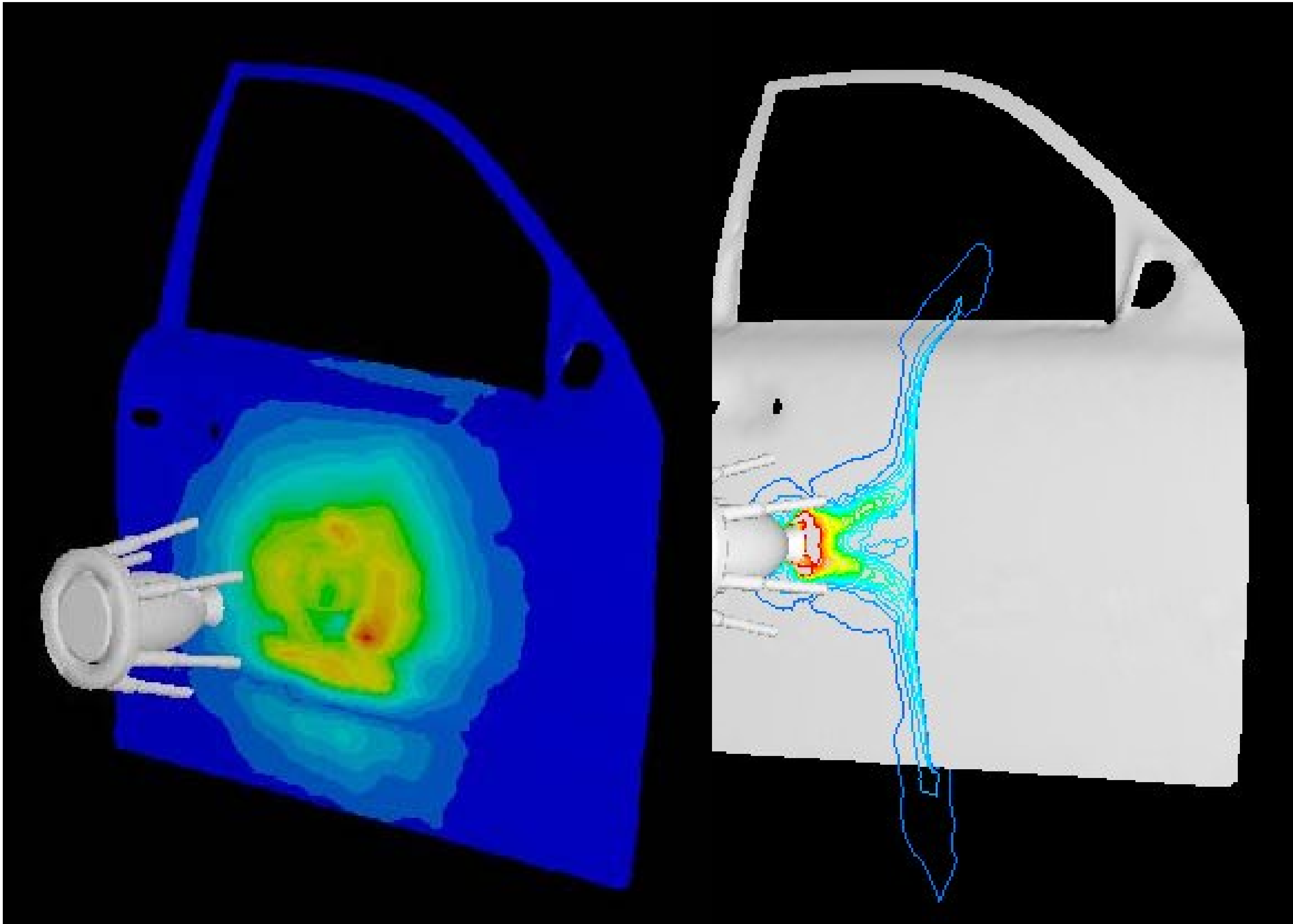
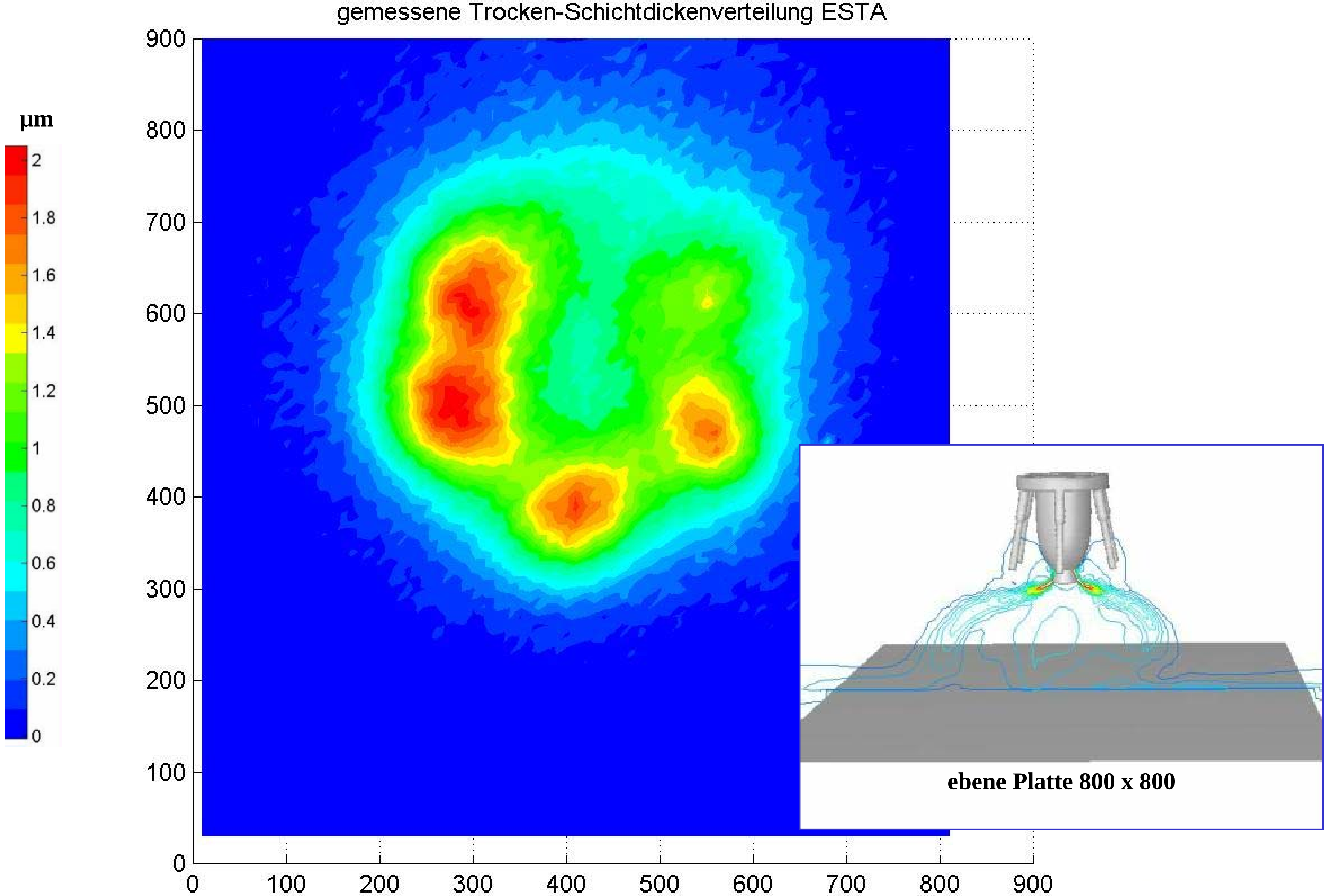
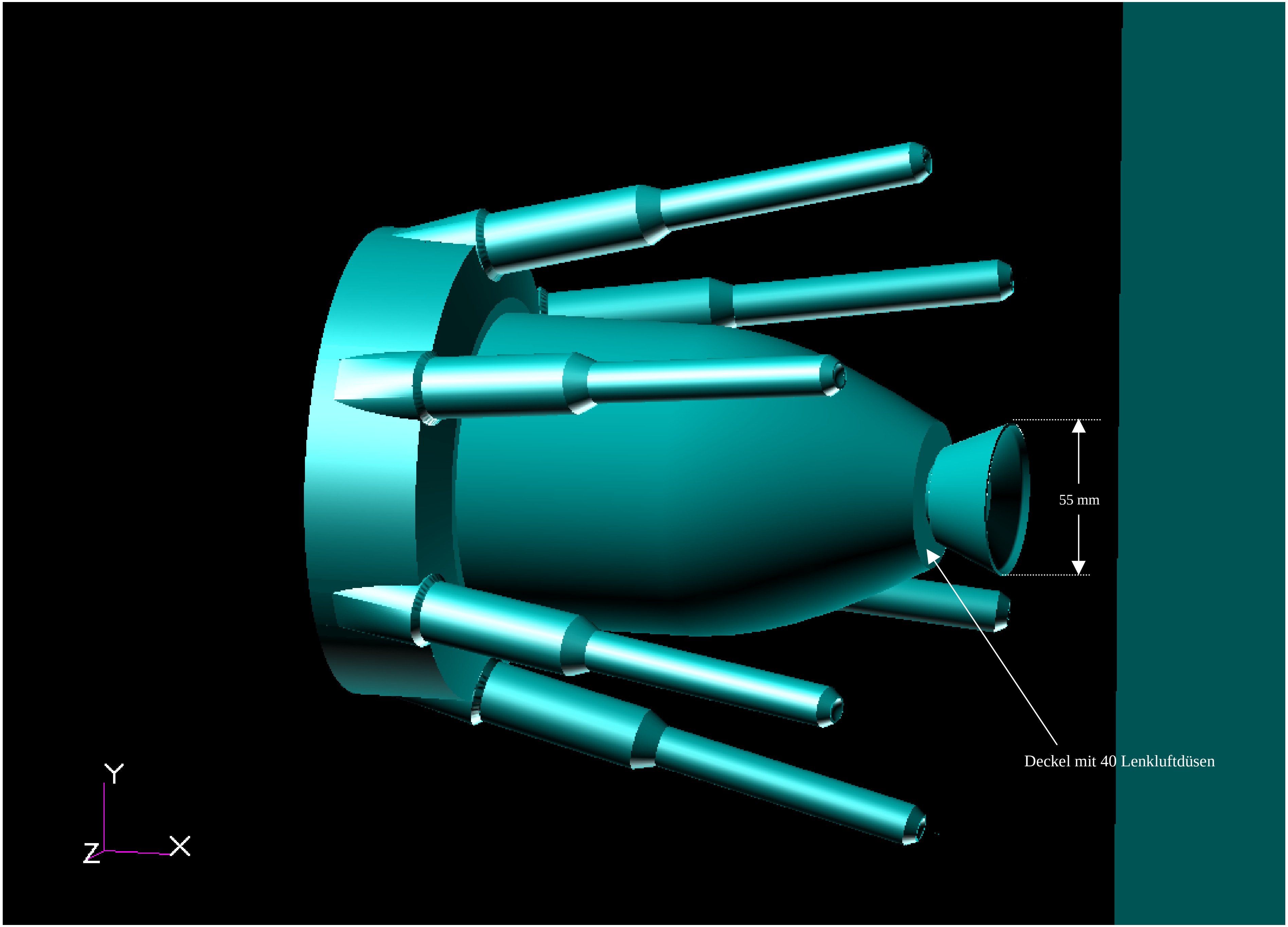
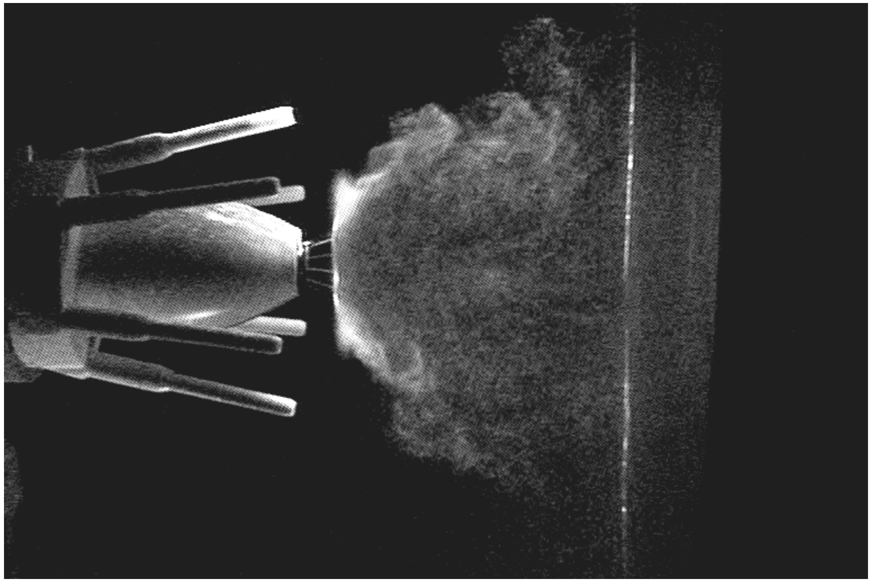



gemessene Trocken-Schichtdickenverteilung ESTA
µm
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
ebene Platte 800 x 800


55 mm
Deckel mit 40 Lenkluftdüsen
Y
Z
X

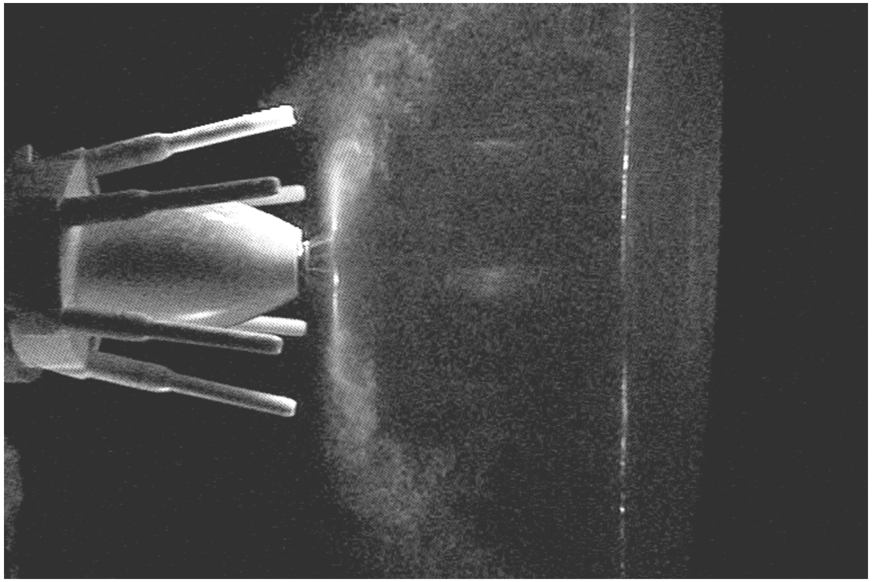


Standardeinstellung

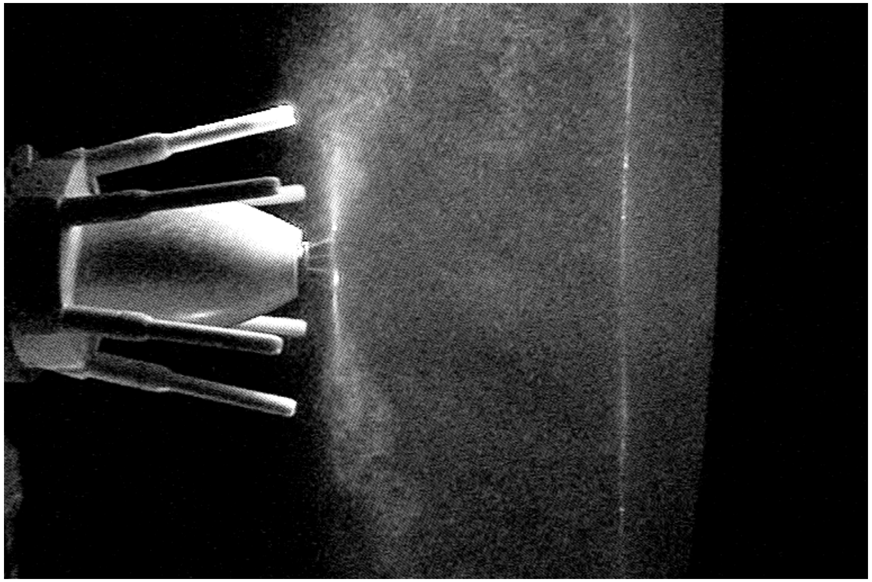
<u>Laserlichtschnitte</u> ***Ecobell-Zerstäuber***

<u>Standardbetriebsbedingungen:</u>

Luftvolumenstrom:	150 Nl/min
Glockendrehzahl:	45000 U/min
Lackmenge:	150 ml/min
Hochspannung:	-70 kV
Strom:	450 μA
Modell-Lack:	Wasser + 12% Butylglykol



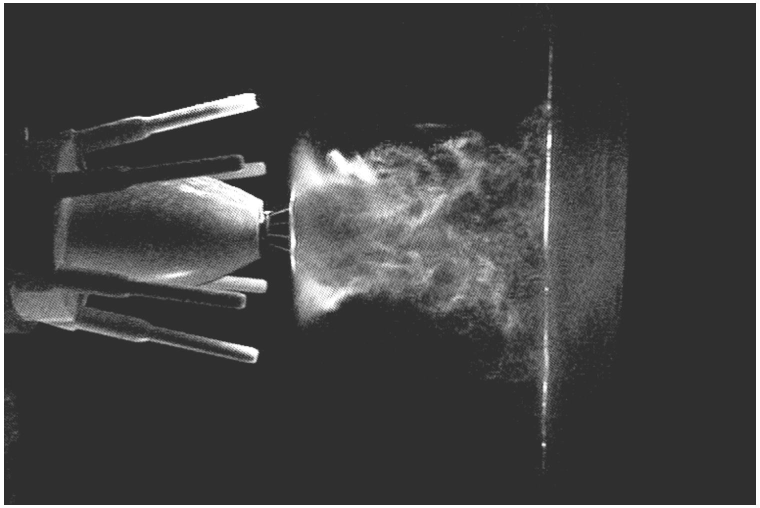
ohne Lenkluft



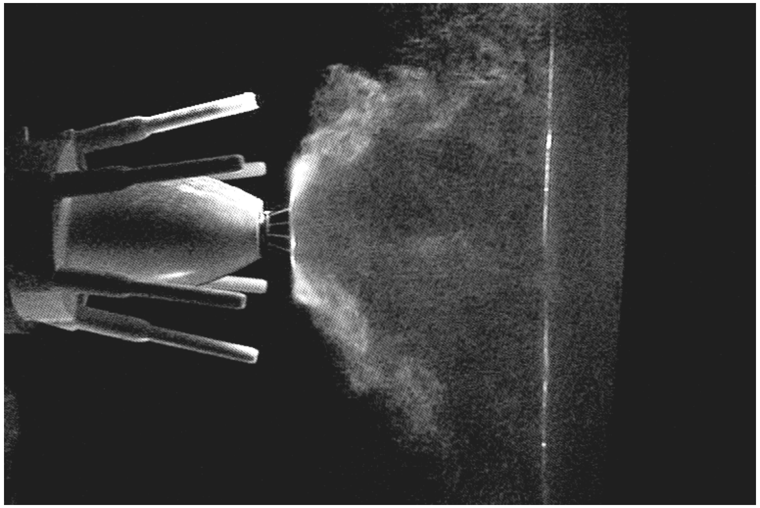
ohne Lenkluft & ohne Hochspannung

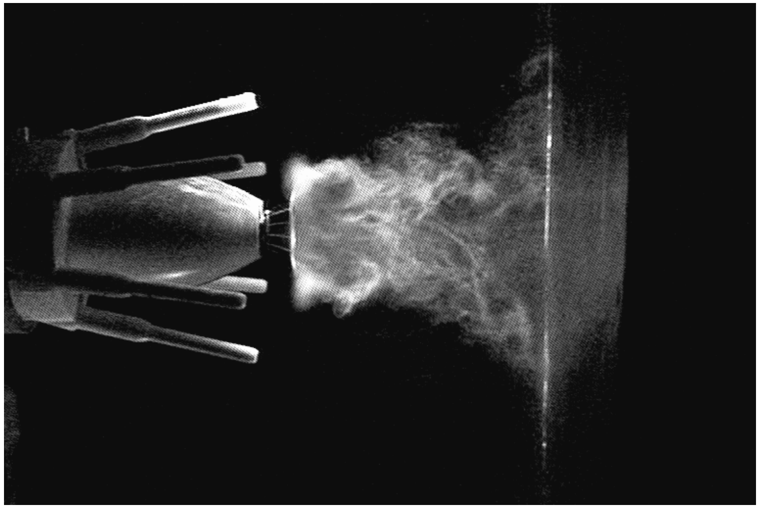
Laserlichtschnitte ***Ecobell-Zerstäuber***

Drehzahl: -25 %

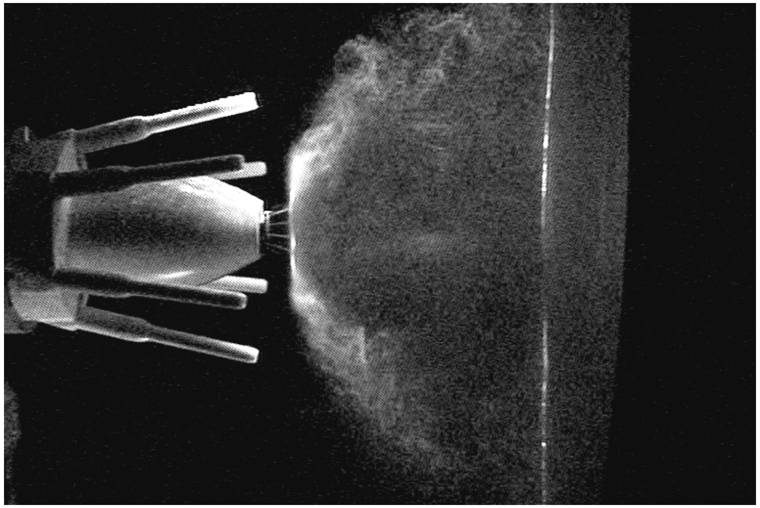


Drehzahl: +25 %



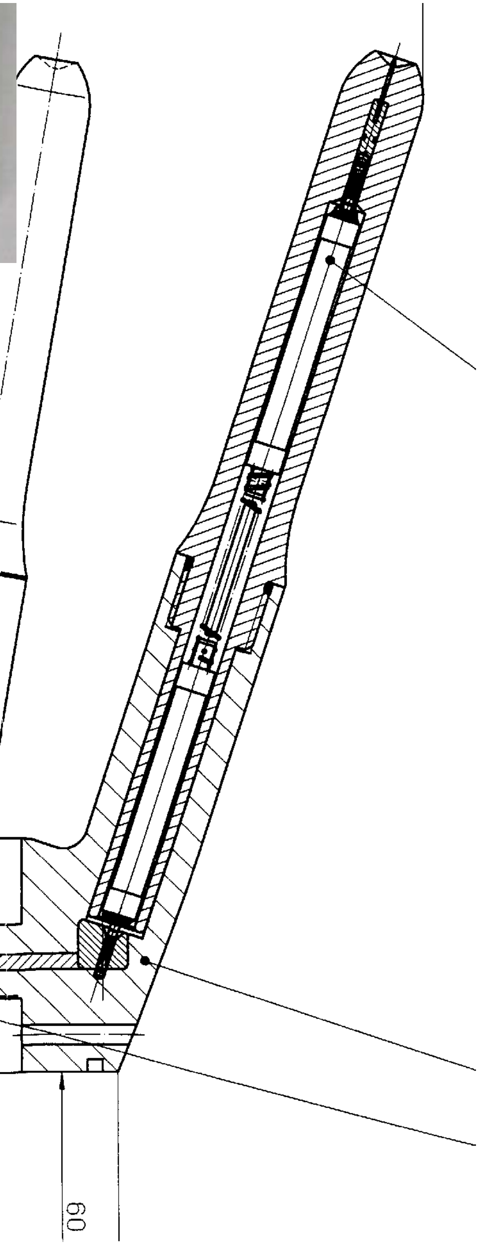


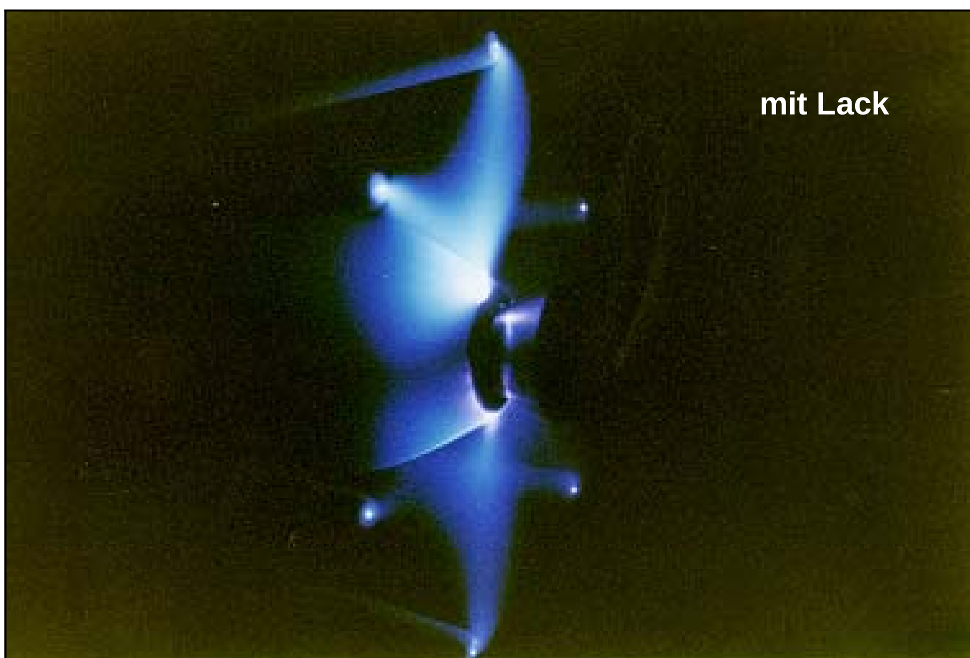
Lenkluft: +33%

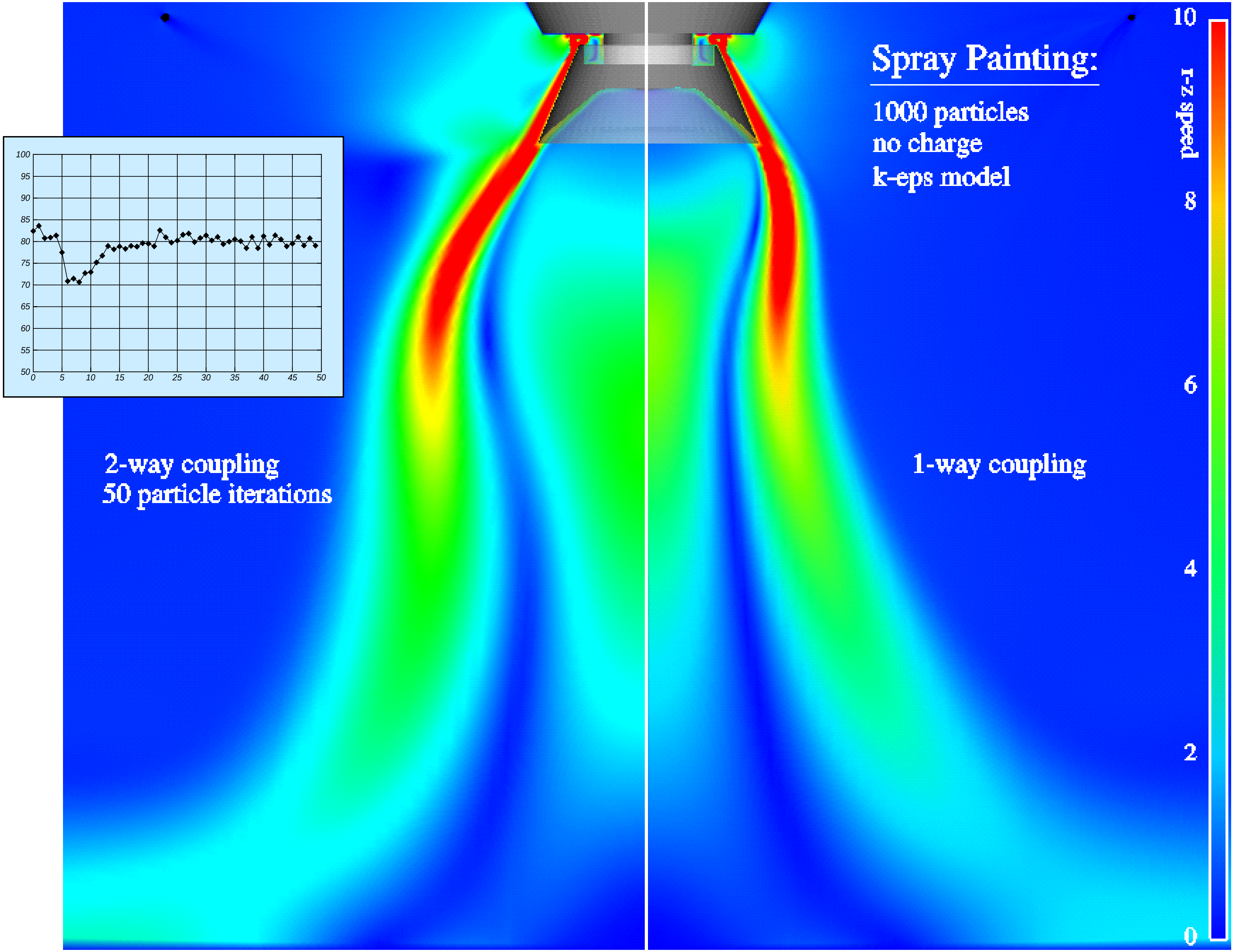


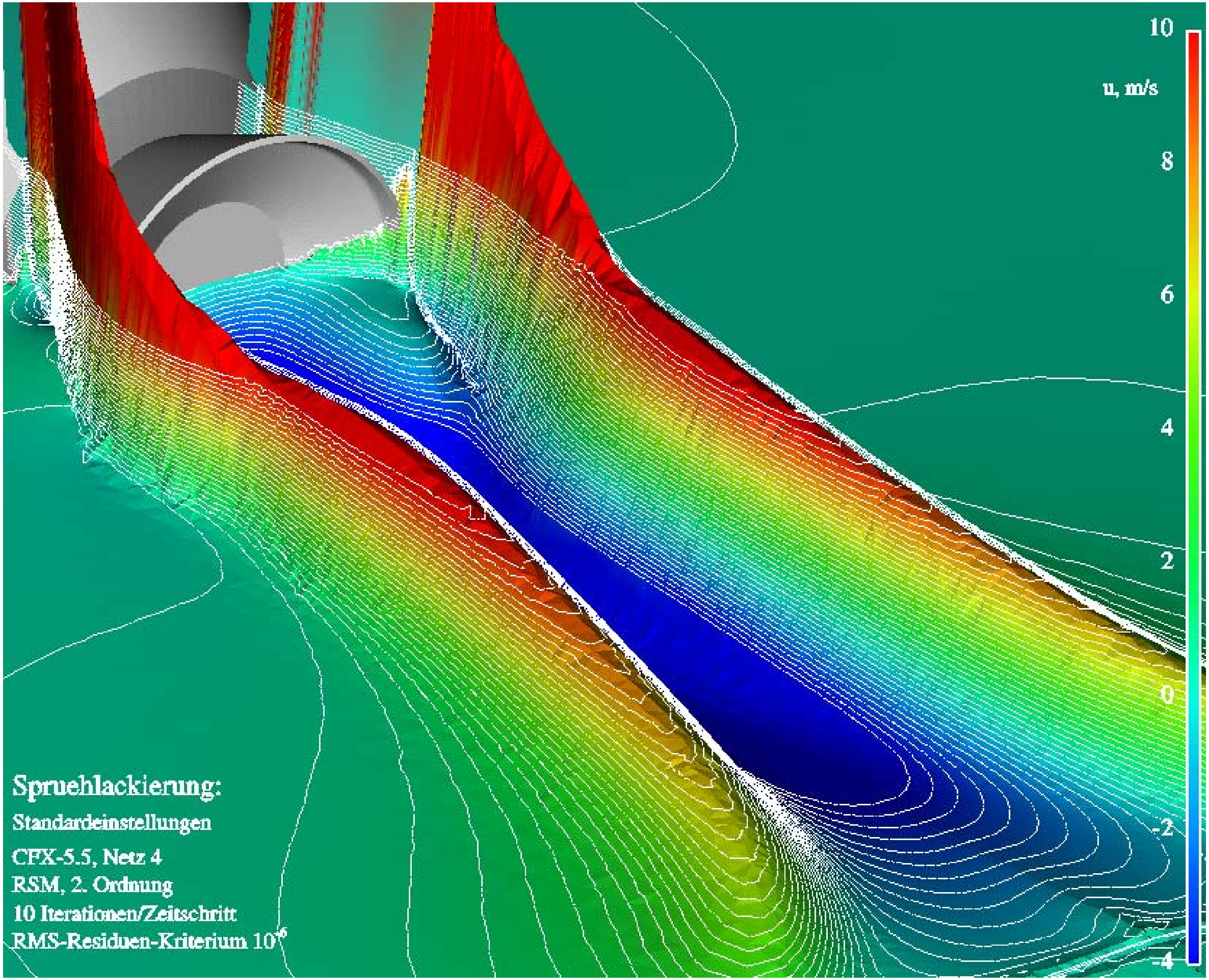
Lenkluft: -33%

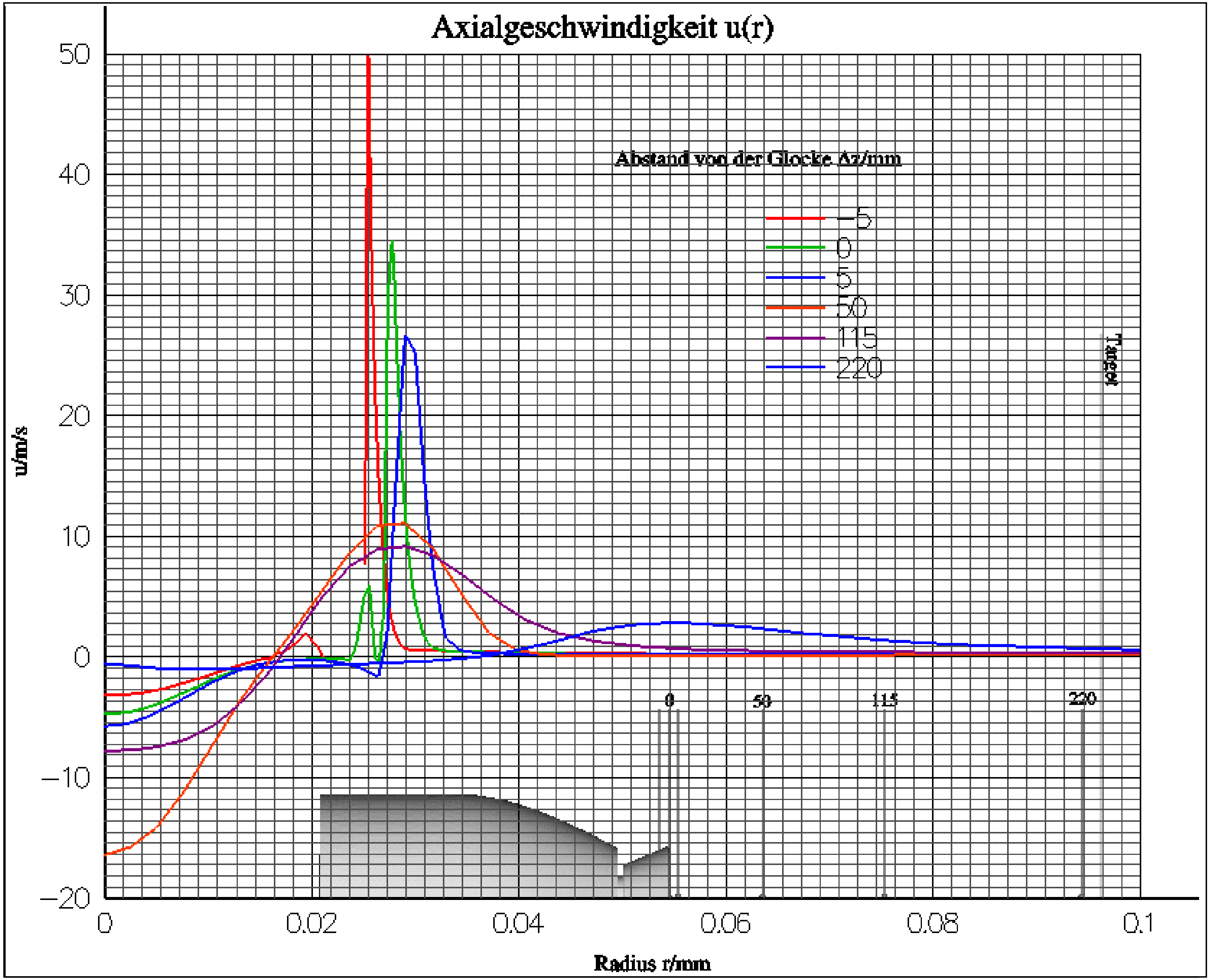
Elektrode



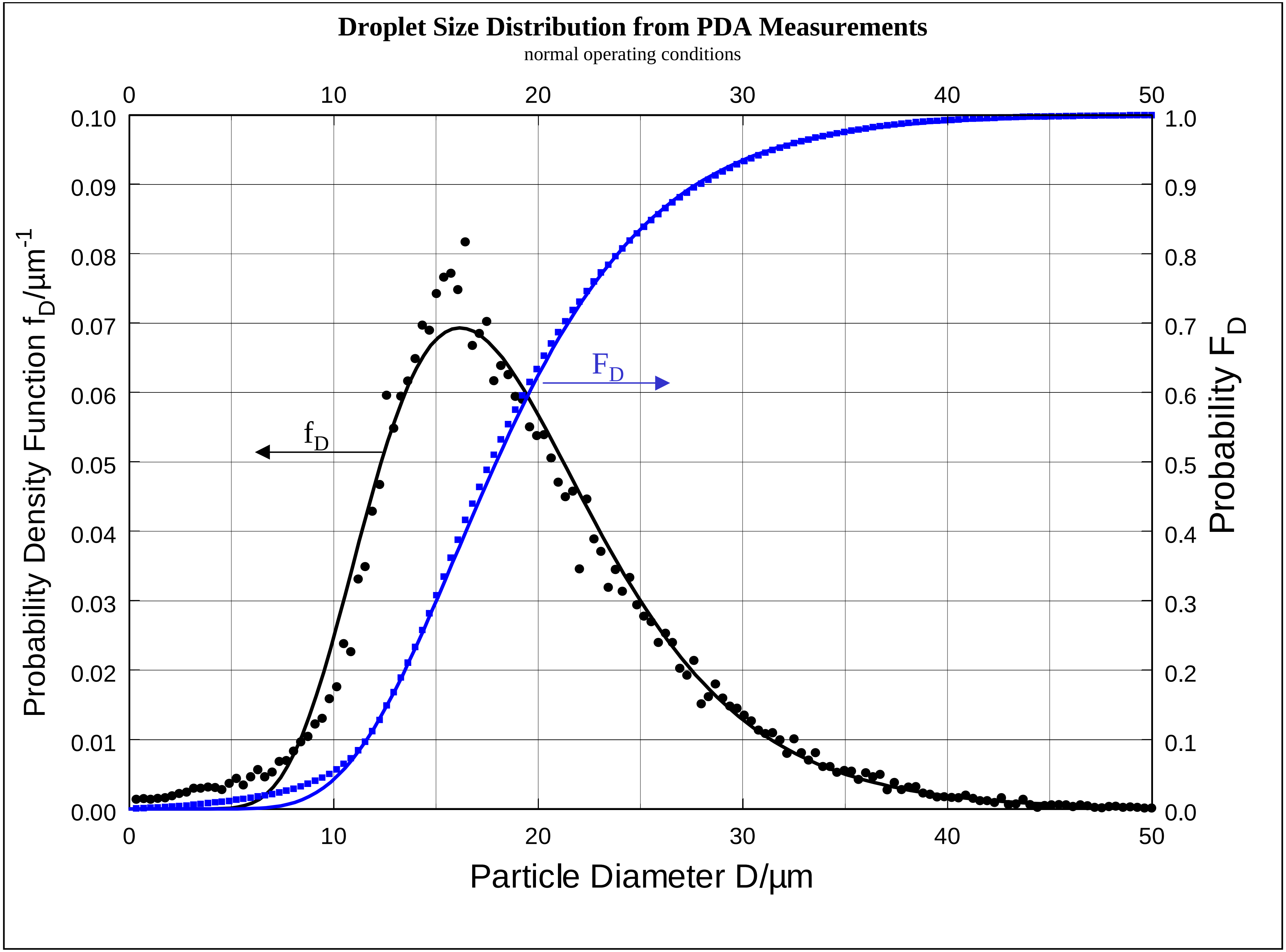



Spray Painting:
1000 particles
no charge
k-eps model
2-way coupling
50 particle iterations
1-way coupling
z-speed
10
8
6
4
2
0
100
95
90
85
80
75
70
65
60
55
50
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50

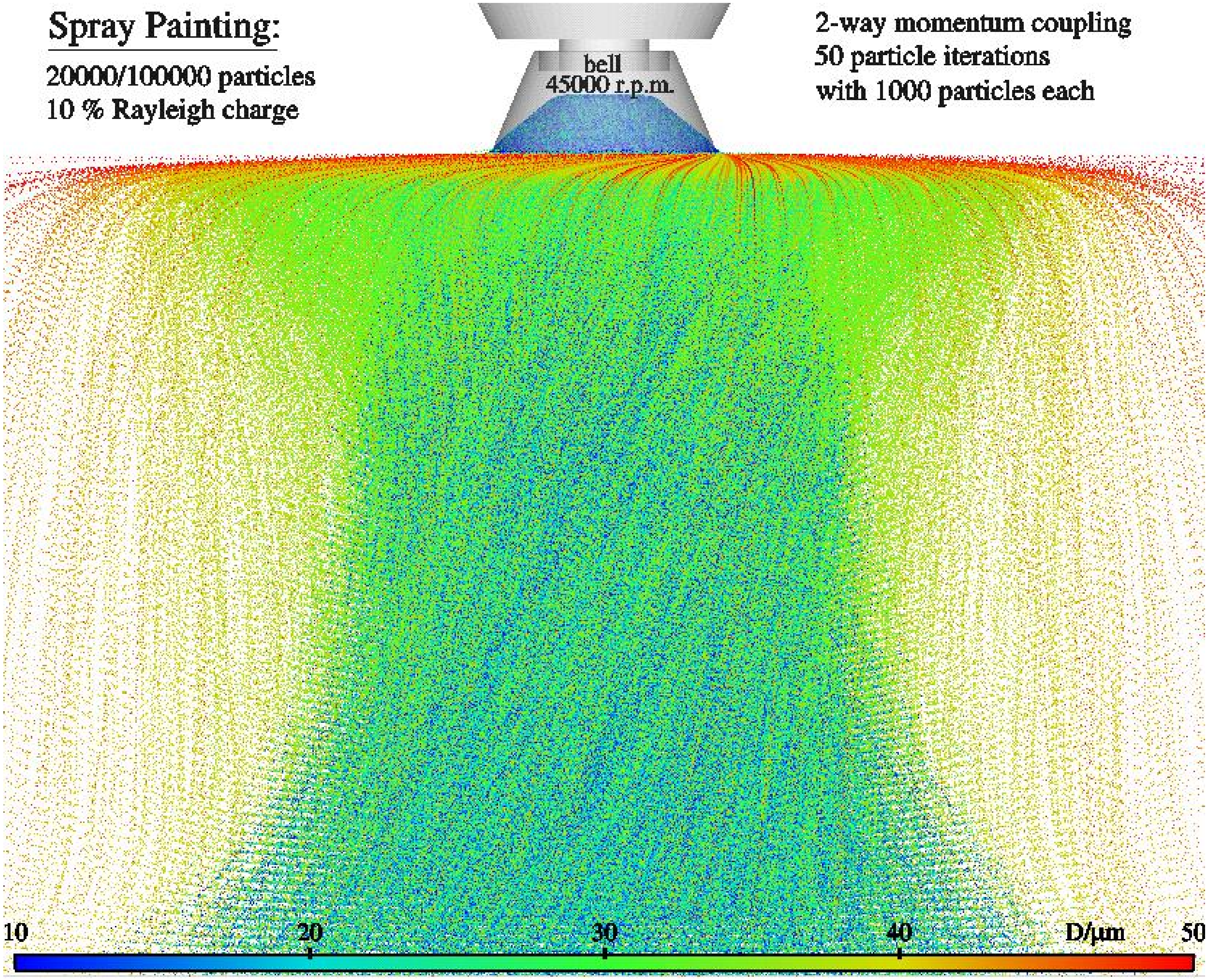

u, m/s
10
8
6
4
2
0
-2
-4
Spruehlackierung:
Standardeinstellungen
CFX-5.5, Netz 4
RSM, 2. Ordnung
10 Iterationen/Zeitschritt
RMS-Residuen-Kriterium 10^-6

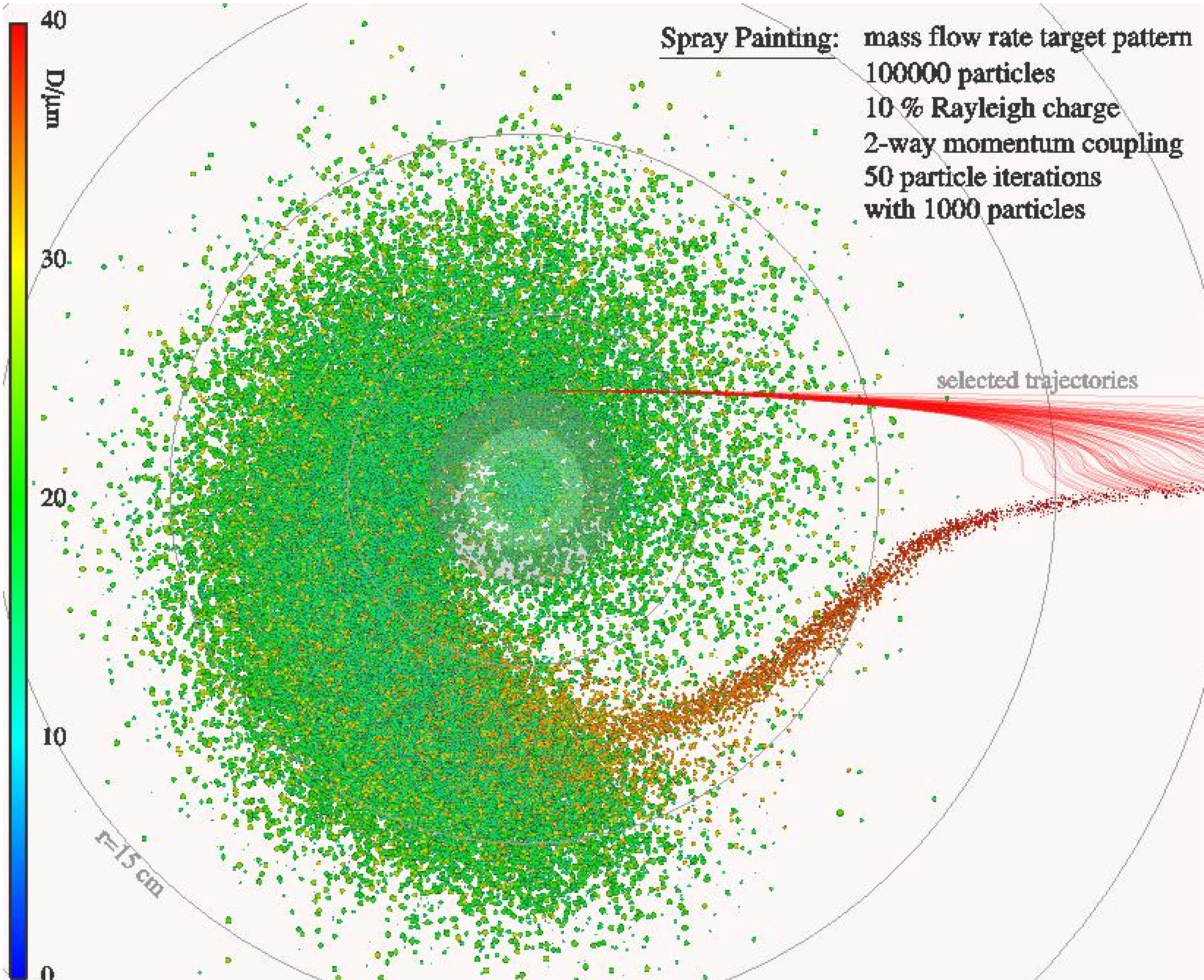


Axialgeschwindigkeit u(r)
Abstand von der Glocke Δz/mm
−5
0
5
50
115
220
Target
0
50
115
220
u/m/s
50
40
30
20
10
0
−10
−20
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
Radius r/mm

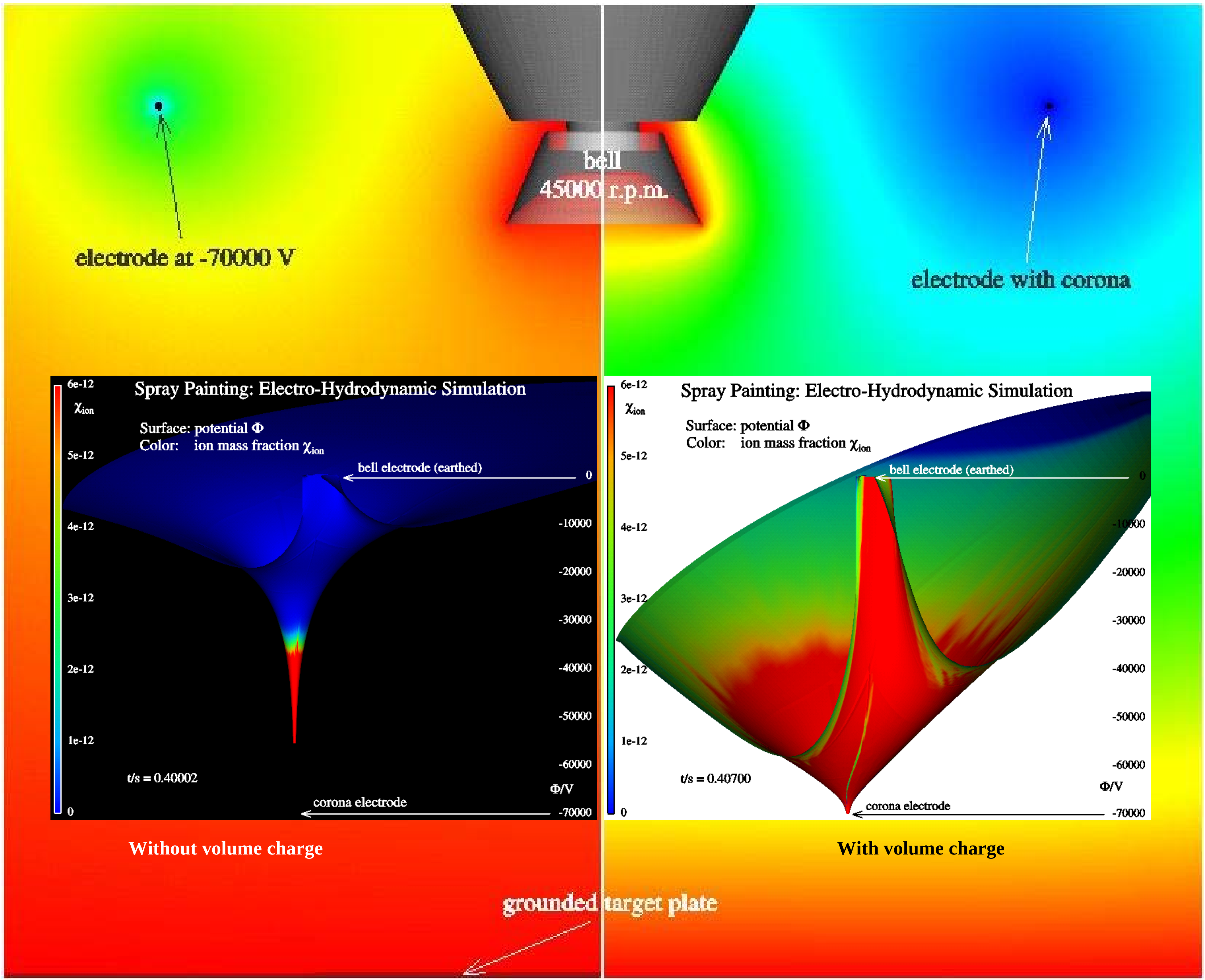


Droplet Size Distribution from PDA Measurements
normal operating conditions
Probability Density Function f_D/µm^{-1}
Probability F_D
Particle Diameter D/µm
f_D
F_D
0
10
20
30
40
50
0.00
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
0.08
0.09
0.10
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0


Spray Painting:
20000/100000 particles
10 % Rayleigh charge
bell
45000 r.p.m.
2-way momentum coupling
50 particle iterations
with 1000 particles each
10
20
30
40
D/µm
50



Spray Painting:
mass flow rate target pattern
100000 particles
10 % Rayleigh charge
2-way momentum coupling
50 particle iterations
with 1000 particles
selected trajectories
r=15 cm
D/µm
40
30
20
10
0



electrode at -70000 V
bell
45000 r.p.m.
electrode with corona
Spray Painting: Electro-Hydrodynamic Simulation
Surface: potential Φ
Color: ion mass fraction χ_{ion}
bell electrode (earthed)
corona electrode
t/s = 0.40002
6e-12
5e-12
4e-12
3e-12
2e-12
1e-12
0
-10000
-20000
-30000
-40000
-50000
-60000
-70000
Φ/V
Spray Painting: Electro-Hydrodynamic Simulation
Surface: potential Φ
Color: ion mass fraction χ_{ion}
bell electrode (earthed)
corona electrode
t/s = 0.40700
Without volume charge
With volume charge
grounded target plate

Transportprozesse:

- Luftströmung
- Ionentransport im selbst-konsistenten elektrischen Feld
- Partikelbewegung mit (Feld-)Aufladung durch Ionen, Verdunstung, etc.

Modellgleichungen:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = \frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial(u_k)}{\partial x_k} = 0$$

Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung)

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ki}}{\partial x_k} + F_i$$

Navier-Stokes-Gleichung (Impulserhaltung)

$$t_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i}\right) - \left(\frac{2}{3}\mu - \kappa\right)\frac{\partial u_l}{\partial u_l}\delta_{ij}$$

viskoser (molekularer) Scherspannungstensor,
μ: molekulare Viskosität, κ<<μ

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \ , \ \vec{E} = -\nabla \Phi$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \frac{\partial D_l}{\partial x_l} = \gamma_{ion} + \gamma_p \ , \ \vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}$$

E: elektrische Feldstärke, Φ: skalares Potential
γ: elektrische Raumladungsdichte (Ionen + Partikel)
ε: Permittivität

$$\frac{\partial \gamma_{ion}}{\partial t} + \frac{\partial j_l^{ion}}{\partial x_l} = s_{ion} \equiv -\left(\frac{\partial \gamma_p}{\partial t} + \frac{\partial j_k^p}{\partial x_k}\right)$$

Ladungserhaltungsgleichung

$$\vec{j}^{ion} = \gamma_{ion}(\vec{u} + b\vec{E}) - D_{ion}\nabla\gamma_{ion}$$

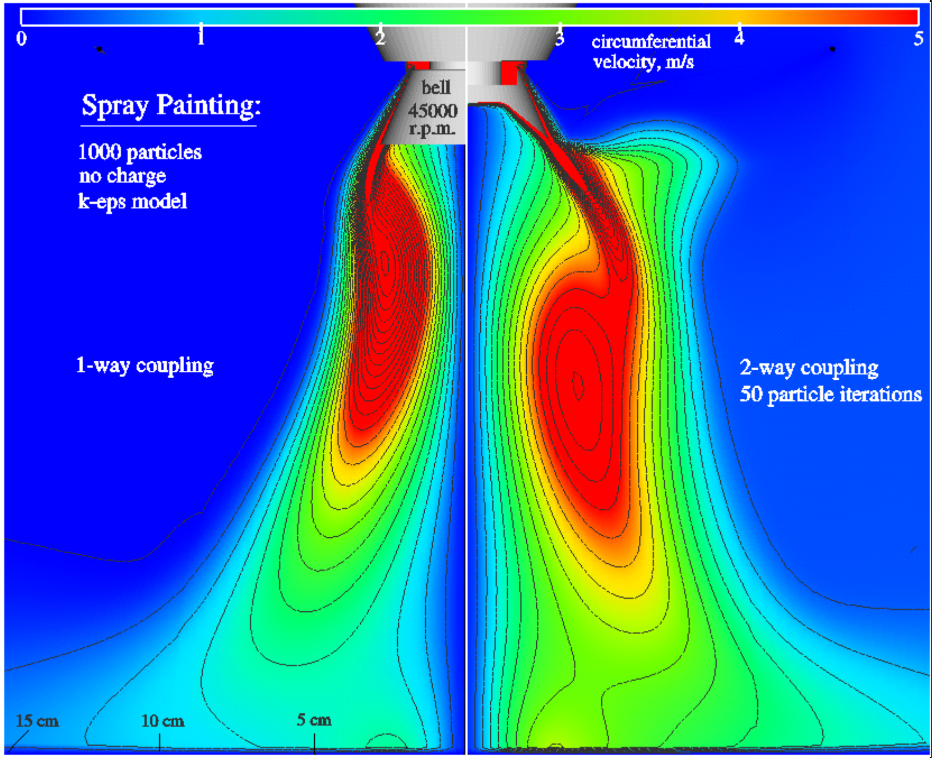
Ionenstromdichte durch Konvektion, Konduktion, Diffusion
b: elektrische Ionenbeweglichkeit
D: Diffusionskoeffizient
w=bE: Driftgeschwindigkeit

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = f(\vec{u}-\vec{v}, \frac{D\vec{u}}{Dt} - \frac{d\vec{v}_p}{dt}, \ldots, \vec{E}, q)$$

$$\frac{dq}{dt} = f(q, \gamma_{ion}, |\vec{E}|, |\vec{u}-\vec{v}|, t)$$

Lagrange-Darstellung: u=*instantane* Fluidgeschwindigkeit (!)

Erhaltungsgleichungen für translatorischen Partikelimpuls sowie Partikelladung



Wechselwirkungen:

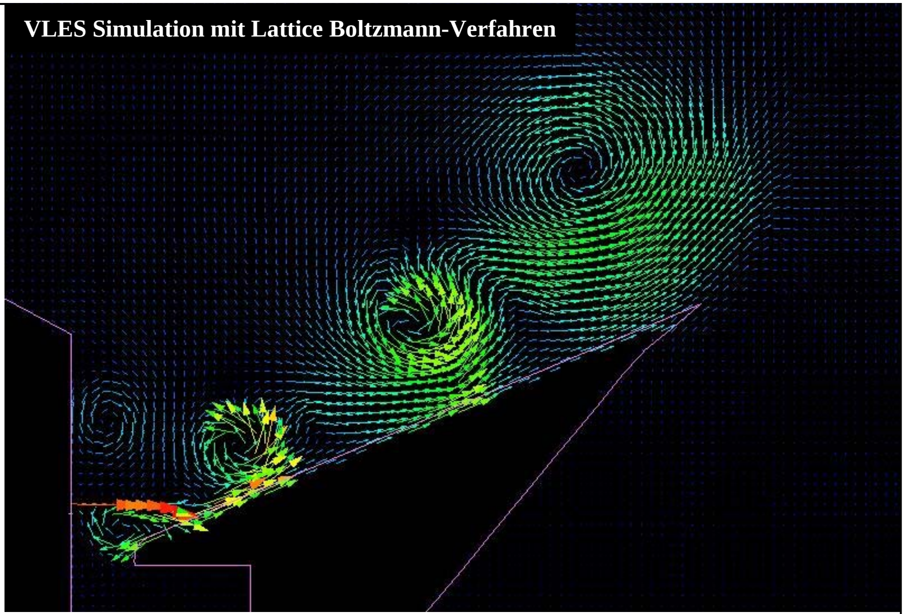
- Impulsaustausch zwischen kontinuierlicher und Partikelphase
- Impulsrückwirkung auf Turbulenzstruktur
- Impulsaustausch zwischen Ionen und Luft
- Ladungsaustausch zwischen Ionen und Partikeln

$\downarrow$

Klasseneinteilung nach Kopplungsintensität
Identifizieren von Teilproblemen
iterative Kopplung

Randbedingungen für E-Feld:

Elektrodenspitze:	$\Phi = \Phi_c$	z.B. Φ_c=-56 kV (Meßwert),
	$E \leq E_c$	Kaptzov-Bedingung mit Peek-Feldstärke E_c, z.B. 12 MV/m
Leiter:	$\Phi = 0$	geerdete Äquipotentialflächen: Glocke, m.E. Target
Nichtleiter:	$\frac{\partial \Phi}{\partial x_n} = 0$	Oberfläche mit Ladung gesättigt (?)



Bemerkungen:

1. Strömungsgleichungen praktisch nicht lösbar ! Beschreibung turbulenter Schwankungen als stochastischer Prozeß: (z.B. zeitliche „Reynolds"-Mittelung + Ergodenhypothese)

$$\vec{u} \rightarrow \vec{U} = \vec{u} - \vec{u'}$$

$$t_{ij} \rightarrow t_{ij} + \tau_{ij} \;,\; \tau_{ij} = -\rho\overline{u_i' u_j'}$$ Reynoldsspannung

⟶ Physikalisch motivierte Annahmen zur Modellschließung notwendig !

(a) 6 Transportgleichungen für Reynoldsspannungen

(b) Boussinesq-Approximation:

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_l}{\partial x_l}\right)\delta_{ij}$$

Transportgleichung für turbulente kinetische Energie: $k = \frac{1}{2}\overline{u_l' u_l'}$

Transportgleichung für Dissipationsrate der turbulenten kinetischen Energie: $\varepsilon = \frac{\mu}{\rho}\overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}}$

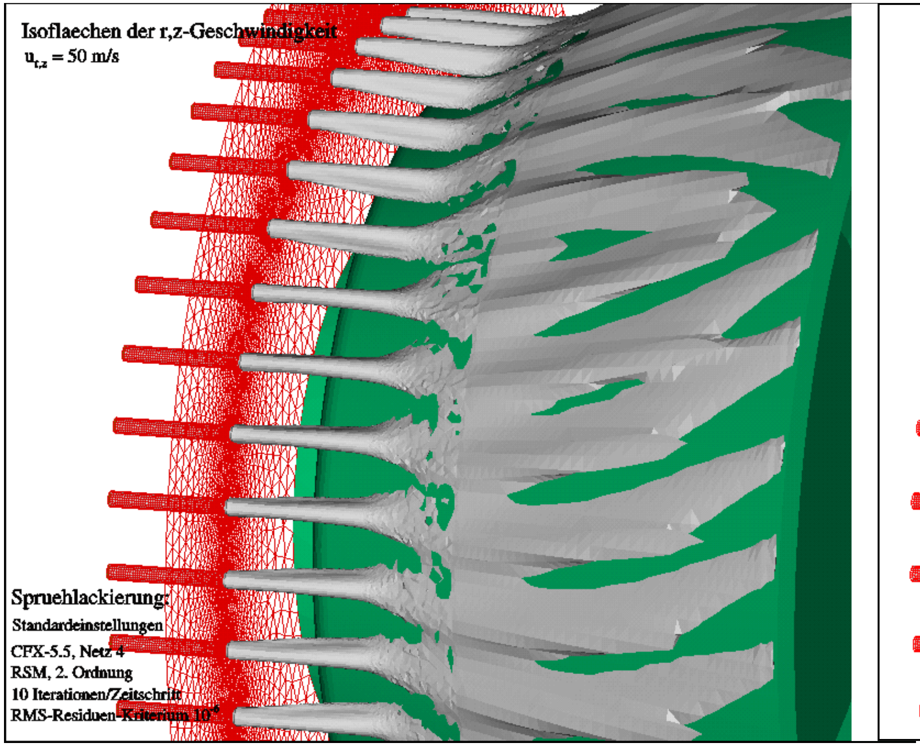
oder

Transportgleichung für Frequenz der dissipierenden Wirbel: $\omega = \frac{1}{C_\mu}\frac{\varepsilon}{k}$

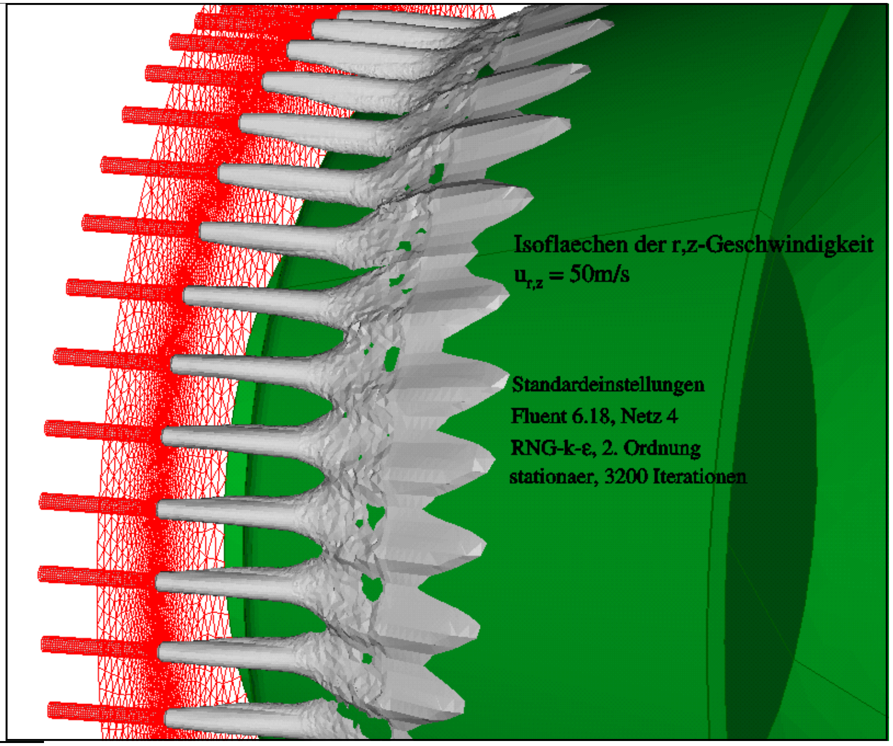
turbulente Wirbelviskosität: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$

2. 1-phasige Strömungsergebnisse abhängig von:
   - Netzeinteilung
   - Diskretisierungsschema
   - Turbulenzmodell

⟶ hoher numerischer Aufwand für Gittererzeugung und Berechnung notwendig !



RSM, 2.Ordnung, CFX-5.5



RNG-k-ε, 2.Ordnung, Fluent-6.18

Isoflächen der r,z-Geschwindigkeit $U_{r,z}$ = 50 m/s

Elektrisches Teilproblem: Berechnung von Ionenkonzentration und selbst-konsistentem E-Feld

Störungsansatz: Ionen werden allein durch E-Feld bewegt, keine anderweitigen Einflüsse

$$\gamma_p = 0\ ,\ s_{ion} = 0\ ,\ \vec{j}^{\,ion} = \gamma_{ion} b \vec{E}$$

$$\boxed{\begin{array}{l} \Delta\Phi = -\dfrac{\gamma_{ion}}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}\ ,\ \vec{E} = -\nabla\Phi \\[2ex] \dfrac{\partial \gamma_{ion}}{\partial t} + \nabla \cdot (b \gamma_{ion} \vec{E}) = 0 \end{array}}$$

1. *Ansatz*: $\vec{E} = \vec{E}_1 = S\vec{E}_0$ E_0: E-Feld ohne Raumladung (Lösung der Laplace-Gleichung)

$$\nabla \cdot \vec{E}_0 = 0\ ,\ \nabla \times \vec{E}_0 = \nabla \times \vec{E}_1 = 0 \ \rightarrow\ S = \sqrt{\frac{2\, j_c^{ion}}{\varepsilon_0 \varepsilon_r E_{0c}} \Delta t_c + \left(\frac{E_{1c}}{E_{0c}}\right)^2}$$

$\Delta\, t_c$: Zeit, die ein Ion im Laplace-Feld benötigt, um entlang der Feldlinie Γ_c vom Fußpunkt c („corona") auf der Sprühelektrode bis zum Aufpunkt zu driften

j_c: Ionenstromdichte am Fußpunkt c

$$\Delta\Phi = \int_{\Gamma_c} \vec{E}_1(j_c^{ion}) \cdot d\vec{l}$$: iterative Bestimmung der Ionenstromdichteverteilung auf der Elektrode

Berechnungsgang: Lösung der Laplace-Gleichung (z.B. BEM), Integration entlang E-Feldlinien

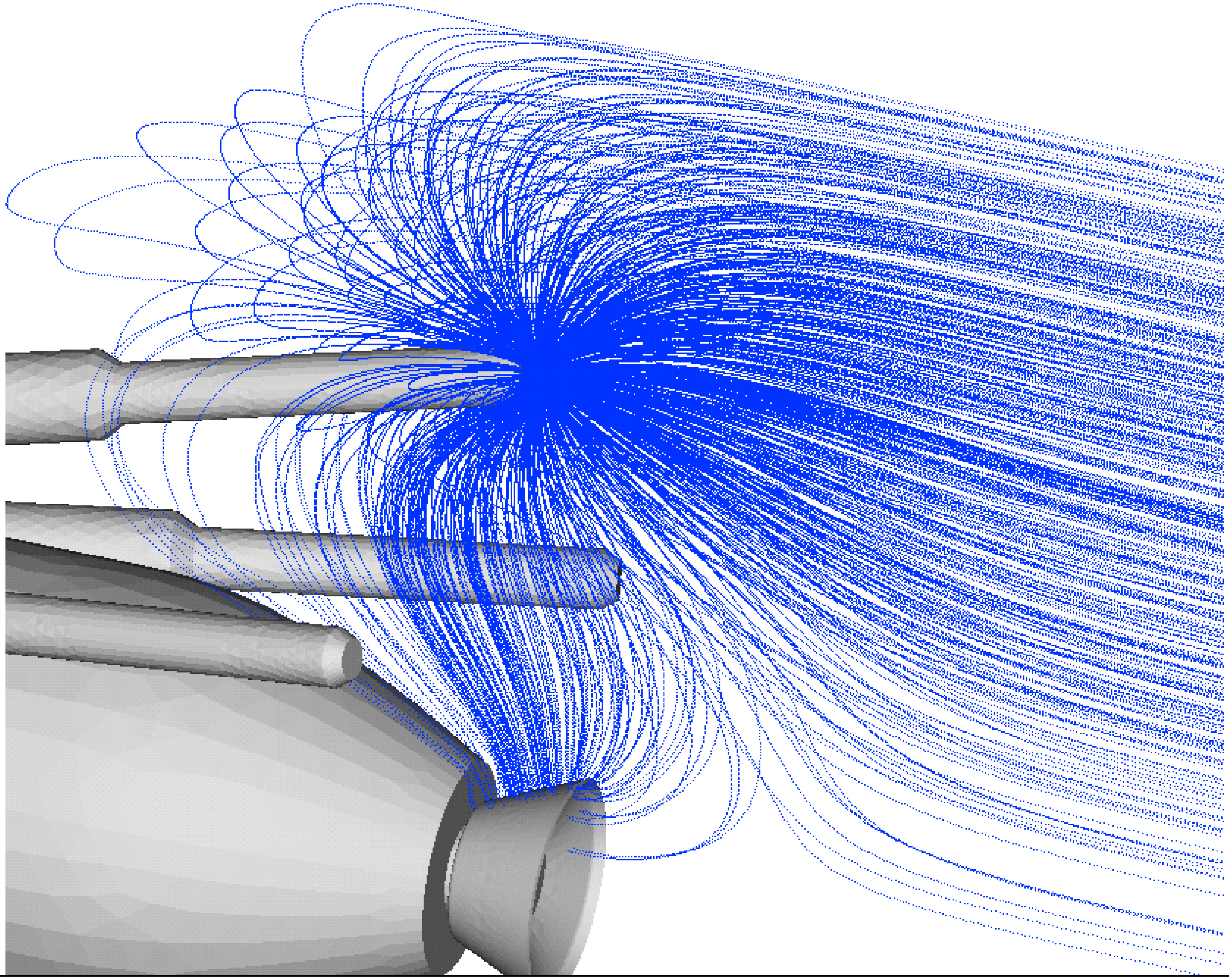
$\longrightarrow$ analytisch lösbare Fälle sowie „Spitze-vor-Platte": E_1 bereits gute Näherung !

2. *Iterative Nachbesserung*: Lösung der Poisson-Gleichung mit Partikelladungsdichte als Anregung
Lösung der Ionentransportgleichung mit Konvektions- und Diffusionseinfluß
FEM-BEM Kopplung

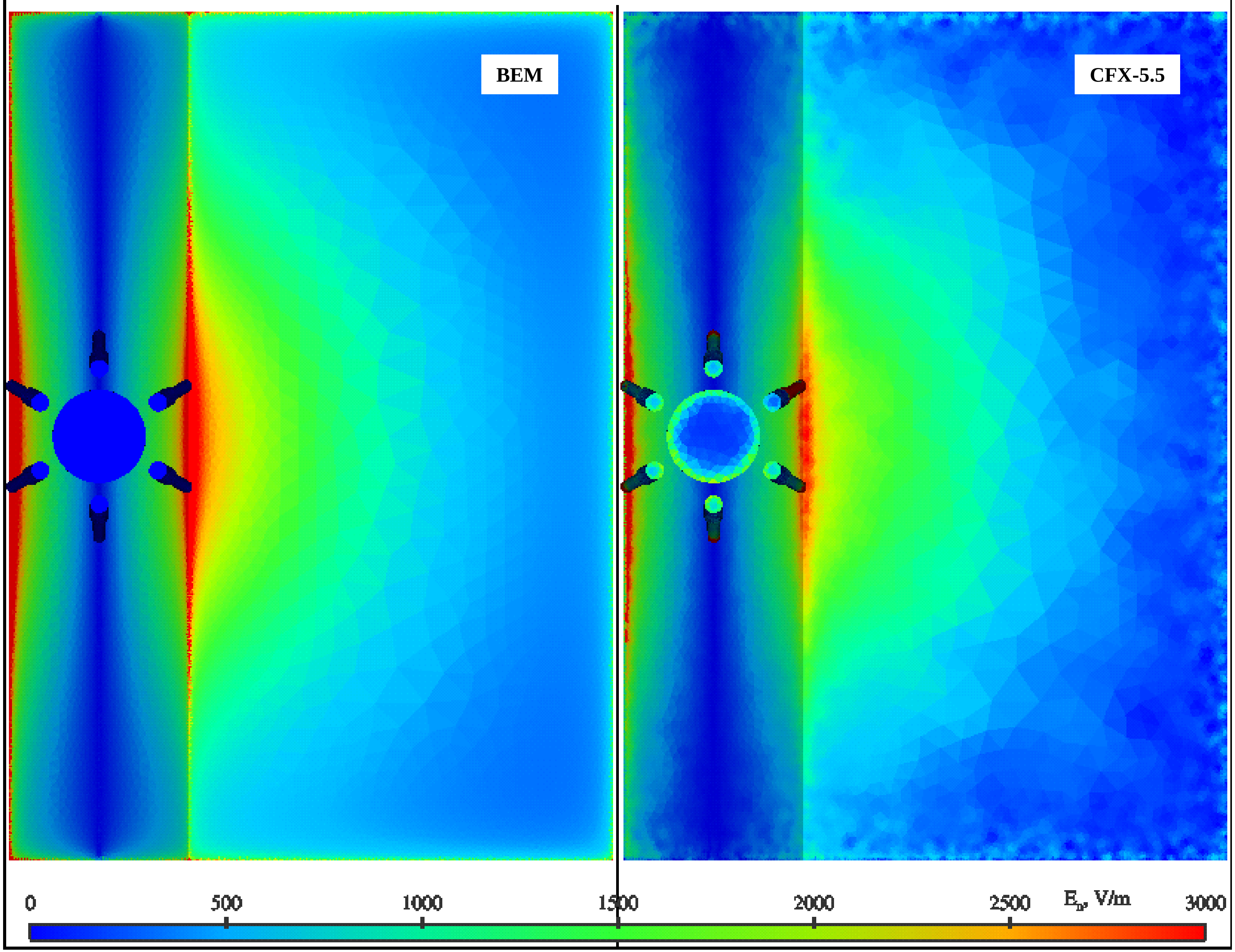
BEM:

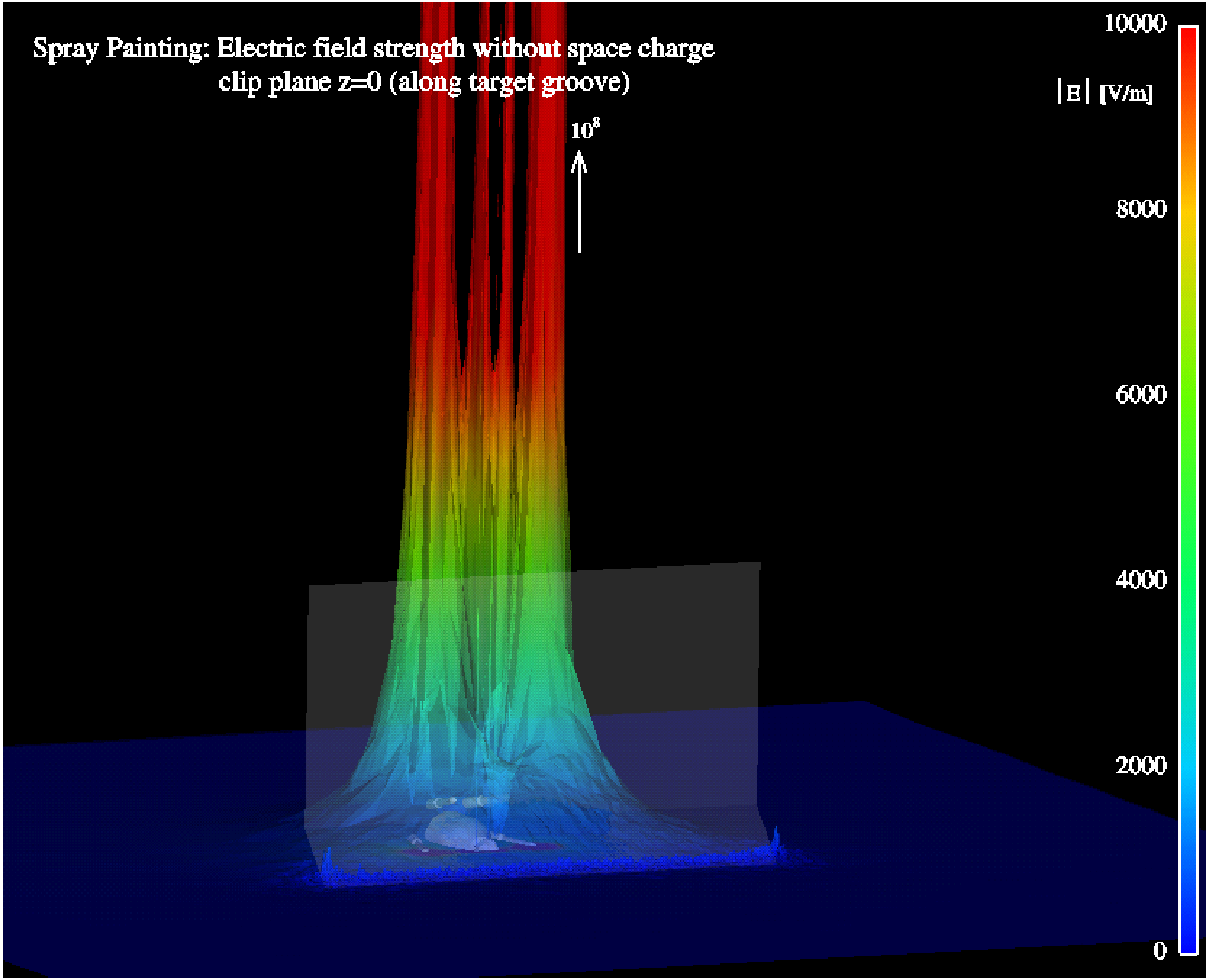
- hohe Zahl an Freiheitsgraden ~ 10^5
- großer Anteil an Dirichlet-Rändern
- schnelle Lösung des linearen Systems + schnelle Auswertung (E-Feld) im Volumen

Verfahren benötigt kein Volumennetz
E-Feld glatt
berechnete Feldlinien geeignet für automatische Netzkonstruktion



Vergleich der Lösungen des Laplace-Problems




Spray Painting: Electric field strength without space charge
clip plane z=0 (along target groove)
10^8
|E| [V/m]
10000
8000
6000
4000
2000
0