



# Plasma plus Umwelt – Was können wir leisten?

Ronny Brandenburg

*Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie Greifswald e.V.  
Forschungsschwerpunkt Schadstoffabbau*



plasma + umwelt



FROM THE IDEA TO THE PROTOTYPE

## Was ist etabliert?

1. Plasmatechnologie ist Umwelttechnologie
  - Aktuelle Anwendungsfelder
  - Prinzipien der plasmagestützten Abluftreinigung
  - Beispiele

## Was ist noch möglich?

2. Weitere Anwendungsfelder
  - Reinraumtechnik
  - Gebäudeschutz
  - Biologische Dekontamination
  - Chemische Synthese (Mikroreaktoren)

## Welche Fragen bestehen?

3. Herausforderungen an die Forschung und Entwicklung
  - Fundamentale Fragestellungen

## Plasma ermöglicht Energie- und Ressourcen-schonende Prozesse

- Effiziente Plasmastrahlungsquellen mit langer Lebensdauer



Bild: OSRAM

- Effiziente Oberflächenbearbeitung (UV-Strahlungsquellen, Oberflächenaktivierung)



Bild: Tantec

## Plasmabrenner

- Abgase
- Müllverbrennung
- Pyrolyse (Vergasung)

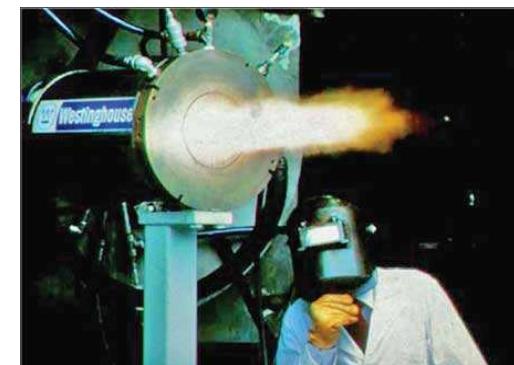


Bild: Westinghouse Plasma Corp.

## Plasmagestützte Erzeugung von Ozon

- Ozon als Oxidationsmittel für
  - Trinkwasseraufbereitung
  - Schwimmbäder
  - Bleichen von Papier, Gewebe, ...



Bild: Wedeco

## Abbau/Umwandlung von Schadstoffen

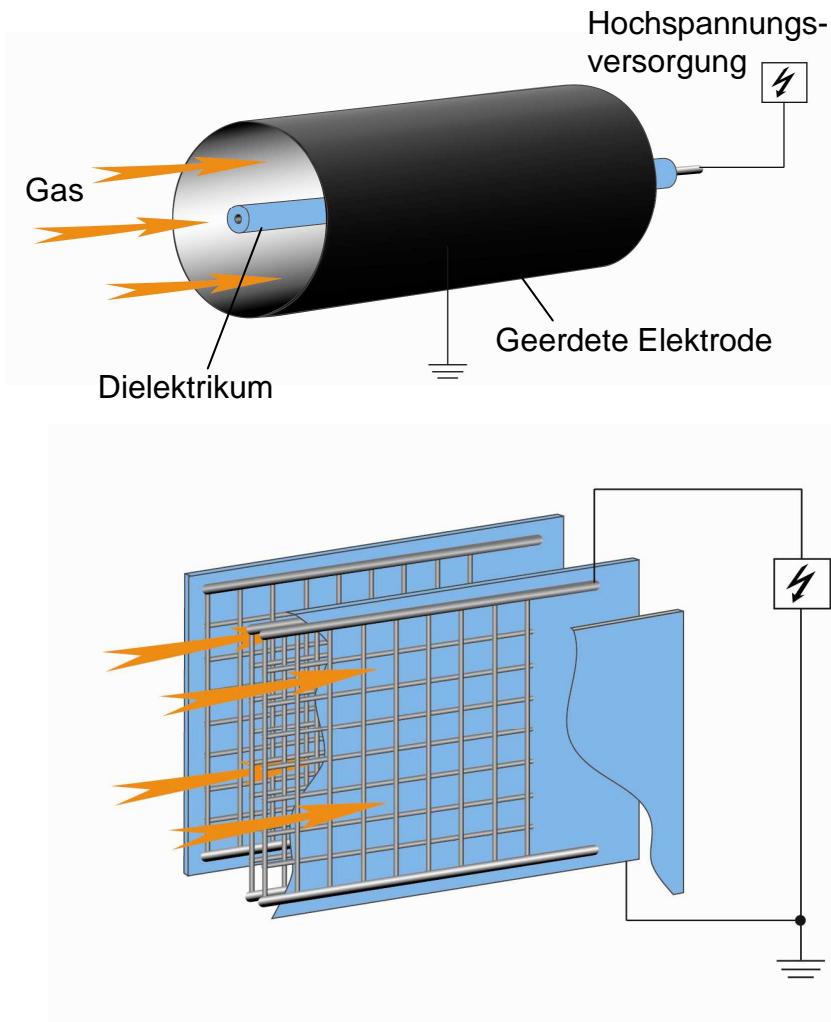
- Abgasbehandlung, Elektrostatische Abscheider
  - Partikel (Ruß)
  - Saure Gase ( $\text{NO}_x$ ;  $\text{SO}_x$ )
- Abluftbehandlung
  - Flüchtige organische Verbindungen
  - Gerüche



Bild: ABB

# Prinzip plasmagestützte Abluftreinigung

## Barrierenentladungen



## Chemische Reaktion durch aktive Plasmabestandteile

### Vorteile:

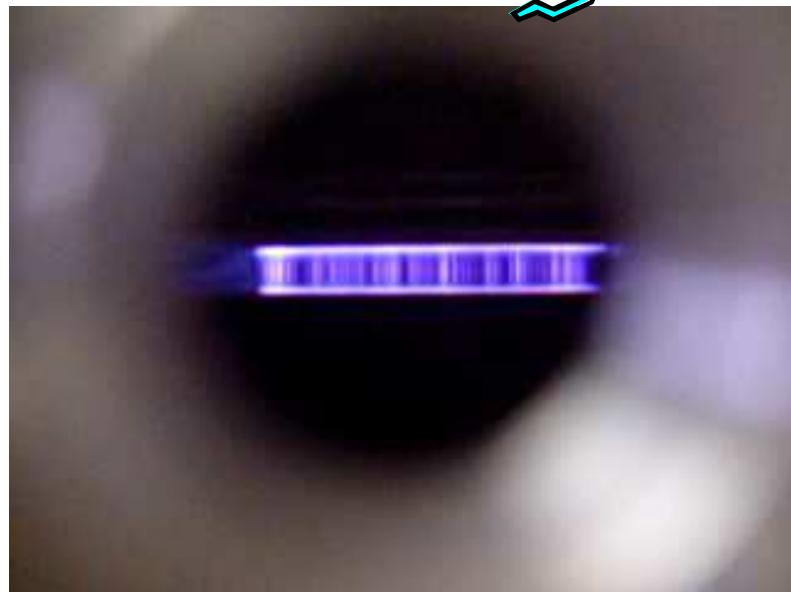
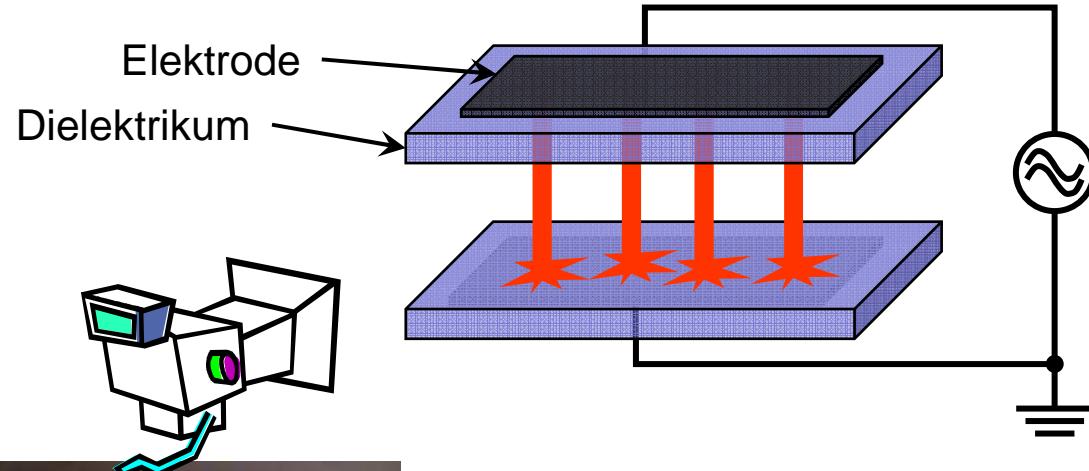
- Abbau ohne Aufheizung (nicht-thermisch)
- Breiter Wirkungsbereich: (Gase ... Feinstaub/Aerosole)
- Abbau organischer Partikel
- Energetisch günstig für geringe Verunreinigungsgrade
- Direkter Abbau oder Konditionierung  
→ Synergien mit anderen Verfahren
- Steuerbar durch elektrische Betriebsparameter

### Risiken:

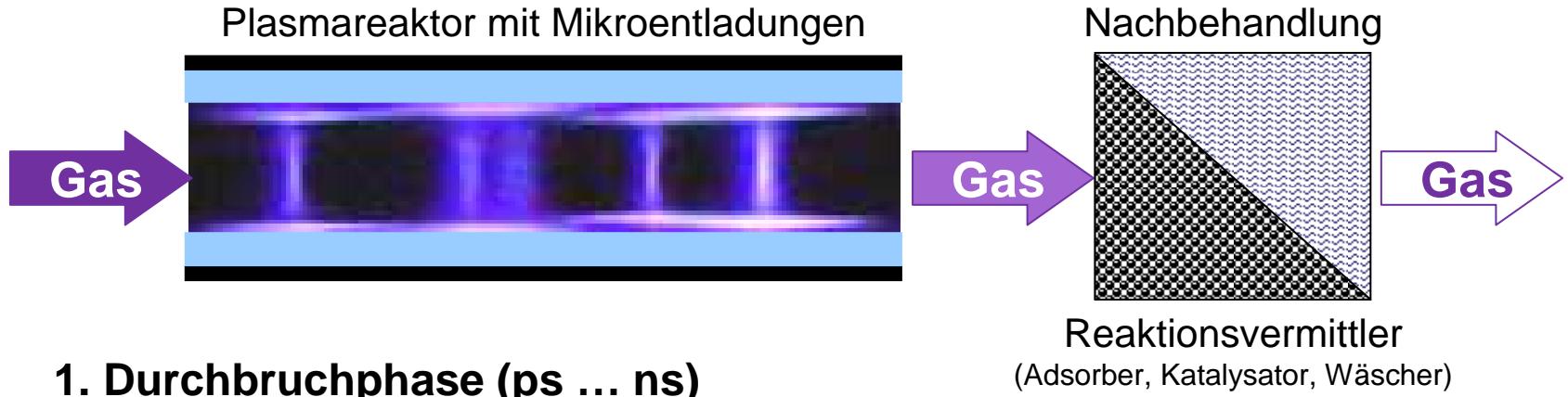
- Nebenprodukte ( $O_3$ , ...)
- Effizienz und Selektivität
- Hochspannungstechnik

# Plasmabetrieb

## Barrierenentladung in Luft bei Atmosphärendruck



**Mikroentladungen**  
→ Elektrischer Durchbruch  
→ Innitierung chem. Prozesse



## 1. Durchbruchphase (ps ... ns)

- Elektrischer Durchbruch (Mikroentladung)
- Ionisation, Dissoziation, Anregung ... → Ionen, Elektronen & Radikale

## 2. Reaktionsphase (μs ... ms)

- Rekombination und Umwandlung von Ionen und Radikalen (primären Radikale OH, O → sekundäre Radikale O<sub>3</sub>, HO<sub>2</sub>, ...)
- Oxidation im Volumen
- Oberflächenreaktionen (Aktivierung, Strukturveränderung)

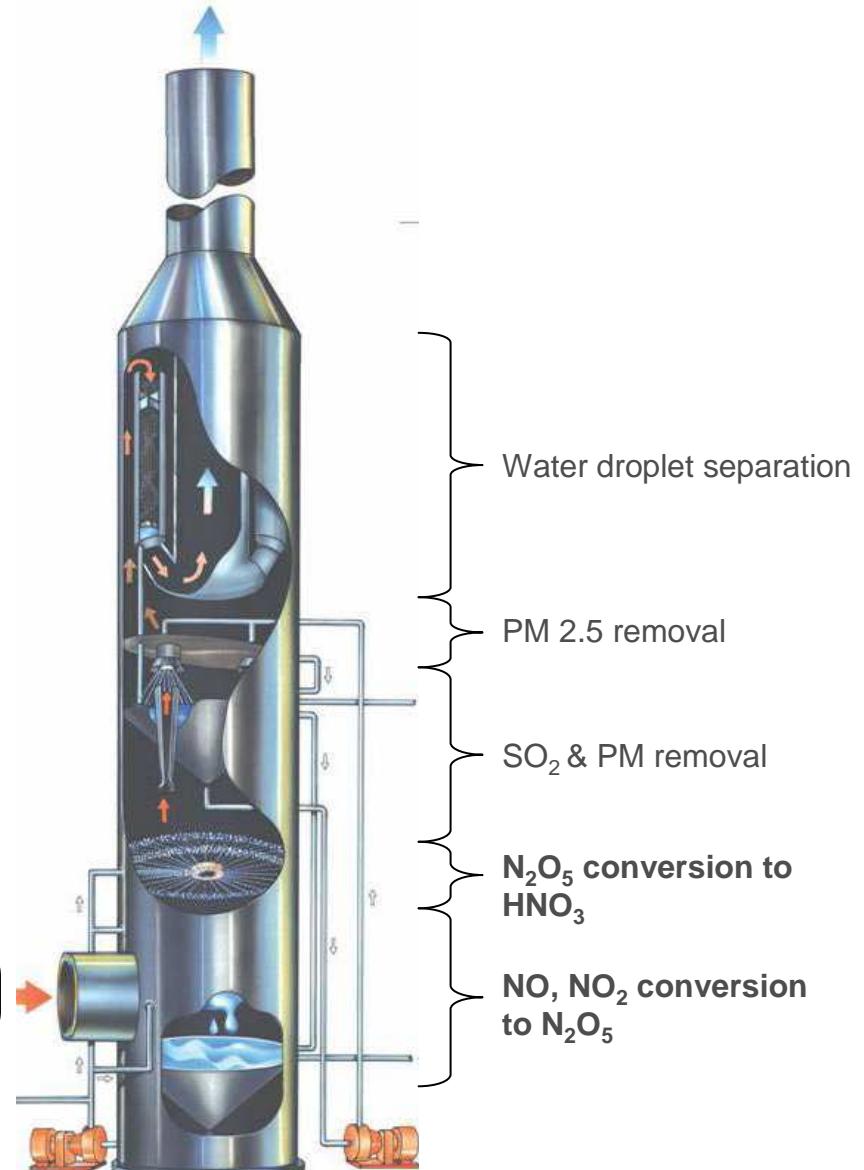
## 3. Nachreaktionsphase (ms ... s)

- Diffusion, Wärme- und Stofftransport, chemische Reaktionen
- Bildung von Aerosolen
- Adsorption
- Chemische Reaktionen durch Reaktionsvermittler

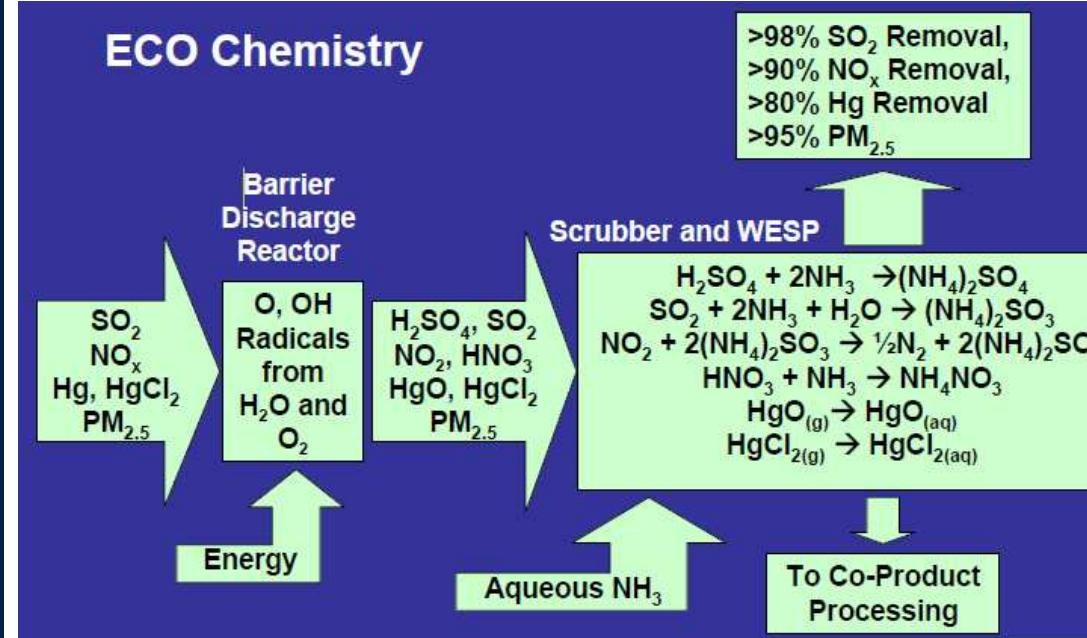
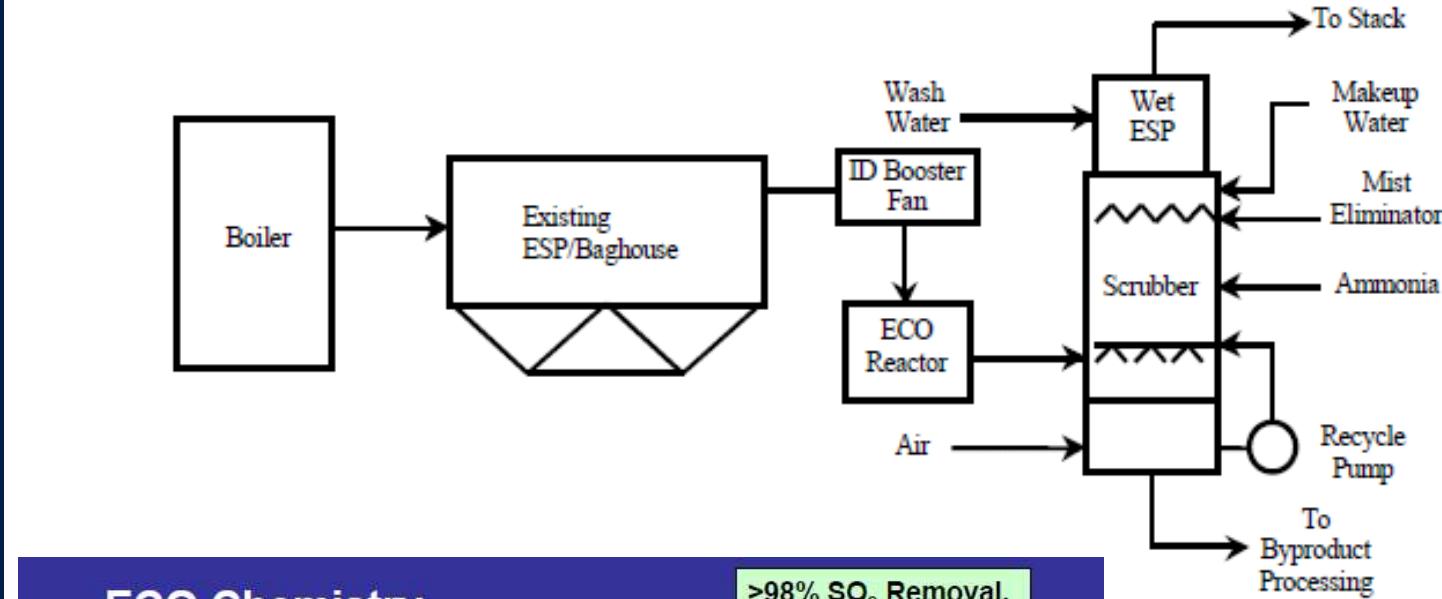
# LOTOX (Low Thermal Oxidation) & EDV Scrubbing



Belco/Dupont



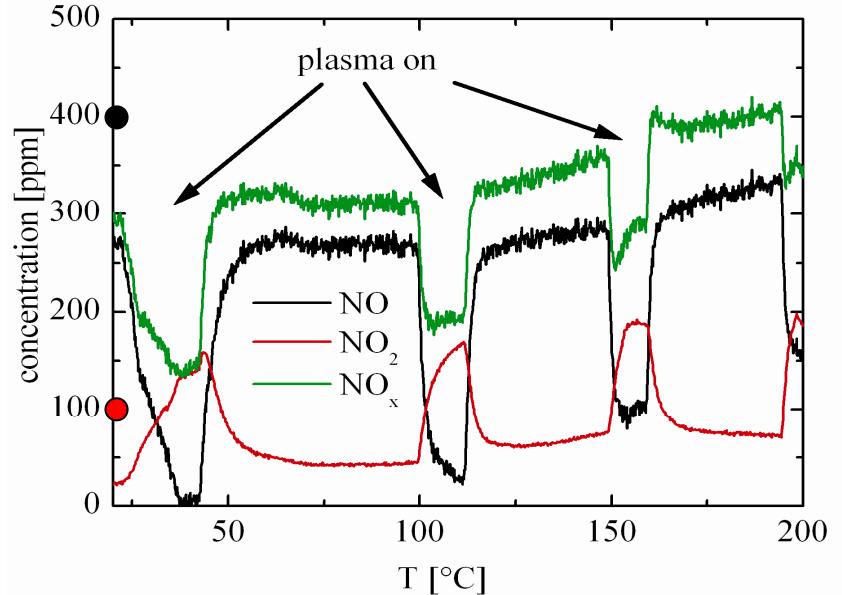
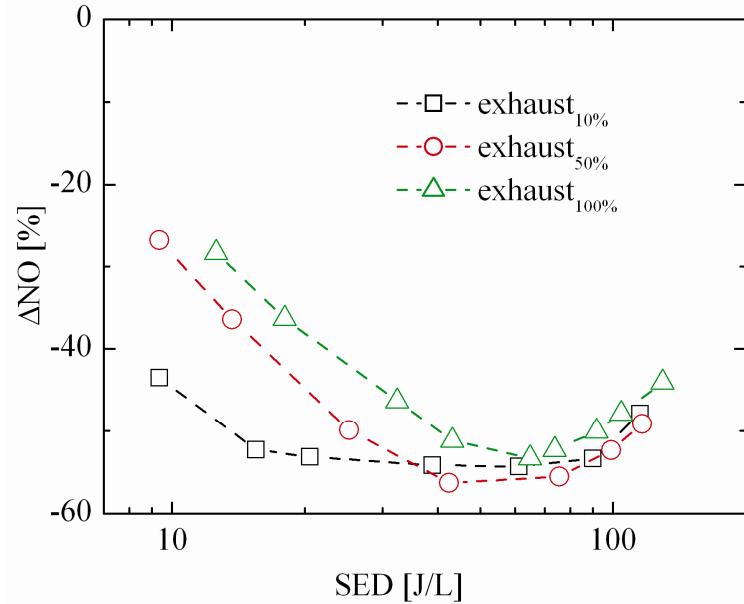
# ECO (Electro Catalytic Oxidation)



50-MW ECO Unit at R.E. Burger Plant in Ohio

Powerspan

# Plasma-basierte Katalyse (DeNOx)

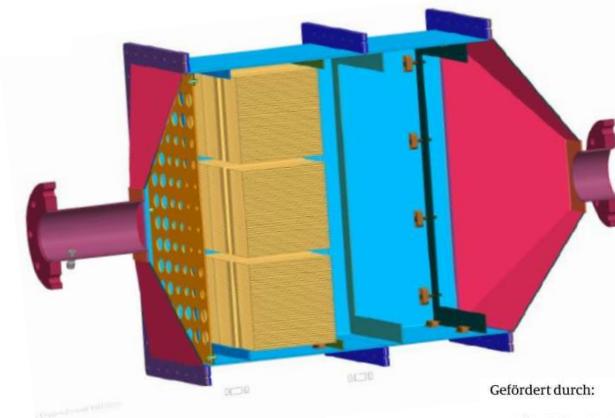


Oxidierende Wirkung des Plasmas soll HC-basierten SCR\*-Prozess unterstützen

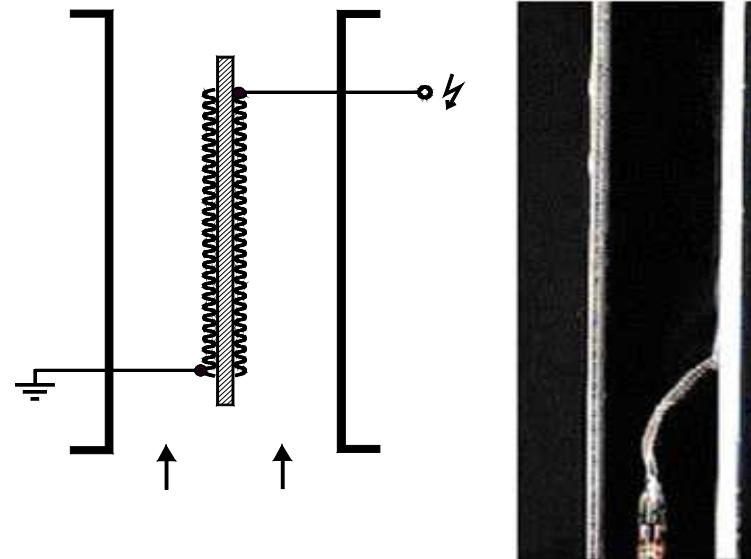
- Größere Prozessfenster ( $T << 200$  °C)
- Längere Lebensdauer
- Kein Handling zus. Reduktionsmittel

\* SCR-Selective katalytische Reduktion

Projekt: ERA-MARTEC: "Plasma based catalytic treatment of diesel exhaust", gef. durch das BMWi



# Partikelfiltration: Ionenwind und Rußabbau



S. Müller, et al.; Plasmas and Polymers, 2007

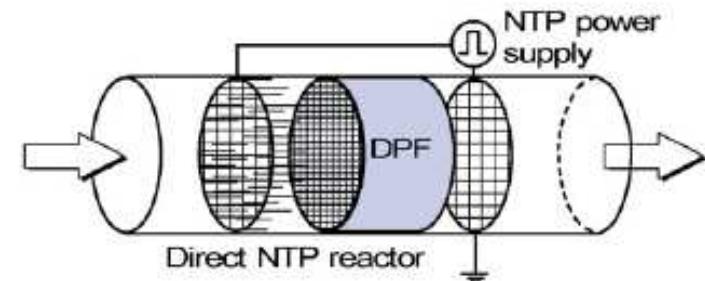
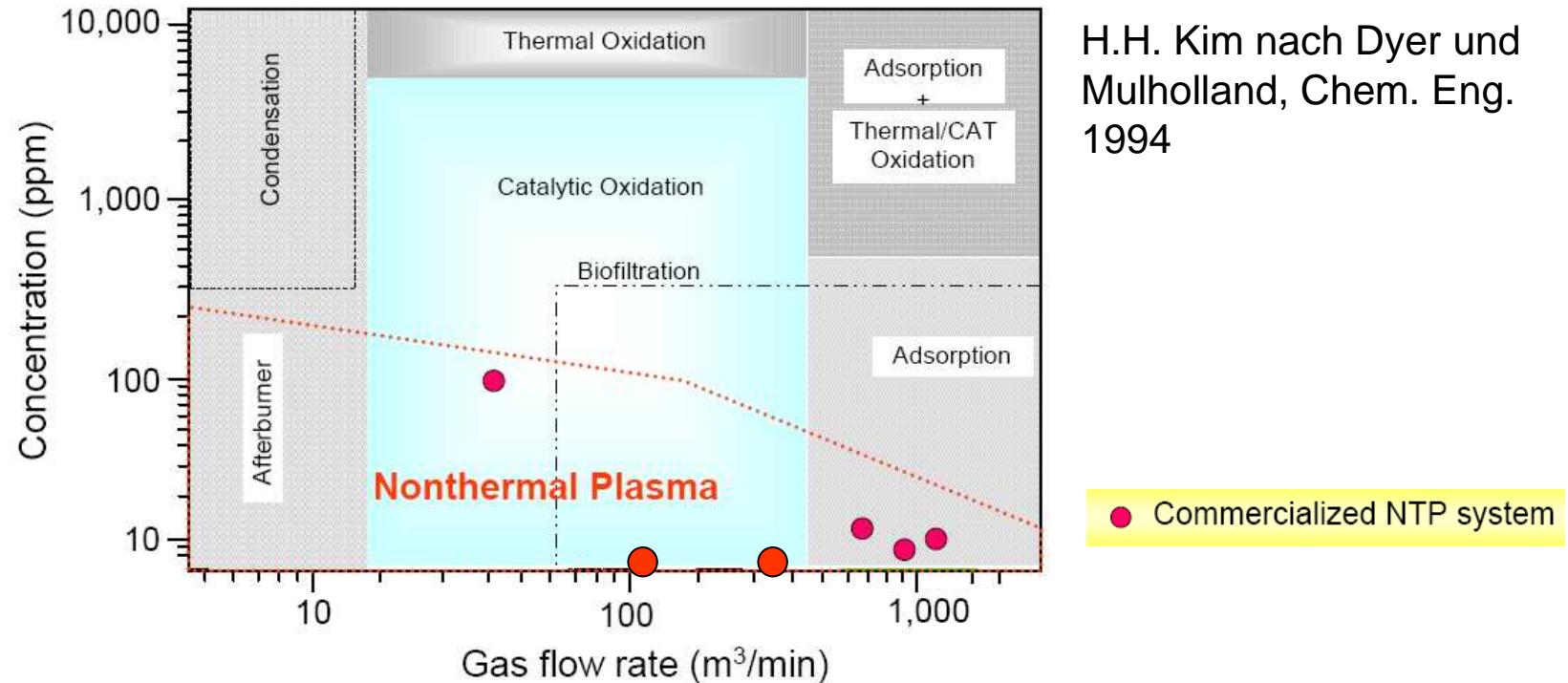


Fig. 4 Metal DPF before and after NTP regeneration

M. Okubo et al.; Thin Solid Films, 2006



H.H. Kim nach Dyer und  
Mulholland, Chem. Eng.  
1994

1. Plasmatechnologie ist Umwelttechnologie
  - Aktuelle Anwendungsfelder
  - Prinzipien der plasmagestützten Abluftreinigung
  - Beispiele

## **Was ist noch möglich?**

2. Weitere Anwendungsfelder
  - Reinraumtechnik
  - Gebäudeschutz
  - Biologische Dekontamination
  - Chemische Synthese (Mikroreaktoren)
3. Herausforderungen an die Forschung und Entwicklung
  - Fundamentale Fragestellungen

Gefährdung von Menschen und Produkten durch:

- Partikel (fest, flüssig, ...) 0,1 µm ... 5 µm
- Krankheitserreger (Bakterien, Pilze, Viren, Sporen, ...) 3 nm ... 100 µm
- Chemische Kontaminationen 3 nm ... 100 nm  
(AMC – Airborne Molecular Contamination)

... in Innenräumen, Produktionsstätten (Reinräume), ...

**Plasma bietet:**

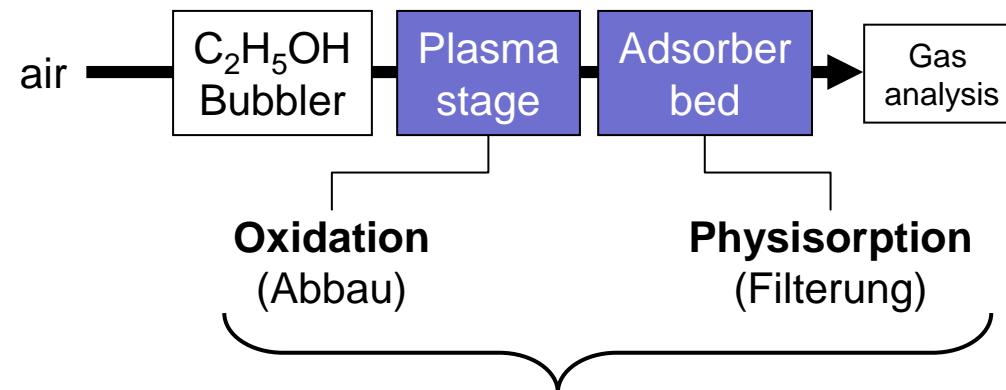
- Direkte Oxidation von AMC (Säuren, VOCs, Basen)
- Antimikrobielle Effekte
- Wirkung auf organische Partikel
- Regeneration/Aktivierung von Adsorbern

und damit

**→ Erhöhung von Wirksamkeit und Standzeit von Luftfiltersystemen**

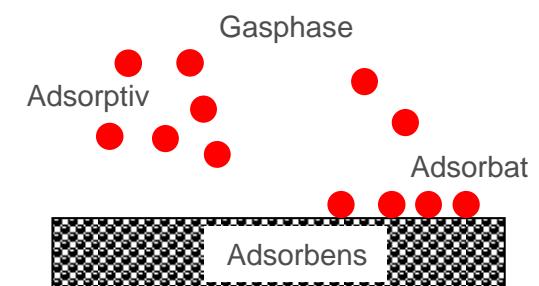
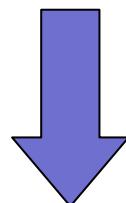
# Synergie Plasma-Adsorber

- Adsorber: Aktivkohle
- Model-VOCs: Ethanol  $C_2H_5OH$



Abnahme des resorbierten Ethanols bei vorgeschalteter Plasmabehandlung

- Reduzierung des Absorptiv
- Oxidation von Adsorbat

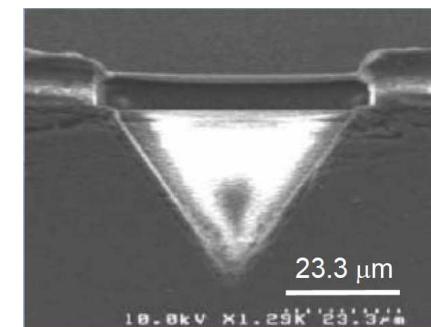
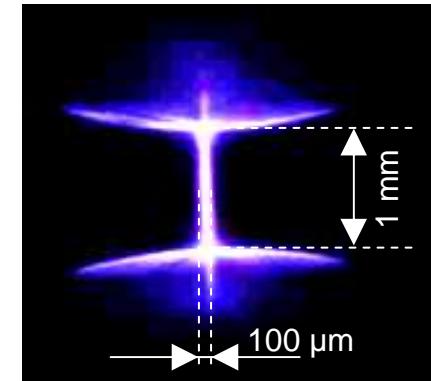
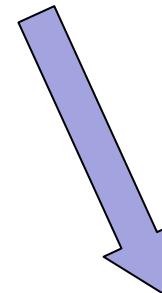
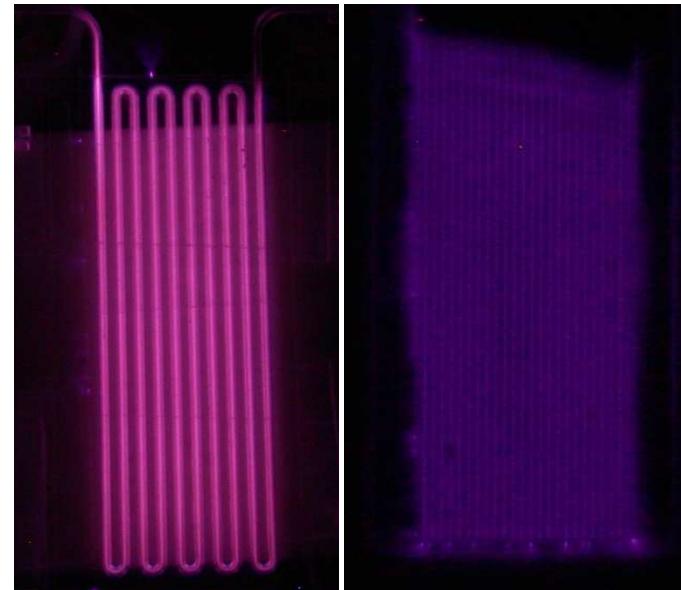


**Abbau von Schadgasen / Regeneration des Adsorbens**

# Mikro-Plasma-Reaktoren

Mikroentladungen  
→ „intrinsische“ Miniaturisierung

Mikroplasmen  
→ Miniaturisierte Gasentladungen  
(Analytik, Strahlungserzeugung)  
→ Ausnutzung der Spaltgängigkeit von Plasmen



J. G. Eden et al.,  
University of Illinois

**Plasmen in Mikroreaktoren (LIKAT)**  
links: Mikromischer (Argonplasma)  
rechts: Fallfilmreaktor (Luftplasma)  
→ nicht-thermische Reaktionen  
steuerbar durch elektrische  
Betriebsparameter

1. Plasmatechnologie ist Umwelttechnologie
  - Aktuelle Anwendungsfelder
  - Prinzipien der plasmagestützten Abluftreinigung
  - Beispiele
  
2. Weitere Anwendungsfelder
  - Reinraumtechnik
  - Gebäudeschutz
  - Biologische Dekontamination
  - Chemische Synthese (Mikroreaktoren)

## Welche Fragen bestehen?

3. Herausforderungen an die Forschung und Entwicklung
  - Fundamentale Fragestellungen

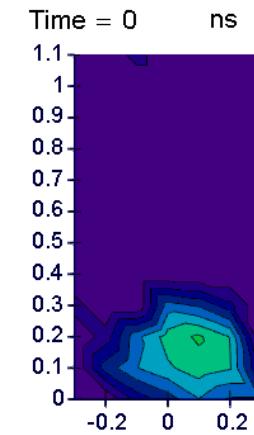
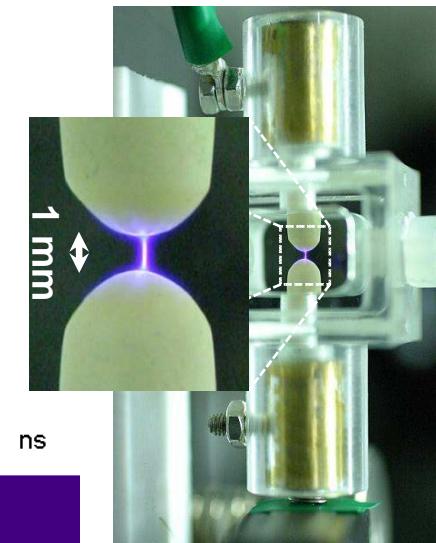
# Entladungsphysik

- Elektrischer Durchbruch und Plasmaausbildung bestimmen nachfolgende chemische Prozesse
- Plasmaeigenschaften abhängig von der Gaszusammensetzung und beeinflußt durch Wechselwirkung mit Wänden, Aerosolen, ...

Kenntnis der

- Elementarprozesse
  - Plasmaparameter
  - phys.-chem. Plasma-Wand-Effekte
- ist notwendig für:

- Reaktor- und Verfahrensauslegung
- Prozessteuerung
- Optimierung (Effektivität, Effizienz)
- Bewertung neuer potenzieller Anwendungen



## **Effekte des Katalysators auf das Plasma**

- Erhöhung der Verweilzeit durch Adsorption
- Einfluß auf die Ausbreitung und lokale Energieeinkopplung

## **Effekte des Plasmas auf den Katalysator**

- Konditionierung der Gasphase
- Schaffung neuer aktiver Zentren
- Verstärkte Dispersion aktiver Komponenten
- Regeneration
- Vergrößerung der aktiven Oberfläche
- Erhöhung der Austrittsarbeit durch elektrisches Potential

→ Erhöhung von Selektivität, Effizienz, Prozessfensterbreite

→ Verwendung neuer Materialien

## **Plasmatechnologie = Umwelttechnologie**

- Etablierte Verfahren in der Abgas- und Abluftbehandlung
- Breiter Wirkungsbereich (Saure Gase, VOC, Partikel, Mikroorganismen)
- Synergien bei Kombination mit anderen Verfahren

## **Neue Anwendungsfelder in vielen Bereichen**

- Dieselabgase: Plasma-basierte selektive katalytische Reduktion
- IAQ: chemische und biologische Dekontamination
- Bioenergieanlagen: Geruchsbeseitigung
- Chemische Synthese (Mikroplasmareaktoren)

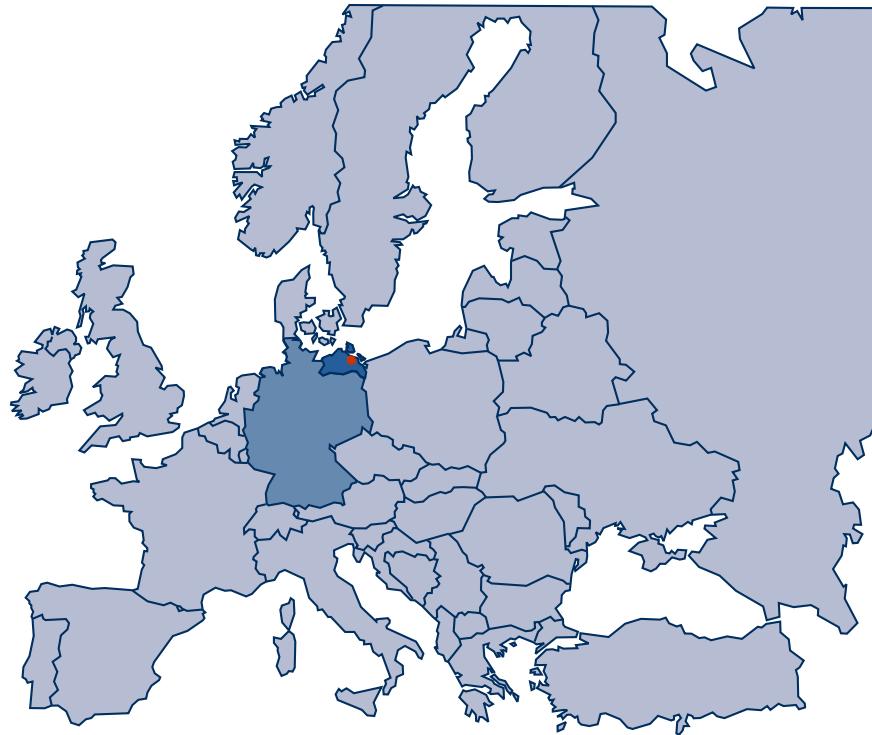
## **Basis: Anwendungsoptionen**

- Gesetzliche und normative Vorgaben
- Vorteile/Verbesserung durch Plasma-Einsatz

## **Fundamentale Fragen problemspezifisch zu beantworten**

- Verknüpfung Entladungsphysik – Plasmachemie
- Physikalisch-chemische Effekte bei Wechselwirkung mit Reaktionsvermittlern (Katalysatoren, Adsorber, Flüssige Phase)

# Contact



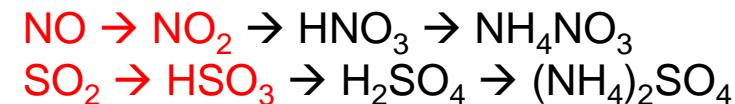
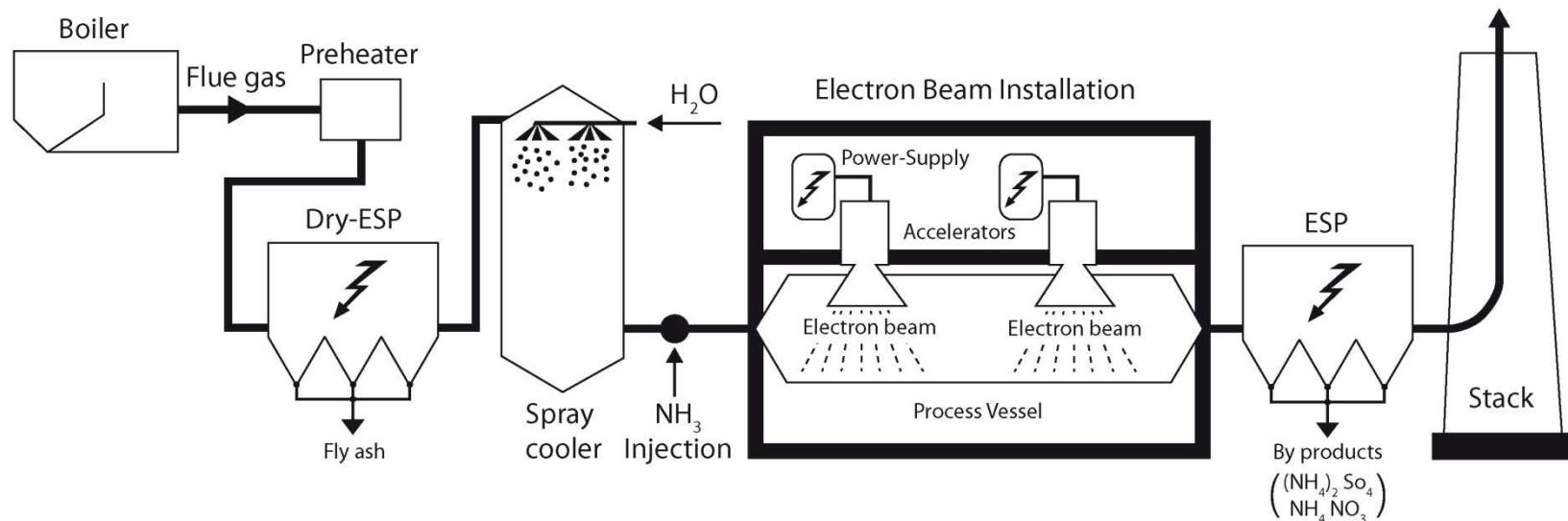
## Leibniz Institute of Plasma Science and Technology

Address: Felix-Hausdorff-Str. 2, 17489 Greifswald, Germany

Phone: +49 - 3834 - 554 300, Fax: +49 - 3834 - 554 301

E-mail: [welcome@inp-greifswald.de](mailto:welcome@inp-greifswald.de), Web: [www.inp-greifswald.de](http://www.inp-greifswald.de)

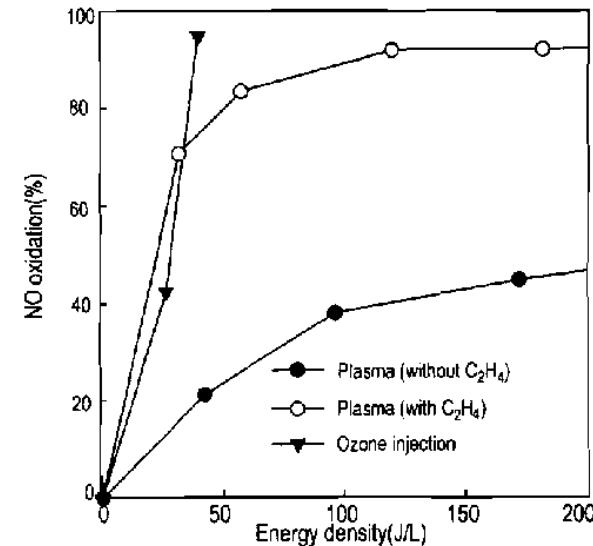
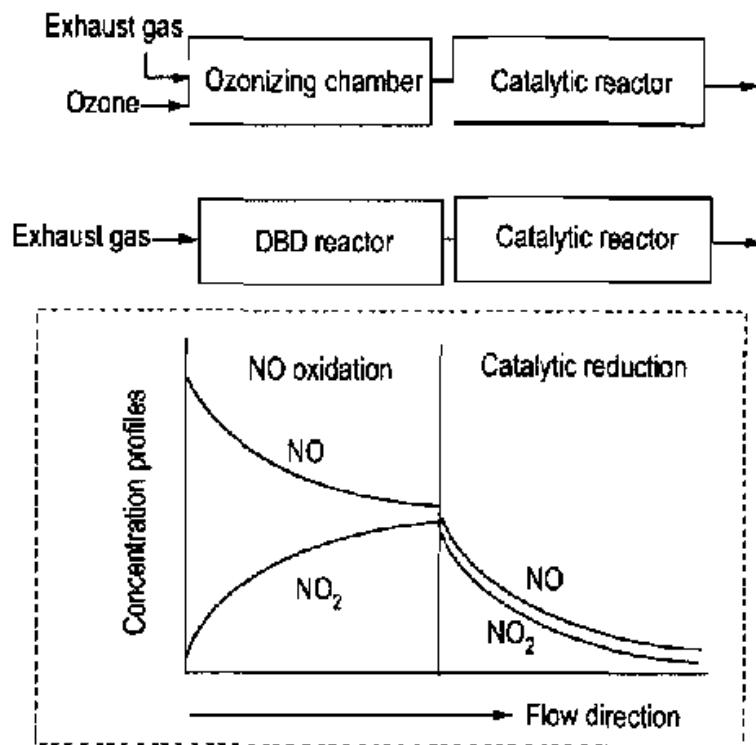
# Elektronenstrahlverfahren



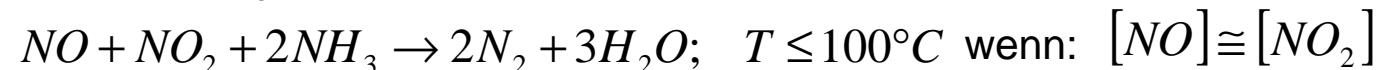
- 270.000 Nm<sup>3</sup>/h of flue gas
- SO<sub>2</sub> removal efficiency above 95%
- NO<sub>x</sub> removal efficiency above 70%
- Dose up to 10 kGy



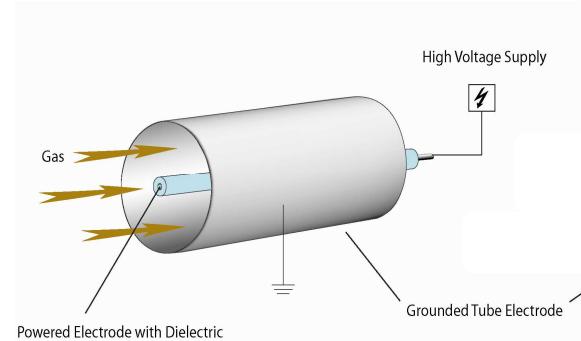
# Plasma-unterstützte Katalyse (NH<sub>3</sub>-SCR)



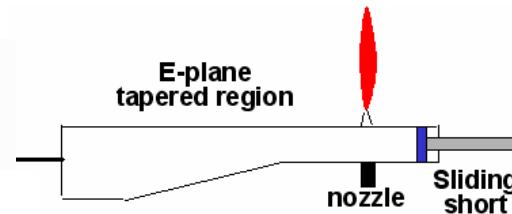
**Fig.5** Comparison of the ozone injection method with the direct application of the DBD plasma in terms of the NO oxidation performance (initial NO<sub>x</sub>: 300 ppm; temperature: 200 °C)



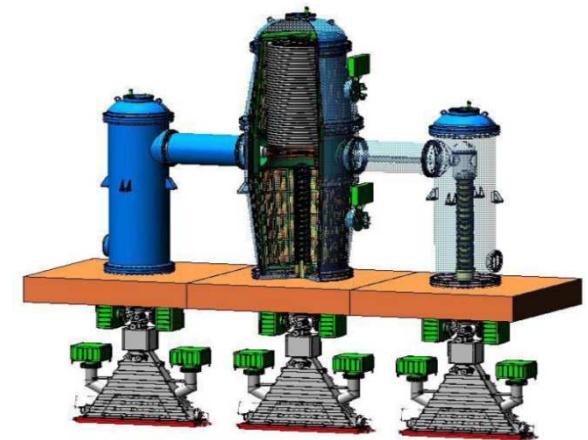
## Gasentladung



## Mikrowellenstrahlung



## Elektronenstrahl



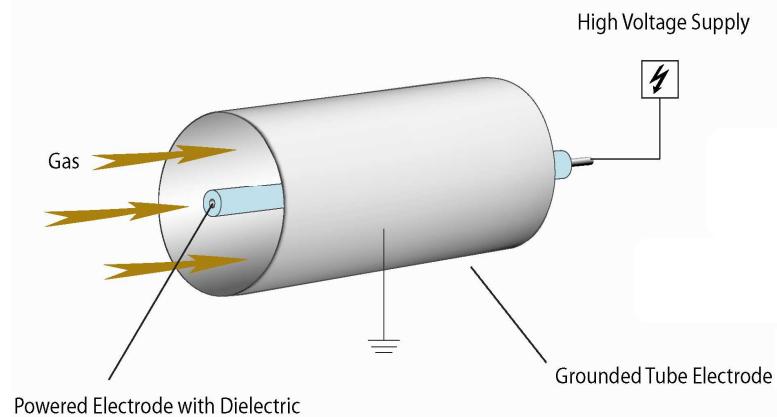
## Einkopplung elektrischer Energie

Elektrische und magnetischer Felder  
(elektrischer Durchbruch)

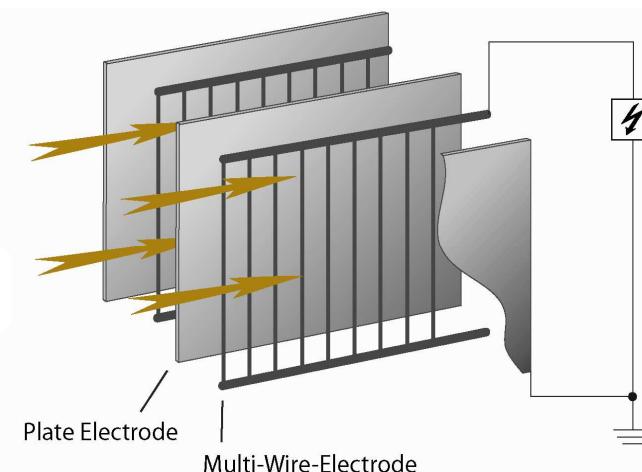
Injektion von Elektronen

# Gasentladungen

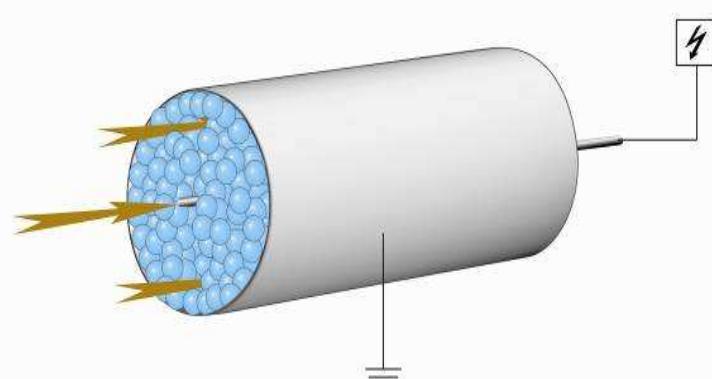
## Barrierenentladung(DBD\*)



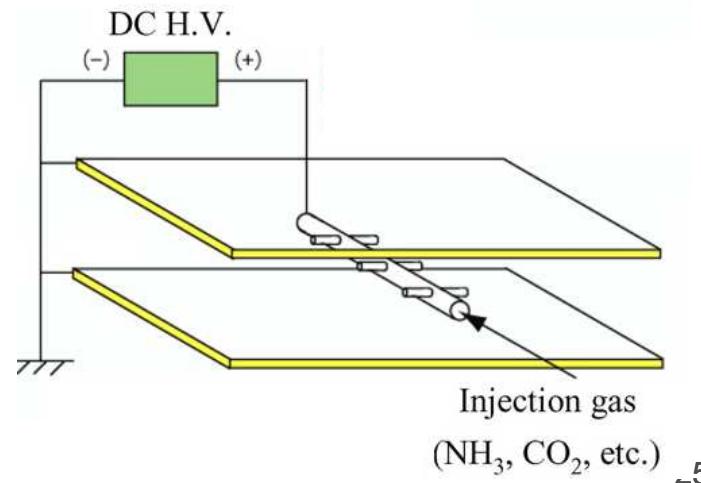
## Korona-Entladung



## Schüttgutreaktor



## Corona Radical Shower



\*DBD: Dielectric Barrier Discharge

# Übersicht „Umweltanwendungen“

- **Wasseraufbereitung**  
→ Ozonsynthese ( $O_3$  als Oxidationsmittel)
- **Filtration von Teilchen (Stäube)**  
→ Elektrostatische Abscheider (Ionen zur Aufladung)
- **Abluftbehandlung (Geruchsabbau; VOCs)**  
→ NTP in Komb. mit Adsorbern/Katalysatoren  
für geringe Kontaminationsgrade (<< 1 g C<sub>org</sub>/m<sup>3</sup>)
- **Abgasbehandlung**  
→  $O_3$ -Injektion (low thermal oxidation + Gaswäsche)  
→ ECO-Prozess (DeNOx/DeSOx; + Gaswäsche)  
→ Elektronenstrahlverfahren (DeNOx mit NH<sub>3</sub>)  
→ Abbau von organischen Partikeln mit Plasmen  
→ Plasma-unterstützte/basierte Katalyse (SCR)



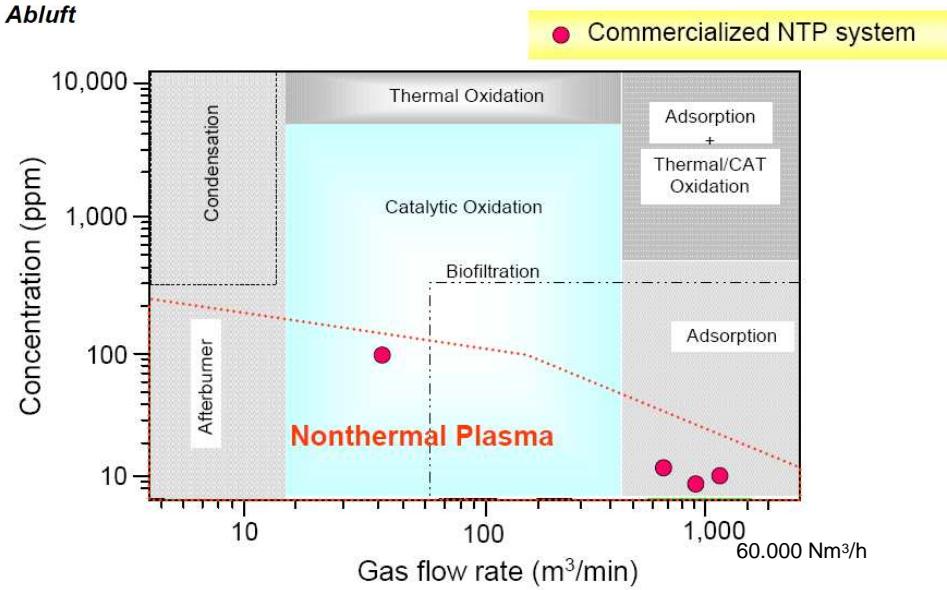
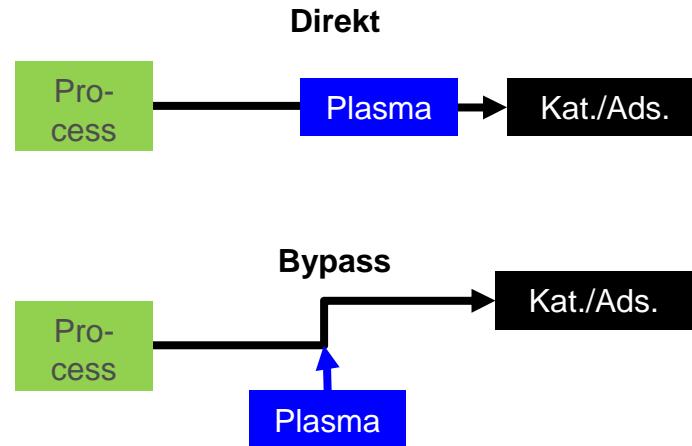
Bilder: Wedeco, ABB, NIPAG

# Abluftbehandlung (Gerüche)



Molekularsiebgestützte NT-Plasmaanlage für 10.000 m<sup>3</sup>/h Abluft aus Herstellungsprozessen von Aromastoffen

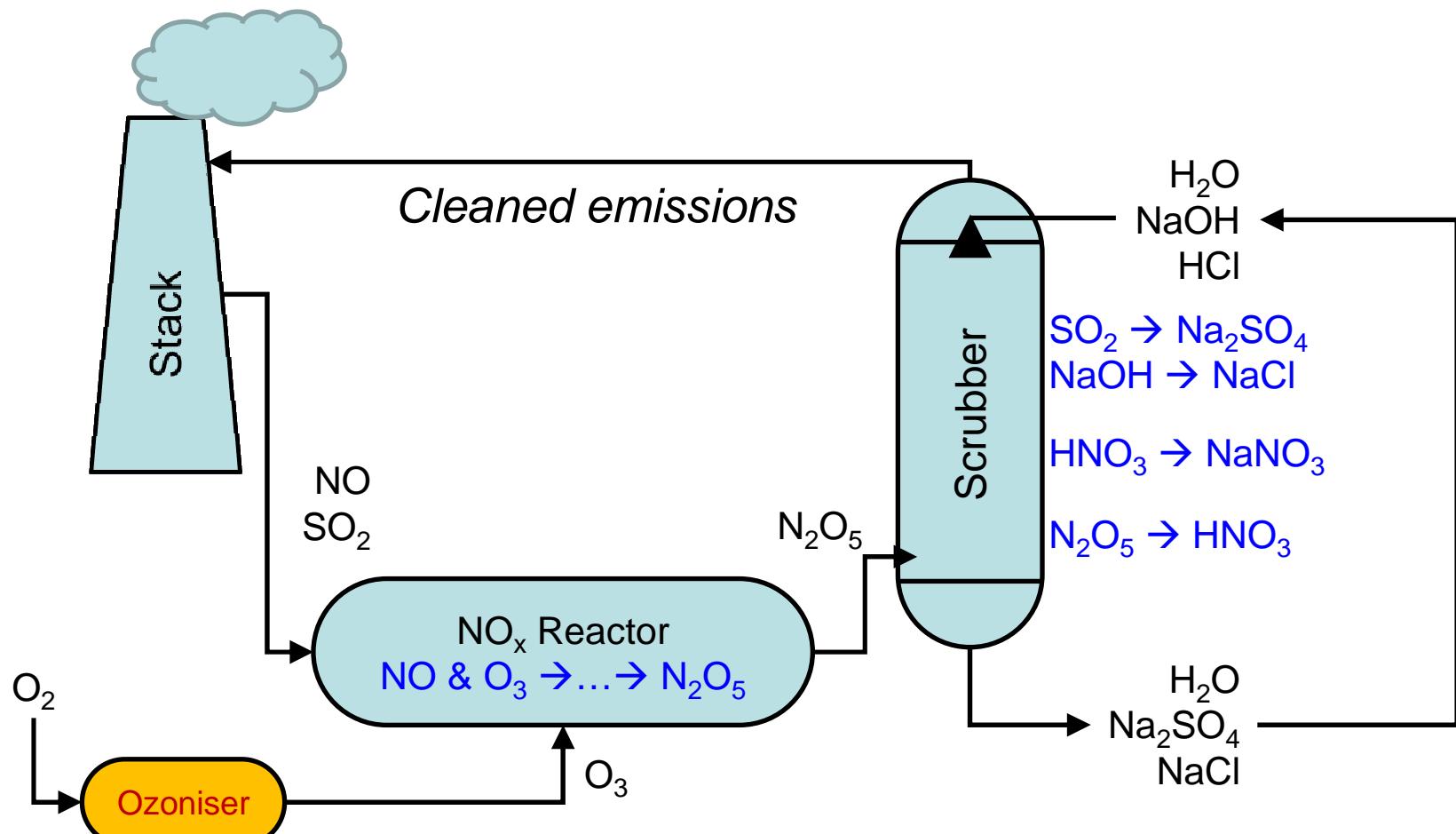
- Gasflows up to 100,000 Nm<sup>3</sup>/h
- Removal efficiency: 75 ... 99 %
- Investment cost about 10,000 € per 1,000 Nm<sup>3</sup>/h
- Running cost less than 10 €/h (@ 50,000 Nm<sup>3</sup>/h)



R. Rafflenbuel; Fa. NIPAG; Langen/DE  
Kim, AIST

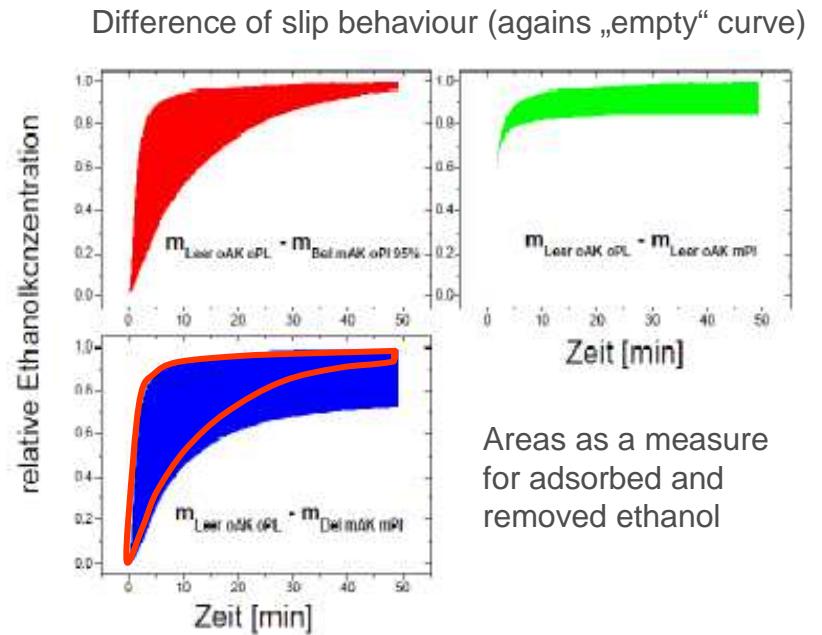
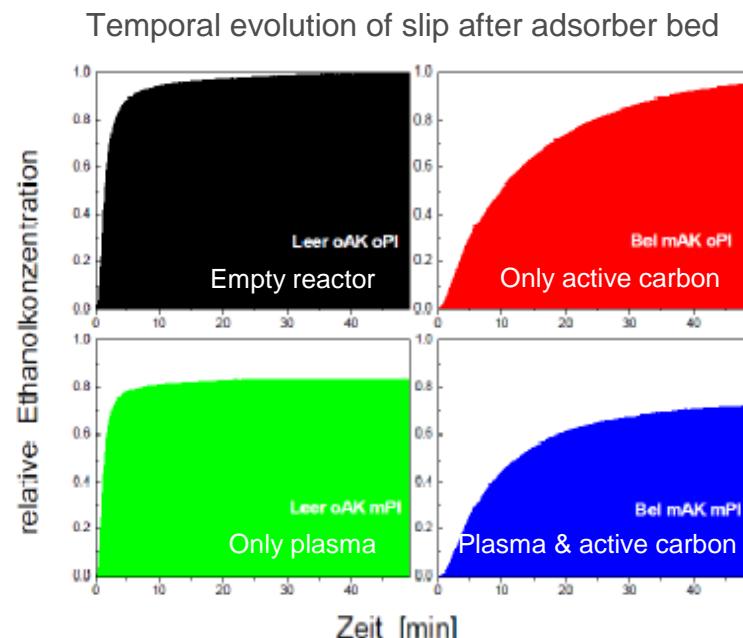
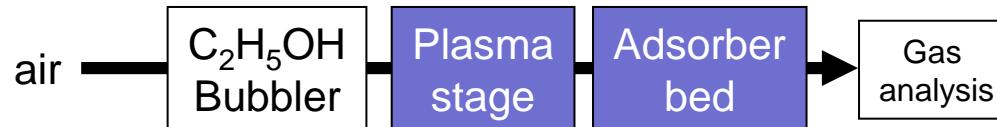
(Original format from J.A. Dyer, K. Mulholland, *Chem. Eng.*, pp. 4-8, 1994)

# Injektionsverfahren / Nicht-therm. Oxidation



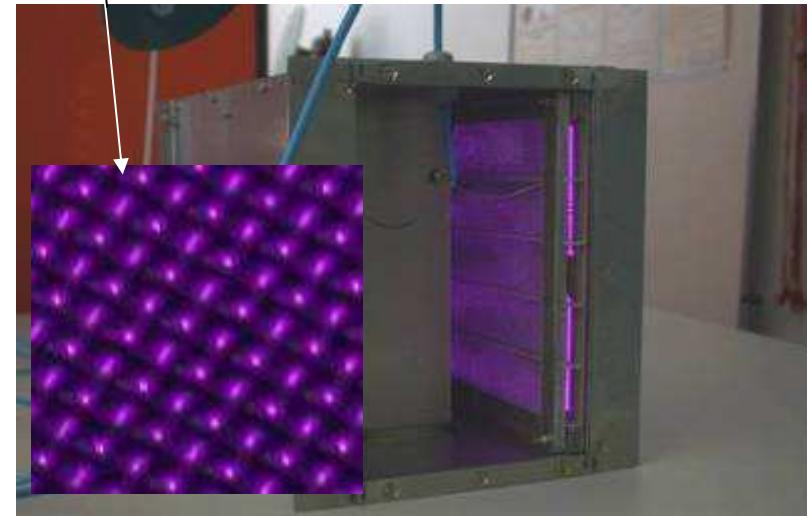
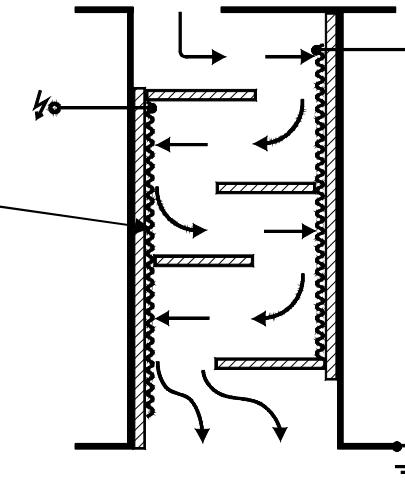
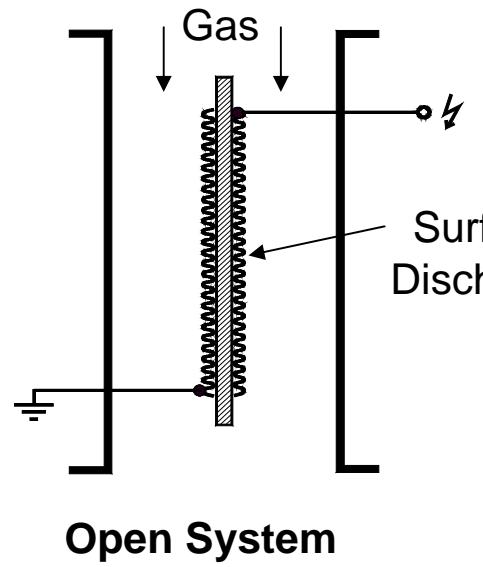
# Synergy between plasma and adsorber

- Active carbon (AC) as adsorber (w/o plasma) and ethanol  $C_2H_5OH$  as model VOC



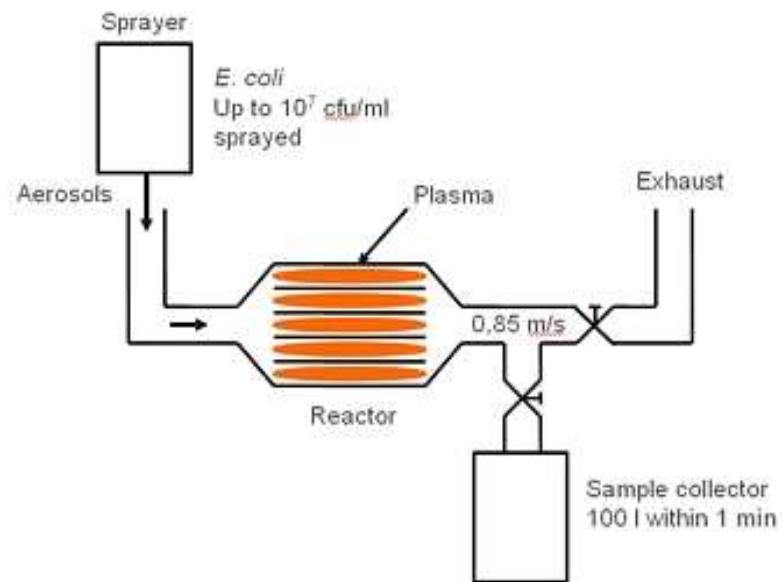
- Physisorption of ethanol on active carbon → no removal
- Significant removal of ethanol by plasma treatment → load on AC reduced
- Less ethanol resorbed after plasma operation
- Adsorbed molecules oxidized on active carbon → removal and regeneration!

# Ionen-Extraktion zur Aerosolabscheidung

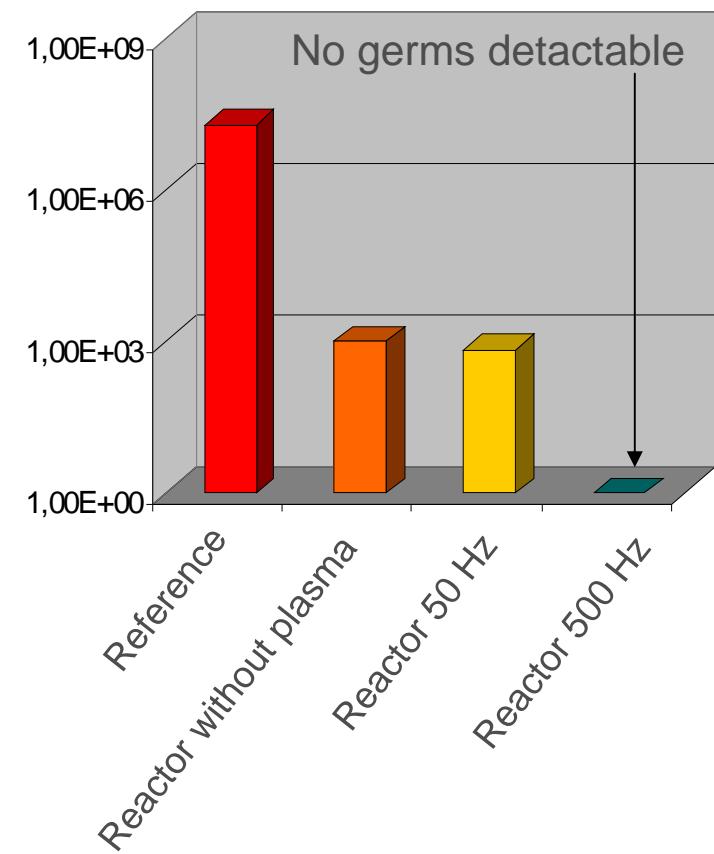


# Biologische Dekontamination

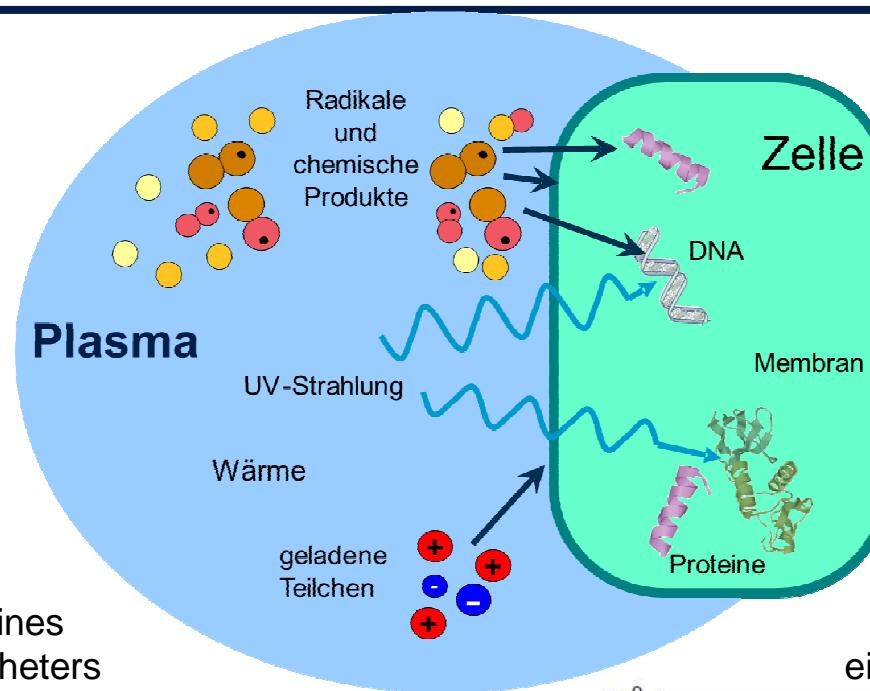
Aerosols containing coli bacteria (DBD stack system)



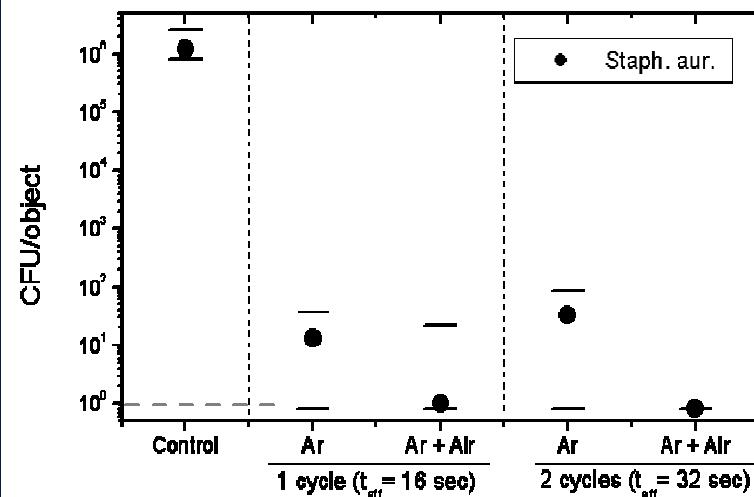
Colony forming  
units (cfu)



# Biologische Dekontamination mit Plasmen



Plasmabehandlung eines  
Elektrophysiologiekatheters



Plasmabehandlung  
einer Flüssigkeitsprobe

