägte turbulente Kanalströmung erzeugt wird. Dies wird durch eine 8 m lange Anlaufstrecke zwischen dem Gleichrichter und der Messstrecke gewährleistet. Um eine gleichmäßige turbulente Strömung zu erzeugen, sind stromab des Gleichrichters auf beiden Seiten des Kanals Turbulatoren angebracht. Diese sind in ihrem Winkel zur Wand so eingestellt, dass im Bereich der Messstrecke ein symmetrisches Geschwindigkeitsprofil besteht. Geschwindigkeitsmessungen mit einem Prandtl'schen Staurohr über der Kanalbreite zeigen das typische Geschwindigkeitsprofil einer turbulenten Kanalströmung. Messungen mit der Wandschubspannungswaage zeigen, dass auf beiden Messplatten die gleichen Kräfte wirken. Die untere Grenze der nutzbaren Kanal-Reynoldszahl ist durch die Geschwindigkeit begrenzt, ab der eine voll turbulente Strömung ausgebildet ist. Die obere Grenze der Kanal-Reynoldszahl ist sowohl durch die Motorleistung des Antriebsmotors als auch den bei höherer Geschwindigkeit

auftretenden Luftblaseneintrag in das Öl begrenzt. Trotz eines ausgeklügelten Blasenfängers würde es zu einem höheren Eintrag von Luftblasen kommen. Diese Luftblasen würden die Dichte des Öls verändern und so die Messwerte verfälschen.

4.3. Druckgradientensteuerung

In einer Kanalströmung kommt es zur Ausbildung eines Druckgradienten. Durch eine Druckverteilung im Bereich der Messstrecke kann es bei Messungen mit Wandschubspannungswaagen zu Messfehlern kommen. Auf den Stirnseiten der Messplatten wirken beim Vorhandensein eines Druckgradienten Kräfte; außerdem kann es zu einer Hinterströmung der Messplatten kommen, was ebenfalls Messfehler verursacht [11], [15]. Um den Einfluss des Druckgradienten auf die Messung zu verhindern, wurde ein Druckgradientensteuerung aufgebaut, die den Druckgradienten im Bereich der Testplatten zu Null einstellt [1].

4.4. Aufbau der Schubspannungswaage

Die Widerstandsmessung erfolgt durch Messung der durch die Strömung auf die Oberfläche wirkenden Kräfte. Der direkte Vergleich der Kräfte, die an der Testplatte und an einer glatten Oberfläche angreifen, hat den Vorteil, dass so das Widerstandsverhalten der Oberflächen direkt als Differenz zwischen einer glatten Platte und einer Testplatte gemessen werden kann.

Wie die Draufsicht des Ölkanals in BILD 1 zeigt, befinden sich die beiden Testplatten in Ausbuchtungen des Kanals. Die Testplatten sind also auch von hinten von Öl umgeben. Die Testplatten sind mit vier Stehbolzen an den Trägerarmen der Waage befestigt. Die beiden Platten mit den Maßen 400 mm x 500 mm sind einander gegenüberliegend wandbündig in den Seitenwänden des Ölkanals eingebaut. Um eine freie Beweglichkeit der Testplatten in den Wandausschnitten der Kanalwand zu gewährleisten, müssen sie zu allen Seiten mit einem Spalt von je einem Millimeter aufweisen. Die Oberflächen der Platten werden beim Einbau wandbündig mit der Kanalwand ausgerichtet. Auf der der Strömung abgewandten Seite der Testplattenträger befinden sich an Vorder- und Hinterkante Biegebalken, um eine eventuell existierende Wölbung der Testplatten ausgleichen zu können. Mit den Einstellmöglichkeiten der Stehbolzen und mit Hilfe der Biegebalken können die Vorder- und Hinterkanten der Platten wandbündig mit den Kanalwänden ausgerichtet werden.

Die Waage ist so konstruiert, dass die Summe und die Differenz der Kräfte, die auf die Platten wirken, gemessen werden. Werden die Testplatten überströmt, wirken in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit der Platten unterschiedliche Schubspannungen auf den Testplatten. In Folge dieser Kräfte bewegt sich der gesamte Rahmen, an dem die Platten befestigt sind, um wenige hundertstel Millimeter in Strömungsrichtung. Bestehen die Testplatten aus unterschiedlich rauen Oberflächen, verformt sich der Rahmen der Waage, an dem die Platten befestigt sind, zu einem Parallelogramm. Diese Verformung wird reibungsfrei durch den mit

Federkreuzgelenken elastisch beweglichen Rahmen ermöglicht.

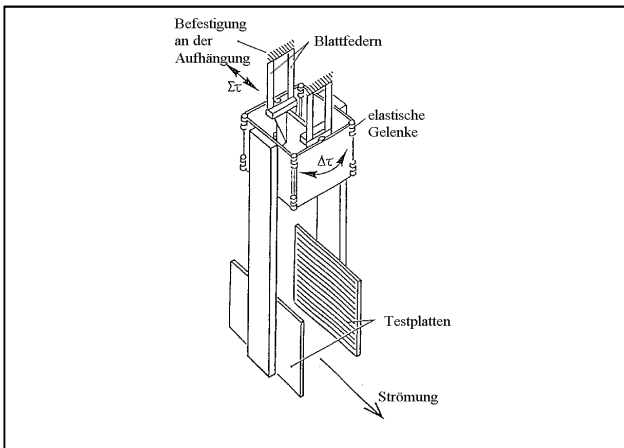


BILD 3. Wandschubspannungswaage des Ölkanals AT-TRA

Mit einem Kraft- bzw. Wegaufnehmer werden die Auslenkungen der Waage in Strömungsrichtung in eine elektrische Spannung umgewandelt. Ein zweiter Wegaufnehmer misst die Deformation der Waage, die sich durch die Differenz der beiden Schubspannungen auf Test- und Referenzplatte ergeben. Die Auslenkung bzw. Verformung des Rahmens der Wandschubspannungswaage wird mit zwei induktiv arbeitenden Wägezellen aufgenommen. Diese Wägezellen können Wege von $\pm 0,2$ mm aufnehmen. Für die resultierenden Ausgangsspannungen von ± 2 V der Trägerfrequenz-Messverstärkern ergibt sich, dass eine Weglänge von $1 \cdot 10^{-9}$ m einer Spannung von $0,1$ mV entspricht. Bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $0,3$ m/s bzw. $1,5$ m/s treten an zwei glatten Platten typische mittlere Weglängen bei der Summenmessung von $8 \cdot 10^{-6}$ m bis $65 \cdot 10^{-6}$ m und bei der Differenzmessung von $0,09 \cdot 10^{-6}$ m bis $1,6 \cdot 10^{-6}$ m auf. Zur Messung der resultierenden Spannungen werden integrierende Digitalvoltmeter verwendet, die Spannungen bis zu $1 \cdot 10^{-7}$ V auflösen können. Wird eine Messung der Auslenkung der Testplatten im ruhenden Öl durchgeführt, erhält man eine Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit der Messungen von $\pm 0,1\%$. Bei Messungen im strömenden Öl verringert sich die Messgenauigkeit auf $\pm 0,3\%$. Die geringere Reproduktionsgenauigkeit wird durch tieffrequente Schwankungen der Strömung hervorgerufen und erfordert bei den kleineren Strömungsgeschwindigkeiten Mittelungszeiten von bis zu 20 Minuten.

Die Schubspannungswaage wird durch Belasten mit bekannten Gewichten kalibriert. Die in horizontaler Richtung wirkenden Kräfte sind den Auslenkungen der Platten proportional, die mit den Wegaufnehmern gemessen werden.

5. AUFBAU DER UNTERSCHIEDLICHEN TESTPLATTEN

Für die Untersuchungen im Ölkanal wurden Messplatten verschiedener Bauart verwendet:

- Einfache gefräste Riblet-Oberflächen

Die ersten Experimente im Ölkanal wurden mit aus Plexiglasplatten mittels einer CNC-Fräse hergestellten Rillenoberflächen durchgeführt BILD 4. Die Fertigung dieser Testplatten ist mit einem relativ hohen Zeitaufwand für Erstellung jeder einzelnen Oberfläche verbunden. Für jede Änderung der Geometrie muss eine neue Test-Oberfläche

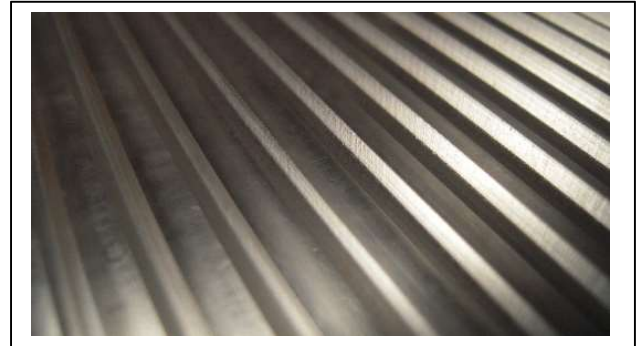


BILD 4. Mit einer CNC-Fräse gefertigte Riblet-Testoberfläche aus Acrylglas.

hergestellt werden oder das bestehende Modell umgearbeitet werden. In BILD 5 sind Daten aus Kunststoff gefertigter Riblet-Oberflächen gezeigt, es handelt sich hier um die von der NASA entwickelten Riblet-Geometrie dreieckigen Rippen (dreieckige Symbole) und der DLR Entwicklung mit trapezförmigen Rillentälern (rautenförmige Symbole). Generell sind die Daten auch in den folgenden Bildern so aufgetragen: Auf der x-Achse ist die dimensionslose Rippenweite s^+ aufgetragen, dies entspricht einer Reynolds-Zahl gebildet mit der Wandschubspannungsgeschwindigkeit u_τ und der

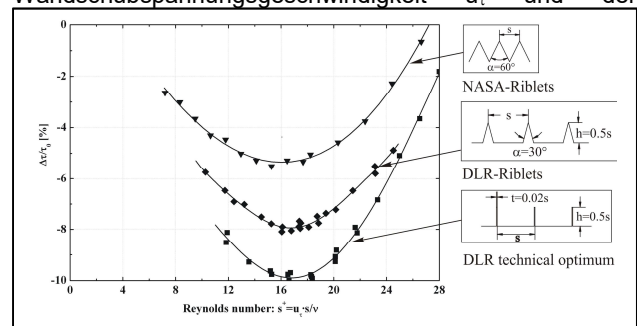


BILD 5. Widerstandsdaten verschiedener Riblet-Geometrien, alle Messungen im Ölkanal

Rippenweite geteilt durch die kinematische Viskosität ν . Lässt sich keine Darstellung über s^+ erstellen, sind die Widerstandswerte über der Kanal-Reynoldszahl dargestellt. Auf der y-Achse ist die Änderung des Widerstandsverhaltens als $\Delta\tau/\tau_0 = (\tau - \tau_0)/\tau_0$ in Prozent aufgetragen: Die Widerstandsänderung wird aus der Differenz der gemessenen Wandschubspannungen von der Test- und Referenzplatte geteilt durch die Wandschubspannungen der Referenzplatte errechnet.

- Mechanisch verstellbare, aufwändige Test-Oberflächen

Die verstellbaren Oberflächen sind sehr aufwändige gefertigte mechanische Konstruktionen. Bei diesen Oberflächen können während den ohne den Ausbau aus

dem Ölkanal verschiedene Parameter verstellt werden.

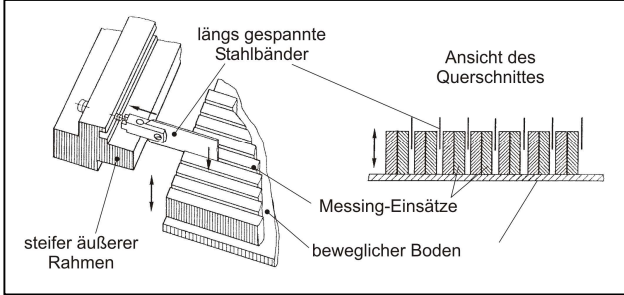


BILD 6. Verstellbare Test-Oberfläche zur Parametervariation um das Geometrieverhältnis Rippenhöhe und Rippenabstand experimentell zu optimieren. Die Rippenweite ist fixiert, die Rippenhöhe wird durch Absenken einen verstellbaren Boden variiert.

Zwar sind Konstruktion und Fertigung dieser verstellbaren Testoberflächen aufwändig, ist diese aber fertig gestellt, können in direkter Folge die Messdaten aufgenommen werden. Außerdem kann eine Parametervariation nahe einem Optimum in feinen Abstufungen durchgeführt werden. Daten mit einer verstellbaren Riblet-Testplatte sind

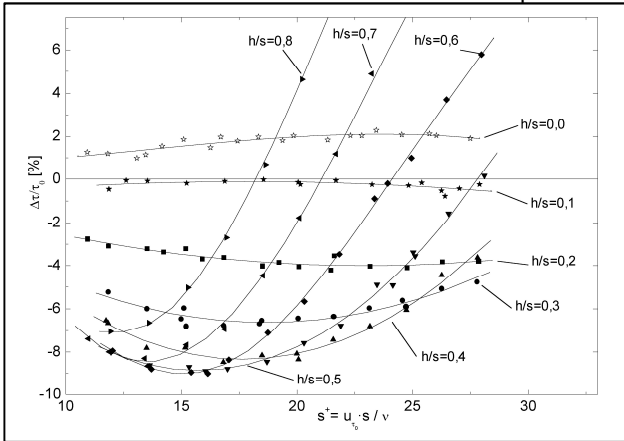


BILD 7. Variation Rippenhöhe zu Rippenweite, das Optimum wird gefunden, wenn die Rillenweite doppelt so groß ist wie die Rippenhöhe ist.

ebenfalls in BILD 5 gezeigt, hier handelt es sich um eine Riblet-Oberfläche wie in BILD 6 gezeigt. Die Rippen bestehen aus dünnen, geschärften Stahlbändern, die an einem steifen Rahmen befestigt sind. Zwischen den Rippen ist ein beweglicher Boden in der Höhe einstellbar, so wird bei fixierter Rillenweite eine Variation des Verhältnisses Rippenhöhe zu Rippenweite eingestellt. Die mit dieser Testoberfläche erreichbare Widerstandsverminderung von bis zu 10% ist das Maximum, das mit Riblets in diesem Prüfstand erreicht wird BILD 7 zeigt eine Variation des Verhältnisses Rippenhöhe h zu Rippenweite s in kleinen Schritten: Das Optimum der Widerstandsverminderung wird bei $h/s=0,5$ gefunden. Ist dieses Verhältnis kleiner, sind die Rippen nicht mehr hoch genug um mit der wandnahen Strömung zu beeinflussen. Ist das Verhältnis h/s größer als 0,5 lässt die Widerstandsverminderung nach und die Rillen erzeugen schon bei kleineren Reynoldszahlen Widerstand.

Es ist einleuchtend, dass sich eine Oberflächengeometrie dieser Art nicht direkt für technische Anwendungen nutzen

lassen kann, da sie für technische Anwendung kleiner skaliert gebaut werden müsste – die Feinheit der Rippen mit einer Dicke von 0,05 mm ließe eine Herunterskalierung für eine Anwendung in der Luftfahrt nicht zu.

Eine weitere mechanisch aufwändige Testoberfläche war die nachempfundene Haifischhaut. Dieser Nachbau mit ca. 800 einzelnen Schuppen, die federnd gelagert sind und sowohl im Anstellwinkel zur Strömung wie auch in der

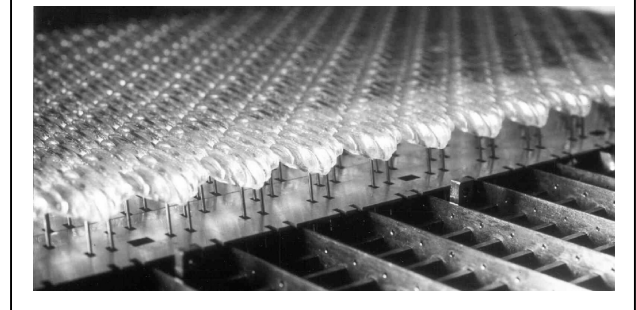


BILD 8. Haifischhaut Nachbau, die Testoberfläche ist teilweise montiert.

Federsteifigkeit der Lagerung einstellbar sind. Der Nachbau der Haut eines Großen Hammerhais (*Sphyrna tudes*) zeigt, wenn auch geringer als erwartet eine Widerstandsverminderung von bis zu 3% im Vergleich zu einer glatten Oberfläche. Es lassen sich zusätzliche strömungsmechanische Wirkweisen der Schuppen

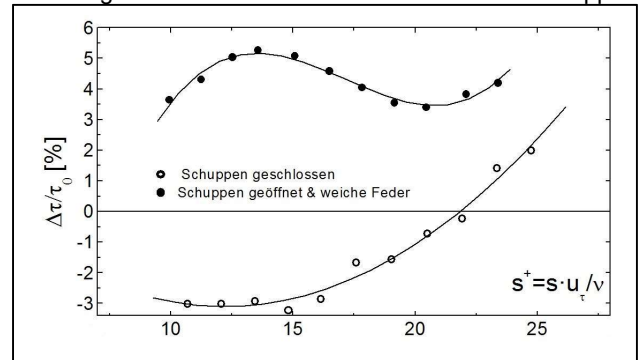


BILD 9. Widerstandsdaten Haifischhaut Nachbau: Das Widerstandsverhalten hängt von Anstellwinkel der Schuppen und Federsteifigkeit der Aufhängung der Schuppen ab.

vermuten: Eine Funktion der Schuppen zur Ablösungsvermeidung scheint möglich, dies ist in BILD 9 in Bereichen kleiner Strömungsgeschwindigkeiten sichtbar, hier stehen die Schuppen auf und wirken vergleichbar wie Wirbelgeneratoren. Bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten liegen die Schuppen flach und verringern den Widerstand durch ihre Wirkung als Riblets [6].

Die als „Slipwall“ bezeichnete Versuchs-Oberfläche ist ein sehr wirksamer widerstandsreduzierender Aufbau, der die

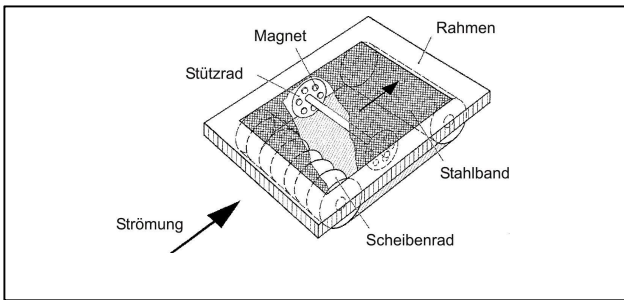


BILD 10. „Slip Wall“ Prinzipdarstellung des Testaufbaus

turbulente Reibung um bis zu 10% im Vergleich zu einer starren Oberfläche verringert. Der Aufbau besteht aus einem endlos gefügtem Band aus Federstahlblech, das über zwei Rollen geführt wird. Der Aufbau ist wandbündig in der Wand verborgen, nur der ebene Teil des Bands wird der Strömung ausgesetzt. Durch die Strömung wird das leicht bewegliche Band passiv mitbewegt, die lokale Geschwindigkeit auf dem Band selbst ist geringer und somit auch die Reibung entsprechend kleiner [2]. Der Aufbau ist in BILD 10 dargestellt. Die in BILD 11 dargestellten Daten zeigen, dass bei festgestelltem Band eine Widerstandserhöhung bis zu 5% im Vergleich zu einer ideal glatten Wand gefunden werden. Bei beweglichem Band bedarf es einer höheren Strömungsgeschwindigkeit, bis sich das Band in Bewegung setzt, dies ist bei ca. $Re_{\text{Kanal}} = 21000$ der Fall, die maximale Widerstandsverminderung liegt bei 10%.

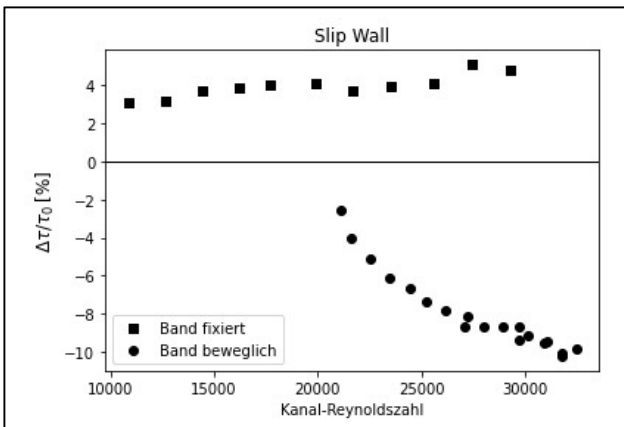


BILD 11. „Slip Wall“ Daten, dargestellt sind Widerstandswerte in % mit fixiertem Band (Vierecke) und die Daten der Widerstandsreduktion bei beweglichem Band (Kreise), jeweils über der Kanal-Reynoldszahl aufgetragen.

- Additiv gefertigte Rillenoberflächen

Die additive Fertigung bietet besonders bei komplizierten dreidimensionalen Geometrien Vorteile. Das sind beispielsweise technische Rauheiten von Windkanalmodellen. Mit Untersuchungen im Ölkanal kann der notwendige Aufwand der Fertigung für Kryowindkanal Versuche beurteilt werden. Ein anderes Beispiel ist die im Flugbetrieb auftretenden

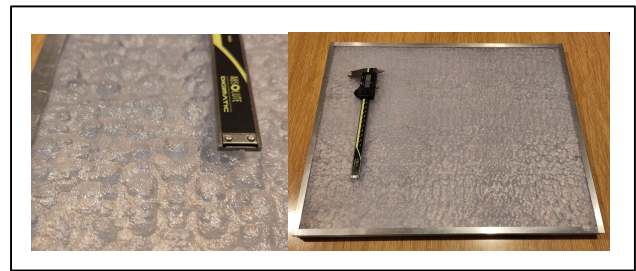


BILD 12. Stark vergrößerte Rauheit einer Turbinenschaufel-Oberfläche, Modellbau mit additiver Fertigung (Stereolithographie)

Langzeitveränderungen von Riblets. Diese Oberflächen-Modelle lassen sich mit zerspanenden Verfahren nur schwer oder gar nicht herstellen. Allerdings müssen auch die Grenzen der additiven Verfahren gesehen werden: Sehr spitze oder scharfe Konturen lassen sich durch auflösungsspezifische Grenzen in der 3D-Druck-Technik nur bedingt darstellen. Die besonders gute Eignung bei der vergrößerten Darstellung mittels additiver Verfahren von Rauheiten ist in BILD 12 gezeigt, mit konventionellen Mittel wäre diese Oberfläche nicht nachzubilden.

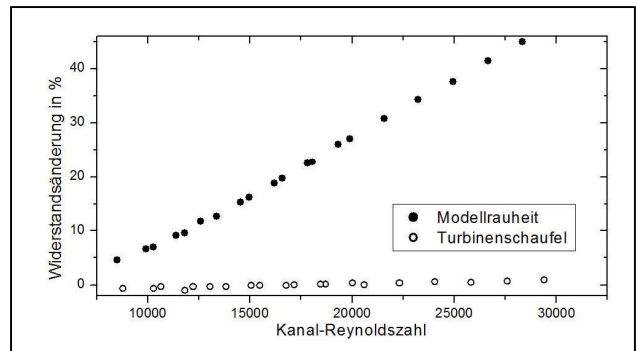


BILD 13. Widerstandsdaten der in BILD 12 gezeigten Testoberfläche (schwarze Punkte) und einer glatten Turbinenschaufel (farbige Punkte), dargestellt als Widerstandsänderung über der Kanal-Reynoldszahl.

In kommerziellen CFD-Programmen wird als Rauheitsparameter oft noch die äquivalente Sandkornrauheit verwendet, die aus den klassischen Experimenten von Nikuradse stammt [14]. Eine andere Möglichkeit ist, CFD Programme mit im Ölkanal gemessenen Rauheitsdaten zu kalibrieren. Dies fand beispielsweise statt im Rahmen der Entwicklung eines Prognosemodells für die thermodynamische Triebwerksalterung unter Berücksichtigung der tatsächlich im Flugbetrieb auftretenden Bedingungen. In diesem Zusammenhang wurden verschieden Oberflächen-Rauheiten von Turbinenschaufeln stark vergrößert im Ölkanal untersucht. Diese Untersuchung wurde im Rahmen des Vorhabens im Luftfahrtforschungsprogramm LuFo V-3 durchgeführt [7]. Die in BILD 13 gezeigten Daten werden zur Kalibrierung des CFD-Programms des beteiligten Partners verwendet. Zu diesem Zweck wird der Bereich der Messtrecke des Ölkanals mit dem Rauheit-Modell komplett im CFD-Programm modelliert.

6. AUSBLICK: ZUKUNFT DES ÖLKANALS

Die Arbeit an der Optimierung von Riblet-Strukturen ist erfolgreich beendet, auch ungewöhnliche Riblet-Konzepte wie verschiedene dreidimensionale Rillen-Geometrien oder

sinusförmige Rillen konnten die Widerstandsverminderung im Vergleich zu den vom DLR entwickelten Riblets mit trapezförmigen Rillen (siehe BILD 5) nicht verbessern.

Im Auftrag von Fluggesellschaften und Flugzeugherstellern wurden zulassungsrelevante Messungen durchgeführt. Weiter Untersuchungen an herstellungsbedingten Eigenschaften von alternativen Riblet-Techniken wie gelaserten oder in Lack geprägten Riblets sind vorstellbar. Insgesamt kann aber festgestellt werden, dass die Arbeiten in diesem Feld als abgeschlossen gesehen werden können.

Mögliche zukünftige Anwendungen können in weiteren Untersuchungen von technische Rauheiten zur Kalibrierung von CFD-Anwendungen stattfinden.

Aktuell ist die Weiterentwicklung von neuen Messverfahren wie der drucksensitiven Farbe (PSP / Pressure-Sensitive Paint) geplant, mit der die instationäre Druckverteilung in einer turbulenten Strömung quantitative untersucht werden kann. Hier bietet sich der Ölkanal wegen der durch das verwendete Fluid stark vergrößerten turbulenten Strukturen in besonderem Maße an.

7. DANKSAGUNG

Die in diesem Artikel beschriebenen Arbeiten haben mit der Finanzierung der DFG, der Volkswagenstiftung und mit den Mitteln aus zahlreichen Industrieprojekten, Förderungen durch die Ministerien BMWi, BMWF sowie aus der Grundfinanzierung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt stattgefunden. Allen Geldgebern sein an dieser Stelle nochmals gedankt.

- [1] BECHERT, D. W., et al. The Berlin oil channel for drag reduction research. *Experiments in Fluids*, 1992, 12. Jg., Nr. 4, S. 251-260.
- [2] BECHERT, D. W.; HAGE, W.; BRUSE, M. Drag reduction with the slip wall. *AIAA journal*, 1996, 34. Jg., Nr. 5, S. 1072-1074.
- [3] BECHERT, D., & BARTENWERFER, M. (1989). The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs. *Journal of Fluid Mechanics*, 206, 105-129. doi:10.1017/S0022112089002247
- [4] BECHERT, D.; REIF, W. On the drag reduction of the shark skin. In: 23rd Aerospace sciences meeting. 1985. S. 546.
- [5] BECHERT, D.W., BARTENWERFER, M., HOPPE, G. (1990). Turbulent Drag Reduction by Nonplanar Surfaces — A Survey on the Research at TU/DLR Berlin. In: Gyr, A. (eds) *Structure of Turbulence and Drag Reduction*. International Union of Theoretical and Applied Mechanics. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-50971-1_44
- [6] Bechert et al *Fluid Mechanics of Biological Surfaces and their Technological Application naturwissenschaften* 2000
- [7] BMWi LuFo V - „ProTherm“ Prognose der thermodynamischen Alterung von Flugtriebwerken unter Betriebsbedingungen, In Zusammenarbeit mit Lufthansa Technik und ANSYS Germany. Laufzeit: 01.01.2018-31.03.2021
- [8] DINKELACKER, A.; NITSCHKE-KOWSKY, P.; REIF, W.-E. On the possibility of drag reduction with the help of longitudinal ridges in the walls. In: *Turbulence Management and Relaminarisation*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1988. S. 109-120.
- [9] DRAKE, Aaron; KENNELLY JR, Robert A. In-flight skin friction measurements using oil film interferometry. *Journal of aircraft*, 1999, 36. Jg., Nr. 4, S. 723-725.
- [10] ECKELMANN, H. (1974). The structure of the viscous sublayer and the adjacent wall region in a turbulent channel flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 65(3), 439-459. doi:10.1017/S0022112074001479
- [11] ECKELMANN, Helmut. Einführung in die Strömungsmeßtechnik. Springer-Verlag, 2013.
- [12] GREIDANUS, A. J., et al. Turbulent Taylor–Couette flow over riblets: drag reduction and the effect of bulk fluid rotation. *Experiments in Fluids*, 2015, 56. Jg., Nr. 5, S. 1-13.
- [13] GRÜNEBERGER, R., HAGE, W. Drag characteristics of longitudinal and transverse riblets at low dimensionless spacings. *Experiments in Fluids*, 2011, 50. Jg., Nr. 2, S. 363-373.
- [14] NIKURADSE, J. Strömungsgesetze in rauhen Rohren. VDI-Forsch. 1933.
- [15] NITSCHKE, Wolfgang; BRUNN, André. Strömungsmesstechnik. Springer-Verlag, 2006.
- [16] NITSCHKE-KOWSKY, Petra. Experimentelle Untersuchung der turbulenten Strömung in glatten und längsgerillten Rohren. Max-Planck-Inst. für Strömungsforschung, 1983.
- [17] RECHENBERG, I. <https://web.archive.org/web/20101217015216/http://www.bionik.tu-berlin.de/institut/skript/B1-10Fo5.ppt>
- [18] REIF, W. E. Morphogenesis and function of the squamation in sharks. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 1982, S. 172-183.
- [19] <https://www.spiegel.de/wissenschaft/dellen-im-dach-a-76363aff-0002-0001-0000-000030346859>
- [20] [Newsroom : SWISS reduziert CO2-Emissionen mit der neuen Oberflächentechnologie AeroSHARK weiter \(newsmarket.com\)](https://www.newsroom.swissair.com/newsroom/Newsroom-SWISS-reduziert-CO2-Emissionen-mit-der-neuen-Oberflächentechnologie-AeroSHARK-weiter-newsmarket.com)
- [21] <https://www.lufthansa-technik.com/aeroshark>
- [22] SCHAFFARCZYK, Alois Peter; MOMBERT, Andreas; STENZEL, Volkmar. Wind tunnel investigations of DU97-W-300-mod equipped with riblets. 2021.
- [23] VAN DER HOEVEN, J.G.T., BECHERT, D.W. (1991). Experiments with a 1:4.2 model of a commuter aircraft with riblets in a large wind tunnel. In: Choi, KS. (eds) *Recent Developments in Turbulence Management*. Fluid Mechanics and Its Applications, vol 6. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3526-9_1
- [24] WALSH, Michael J. Drag characteristics of V-groove and transverse curvature riblets. In: *Symposium on Viscous flow drag reduction*. 1980.
- [25] ZUNIGA, Fanny A. Flight test results of riblets at supersonic speeds. NASA, Scientific and Technical Information Program, 1992.