

# **Experimentelle Untersuchungen zur aktiven Beeinflussung von laminaren Strömungsablösungen**

B. Göksel, I. Rechenberg, R. Bannasch  
Institut für Bionik und Evolutionstechnik, TU Berlin

11. STAB-Workshop

DLR Göttingen, 4. November 2003

# Inhalt

Einführung zur Anwendung

Möglichkeiten der aktiven Strömungskontrolle

Videopräsentation

Ausblick

# 1. Einführung zur Anwendung

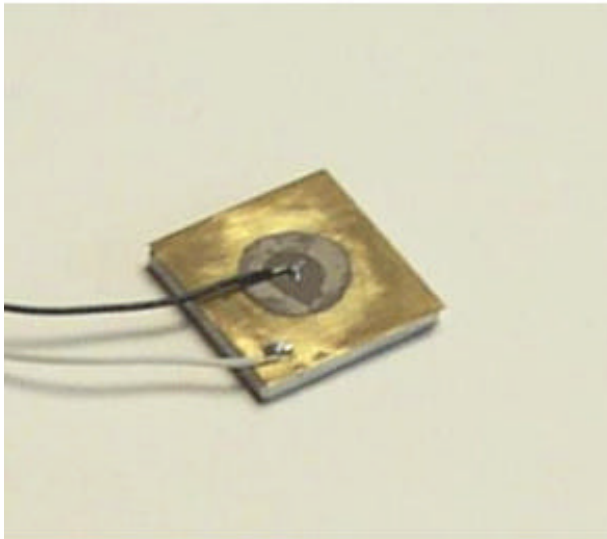
- Micro Aerial Vehicle (MAV) fliegen im Reynoldszahlbereich von 20000 – 200000
- Strömungsbild gekennzeichnet durch frühzeitige laminare Ablösung im Bereich der Leitkante
- Kompakte Geometrie (kleine Streckung im Bereich kleiner 2) verursacht starke 3D Effekte
- Nichtlineare Auftriebskurve und niedrige aerodynamische Güte

Welche Möglichkeiten der aktiven Strömungskontrolle gibt es zur Verbesserung der Flugleistungen von Mikrodrohnen?

**Möglichkeiten  
der aktiven  
Strömungskontrolle**

# 1. Aktive Kontrolle durch Piezo-Schwinger

Instationäre Anregung der laminaren Grenzschicht durch piezoelektrische Aktuatorelemente bei  $f = 250$  Hz



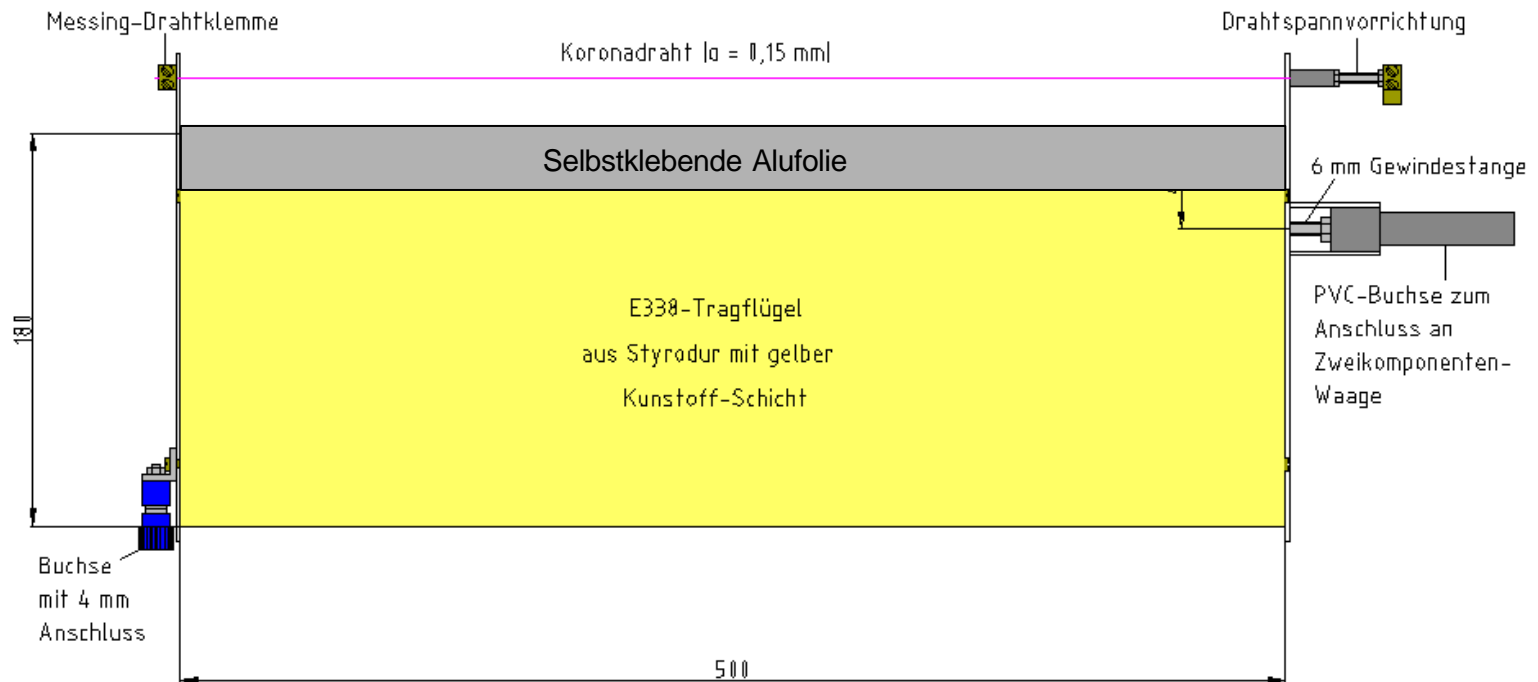
Rückseite eines Piezoaktuators mit Verdrahtung.



2D-Flügel mit NACA 0012 Profil und integrierten piezoelektrischen Aktuatorelementen.

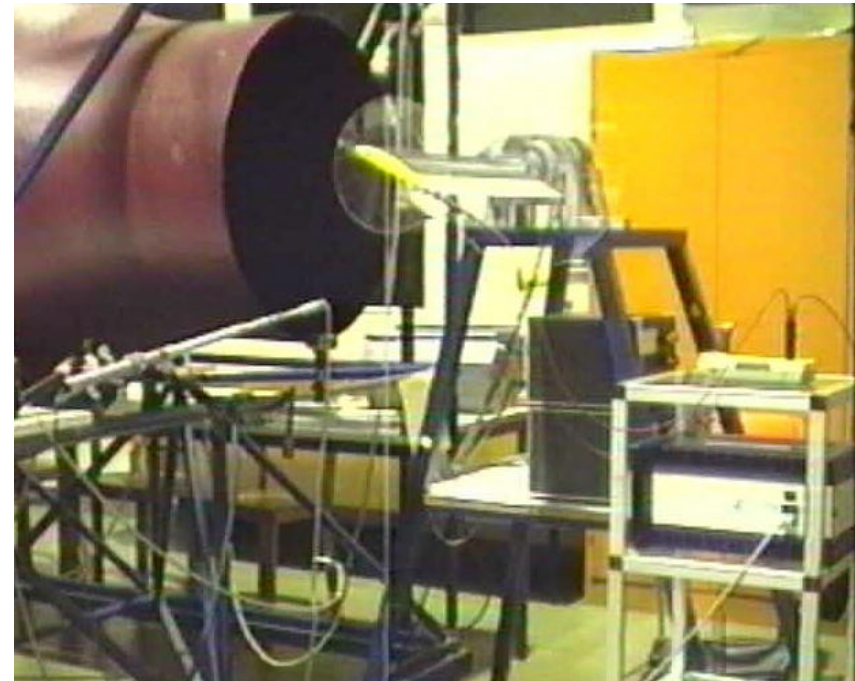
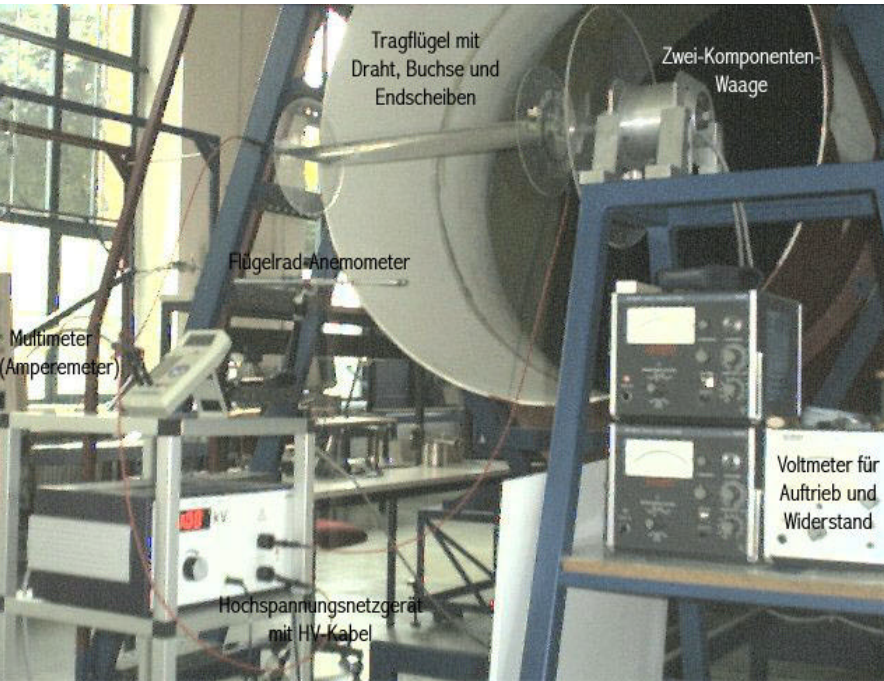
## 2. Aktive Kontrolle durch elektrostatische Felder

Beschleunigung ionisierter Luft im elektrischen Spannungsfeld zur Stabilisierung der laminaren Grenzschicht



Geschwindigkeitsbereich im Versuch: 1,1 - 11,0 m/s  
Reynoldszahlbereich bei 17,8 cm Profiltiefe: 13250 - 132500

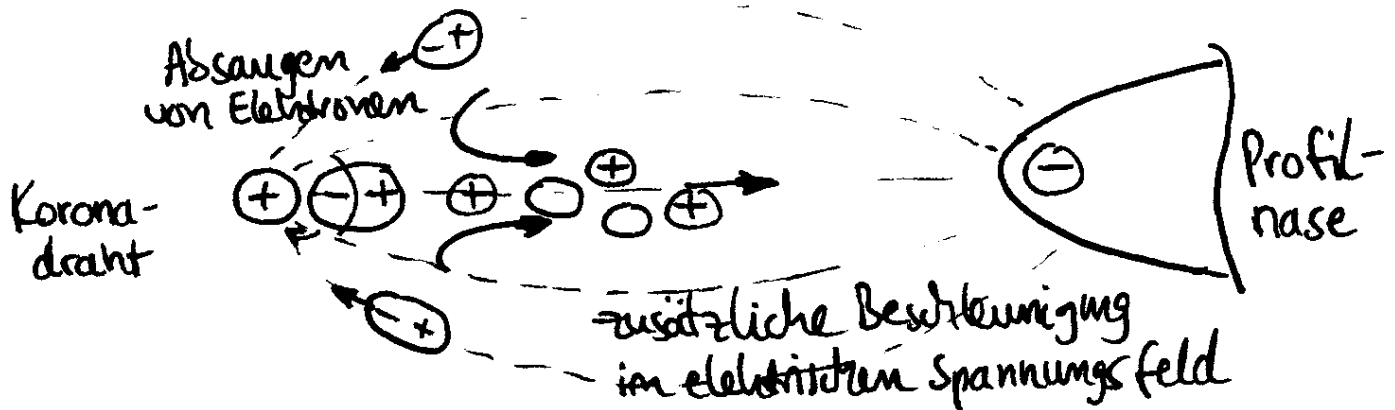
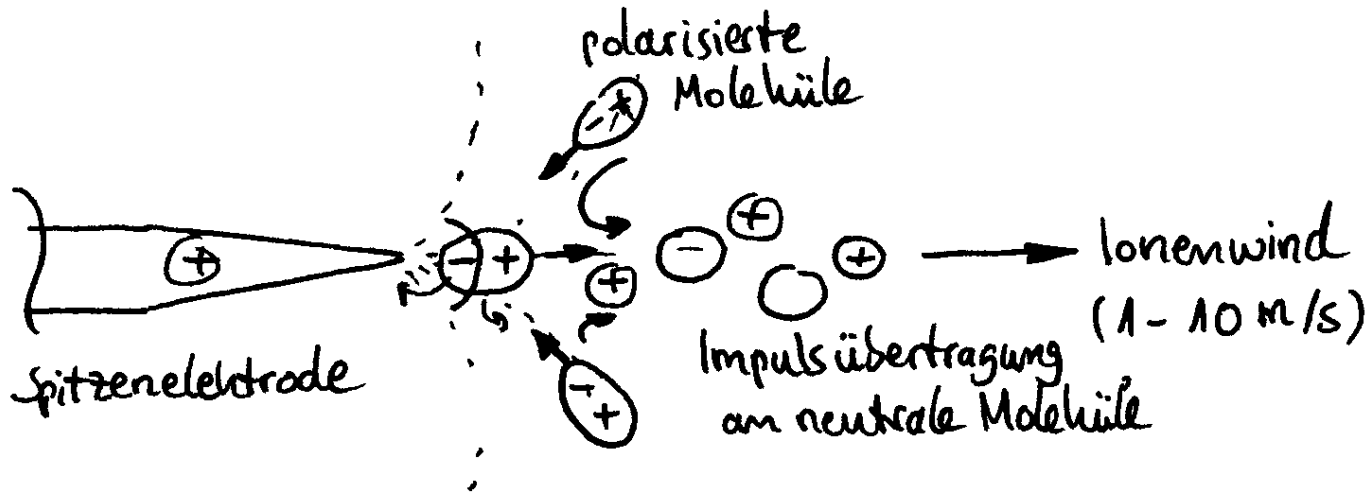
# Versuchsaufbau am Institut für Bionik der TU Berlin



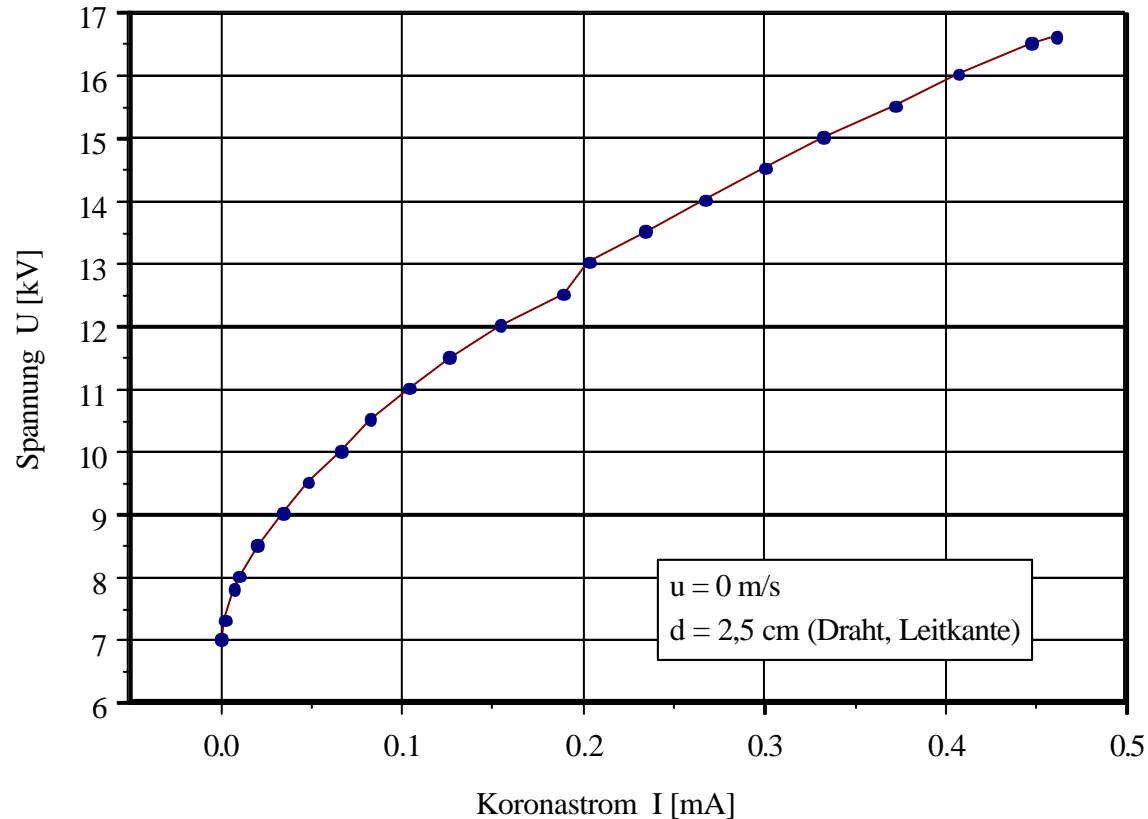
**Großer Windkanal** mit Auslassdüse  $d = 1200$  mm. Minimalgeschwindigkeit: 5 m/s  
Maximalgeschwindigkeit: 15 m/s

**Kleiner Windkanal** mit Auslassdüse  $d = 600$  mm. Minimalgeschwindigkeit: 0 m/s  
Maximalgeschwindigkeit: 6 m/s

# Mechanismus der Luftionisation am Koronadraht



# Strom-Spannungsverlauf für Koronadraht $a = 0.15 \text{ mm}$



Strom-Spannungs-Verlauf für Koronadraht mit Durchmesser  $a = 150 \mu\text{m}$  und Elektroden-Abstand  $d = 25 \text{ mm}$  zur Leitkante bei  $u = 0 \text{ m/s}$ .

Bei konstantem Drahtdurchmesser ist die **Geschwindigkeit des Ionenwindes** *proportional* der **Wurzel des Koronastroms**

## Elektrische Leistung pro 50 cm Draht:

$$I = 0,48 \text{ mA}, U = 16,5 \text{ kV} \rightarrow P = 7,9 \text{ Watt}$$

$$I = 0,30 \text{ mA}, U = 14,4 \text{ kV} \rightarrow P = 4,3 \text{ Watt}$$

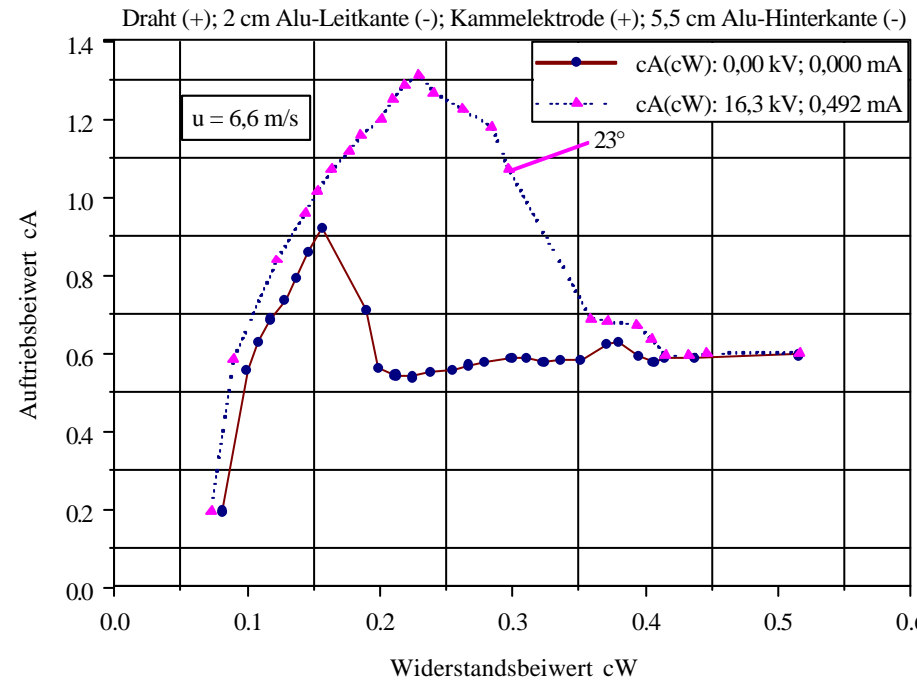
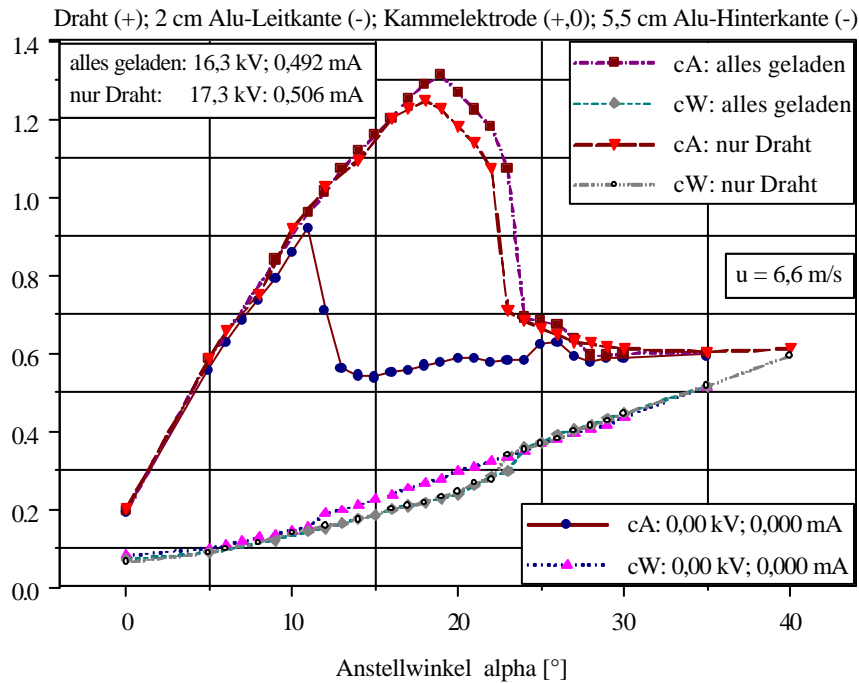
$$I = 0,24 \text{ mA}, U = 13,4 \text{ kV} \rightarrow P = 3,2 \text{ Watt}$$

## Ziel zur MAV-Anwendung:

Möglichst feine Mikrospitzen zur Reduzierung der Leistung bei konstantem Koronastrom.

# Ablöseverzögerung und Auftriebsgewinn bei $u=6,6$ m/s

- Auftriebsgewinn bei  $\alpha = 19^\circ$  beträgt 127%
- Widerstandsbeiwert sinkt um 18%.  
→ Steigerung der aerodynamischen Güte um 177%.
- Bei  $\alpha = 0^\circ$  mit E-Feld Widerstandsreduktion von 10,1 %



Zuschaltung der Kammelektrode an Hinterkante hat Wirkung einer Strahlklappe.

# Ablöseverzögerung und Auftriebsgewinn bei $u=5,5$ m/s

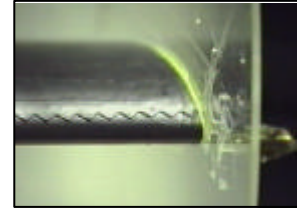
-Turbulenzgenerator verzögert laminare Ablösung bis  $\alpha = 21^\circ$ .

Aber: - maximale Auftriebsbeiwert 15% niedriger als mit Koronaentladung

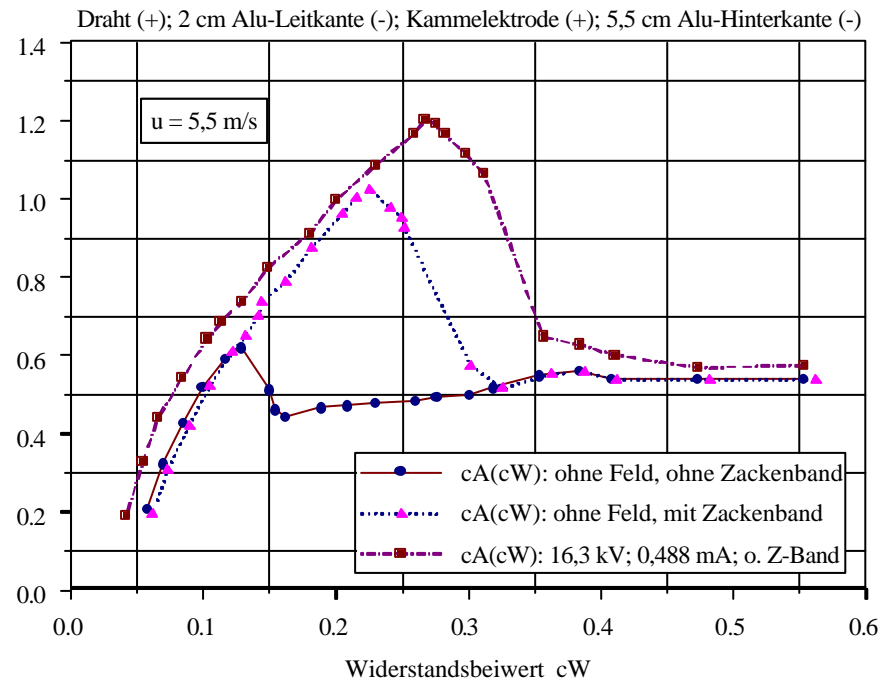
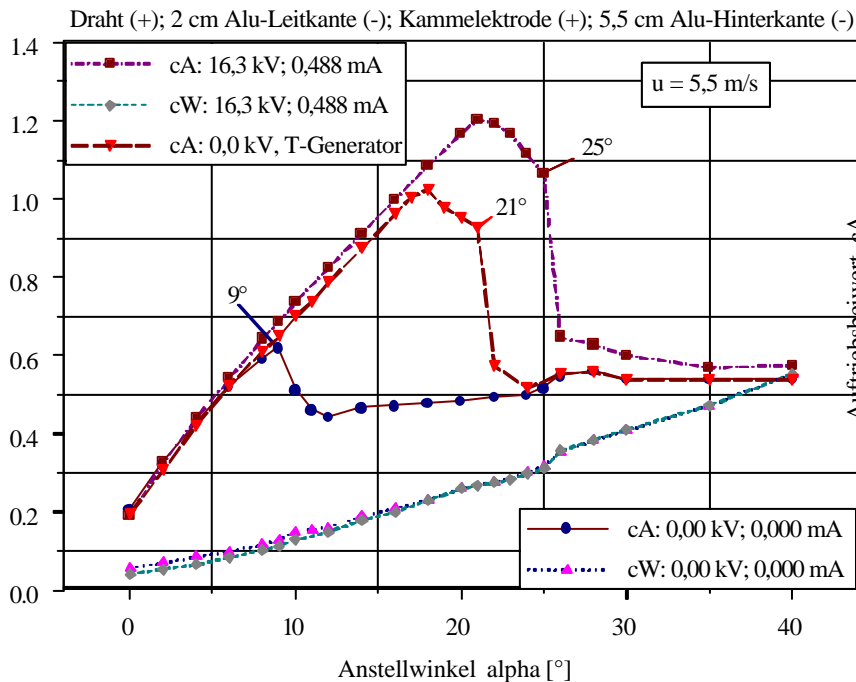
- Widerstandserhöhung bei unkritischen Anstellwinkeln.

Bei  $\alpha = 0^\circ$  steigt Widerstandsbeiwert um 6,6 %.

→ Verschlechterung der aerodynamischen Güte um 11,8%

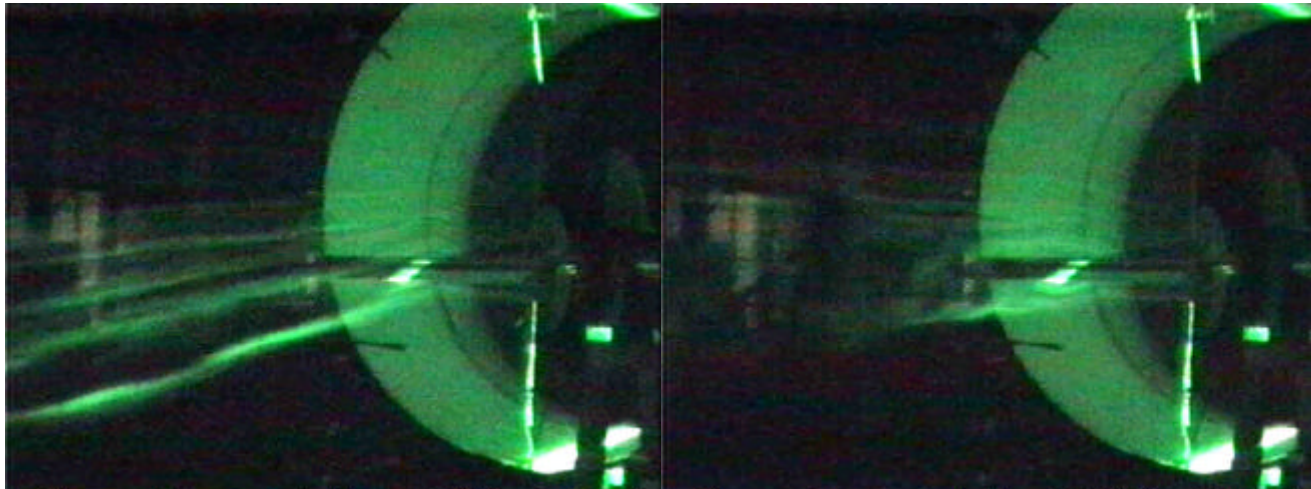


Turbulenzgenerator



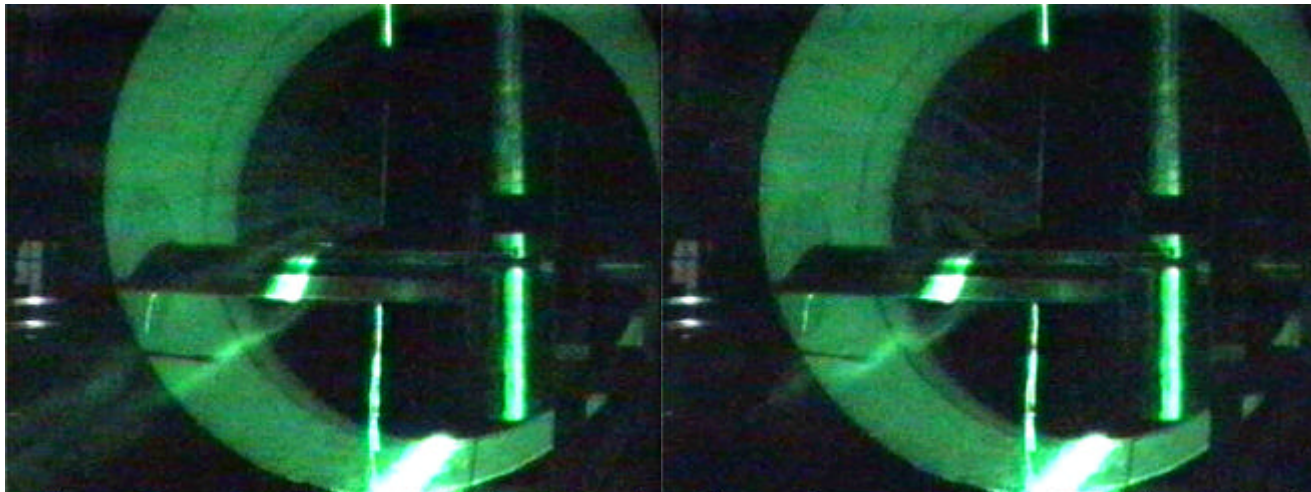
Bei  $\alpha=0^\circ$  mit Koronaentladung (ohne Turbulenzgenerator) Abnahme des Widerstandsbeiwertes um 28%.

# Rauchvisualisierung im Laserlichtschnitt



$\alpha = 12^\circ$ ;  $u = 6,6 \text{ m/s}$ ;  $U = 16,3 \text{ kV}$ ;  $I = 0,492 \text{ mA}$

$\alpha = 12^\circ$ ;  $u = 6,6 \text{ m/s}$ ;  $U = 0,00 \text{ kV}$ ;  $I = 0,000 \text{ mA}$



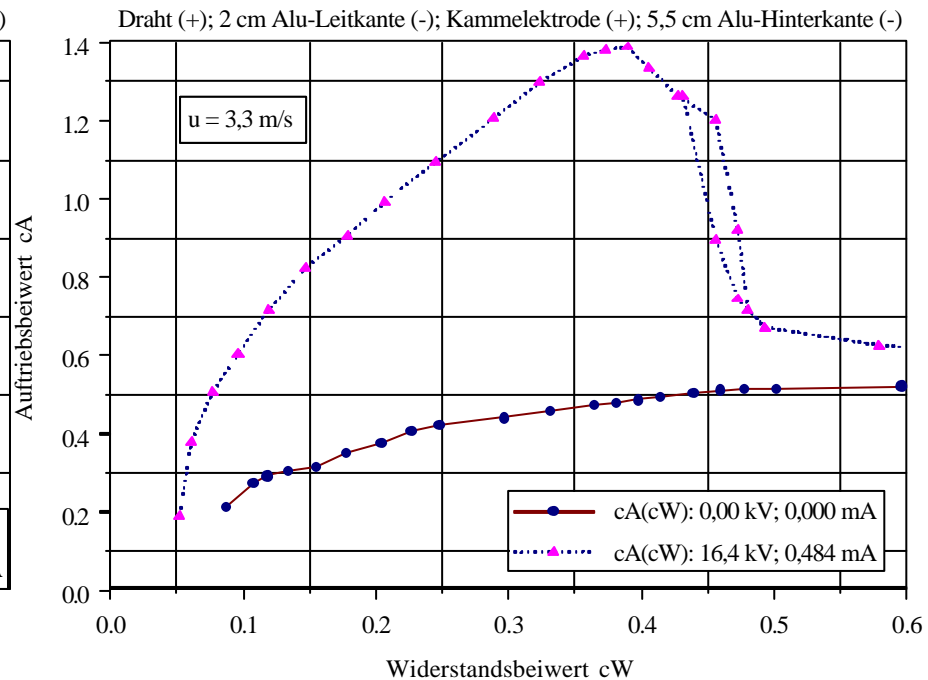
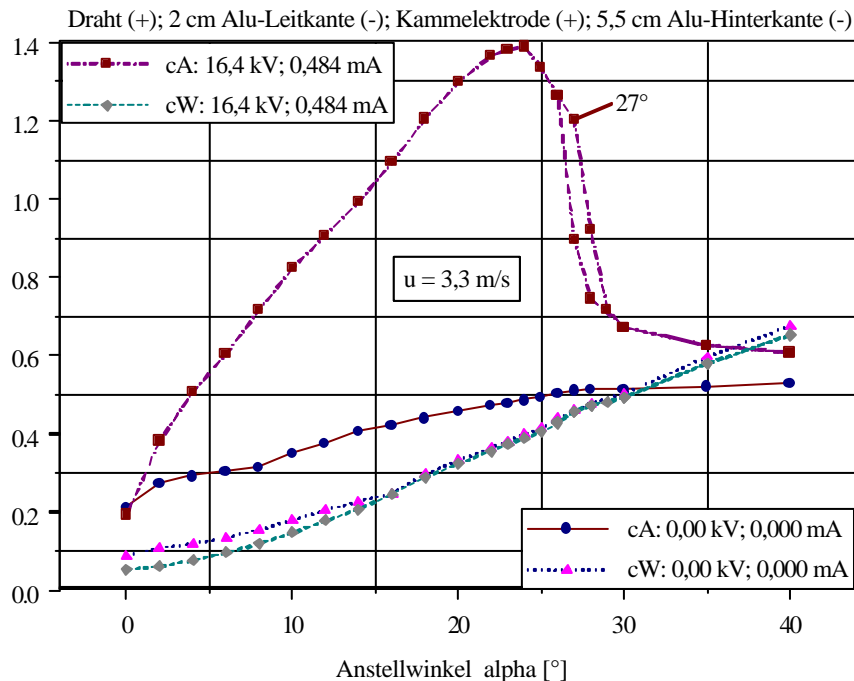
$\alpha = 20^\circ$ ;  $u = 6,6 \text{ m/s}$ ;  $U = 16,6 \text{ kV}$ ;  $I = 0,497 \text{ mA}$

$\alpha = 20^\circ$ ;  $u = 6,6 \text{ m/s}$ ;  $U = 0,00 \text{ kV}$ ;  $I = 0,000 \text{ mA}$

Bis  $\alpha = 15^\circ$  kann Strömung wie fluidische Flip-Flop-Schaltung abgelöst, angelegt und wieder abgelöst werden (siehe Videopräsentation).

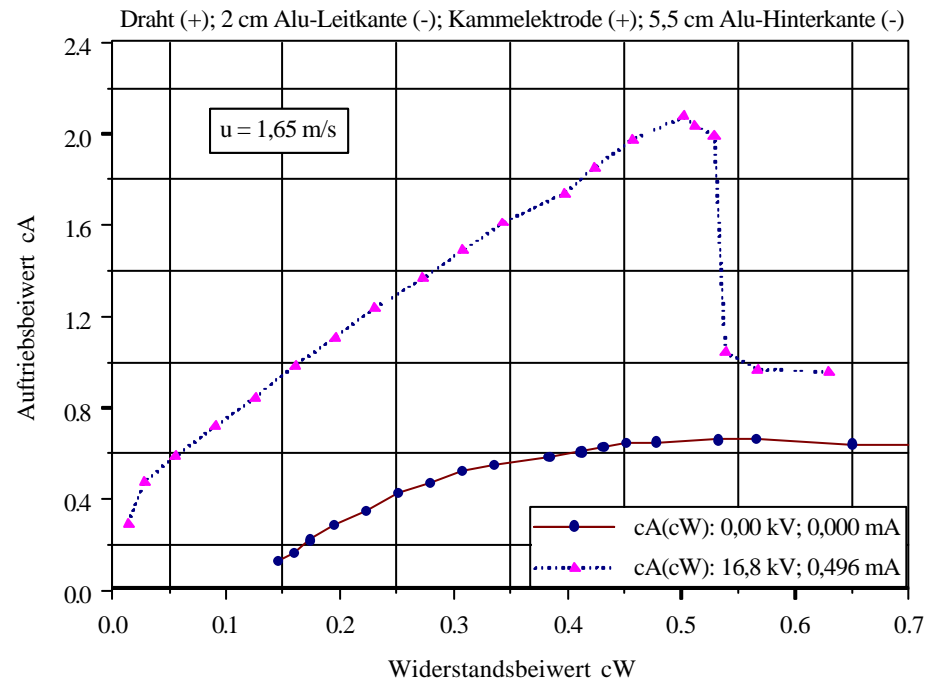
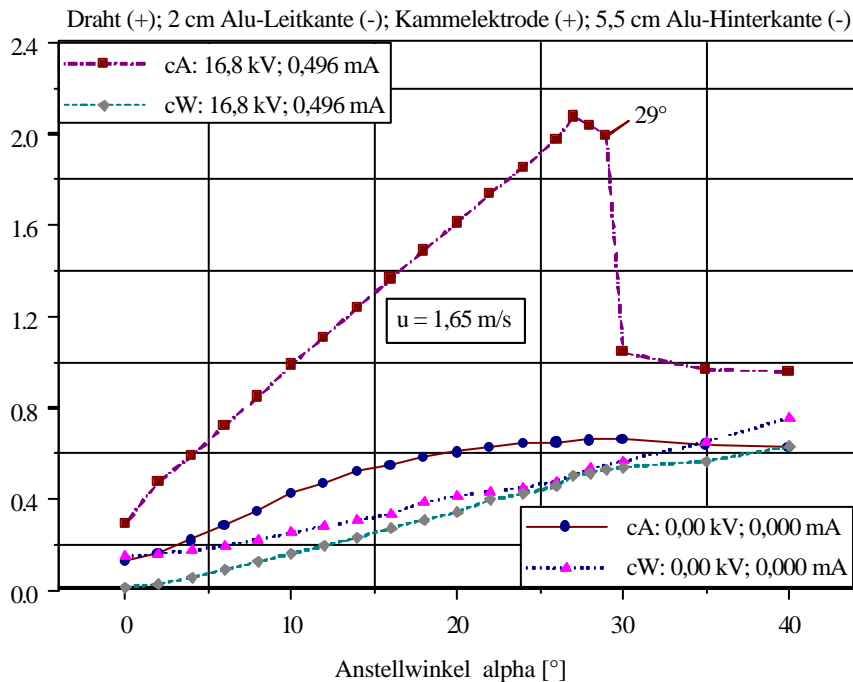
# Ablöseverzögerung und Auftriebsgewinn bei $u=3,3$ m/s

- bei  $u = 1,1 - 4,4$  m/s Turbulenzgenerator ohne Wirkung auf laminare Ablösung
- Koronaentladung zeigt dramatische Wirkung auf Auftriebs- und Widerstandsbeiwert
- bei  $\alpha = 23^\circ$  maximaler Auftriebsgewinn von 191%
- bei  $\alpha = 0^\circ$  Widerstandsbeiwert um 40% verringert
- bei  $\alpha = 4^\circ$  aerodynamischen Güte um 170% und bei  $\alpha = 8^\circ$  um 198% erhöht



# Ablöseverzögerung und Auftriebsgewinn bei $u=1,65 \text{ m/s}$

- bei  $\alpha = 27^\circ$  maximaler Auftriebsgewinn von 220% ,  $cA_{\text{max}} = 2,07$
- bei  $\alpha = 0^\circ$  Widerstandsbeiwert um 90,5% verringert  
 Auftriebsbeiwert um 133% erhöht  
 → Erhöhung der aerodynamischen Güte um 2350%



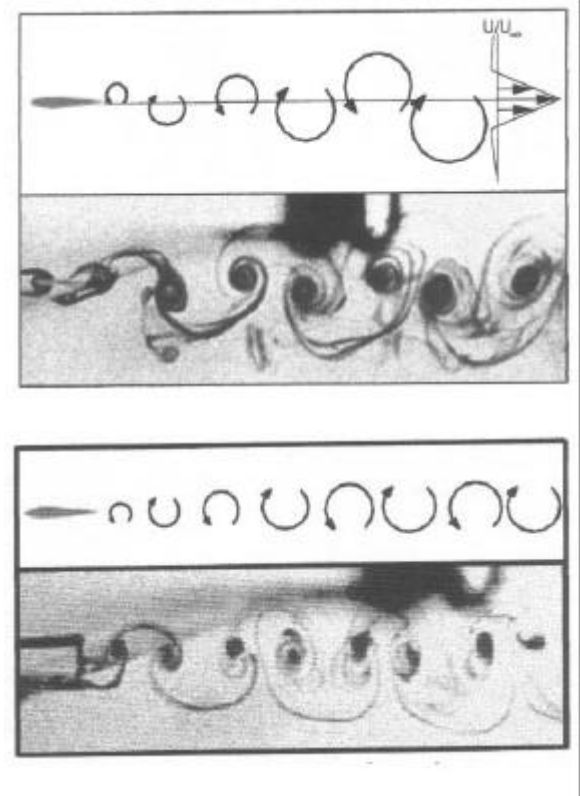
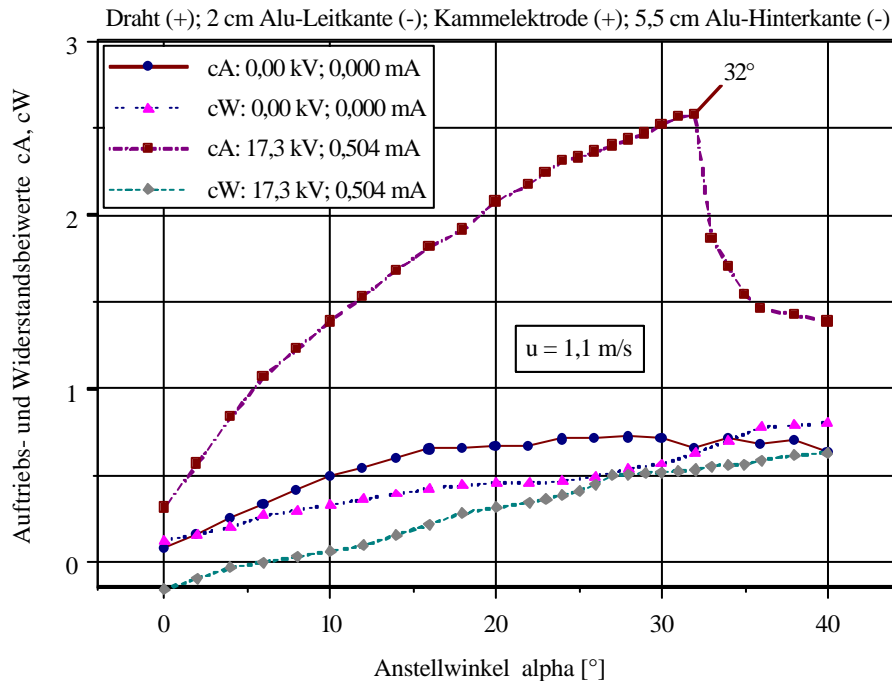
Ionenwind erzeugt durch Beschleunigung der Saugseite eine zusätzliche Zirkulation (Superzirkulation).

Ionenwindgeschwindigkeit liegt nun im Bereich der Anströmgeschwindigkeit.

# Ablöseverzögerung und Auftriebsgewinn bei $u=1,1$ m/s

- bei  $\alpha = 32^\circ$  Auftriebsgewinn von 293%, maximaler Auftriebsbeiwert von 2,57
- bei  $\alpha = 0^\circ$  Widerstandsbeiwert sogar um 113% reduziert

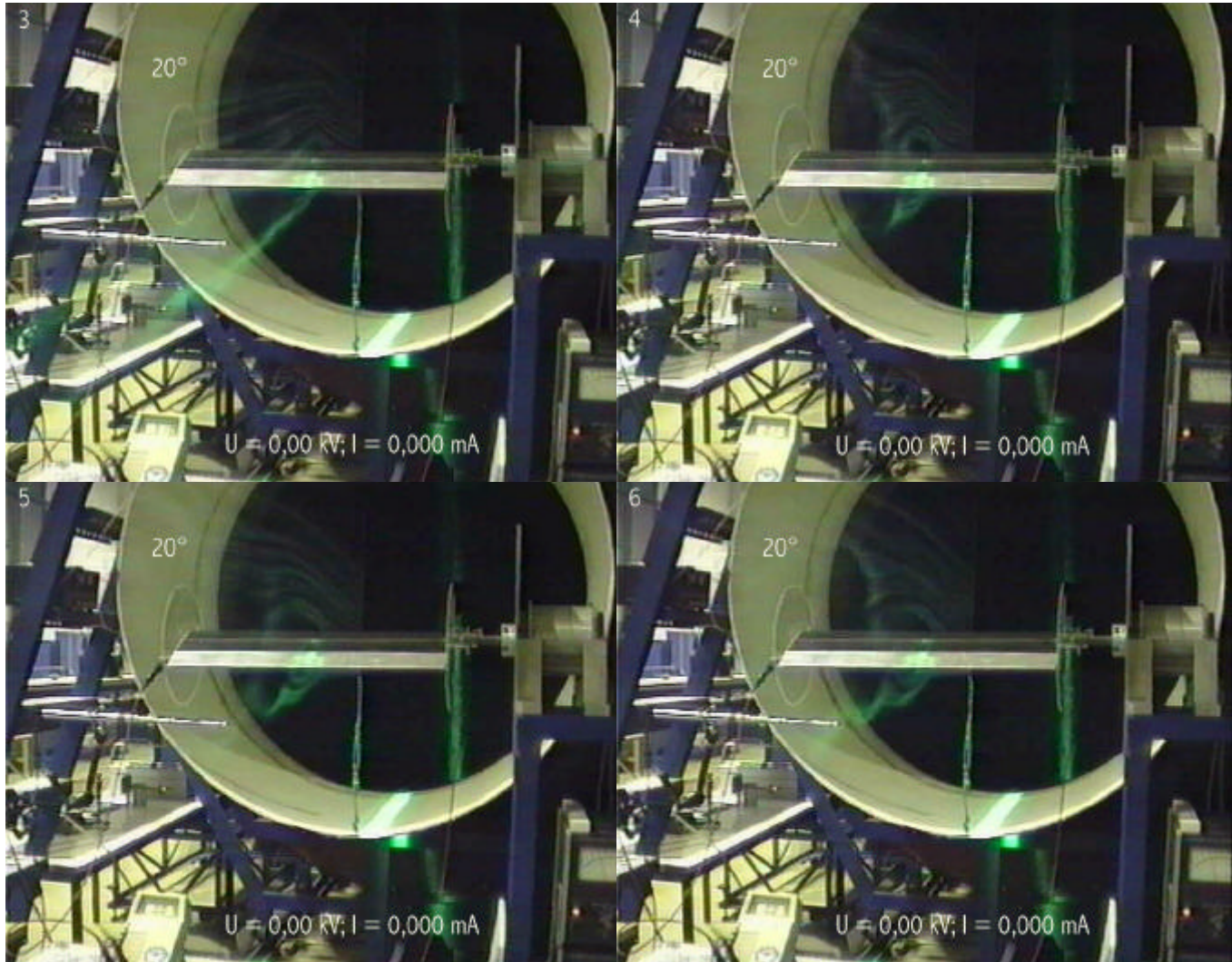
→ Tragflügel erzeugt bis  $\alpha = 6^\circ$  Schub !!



Ionenwindgeschwindigkeit > Anströmgeschwindigkeit

Wirbelstraße mit Schub und Nullwiderstand (Quelle: Jones, K. D.)

# Bildsequenzen zur Rauchvisualisierung



Kontrollierte Ablösung zum Studium der Wirbelentwicklung nutzbar.

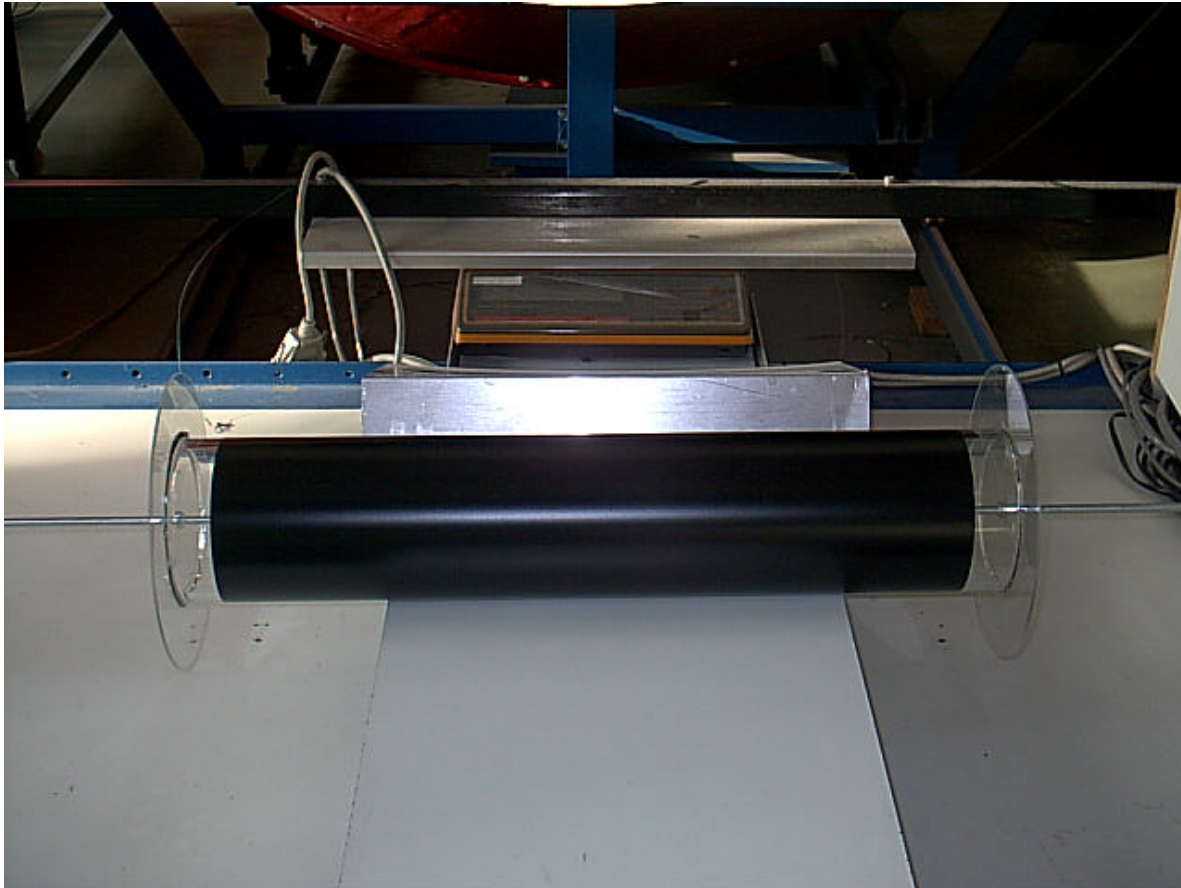
# Videopräsentation

[electrofluid1.avi](#)

[plasmaloudspeaker.mpeg](#)

**Ausblick**

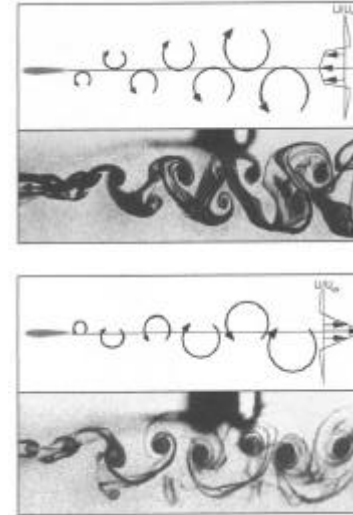
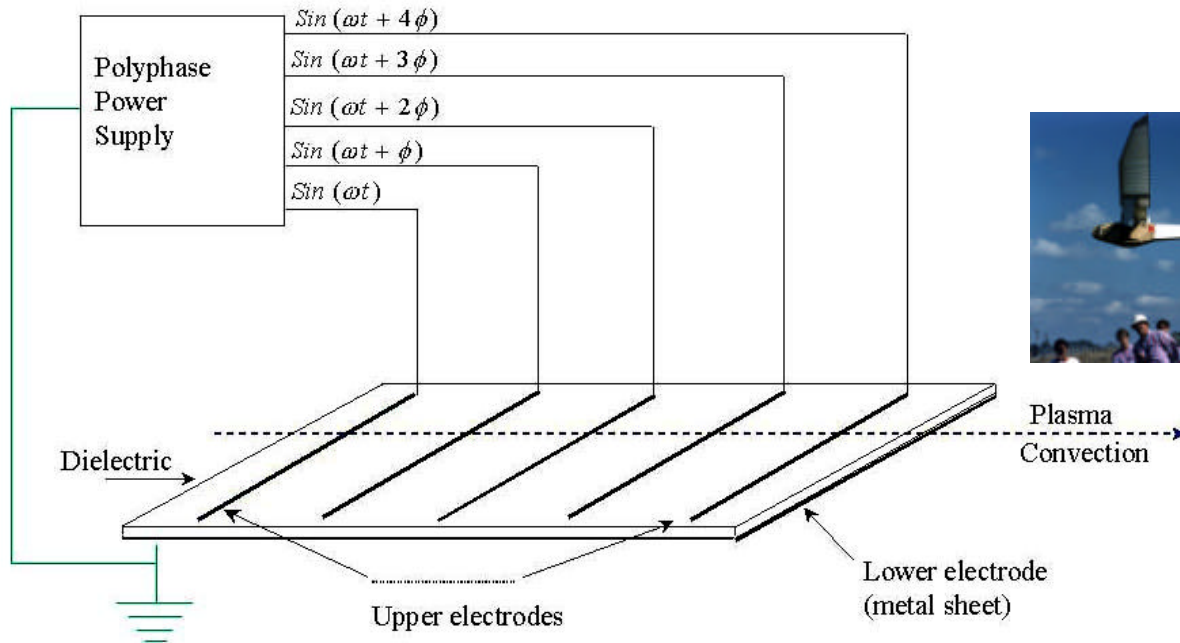
# Elektroaerodynamischer Coanda Effekt (ECE)



Experimente zur aktiven Kontrolle der Zylinderumströmung mittels elektrischer Felder am Institut für Bionik und Evolutionstechnik, TU Berlin

# Instationärer Auftrieb und Vortrieb durch elektrokinetischen Wellantrieb

Mögliche Starrflügel-Simulation (bionische Umsetzung) des mechanischen Wirbelantriebs durch schwingende („schlagende“) elektrostatische Solitonen-Wanderfelder.



Wirbelstraße bei Widerstand Schub (Quelle: Jones, K. D.)

Peristaltischer Plasma-Beschleunigung mittels elektrostatischer Wanderwellen (Quelle: Karakaya et al.)

- Pumpgeschwindigkeit bis zu 100 m/s erreichbar
- Heutige MAVs fliegen mit maximal 25 m/s.

Ist die Entwicklung einer rein elektrokinetisch angetriebenen Minidrohone möglich?

# Miniaturisierte Feldelektronenemitter

## Kalte Feldelektronenemission aus mikrostrukturierten Oberflächen (Fowler-Nordheim Tunneleffekt):

- Einsatz von organischen Oberflächenfilmen aus Carbon Nano Tubes
- Einsatz von mikrostrukturierten Metalfolien mit Carbon-Schutzschicht (amorphe Diamantschicht)

→ Bereits bei niedrigen Hochspannungen können Emissionen von mehr als  $3 \text{ mA/cm}^2$  erreicht werden (vgl. Grundlagenexperiment mit Koronadraht mit max. Stromdichte von  $0.5 \text{ mA}/2.4 \text{ cm}^2$ ).  
Hochenergetisierte Diamantemitter erreichen sogar  $\text{kA/cm}^2$ .

Stichworte: Field (Electron) Emission, Multi-Wall Carbon Nanotube Films, Emitting Diamond Films, Microfabricated Emitters, Carbon Cold Cathode, Solid State Emitter