

# Aktive Strömungskontrolle mittels oberflächenbündiger Plasma-Aktuatoren

---

B. Göksel, I. Rechenberg  
Institut für Bionik und Evolutionstechnik  
Technische Universität Berlin

<http://www.bionik.tu-berlin.de>  
<http://www.elektrofluidsysteme.de>

14th DGLR-Syposium of STAB  
16.-18. November 2004, Bremen

# Inhalt

---

1. Einführung in die Elektrofluiddynamik
2. Versuche mit Plasma-Aktuatoren
3. Zusammenfassung
4. Ausblick

# 1. Einführung in die Elektrofluidodynamik

## Kalte Plasmaerzeugung durch Elektronenstoßionisierung

$$E_{kin} = e \cdot E \cdot \lambda > E_{ex} \quad (\text{im Bereich von einigen Elektronenvolt } eV = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J})$$

**e:** Elementarladung

**E:** angelegte elektrische Feldstärke

**$\lambda$ :** mittlere freien Weglänge

**$E_{kin}$ :** kinetische Energie

Mit abnehmender freier Weglänge  $\lambda$ , d. h. mit steigendem Druck, wird zunehmend höhere elektrische Feldstärke  $E$  und damit (bei konstantem Elektrodenabstand) ein erhöhter Energieaufwand benötigt.

Bei Atmosphärendruck ( $\lambda \approx 10^{-5} \text{ cm} = 0,1 \text{ } \mu\text{m} = 100 \text{ nm}$ ) wird eine mittlere kinetische Energie von bis zu 10 eV benötigt.  $\rightarrow E = 10^4 - 10^6 \text{ V/cm}$

Es gilt:  $E = U/d$  und  $P = U \cdot I$

Beispiel:  $E = 10000 \text{ V} / 10 \text{ mm} = 10^4 \text{ V/cm}$  (Aktueller Versuchsbereich)

$$E = 1000 \text{ V} / 1 \text{ mm} = 10^4 \text{ V/cm}$$

$$E = 100 \text{ V} / 100 \text{ } \mu\text{m} = 10^4 \text{ V/cm}$$

$$E = 1 \text{ V} / 1 \text{ } \mu\text{m} = 10^4 \text{ V/cm}$$

$$E = 100 \text{ mV} / 100 \text{ nm} = 10^4 \text{ V/cm} \quad (\text{Bereich von Zellpotentialen})$$

$\rightarrow$  Die Natur kann nur mit Nanostrukturen elektrokinetische Effekte realisieren.

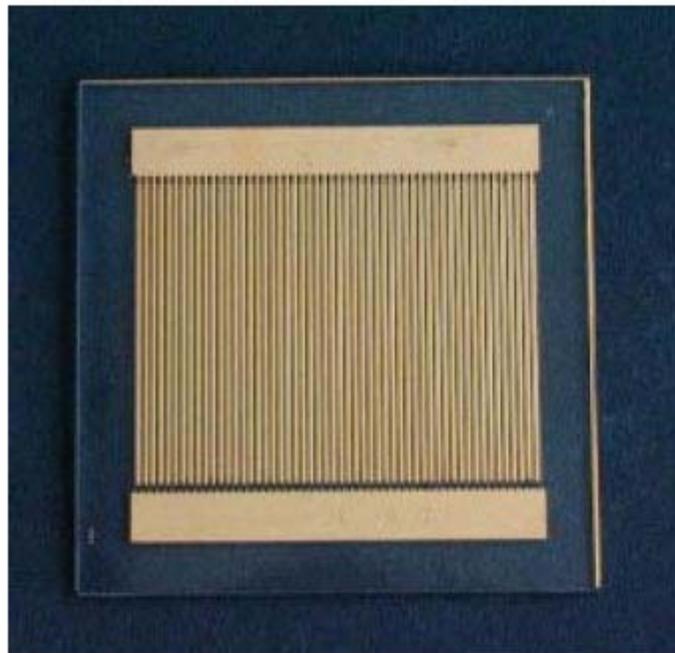
# 1. Einführung in die Elektrofluidodynamik

**Wie kann man mit moderaten Hochspannungen Atmosphärenplasmen erzeugen?**

Verringerung des Elektrodenabstandes  $d$

→ Hohe Ansprüche an die Fertigungstechnik

Mikrostrukturierte Elektrodensysteme erreichen bereits Elektrodenabstände von 10 – 2000  $\mu\text{m}$



**Abbildung 4.3-1. Typ L-RH**  
Mikroelektroden-Array (50 mm × 50 mm).  
– Goldelektroden auf AF-45-Glasträger,  
Hersteller: Radeberger Hybridelektronik  
GmbH.

# 1. Einführung in die Elektrofluiddynamik

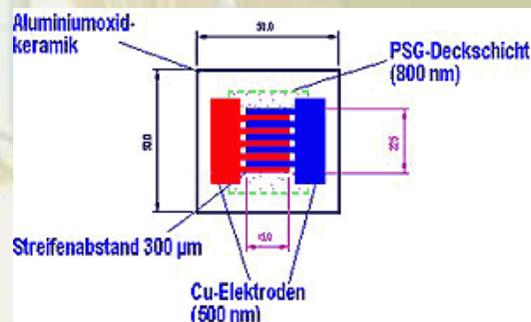
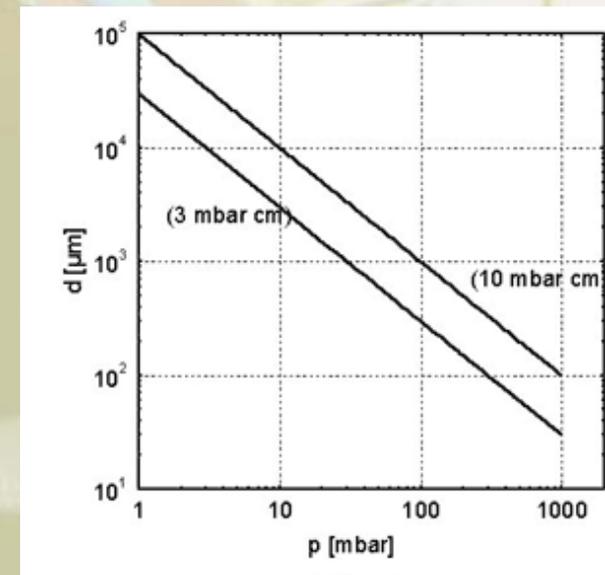
## Atmosphärische Plasmen mit 100 V durch Skalierung des Elektrodenabstands

Ähnlichkeitsbeziehung nach Paschen:

$$p1 \cdot d1 = p2 \cdot d2 = \text{konstant}$$

Elektrodenabstand  $d2$  so skalieren, dass die Entladung bei einem Gasdruck  $p2 = 1000$  mbar betrieben werden kann, wobei für das Produkt  $p1 \cdot d1$  typische, aus dem Niederdruckbereich bekannte Werte von  $3 \text{ mbar} \cdot \text{cm}$  bis  $10 \text{ mbar} \cdot \text{cm}$  angesetzt werden.

Ergebnis in der Paschen-Kurve aufgetragen.



Erzeugung eines großflächigen Mikrostrukturelektrodenplasmas aus mehreren Mikrostrukturelektroden (Plasmafläche  $20 \times 120 \text{ m}^2$ )

Quelle: <http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/>

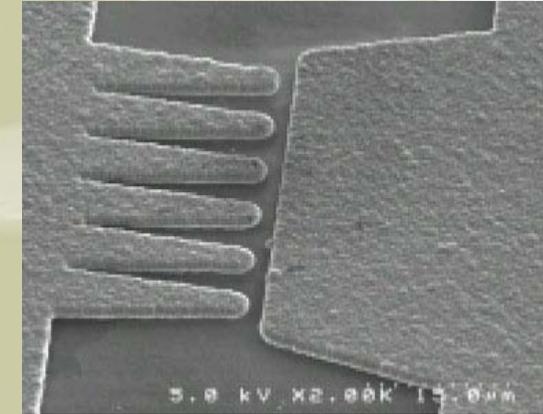
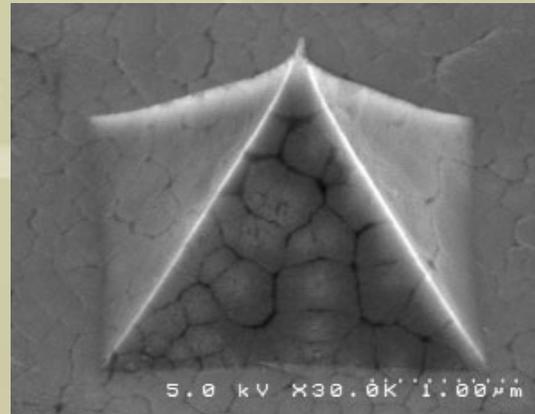
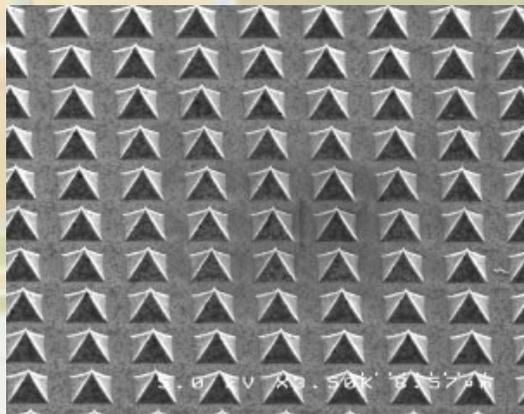
Gibt es Materialien mit selbststrukturierender Nano-Oberfläche?

# 1. Einführung in die Elektrofluidodynamik

**Einsatz von neuartigen kalten Feldelektronenemittern auf Kohlenstoff-Basis zur energieeffizienten Luftionisation bei Atmosphärendruck**

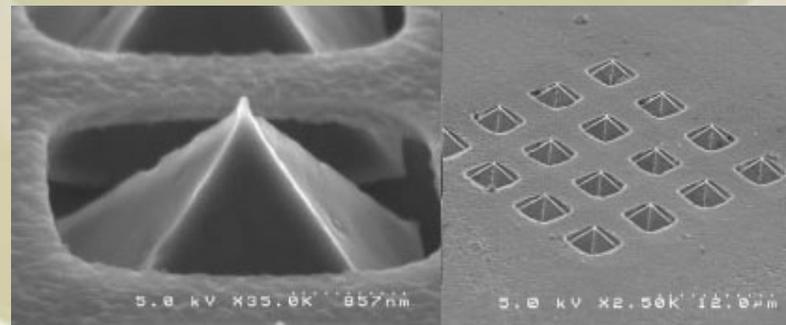
## Diamantemitter

Mikrostrukturierte polykristalline und amorphe Diamantoberflächen als effiziente Feldelektronenemitter zur Luftionisierung bei Atmosphärendruck mit  $< 100 - 300$  V.



Pyramidenfuß  
bei  $2\mu\text{m}$  Länge

Spitzenradius  
im nm-Bereich

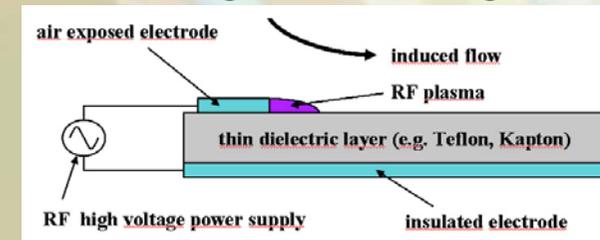


Elektrodenabstand  
bei  $1-2\mu\text{m}$  Länge in  
lateraler und vertikaler  
Elektrodenanordnung

# 1. Einführung in die Elektrofluidodynamik

Wie kann die Plasma-Grenzschicht einer Barriereentladung beschleunigt werden?

1. Paraelektrisch (mittels Feldgradienten)
2. Peristaltisch (mittels Wanderwellen)



Dielektrische Leiterplatten (Plasma Panel) mit Abmessungen 160 mm x 100 mm



1. Paraelektrisch (einphasiger Aktuator)



3. Paraelektrisch und peristaltisch.



2. Peristaltisch mit 8 Phasen und 2 Perioden.



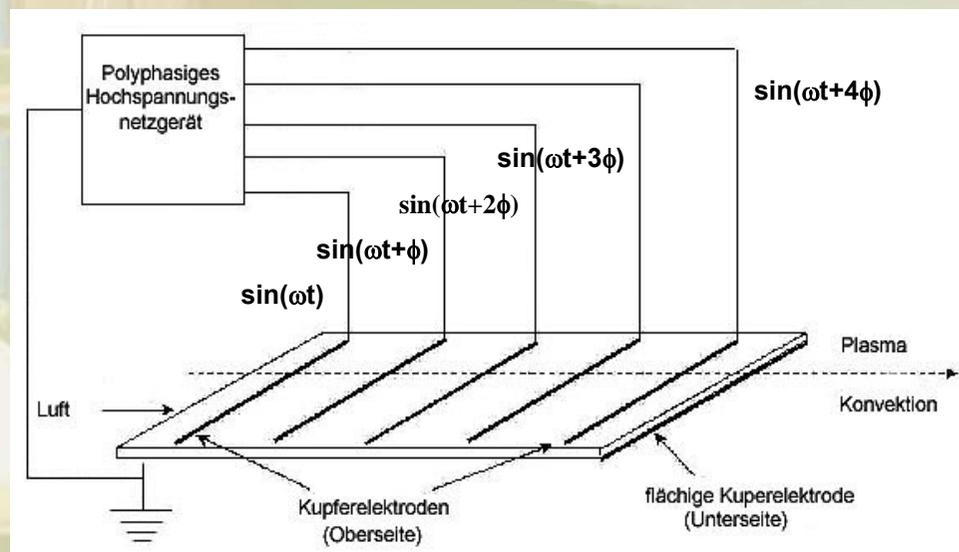
4. Gleichspannungsbeschleunigung.

# 1. Einführung in die Elektrofluidodynamik

## Erzeugung flächiger Ionenwinde durch *elektrostatische Wanderwellen*

- 1999 von Karakaya (University of Tennessee) erstmals zur Anwendung in der Aerodynamik beschrieben. Theoretisch Ionenwinde größer 100 m/s möglich.
- 2002 erstmals erfolgreich im Experiment von H. Sin (University of Tennessee) im Rahmen seiner M.S. Arbeit beschrieben (Ionenwindgeschwindigkeit von 6 m/s erreicht):

H. Sin (2002) *A Polyphase Power Supply and Peristaltic Flow Accelerator Using a One Atmospheric Uniform Glow Discharge Plasma*. M. S. in Electrical Engineering Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Tennessee, Knoxville.



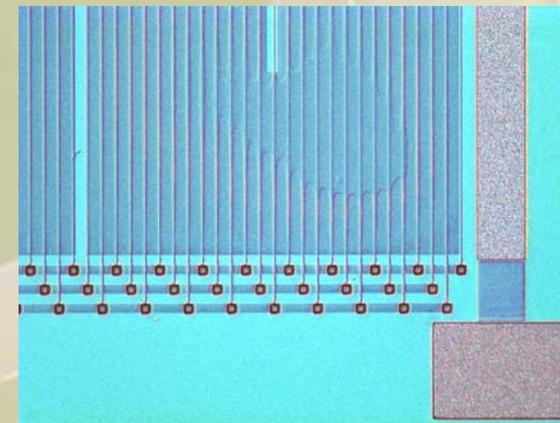
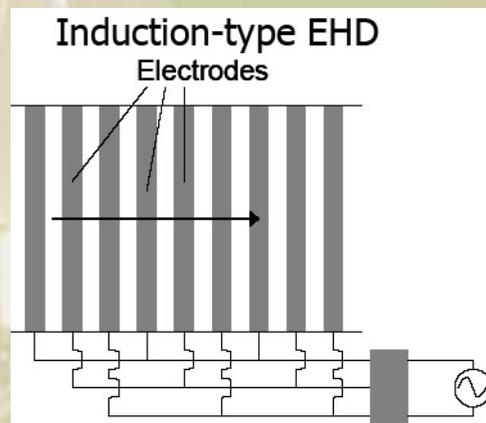
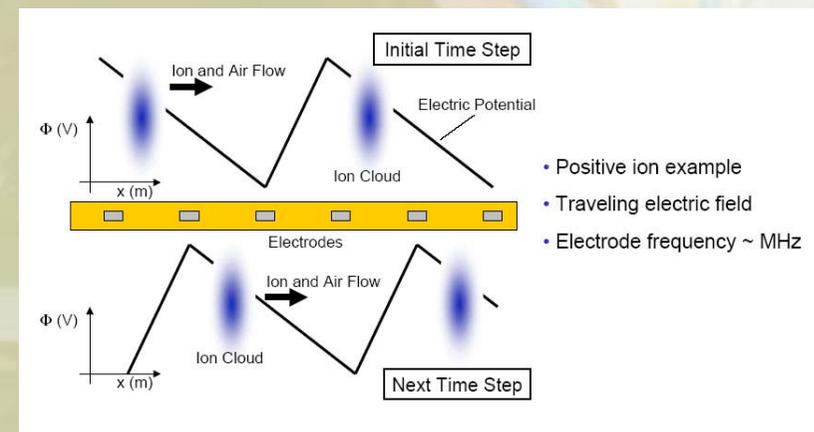
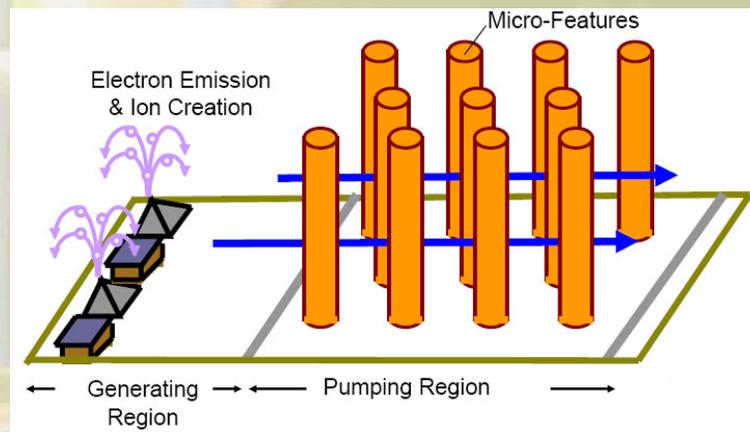
$$\phi = \frac{360^\circ}{N}$$

Mit N = Anzahl der Phasen pro Periode

# 1. Einführung in die Elektrofluiddynamik

## Erzeugung flächiger Ionenwinde durch *elektrostatische Wanderwellen*

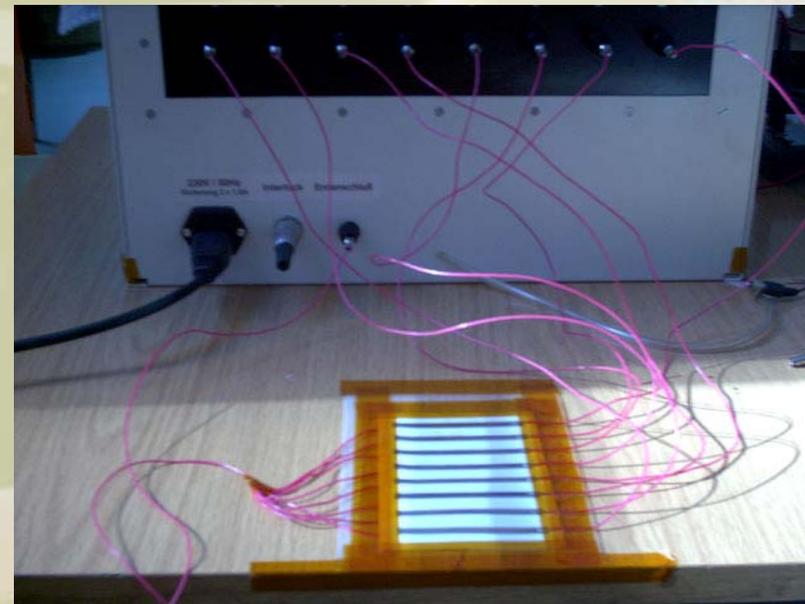
- 2003 von Peterson, Garimella, Fisher (Purdue University) erstmals Diamantemitter bei Atmosphärendruck zur Ionisation von Luft demonstriert – Anwendung zur Chipkühlung



## 2. Versuche mit Plasma-Aktuatoren

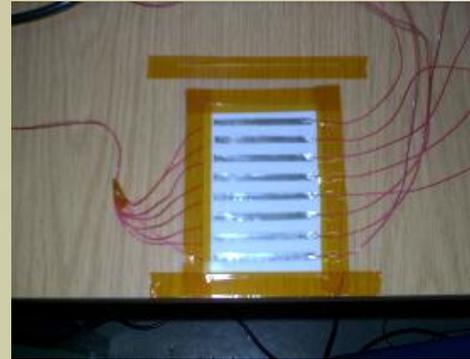
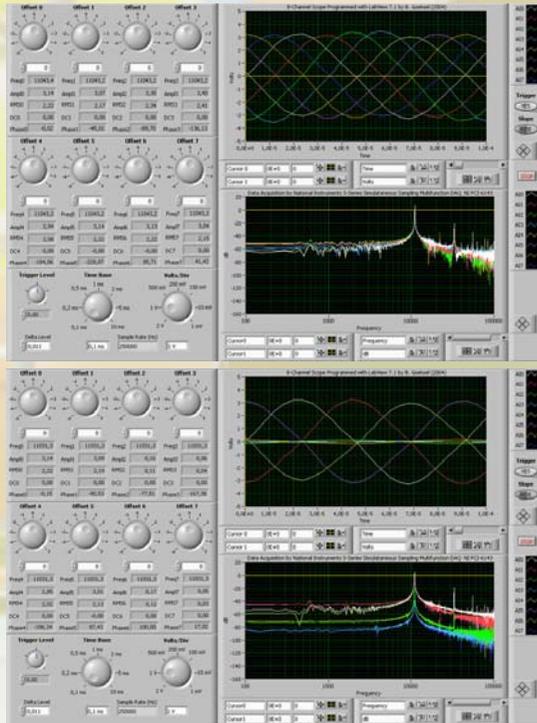
### Erzeugung von *elektrostatischen* Wanderwellen an der TU Berlin seit 2004

- *Elektrostatischer Wellantrieb* mittels *polyphasiger Plasma-Aktuatoren* gehört zu den 30 Gewinnerprojekten des BMBF-Ideenwettbewerb "*Bionik – Innovationen aus der Natur*"
- Erste Experimente mit oberflächenbündigen Plasma-Aktuatoren (0,50 mm dicke Teflon-Folie mit 0,07 mm dicken zinnbedampften Kupferelektroden) sind vielversprechend.
- Elektrodenabstand im mm-Bereich bei 9 mm  $\rightarrow U = 2000 - 4000$  V



## 2. Versuche mit Plasma-Aktuatoren

Erzeugung von *elektrostatischen Wanderwellen* an der TU Berlin seit 2004



Polyphasiger Plasma-Aktuator erzeugt bei 2.66 kV rms mit 11 kHz bereits genug Ionenwind, um eine kleine Flamme ganz auszublasen (siehe [Video](#)).



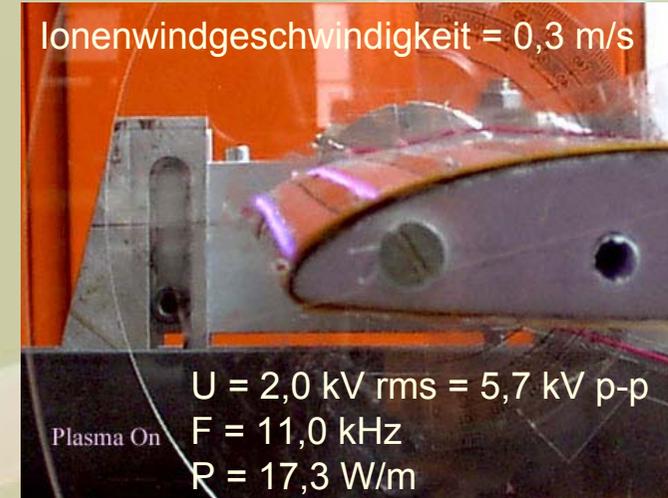
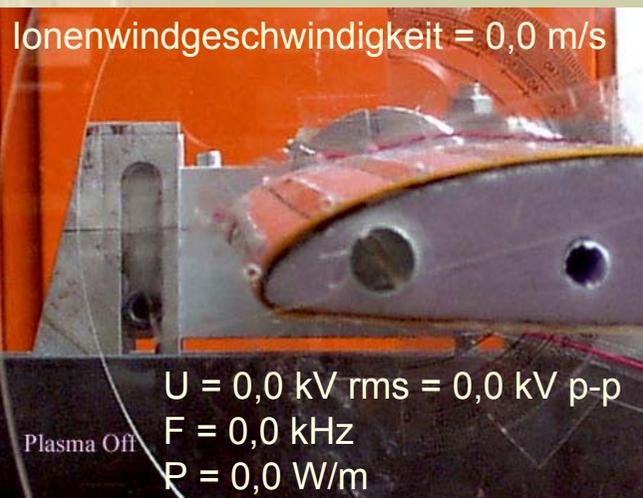
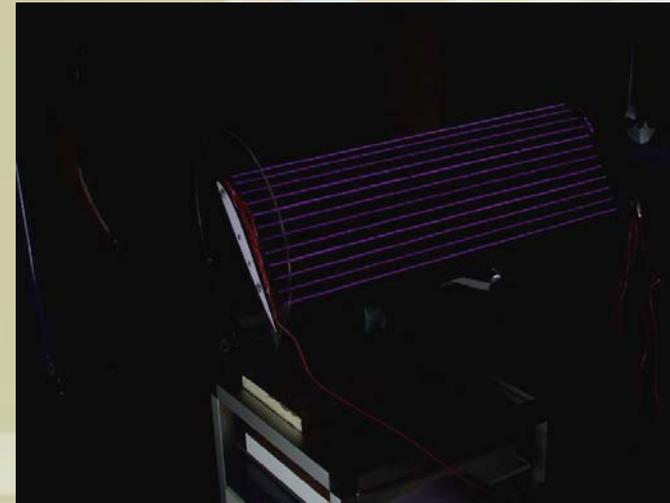
## 2. Versuche mit Plasma-Aktuatoren

### Aktive Strömungskontrolle am 2D-Tragflügel mit Eppler E338 - Profil



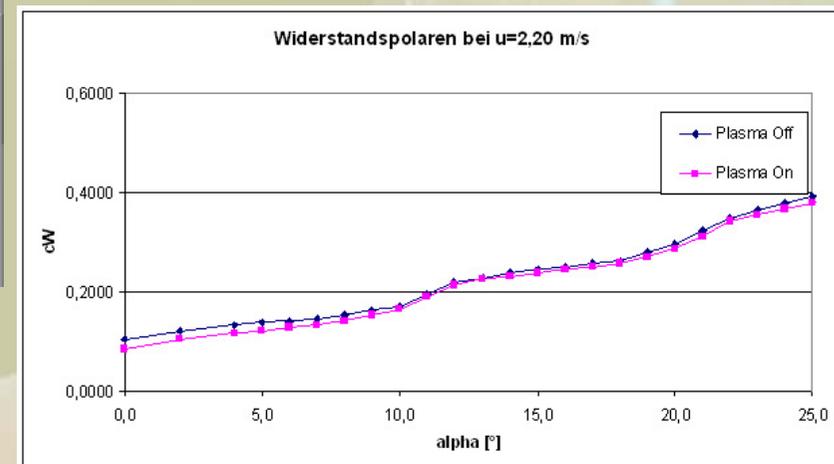
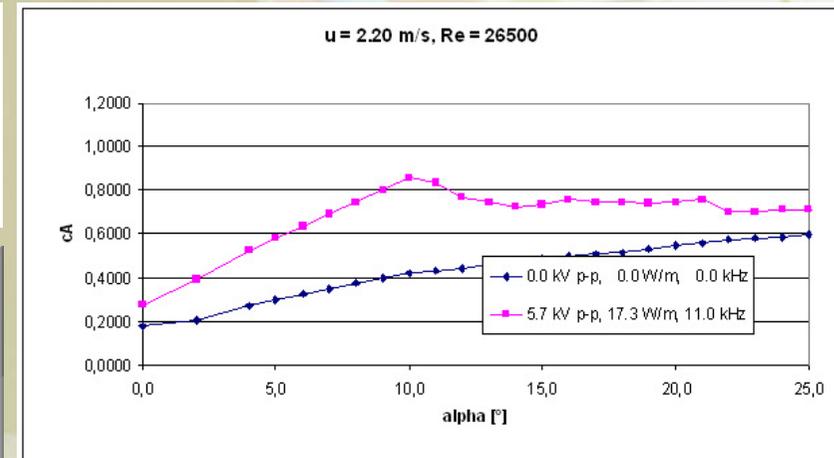
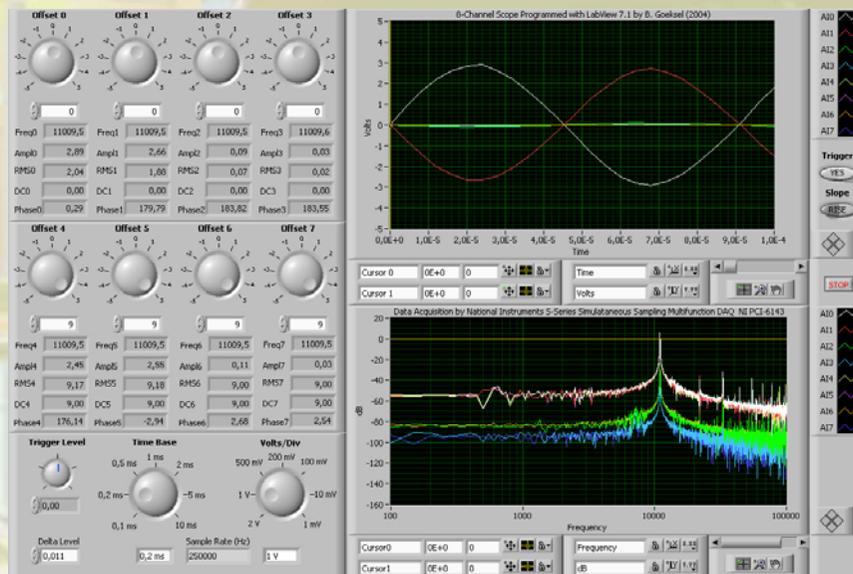
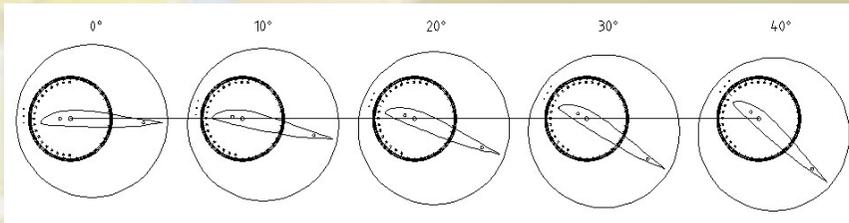
## 2. Versuche mit Plasma-Aktuatoren

### Aktive Strömungskontrolle am 2D-Tragflügel mit Eppler E338 - Profil



## 2. Versuche mit Plasma-Aktuatoren

### Aktive Strömungskontrolle am 2D-Tragflügel mit Eppler E338 - Profil

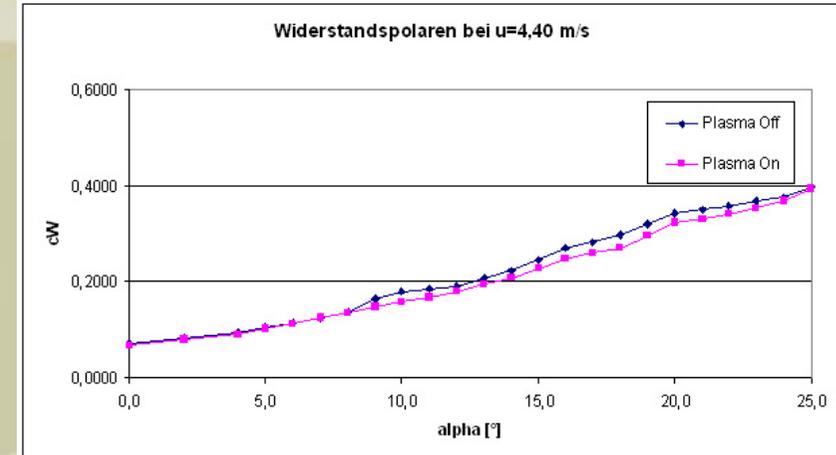
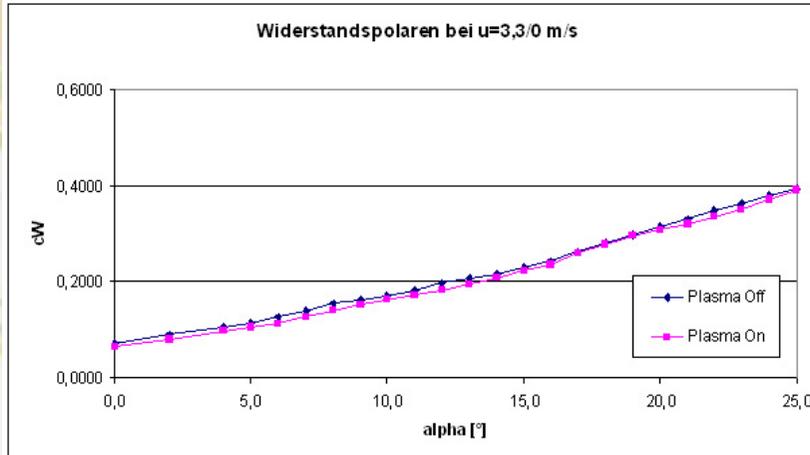
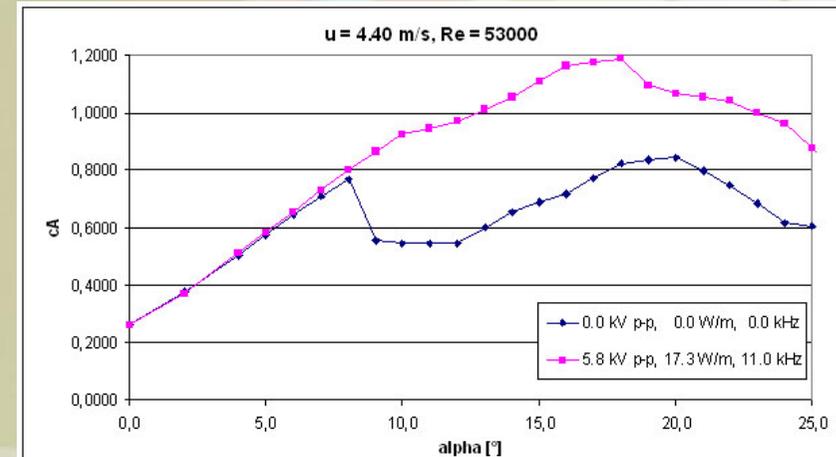
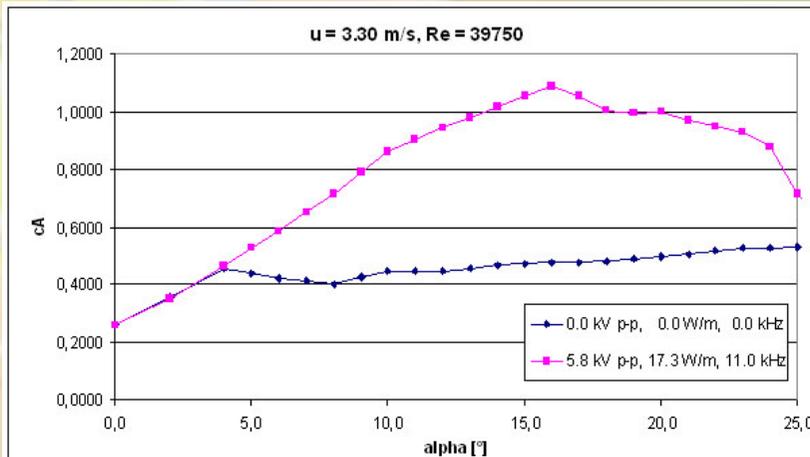


*Auftriebserhöhung um 57% bei  $\alpha=0^\circ$*

*Widerstandsreduktion um 17% bei  $\alpha=0^\circ$*

## 2. Versuche mit Plasma-Aktuatoren

### Aktive Strömungskontrolle am 2D-Tragflügel mit Eppler E338 - Profil



*Auftriebserhöhung um 129% bei  $\alpha=16^\circ$*

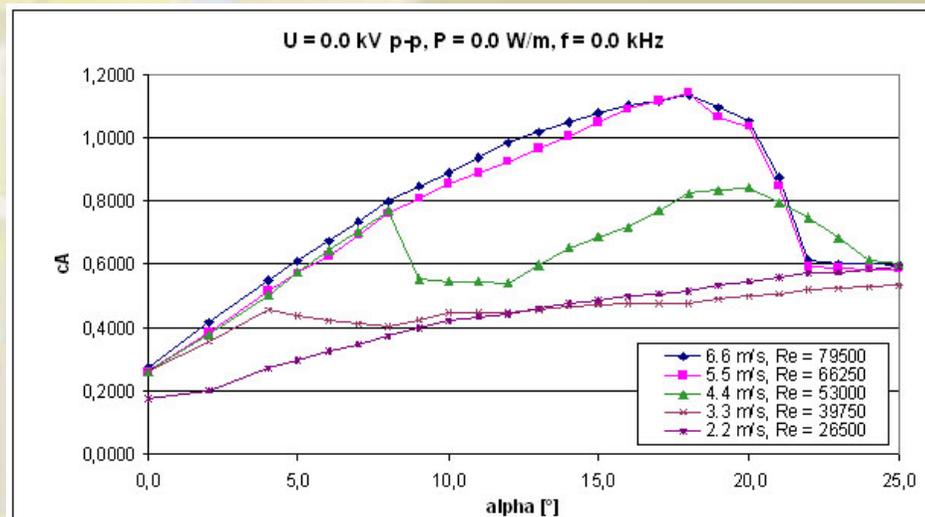
*Widerstandsreduktion um 11% bei  $\alpha=0^\circ$*

*Auftriebserhöhung um 78% bei  $\alpha=12^\circ$*

*Widerstandsreduktion um 6,4% bei  $\alpha=0^\circ$*

## 2. Versuche mit Plasma-Aktuatoren

### Aktive Strömungskontrolle am 2D-Tragflügel mit Eppler E338 - Profil



#### Ohne Plasma-Felder:

Re < 30K: Laminare Ablösung bei  $\alpha=0^\circ$

Re < 60K: Laminare Ablösung bei  $\alpha=8^\circ$

Re > 60K: Ablösung bei  $\alpha < 20^\circ$

Bei hohen Re-Zahlen Profil gutmütig

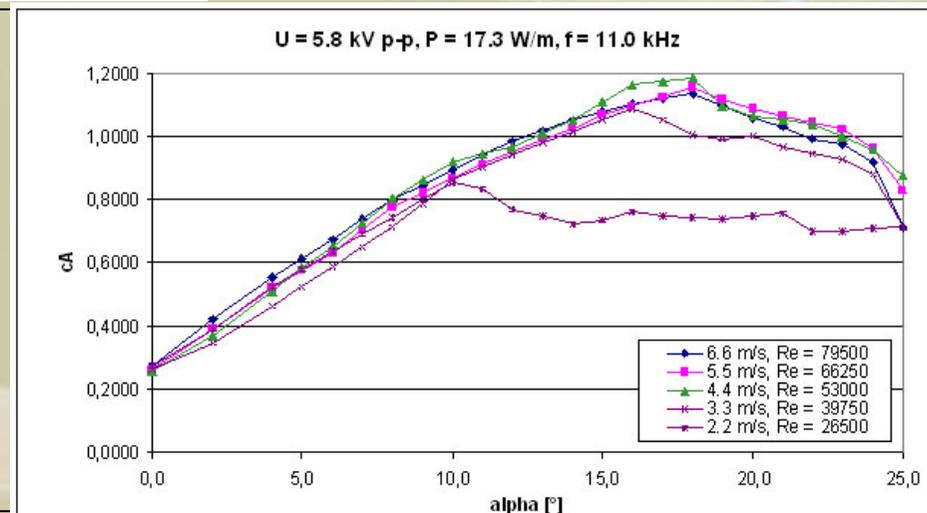
#### Mit Plasma-Felder:

Re < 30K: Ablösung bei  $\alpha=10^\circ$

Re < 60K: Ablösung bei  $\alpha=16^\circ$

Re > 60K: Ablösung bei  $\alpha < 20^\circ$

In allen Fällen gutmütige Ablöseverläufe



### 3. Zusammenfassung

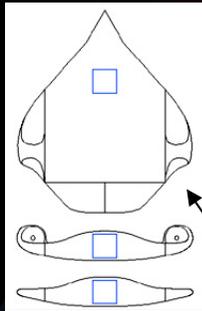
---

- Plasma-Aktuator erzeugt in der viskosen Unterschicht einen quasi-stationären, tangentialen Ionenwind mit 0,3 – 0,4 m/s
- Ionenwind verzögert laminare Ablösung an Leitkante hin zu höheren Anstellwinkeln
- Ionenwind prinzipiell nutzbar zur Widerstands- und Vortriebserzeugung
- Aerodynamische Effizienz des Tragflügels verbessert bei niedrigen Reynoldszahlen
- Ablöseverläufe sind mit Plasma bei allen Freistrahlgeschwindigkeiten gutmütig, maximale Auftriebswerte werden auch bei kleinen Reynoldszahlen erreicht  
→ Vereinfachung in der numerischen Simulation zur Auslegung von Flugmodellen
- Forschung und Entwicklung steht am *Anfang der Optimierungskurve*
- Innovationspotential durch Einsatz mikro- und nanostrukturierter Elektroden zur Senkung des Leistungsbedarfs
- Weiteres Innovationspotential durch Einsatz nichtlinearer Solitonen-Wanderfelder zur Senkung des elektrischen Leistungsbedarfs

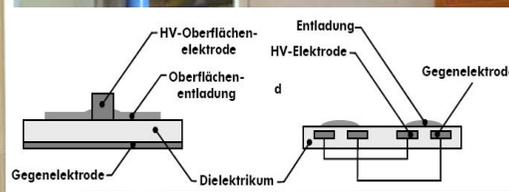
# 4. Ausblick

## Elektrostatische Strömungskontrolle an bionischen Nurflügelmodellen

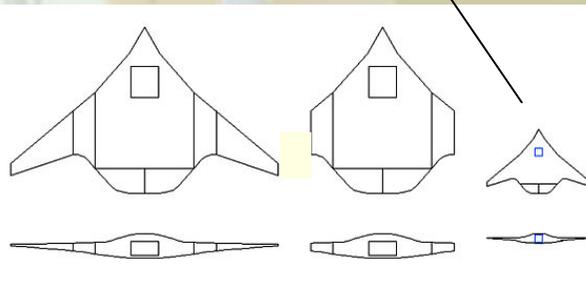
### Fibonacci Nurflügel



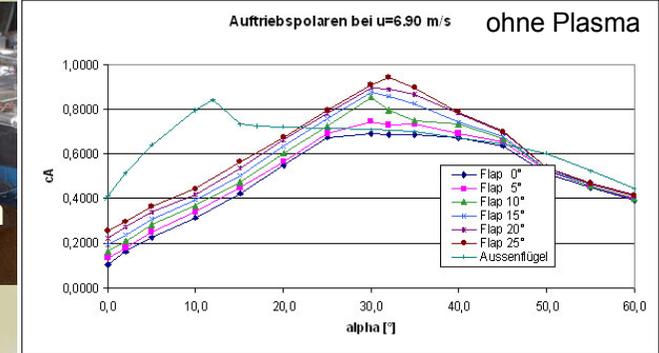
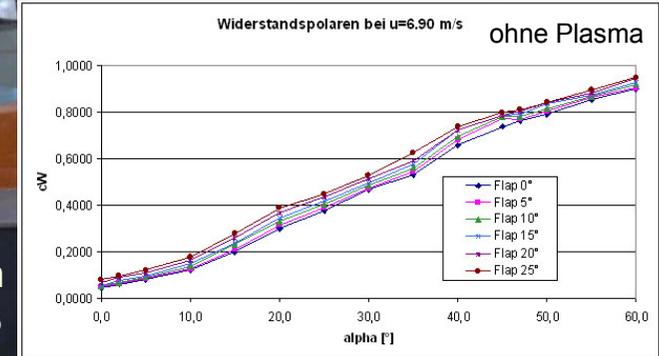
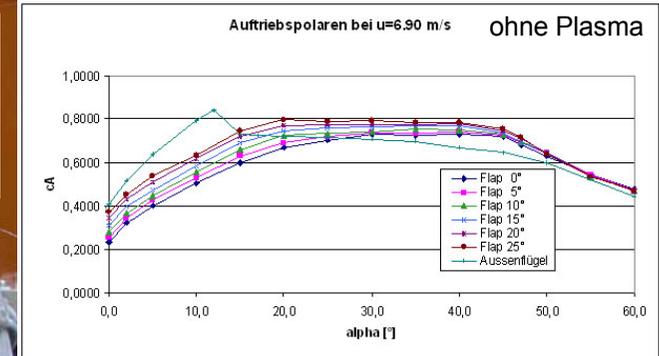
$b = 160 \text{ mm}$



$b = 778 \text{ mm}$   
 $b / l = 1.618$



$b = 420 \text{ mm}$   
 $b / l = e / \pi$



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**

---



**Gefördert durch das  
BMBF**