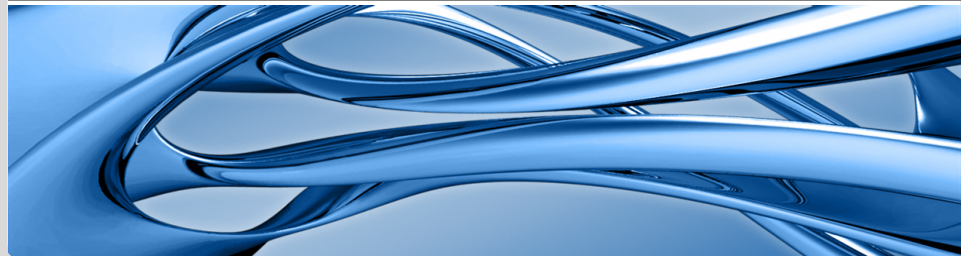


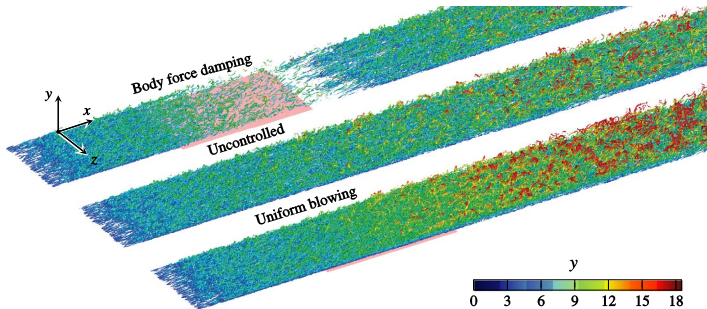
Kann homogenes Ausblasen die aerodynamische Effizienz eines Flügelprofils erhöhen?

Martin Reder, Alexander Stroh, Davide Gatti | 6. November 2018

21. DGLR-FACHSYMPOSIUM DER STAB



- Reibung hat großen Anteil an Verlusten kinetischer Energie
→ Strömungskontrolle zur Reibungsminderung
- Homogenes Ausblasen („uniform blowing“) eine Möglichkeit



Stroh et al. J. Fluid Mech. (2016), vol. 805, S. 303-321.

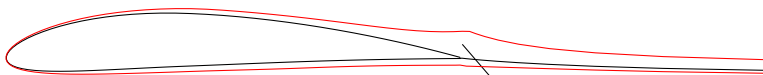
- DNS bei turbulenter Plattenströmung
 - Park und Choi. Physics of fluids (1999)
 - Kametani et al. J. Fluid Mech. (2011)
 - Stroh et al. J. Fluid Mech. (2016)
- Gute Kontrolleffizienz von homogenem Ausblasen
- Inkompressible Flügelprofilumströmung
 - Auch Druckanteil des Strömungswiderstands
 - Einfluss auf Auftrieb
- Wie untersuchen?

- DNS bei turbulenter Plattenströmung
 - Park und Choi. Physics of fluids (1999)
 - Kametani et al. J. Fluid Mech. (2011)
 - Stroh et al. J. Fluid Mech. (2016)
- Gute Kontrolleffizienz von homogenem Ausblasen
- Inkompressible Flügelprofilumströmung
 - Auch Druckanteil des Strömungswiderstands
 - Einfluss auf Auftrieb
- Wie untersuchen?

- DNS bei turbulenter Plattenströmung
 - Park und Choi. Physics of fluids (1999)
 - Kametani et al. J. Fluid Mech. (2011)
 - Stroh et al. J. Fluid Mech. (2016)
- Gute Kontrolleffizienz von homogenem Ausblasen
- Inkompressible Flügelprofilumströmung
 - Auch Druckanteil des Strömungswiderstands
 - Einfluss auf Auftrieb
- Wie untersuchen?

- Kopplung von Potential- und Grenzschichtlösung basierend auf Xfoil (Abkürzung BEM)

Außenbereich:
Randelemente-Methode



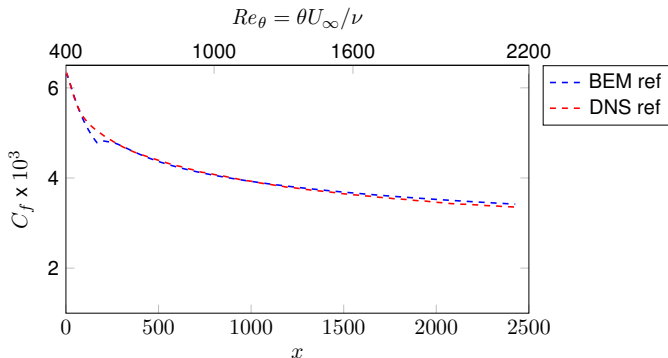
Grenzschicht: Integralverfahren

- Ausblasen durch **zusätzlichen Term** in Grenzschichtgleichungen

$$\frac{d\theta}{ds} + (2\theta + \delta^*) \frac{1}{U} \frac{dU}{ds} = \frac{c_f}{2} + \frac{v_w}{U} \quad (1)$$

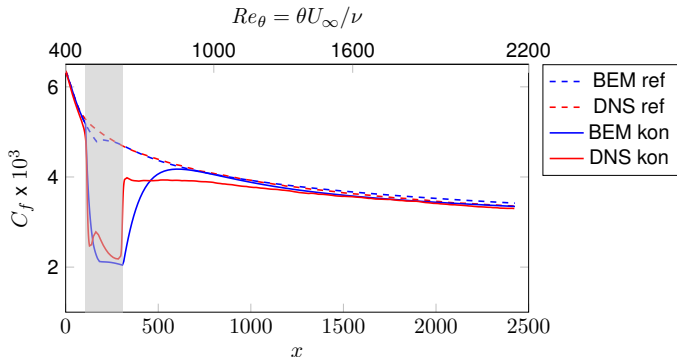
$$\frac{d\theta^*}{ds} + 3\theta^* \frac{1}{U} \frac{dU}{ds} = 2c_D + \frac{v_w}{U} \quad (2)$$

■ Turbulente Plattengrenzschicht



DNS-Daten: Stroh et al. 2016

- Turbulente Plattengrenzschicht, $v_w = 0,5\%U_\infty$

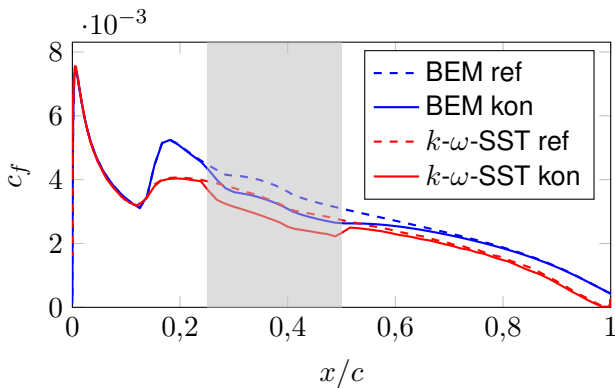


DNS-Daten: Stroh et al. 2016

mittlere Reibungsreduktion

BEM	DNS
8,4%	8,1%

- NACA 4412 bei $Re = 400\,000$ und $\alpha = 0^\circ$ (Saugseite).

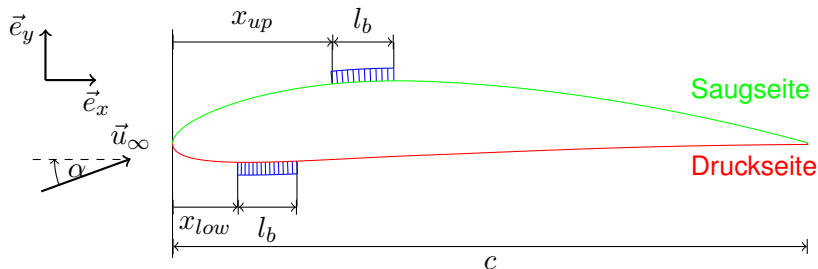


Reibungsreduktion:

	BEM	RANS
$C_{d,R}$	3,19% ↓	3,67% ↓

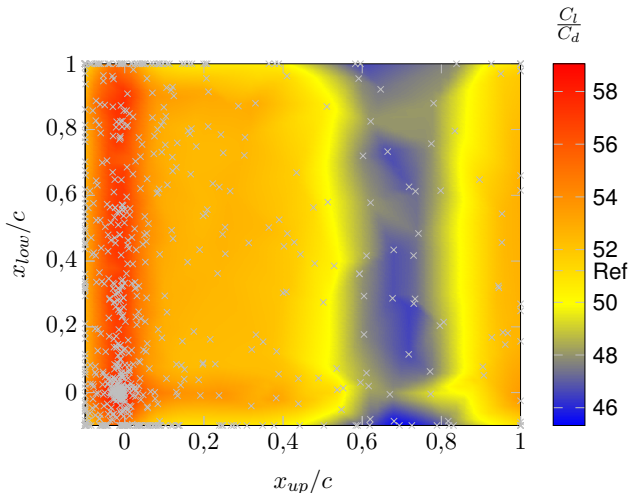
- Optimierungsalgorithmus: Partikelschwarmoptimierung (Metaheuristik)
- Zu maximierende Zielfunktion: $\frac{C_l}{C_d}$
- Profilgeometrie: NACA 4412
- Reynolds-Zahl: $Re = 400\,000$

- Parameter x_{up} und x_{low}
- Festgesetzt: $v_w = 0,5\%U_\infty$ und $l_b = 0,1c$



Optimierung : Parameterraum für $\alpha = 2^\circ$

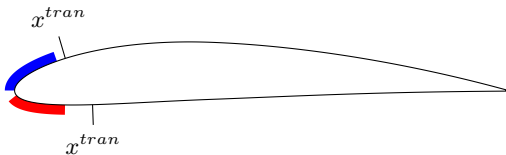
Referenzwert des unkontrollierten Falls $C_l/C_d = 51,23$.



Optimierung

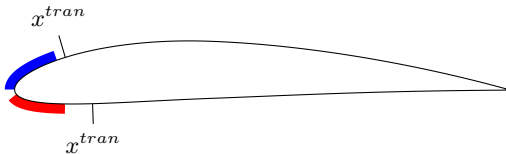
Optimum:

- $C_l \Rightarrow 0,9\% \downarrow$
- $C_d \Rightarrow 14,1\% \downarrow$



Optimum:

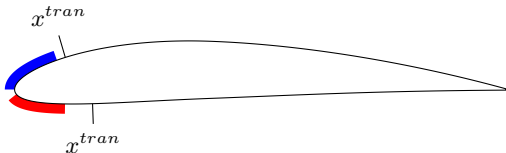
- $C_l \Rightarrow 0,9\% \downarrow$
- $C_d \Rightarrow 14,1\% \downarrow$



Aber: fester Transitionspunkt durch Tripping!

1) Optimum:

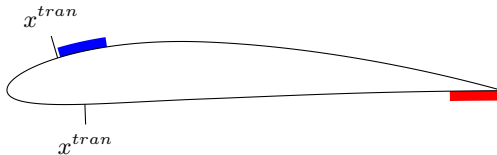
- $C_l \Rightarrow 0,9\% \downarrow$
- $C_d \Rightarrow 14,1\% \downarrow$



Aber: fester Transitionspunkt durch Tripping!

2) Zusätzliche Restriktion: Ausblasen erst nach Transition

- $C_l \Rightarrow 1,4\% \uparrow$
- $C_d \Rightarrow 3,7\% \downarrow$



- Notwendiger Energieeintrag für Ausblasen muss berücksichtigt werden („net-energy saving“)
- Abschätzung der Leistung für das Ausblasen (normiert mit $\rho U_\infty^3 / 2$)

$$P_{in} = \int_{\partial\Omega} \max(0, C_p v_w / U_\infty) + (v_w / U_\infty)^3 ds. \quad (3)$$

- Fall 1): $P_{in} / C_{d0} \approx 0,65\%$
- Fall 2): $P_{in} / C_{d0} \approx 0,60\%$
→ Geringer als Verringerung der Verlustleistung durch den Strömungswiderstand

- Notwendiger Energieeintrag für Ausblasen muss berücksichtigt werden („net-energy saving“)
- Abschätzung der Leistung für das Ausblasen (normiert mit $\rho U_\infty^3 / 2$)

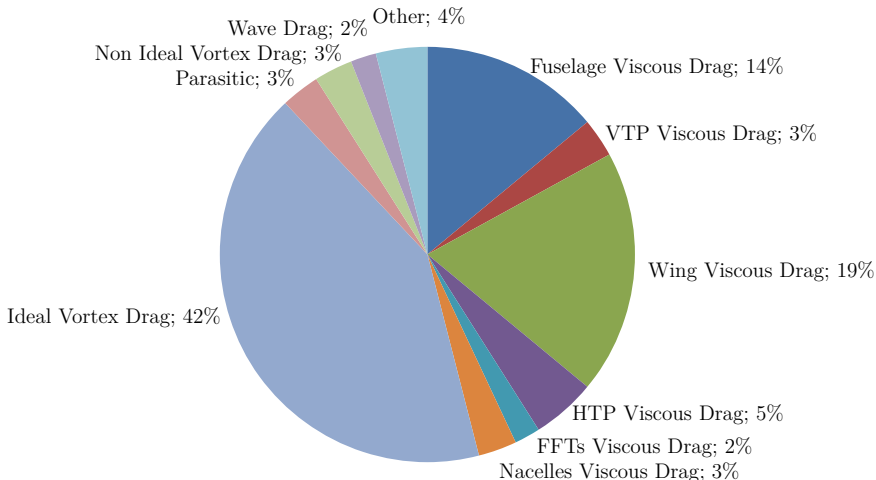
$$P_{in} = \int_{\partial\Omega} \max(0, C_p v_w / U_\infty) + (v_w / U_\infty)^3 ds. \quad (3)$$

- Fall 1): $P_{in} / C_{d0} \approx 0,65\%$
- Fall 2): $P_{in} / C_{d0} \approx 0,60\%$
→ Geringer als Verringerung der Verlustleistung durch den Strömungswiderstand

- Effekt von homogenem Ausblasen kann ordentlich abgebildet werden
- Rechenzeit erlaubt Parameterstudie
- Nutzen des Ausblasens hängt von Konfiguration ab
- Entwurfsraumexploration für genauere Simulationen möglich
→ DNS auf Grundlage der Ergebnisse geplant (CWING-Projekt)

Fragen?

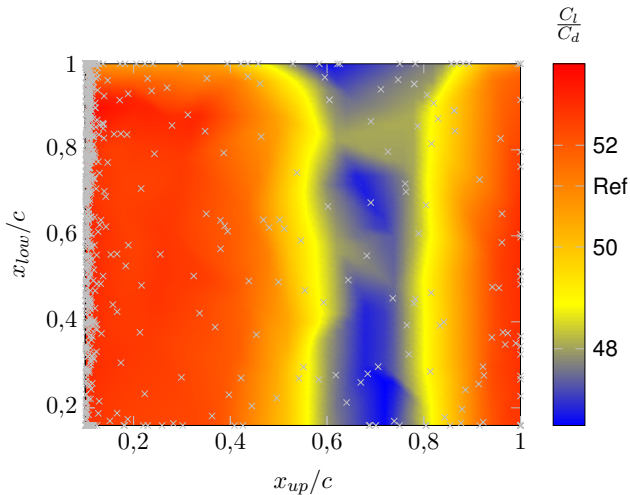
Aufteilung des Strömungswiderstand bei einem typischen Flugzeug



UK Aerodynamics, ERCOFTAC Flow Control , UKAC, December 2013

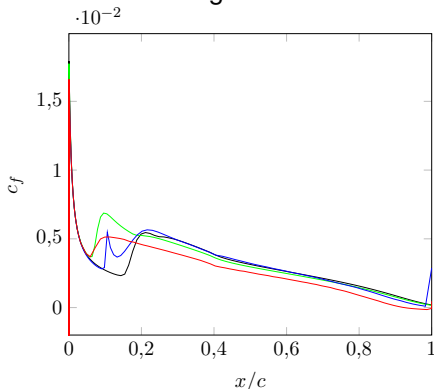
Optimierung nach Transition $\alpha = 2^\circ$

Referenzwert des unkontrollierten Falls $C_l/C_d = 51,23$.

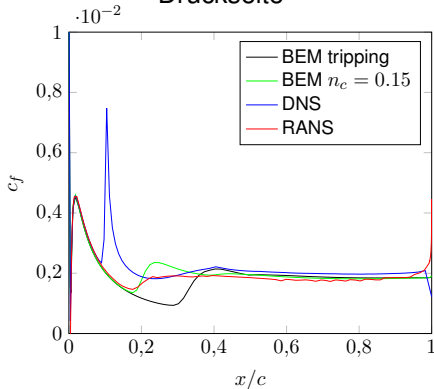


NACA4412-Profil bei $Re = 400\,000$ und $\alpha = 5^\circ$

Saugseite

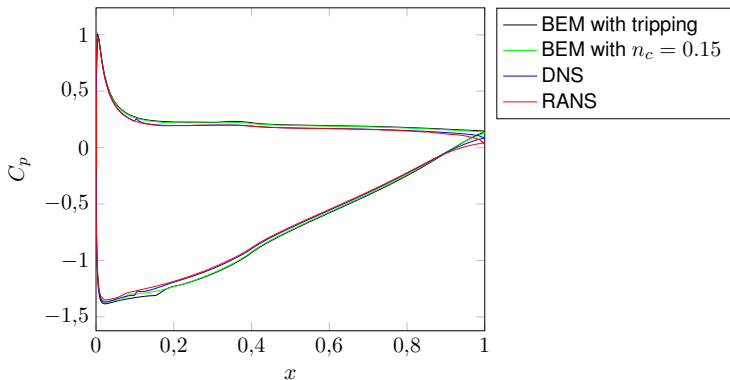


Druckseite



DNS-Daten: Vinuesa et al. Flow Turbulence Combust (2017), vol. 99, S. 613–641

NACA4412-Profil bei $Re = 400\,000$ und $\alpha = 5^\circ$



DNS-Daten: Vinuesa et al. Flow Turbulence Combust (2017), vol. 99, S. 613–641

- Park, J ; Choi, H: Effects of uniform blowing or suction from a spanwise slot on a turbulent boundary layer flow. In: *Physics of fluids* 11 (1999), Nr. 10, S.3095-3105.
- Kametani, Y ; Fukagata, K: Direct numerical simulation of spatially developing turbulent boundary layers with uniform blowing or suction. In: *Journal of Fluid Mechanics* 681 (2011), S. 154-172.
- Kametani, Y ; Fukagata, K ; Örlu, R ; Schlatter, P: Effect of uniform blowing/suction in a turbulent boundary layer at moderate Reynolds number. In: *International Journal of Heat and Fluid Flow* 55 (2015), S. 132-142.
- Stroh, A ; Hasegawa, Y ; Schlatter, P ; Frohnäpfel, B: Global effect of local skin friction drag reduction in spatially developing turbulent boundary layer. In: *Journal of Fluid Mechanics* 805 (2016), S. 303-321.

- Wadcock, A: *Flying-hot-wire study of two-dimensional turbulent separation of an NACA 4412 airfoil at maximum lift*, California Institute of Technology, Diss., 1978
- Drela, M: XFOil: An analysis and design system for low Reynolds number airfoil aerodynamics. In: *Conference on Low Reynolds Number Airfoil Aerodynamics, University of Notre Dame*, 1989.
- Eppler, R ; Somers, D: A computer program for the design and analysis of low-speed airfoils / NASA Langley Research Center. Hampton, 1980 (NASA-TM-80210, L-12937). – Forschungsbericht
- Peltonen, R: Viscous-inviscid method for airfoil analysis and design for aviation and windmills. In: *Journal of aircraft* 43 (2006), Nr. 4, S. 1069-1081.

- Schlichting, H (Hrsg.) ; Gersten, K (Hrsg.): *Grenzschicht-Theorie*. 10., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006 – ISBN 978-3-540-32985-5
- Green, E ; Weeks, D ; Brooman, J: Prediction of turbulent boundary layers and wakes in compressible flow by a lag-entrainment method. In: ARC R&M 3791 (1977)
- Poli, R ; Kennedy, J ; Blackwell, T: Particle swarm optimization. In: *Swarm intelligence* 1 (2007), Nr. 1, S. 33-57.
- Salhi, S: *Heuristic search: The emerging science of problem solving*. Cham : Palgrave Macmillan, 2017. – ISBN 978-3-319-49354-1