

S. Schumacher, R. Jasti, C. Asbach
K. Schmidt, M. Kerner, A. Hellmann, S. Antonyuk

Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Abscheide- verhalten neuer und gealterter Elektretfilter

Laufzeit: 01.09.2016 – 28.02.2019

2. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses
Kaiserslautern, 29. Januar 2018



*Institut für Energie-
und Umwelttechnik e.V.*
Luftreinhaltung & Filtration

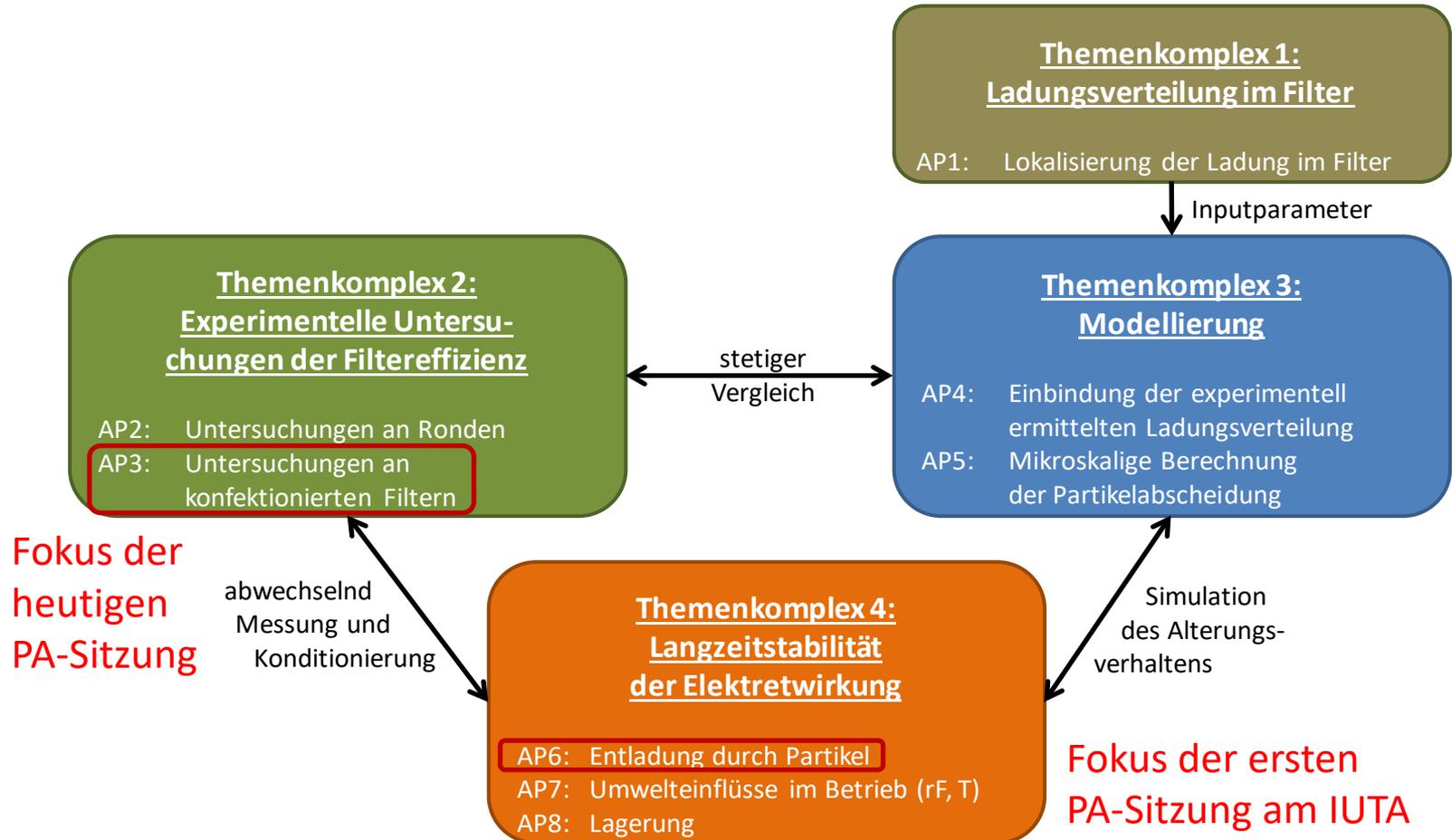


**Technische Universität
Kaiserslautern**

*Lehrstuhl für Mechanische
Verfahrenstechnik*

Ziel des Vorhabens und Lösungsweg

- grundlegendes Verständnis zu Ladungsverteilung, Abscheidung und Langzeitstabilität
- kombinierter Ansatz aus Experimenten und Simulationen



- Entwicklung und Charakterisierung eines Diffusionsaufladers
- Messungen an drei verschiedenen Kfz-Innenraumfiltern
 - Charakterisierung des Druckverlusts
 - Abscheideeffizienz für verschiedene Partikelladungszustände
 - NaCl
 - DEHS

} Vergleich
 - Charakterisierung des Oberflächenpotentials
 - Abscheideeffizienz für verschiedene Filterladungszustände
 - Entladung durch Tränken in Isopropanol
 - Entladung in mit Isopropanol gesättigter Luft

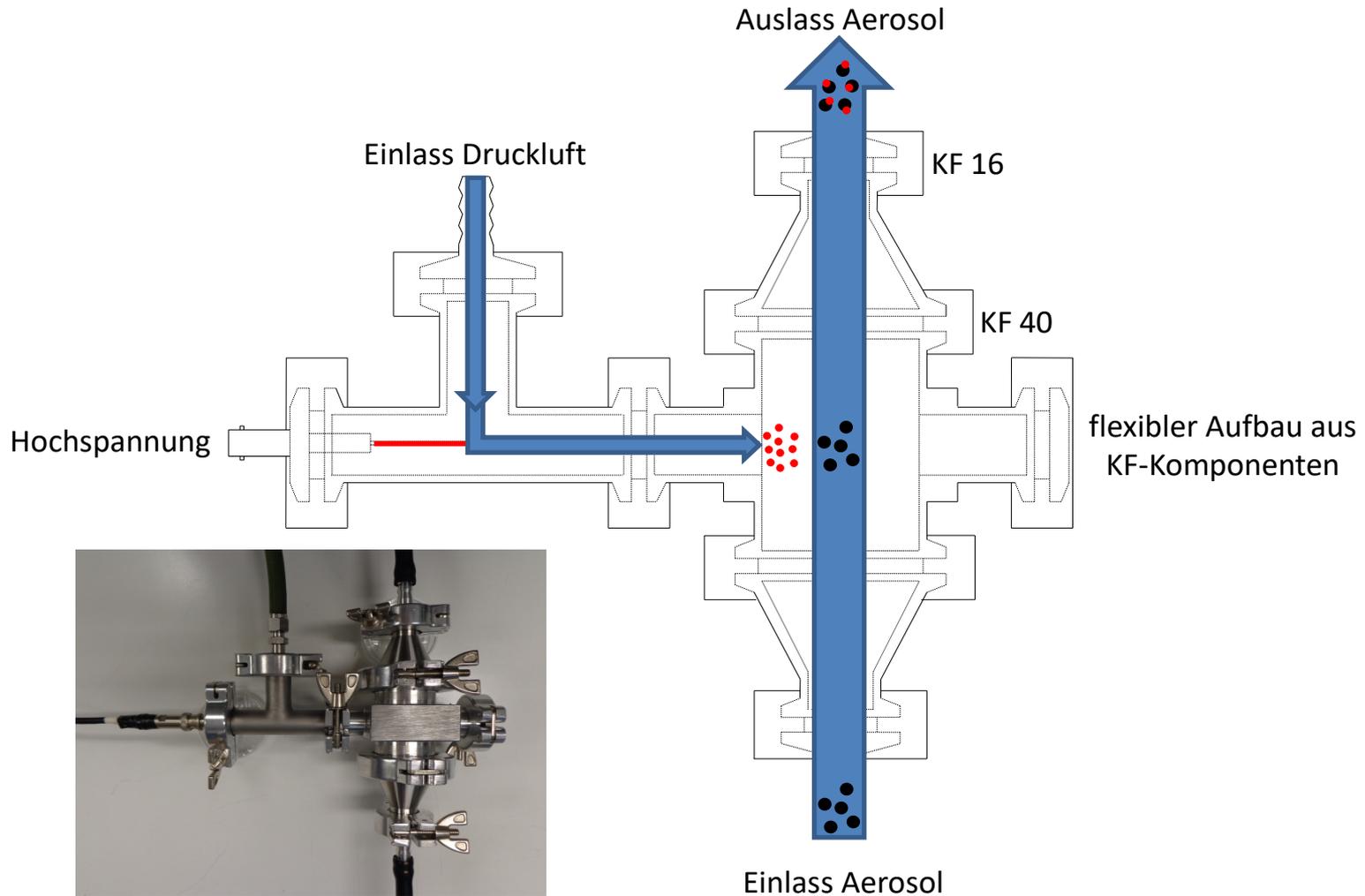
} Vergleich
 - Änderung der mittleren Partikelladung hinter dem Filter

Das Ergebnis jeder ernsthaften Forschung kann nur sein,
zwei Fragen zu entwickeln, wo vorher nur eine stand.

(Thorstein Veblen)

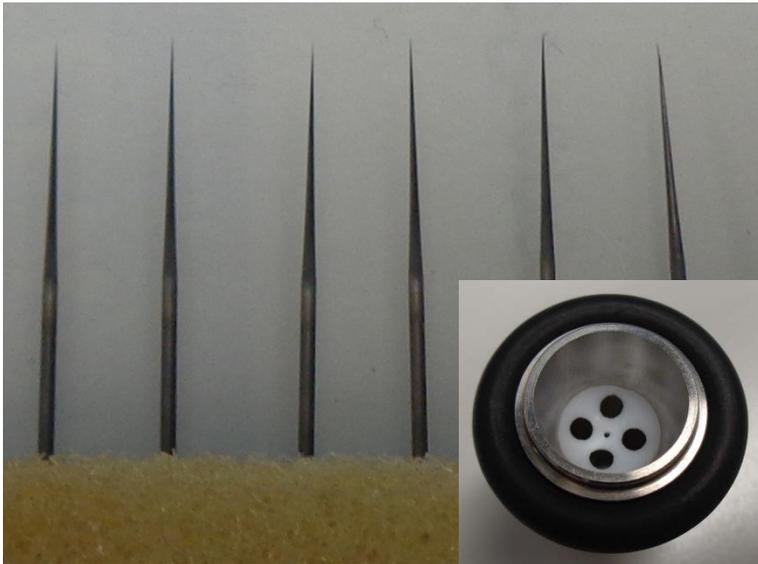
Entwicklung eines Diffusionsaufladers

- basierend auf einem Konzept von Ana Maria Todea (Projekt BUONAPART-E)

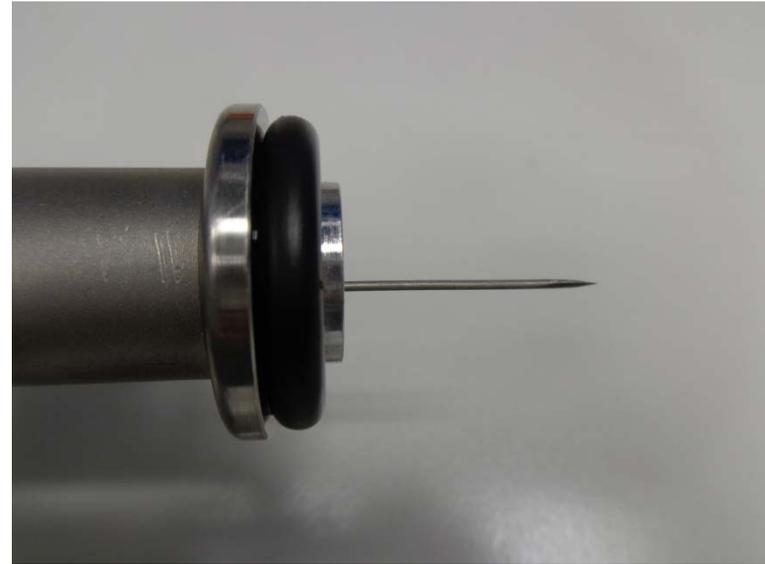


Entwicklung eines Diffusionsaufladers

- als Spitzen ursprünglich kommerzielle REM-Kathoden aus Wolfram geplant
→ sehr definierte und scharfe Spitze → hohe Feldstärke und Ionenemission
- Problem: Spitzen zu kurz, Wolfram-Verbindungen schwer zu löten, Ausrichtung schwierig
→ Verwendung eines durchgehenden, angespitzten 1 mm Wolframdrahts

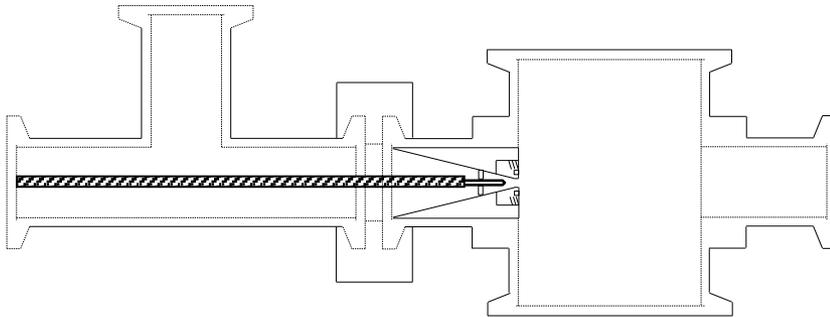


REM-Spitzen und Teflonfixierung

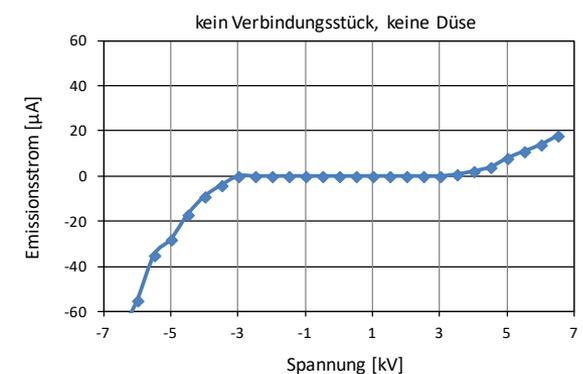
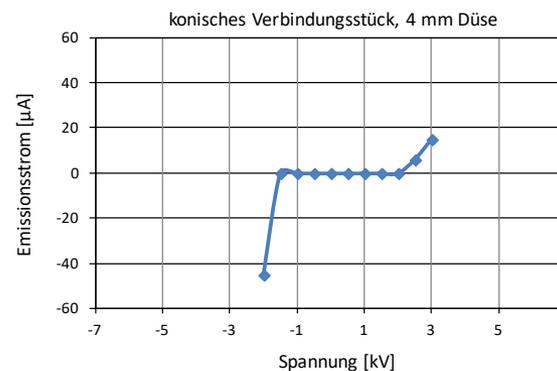
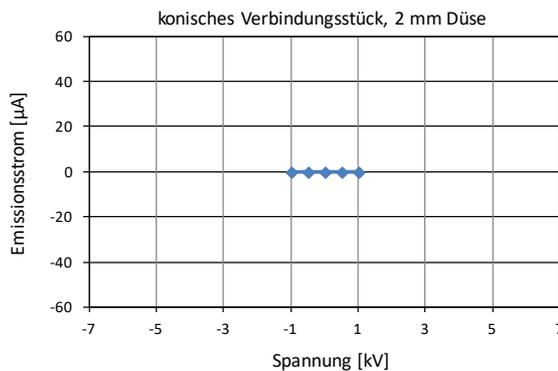


angespitzter Wolframdraht

- Koronanadel sollte ursprünglich vor wechselbarer, kleiner Düse platziert werden
→ hohe Strömungsgeschwindigkeit, um Ionenabscheidung an Wänden zu minimieren

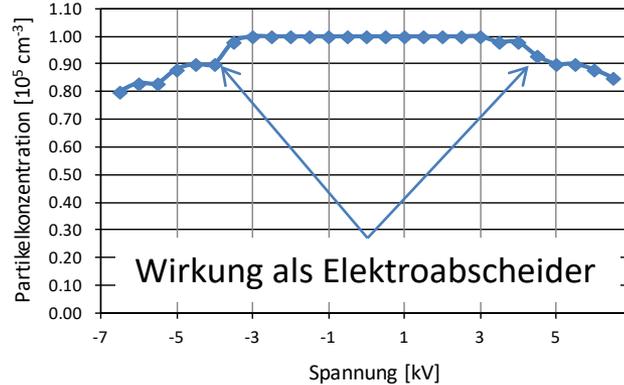
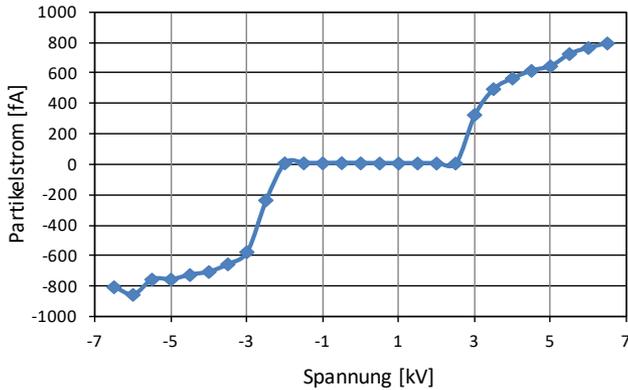


- Problem: Überschlüge, Deposition von Partikeln, Positionierung schwierig
→ Weglassen der Düse und des konischen Verbindungsstücks



- negative Korona effizienter, aber weniger stabil und mehr Ozon-Produktion

- gleichzeitige Messung von Partikelstrom und Anzahlkonzentration



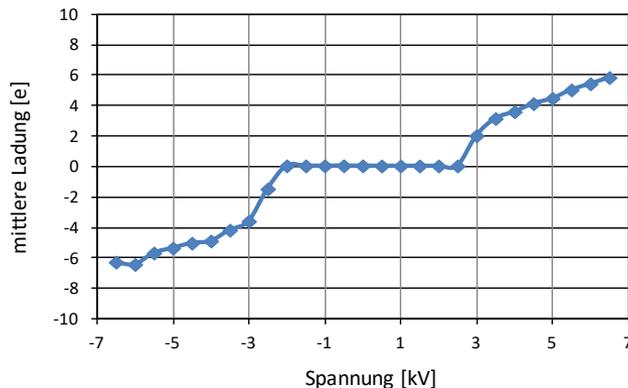
Elektrometer



CPC

- Bestimmung der mittleren Ladung pro Partikel

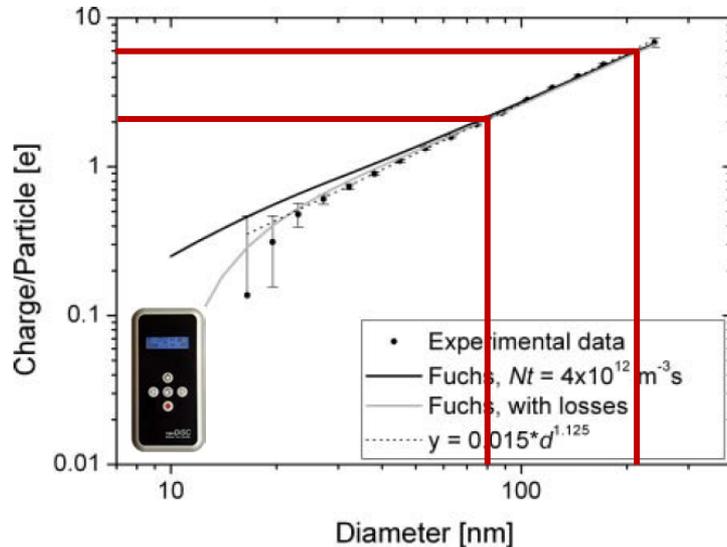
$$q_P = \frac{I_P}{Q \cdot C_N} \quad (Q_{\text{Elektrometer}} = 0,6 \text{ l/min})$$



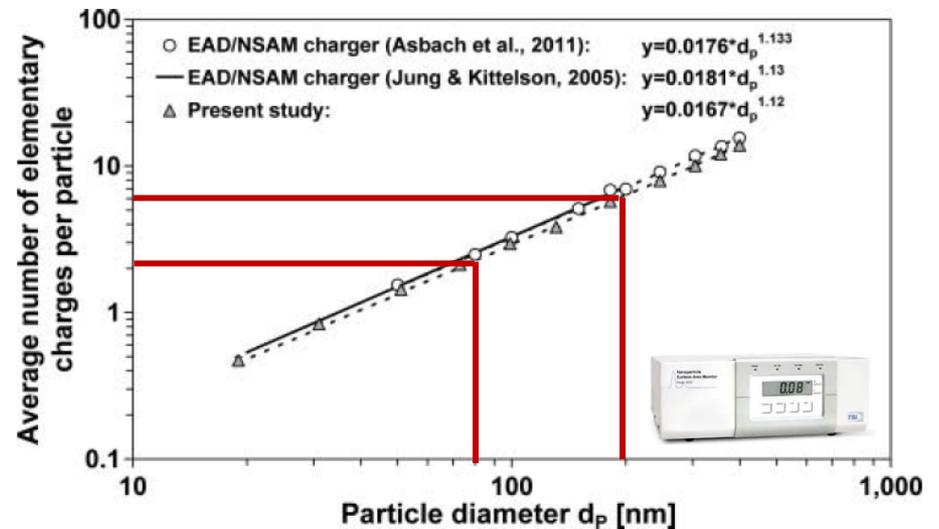
- Diffusionsauflader lädt Partikel effizient auf
 - Ladungszustand noch nicht vollständig gesättigt bei maximal anlegbarer Spannung
- nicht problematisch für spätere Messungen

Vergleich mit Literaturwerten

- Modaldurchmesser ca. 80 nm, in Sättigung mindestens 6 Elementarladungen pro Partikel
- nach Literatur für miniaturisierte Diffusionsauflader nur 2 Elementarladungen erwartet

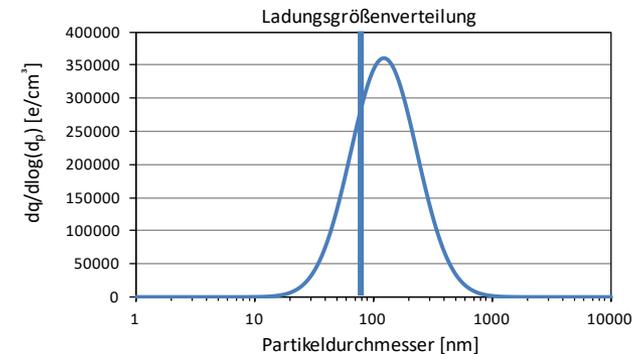


M. Fierz *et al.* Aerosol Sci. Technol. 45 1 (2011)



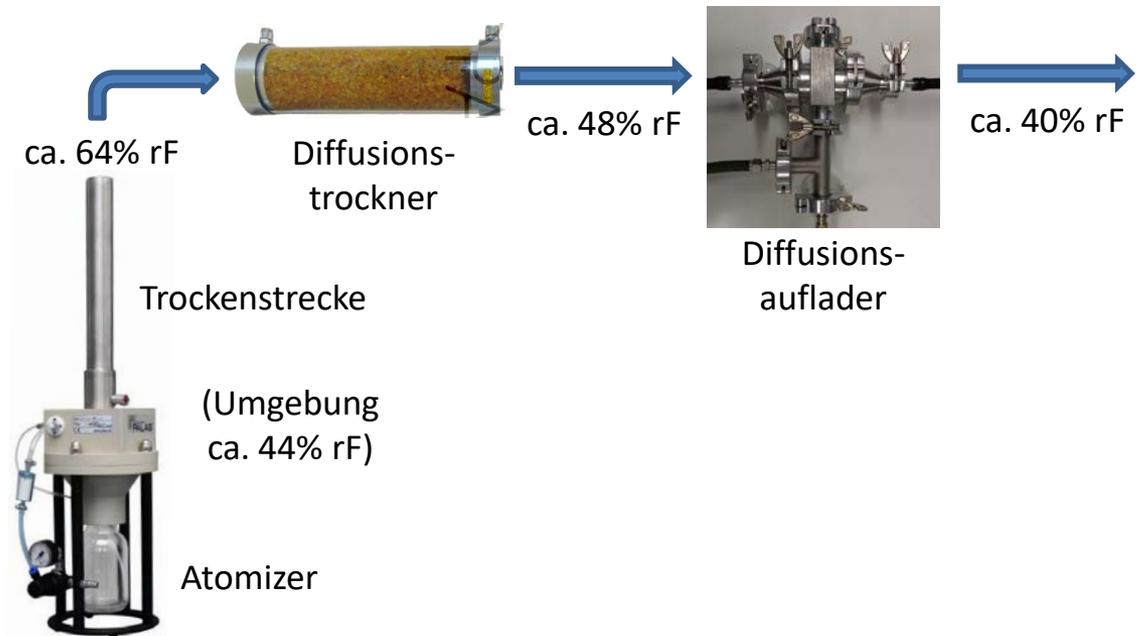
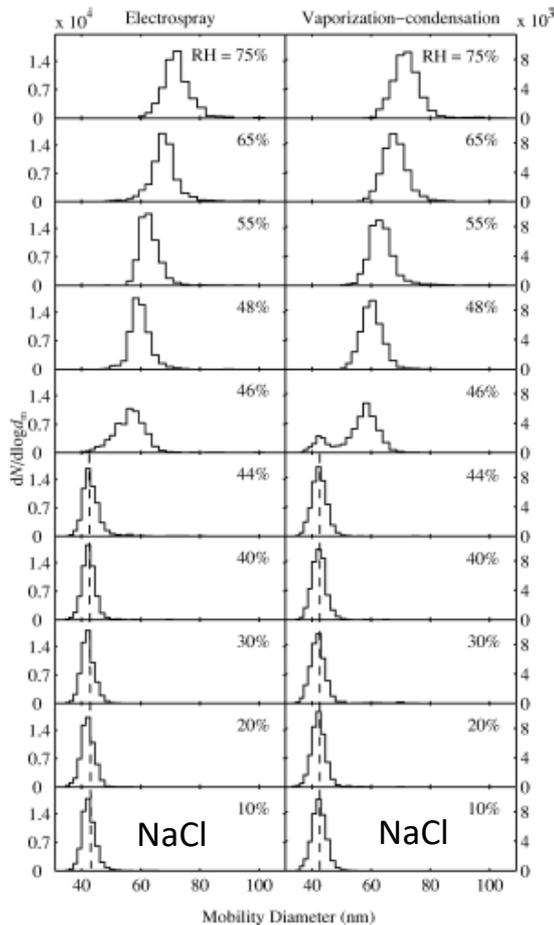
H. Kaminski *et al.* Aerosol Sci. Technol. 46 708 (2012)

- Elektrometer/CPC mit Zweitgeräten verglichen
→ keine signifikanten Abweichungen
- polydisperses statt monodisperses Aerosol
→ leicht höhere mittlere Ladung (ca. 2,8 e)



Einfluss der Trocknung des Aerosols

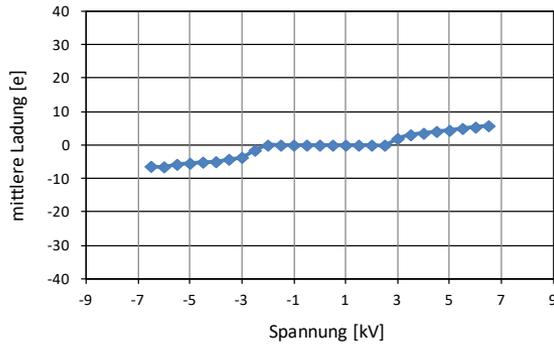
- vollständige Kristallisation erst bei Unterschreitung der relativen Effloreszenzfeuchte (ERH)
- ERH für 80 nm NaCl-Partikel bei etwa 45 % rF (Wert leicht partikelgrößenabhängig)



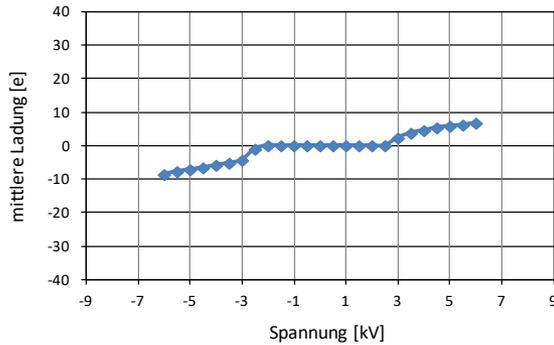
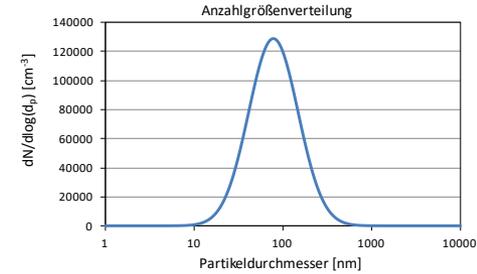
- keine vollständige Trocknung bei Eintritt in den Auflader
→ Partikel bei Aufladung größer als später gemessen
- vielleicht Aufladung aber auch effizienter als erwartet (hängt von Verweilzeit x Ionenkonzentration ab)

G. Biskos *et al.* Aerosol Sci. Technol. 40 97 (2006)

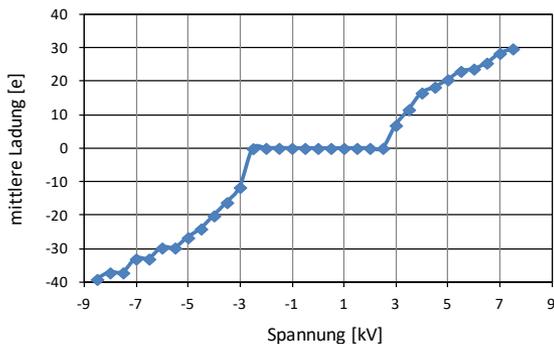
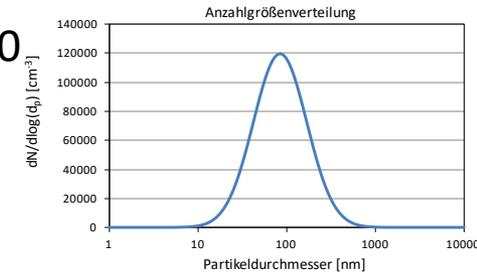
Mittlere Ladung für größere Partikel



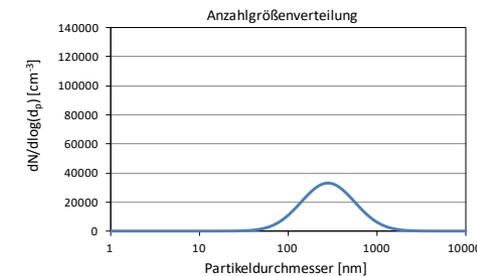
- NaCl (50 g/l) → CMD = 78 nm, $\sigma = 1.9$
→ 4,5 / -5,3 e bei ± 5 kV
- erwartet ca. 2,8 e



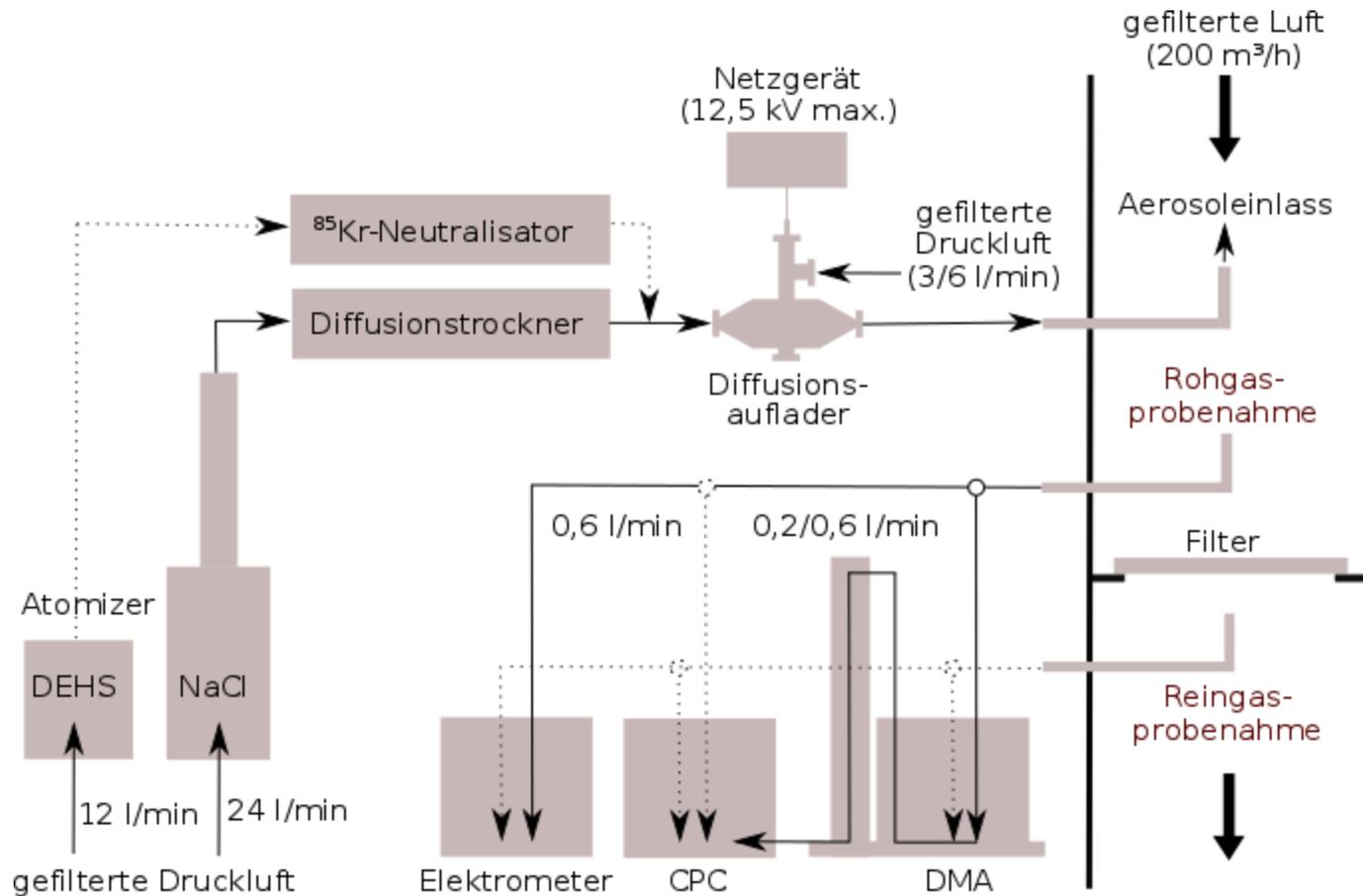
- NaCl (200 g/l) → CMD = 84 nm, $\sigma = 2.0$
→ 5,9 / -7,1 e bei ± 5 kV
- erwartet ca. 3,2 e



- DEHS → CMD = 280 nm, $\sigma = 2.0$
→ 20,5 / -26,6 e bei ± 5 kV
- erwartet ca. 12,4 e



• Fazit: effiziente Bereitstellung unipolar geladener Partikel möglich



- Atomizer: Palas AGF 2.0 (DEHS), AGK 2000 (NaCl)
- SMPS: TSI 3936 (DMA 3081), CPC: TSI 3776/3787
- Elektrometer: TSI 3068B

- ⁸⁵Kr-Neutralisator: TSI 3012
- Hochspannungsnetzgerät: FuG HCP 14-12500
- Prüfstand gemäß DIN 71460-1 (Kfz-Innenraumfilter)

- drei gleich konfektionierte Filtertypen aus drei verschiedenen Medien
- Nennvolumenstrom je nach Kunde 180, 200 oder 360 m³/h

→ hier 200 m³/h verwendet (entspricht 8 cm/s Anströmgeschwindigkeit)



(Beispielfoto)

Filterlänge	306 mm
Filterbreite	210 mm
Faltentiefe	27 mm
Faltenfläche	0.01 m ²
Faltenzahl	60
Filterfläche	0.68 m ²
Volumenstrom	200 m ³ /h
Anströmgeschwindigkeit	0.08 m/s

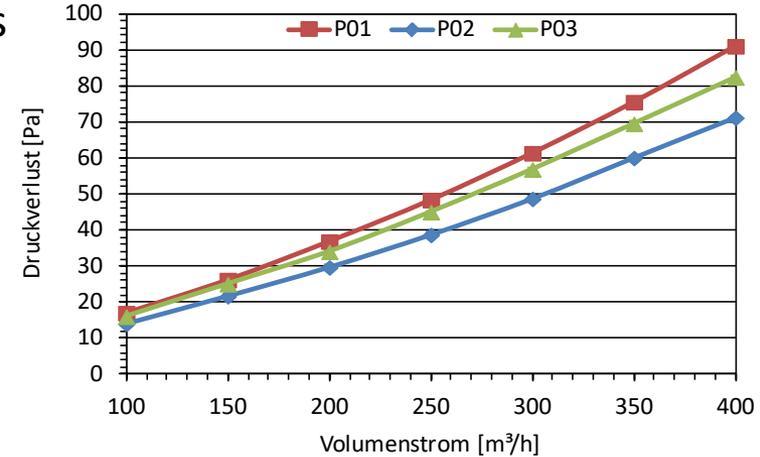
LDL Luftdurchlässigkeit
 PP Polypropylen
 PE Polyethylen
 PBT Polybutylenterephthalat

	Medium P01	Medium P02	Medium P03
Material	PP/PE (~ 940 kg/m ³)	PBT (~ 1310 kg/m ³)	PP (~ 950 kg/m ³)
LDL (bei 200 Pa) [l/m ² /s]	505 ± 21	> 800	> 700
Grammatur [g/m ²]	110 ± 10	116 ± 17	140 ± 15
Dicke [mm]	0,9 ± 0,3	0,7 ± 0,1	1,15 ± 0,15
Porosität (berechnet)	0,87	0,87	0,87

- Faserdurchmesser müssen noch im REM bestimmt werden

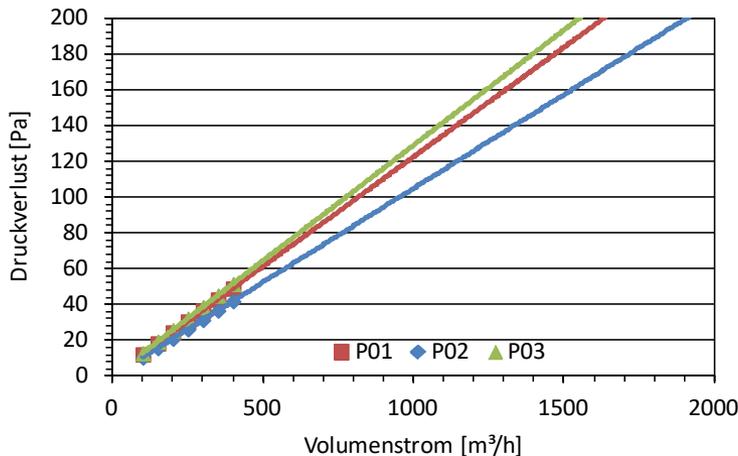
Druckverlust der Filter

- volumenstromabhängige Messung des Druckverlusts
- Streuung zwischen Filtern des gleichen Typs gering
- Frage: Passen die Werte zur Luftdurchlässigkeit?

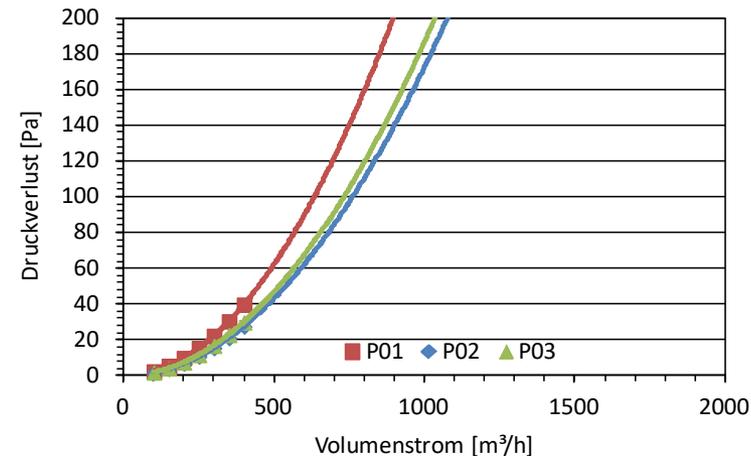


Medium P01	Medium P02	Medium P03
505 ± 21 l/m²/s ≡ 50,5 cm/s	> 800 l/m²/s ≡ 80 cm/s	> 700 l/m²/s ≡ 70 cm/s

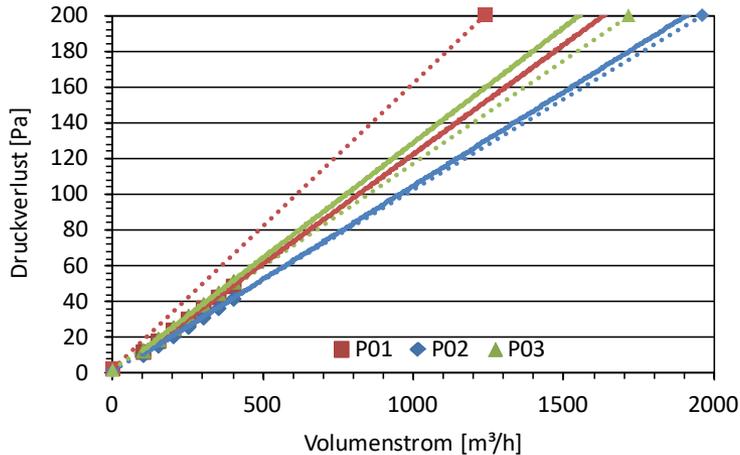
- Zerlegung in linearen und quadratischen Anteil (extrapoliert bis 200 Pa)



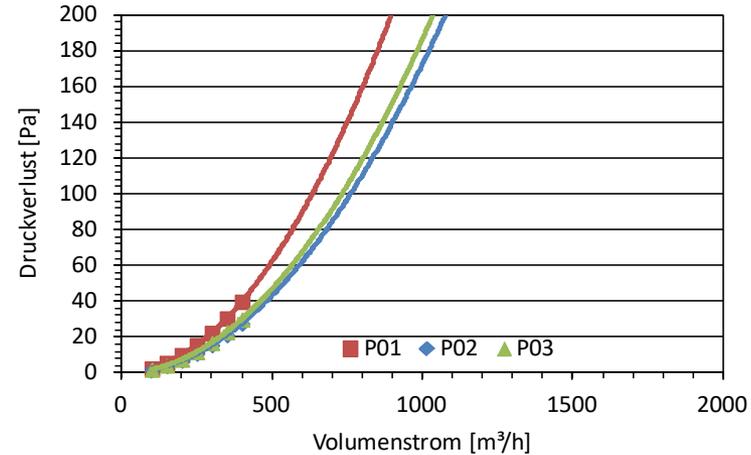
$Re_{Faser} < 1 \rightarrow$ laminare Strömung im Medium,
Steigung sollte durch das Medium bestimmt sein



turbulenter Anteil sollte rein durch die
Geometrie von Filter und Prüfstand bestimmt



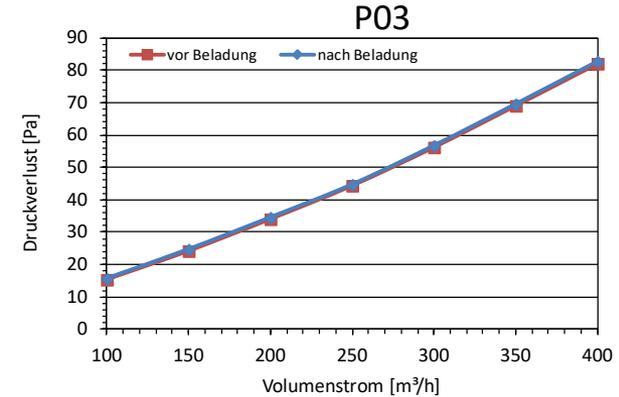
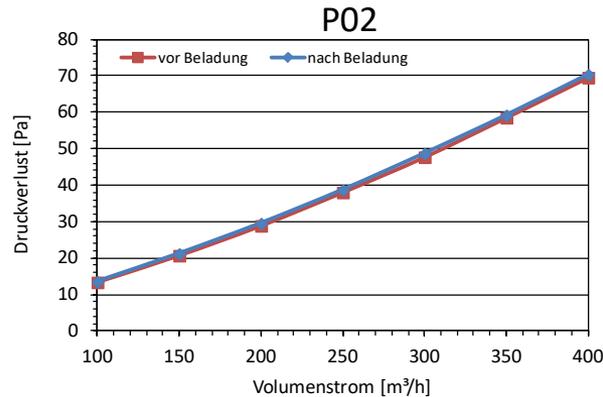
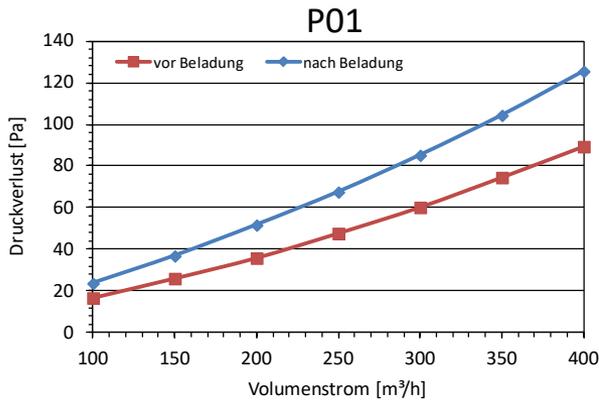
$Re_f < 1 \rightarrow$ laminare Strömung im Medium,
Steigung sollte durch das Medium bestimmt sein



turbulenter Anteil sollte rein durch die
Geometrie von Filter und Prüfstand bestimmt

- gute Übereinstimmung mit den Annahmen für Filter P02
- leichte Abweichungen für Filter P03, turbulenter Anteil sehr ähnlich
- deutliche Abweichungen in beiden Anteilen für Filter P01
- mögliche Gründe:
 - Strömung im Filtermedium ist doch nicht rein laminar
 - geringe Unterschiede in der Plissierung haben bereits großen Einfluss

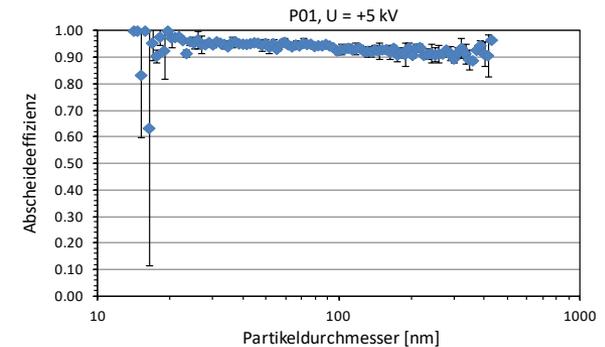
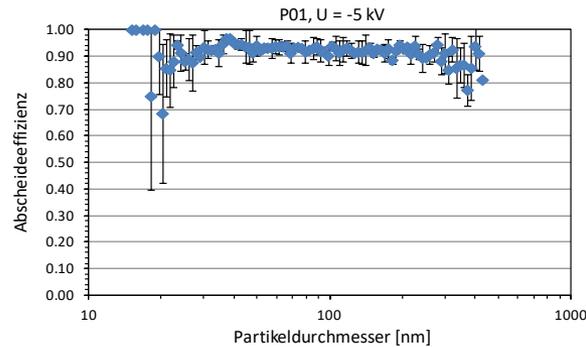
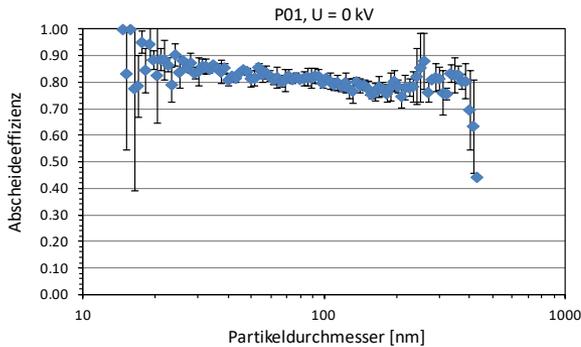
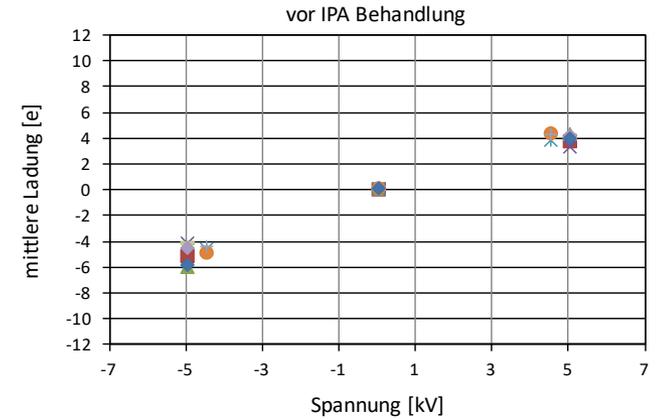
Änderung des Druckverlusts durch Beladung



- Messung mit einem Filter dauert ca. 1,5 h (bei 0, +5 und - 5kV je zweimal Rein-/Rohgas)
- Abschätzung zudosierte Salzmenge ca. 110 mg (berechnet aus Größenverteilung)
- relativer Anstieg des Druckverlustes für P02 und P03 unter 2%
- deutlicher relativer Anstieg des Druckverlustes für P01 von über 40%
→ erstaunlich hoch für die geringe zudosierte Salzmenge
- offene Frage: Lassen sich die Daten dennoch sinnvoll interpretieren?

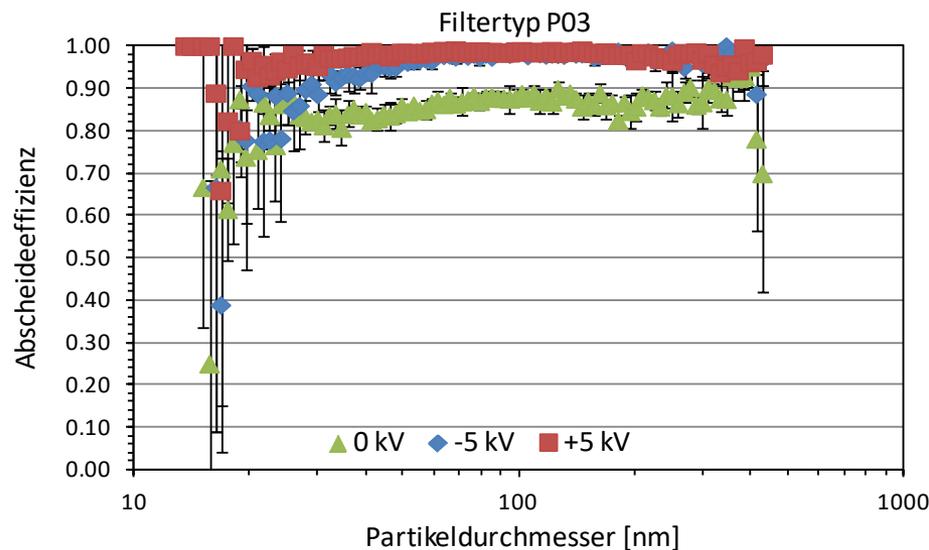
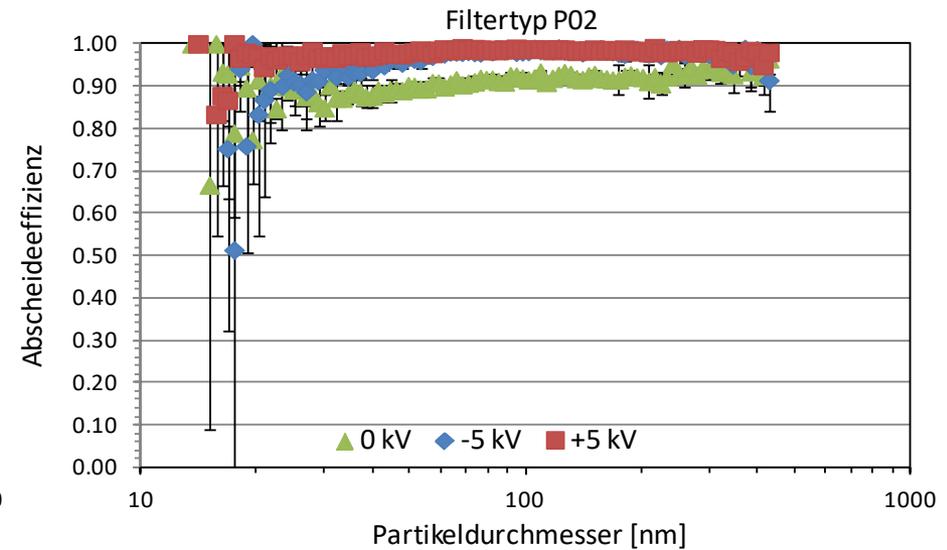
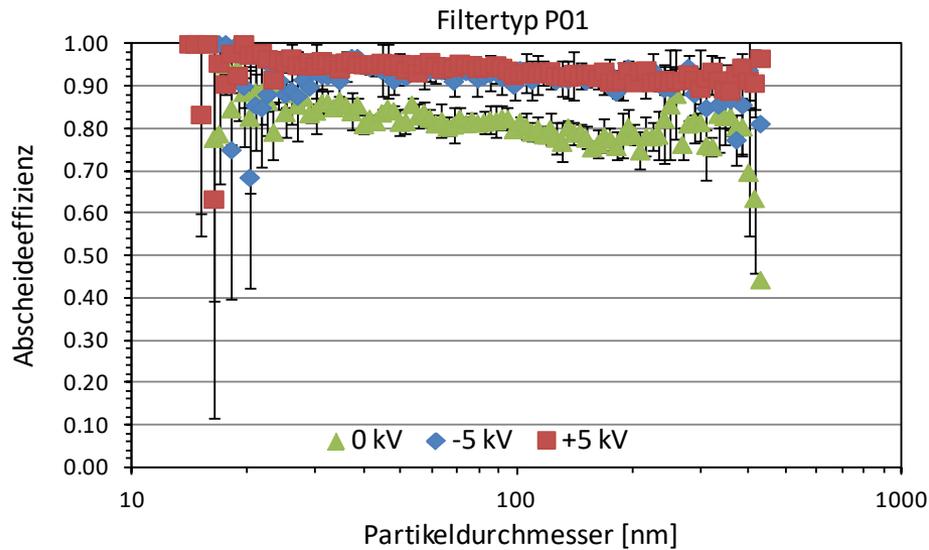
Abscheideeffizienz der Filter bezüglich NaCl

- Messung von je der Filtern des gleichen Typs
- Messung ohne Hochspannung am Diffusionsauflader
→ Annahme Aerosol im bipolaren Gleichgewicht
- Messung bei +/- 5 kV (bei regelmäßiger Reinigung stabil)
→ mittlere Ladung pro Partikel sehr reproduzierbar



→ Zusammenfassung der drei Graphen in eine Abbildung pro Filtertyp

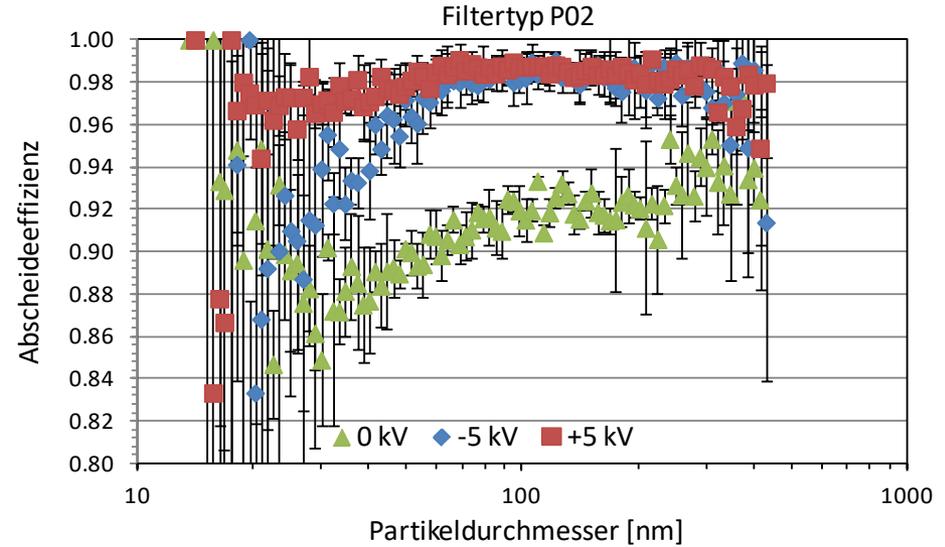
Abscheidung von NaCl an den drei Filtertypen



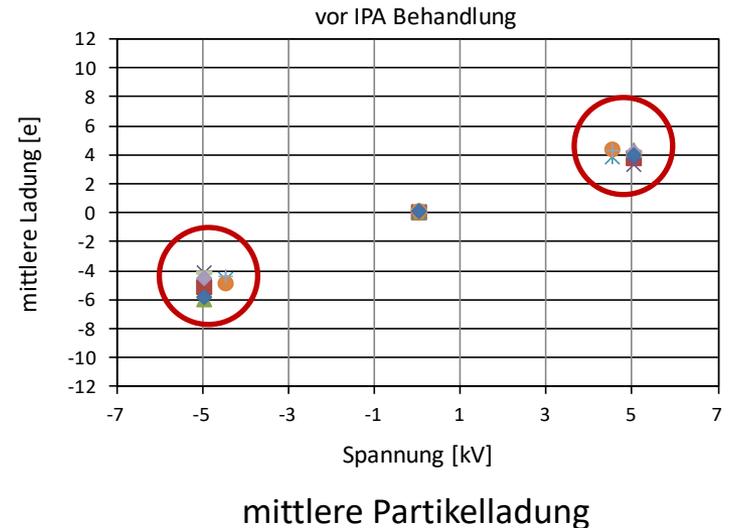
- Streuung zwischen Filtern gleichen Typs gering (solange ausreichend Partikel)
- Verhalten von P02 und P03 sehr ähnlich
- etwas geringere Abscheidung für P01
- höhere Abscheidung geladener Partikel
- positiv geladene Partikel werden leicht effizienter abgeschieden als negative

Unterschiede zwischen positiven/negativen Partikeln

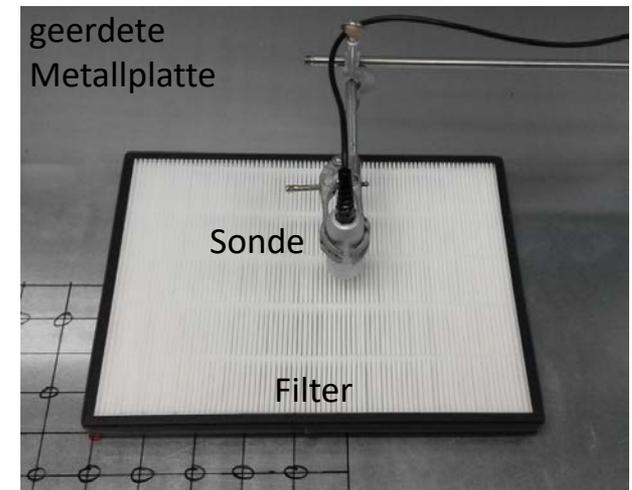
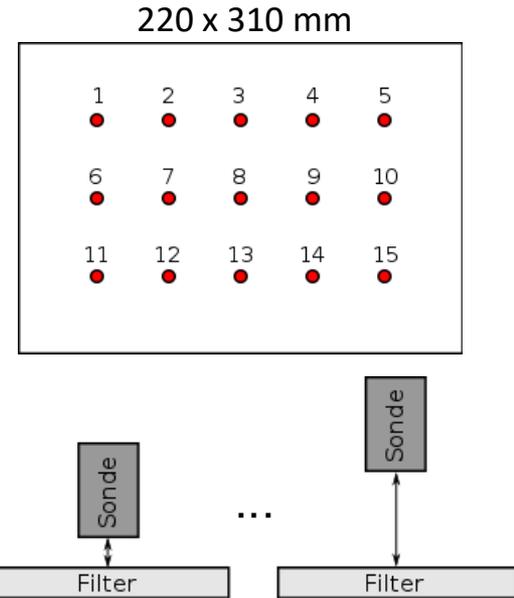
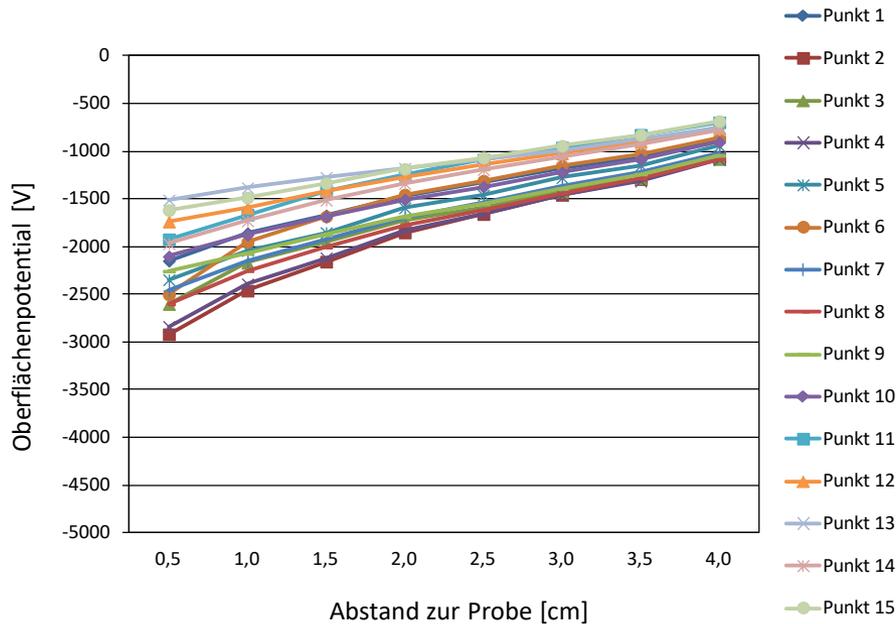
- negative Partikel leicht stärker geladen
 - das allein lässt bessere Abscheidung negativer Partikel erwarten
- zusätzlicher Effekt notwendig
 - Überschuss an negativer Faserladung
 - Messung des Oberflächenpotentials



AlphaLab USSVM II
Ultra Stable Surface Volt Meter

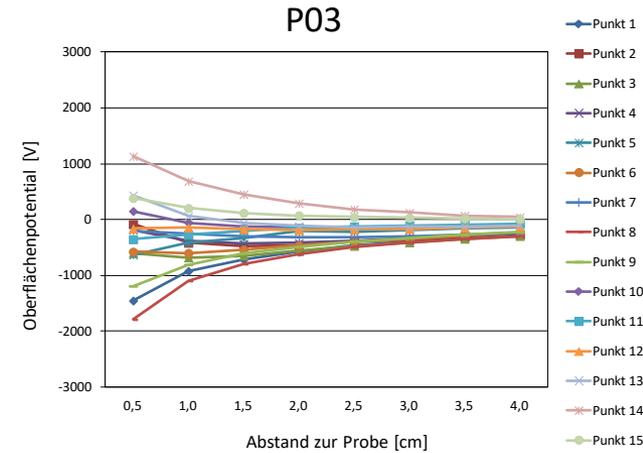
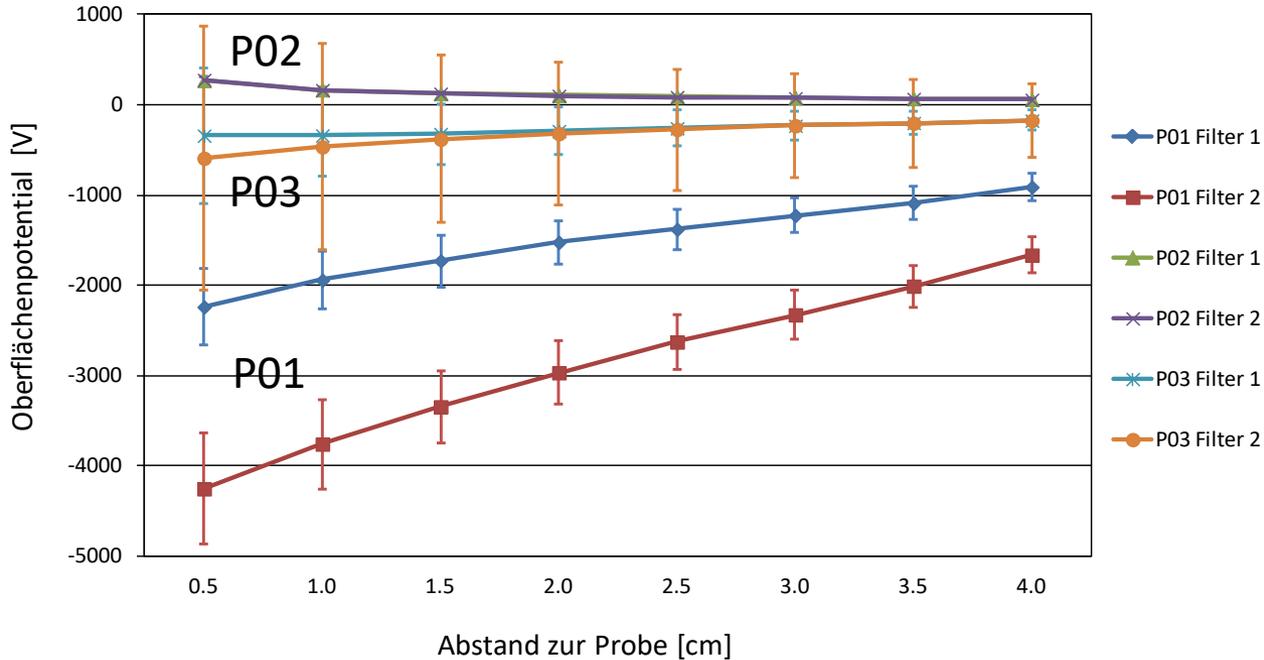


- jeweils zwei Filter gleichen Typs untersucht
- 15 Messpunkte mit 5 cm bzw. 5,5 cm Abstand
- Variation des Sondenabstands (0,5 – 4 cm)
- jeder Filter dreimal nacheinander vermessen
- Dauer eines Durchlaufs ca. 40 min



Abstandsabhängigkeit des Oberflächenpotentials

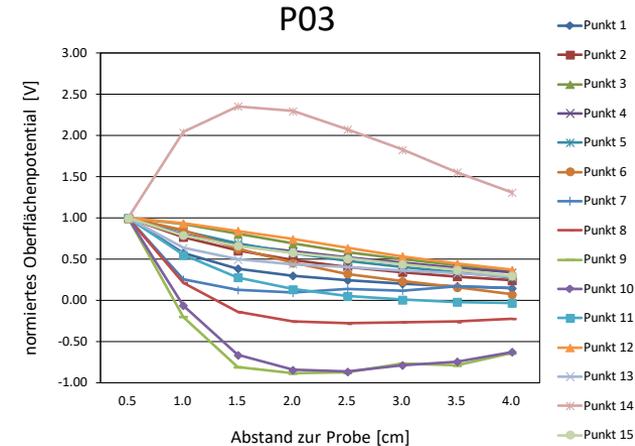
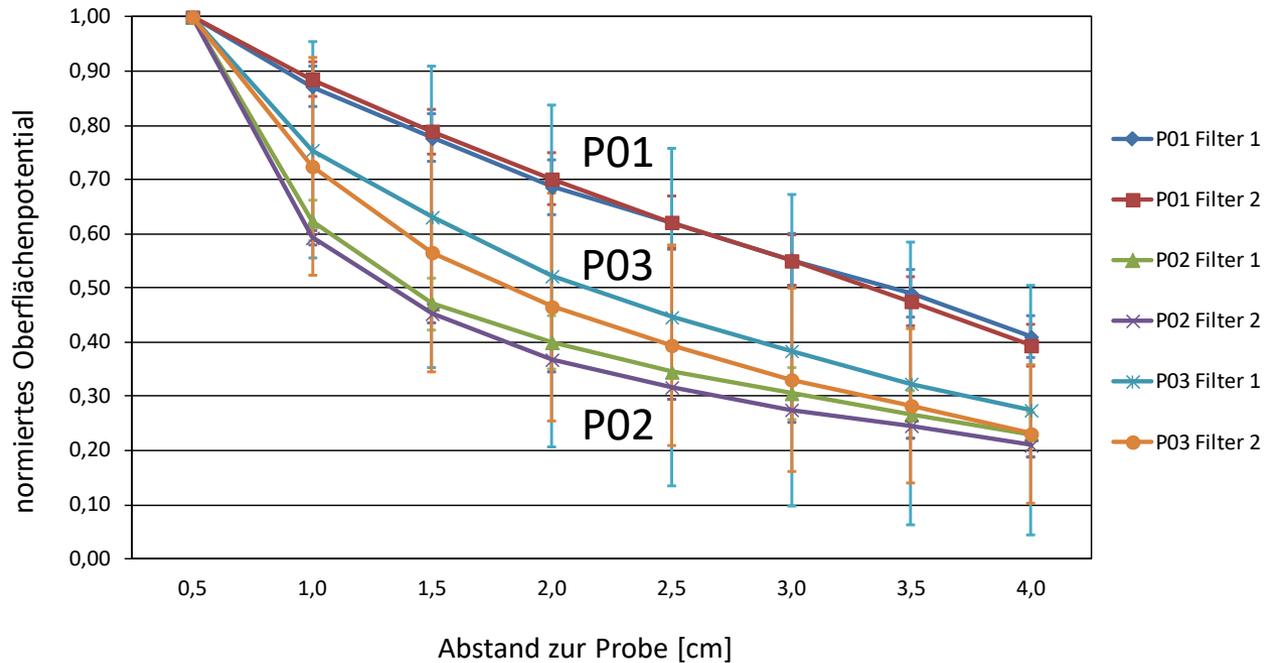
Zusammenfassung



Filtertyp	Vorzeichen	Stärke	Streuung innerhalb eines Filters	Streuung zwischen zwei Filtern
P01	negativ	stark	mittel	groß
P02	positiv	schwach	gering	gering
P03	positiv/negativ	mittel	groß	mittel

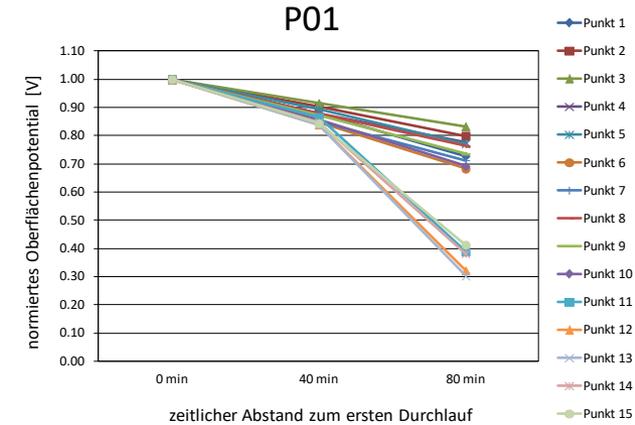
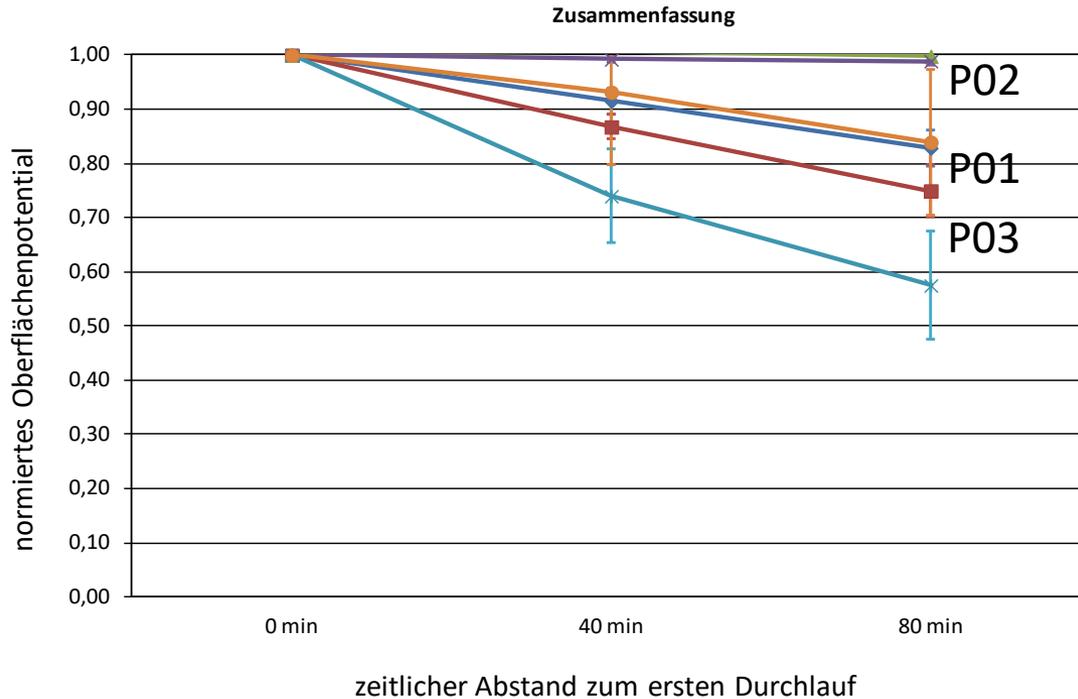
Normierter Verlauf der Abstandsabhängigkeit

Zusammenfassung



Filtertyp	Abklingverhalten	ungewöhnliches Verhalten
P01	nahezu linear	nein
P02	„stark“ hyperbolisch	nein
P03	„schwach“ hyperbolisch	teils ja (Vorzeichenwechsel, Anstieg des Potentials → Werte ausgenommen)

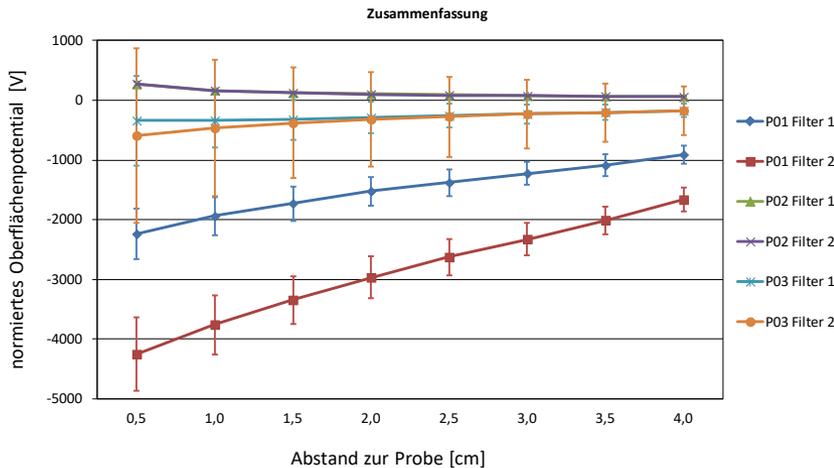
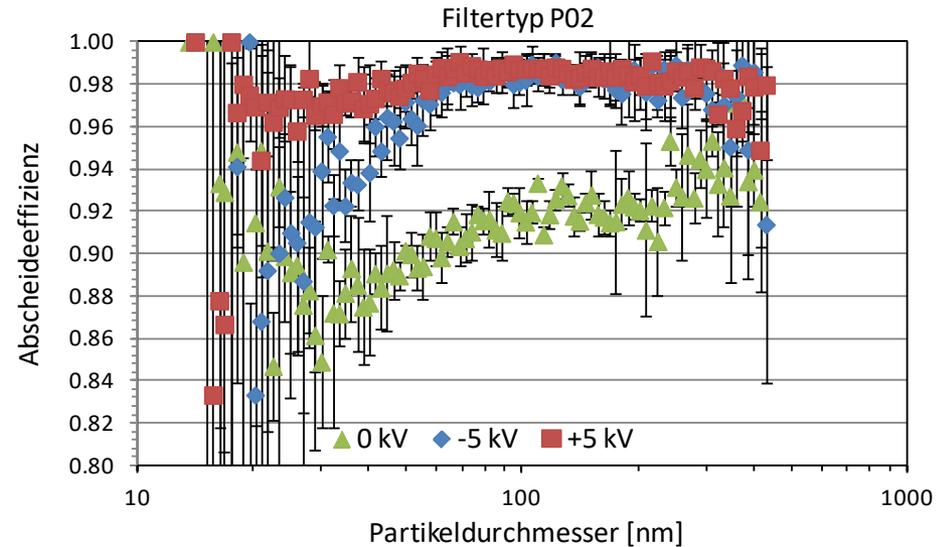
Stabilität während über die Messungen (2,5 cm Abstand)



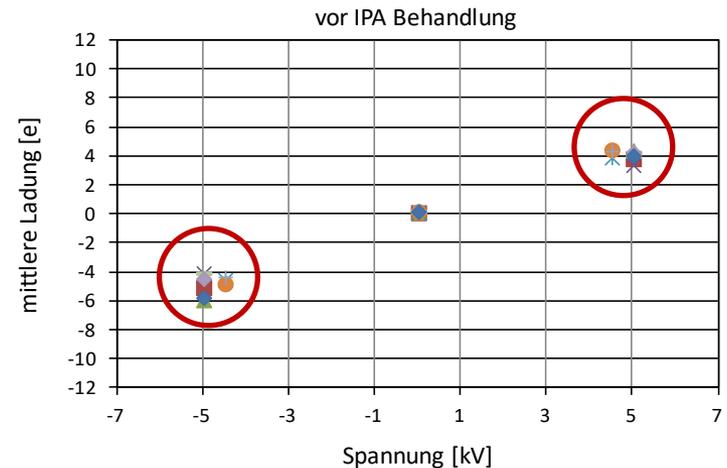
Filtertyp	Stabilität	Ausreißer	Streuung zwischen zwei Filtern
P01	mittel	ja (Werte ausgenommen)	mittel
P02	hoch	nein	gering
P03	gering	ja (Werte ausgenommen)	hoch

Unterschiede zwischen positiven/negativen Partikeln

- negative Partikel leicht stärker geladen
→ das allein lässt bessere Abscheidung negativer Partikel erwarten
- zusätzlicher Effekt notwendig
→ Überschuss an negativer Faserladung
- deckt sich mit Messungen mit elektrostatischen Voltmeter für P01 und P03, jedoch nicht für P02



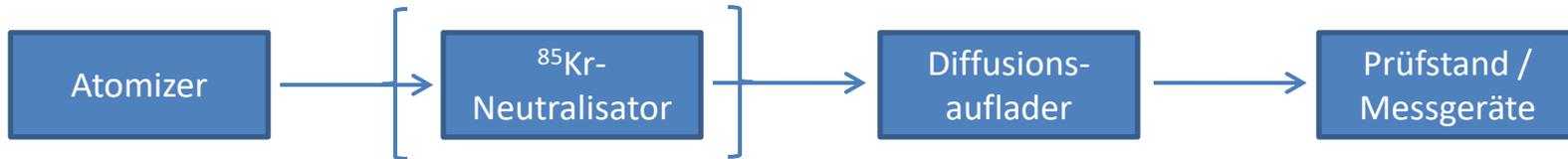
Oberflächenpotential



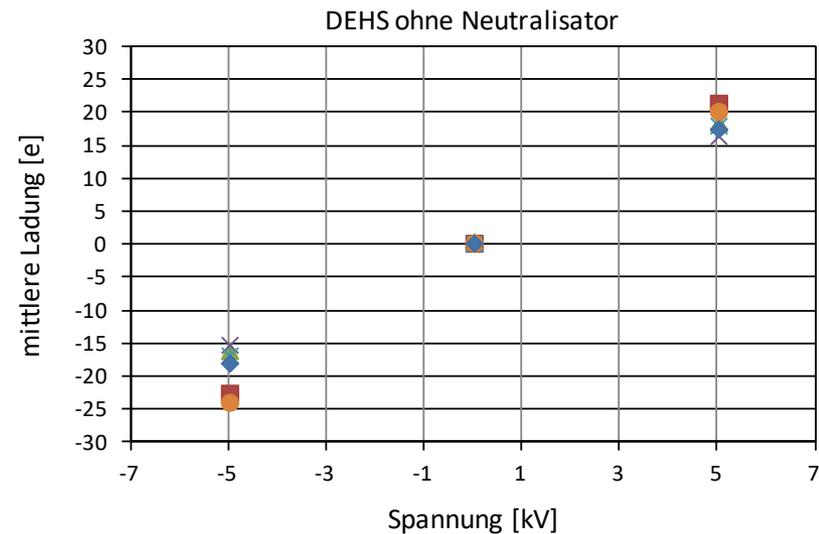
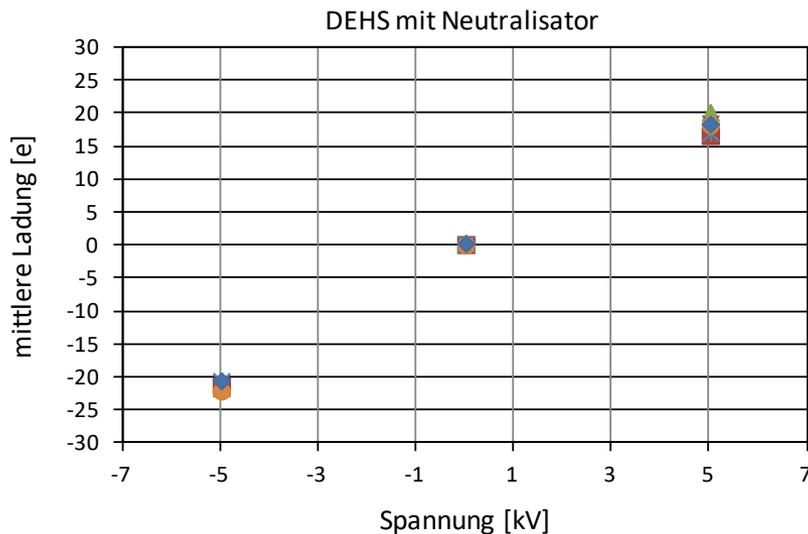
mittlere Partikelladung

Vergleich mit Messungen mit DEHS als Testaerosol

- Messung mit DEHS als Testaerosol (CMD = 280 nm, $\sigma = 2.0$)
- Aufladung mit bzw. ohne vorgeschaltetem ^{85}Kr -Neutralisator



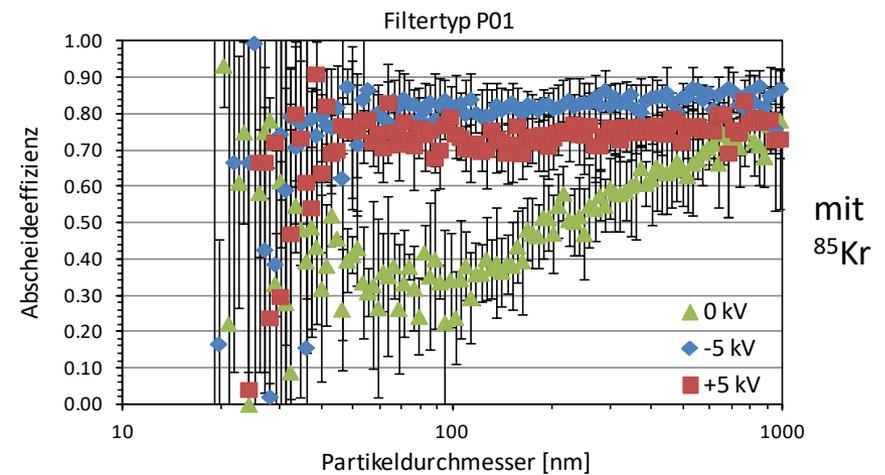
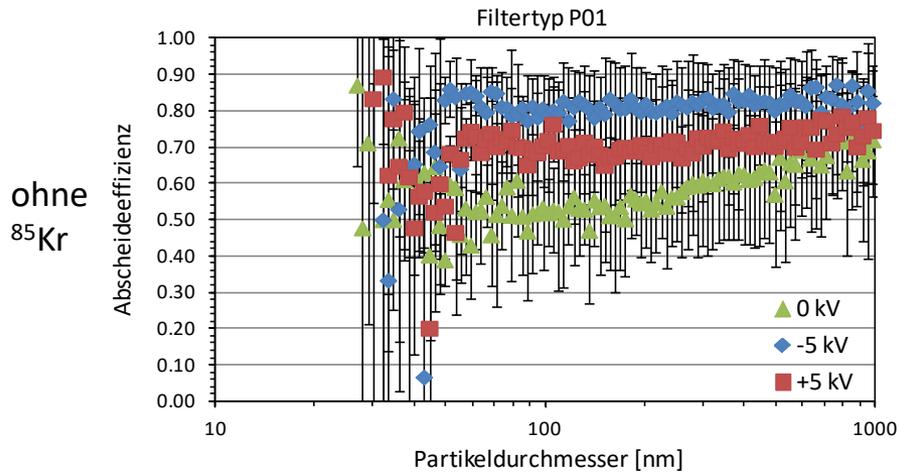
- mittlere Ladung vergleichbar, eventuell etwas mehr Streuung ohne Neutralisator



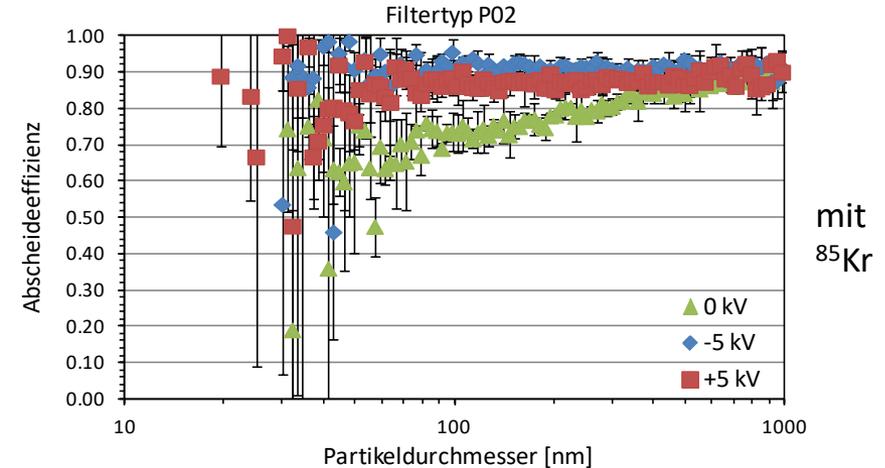
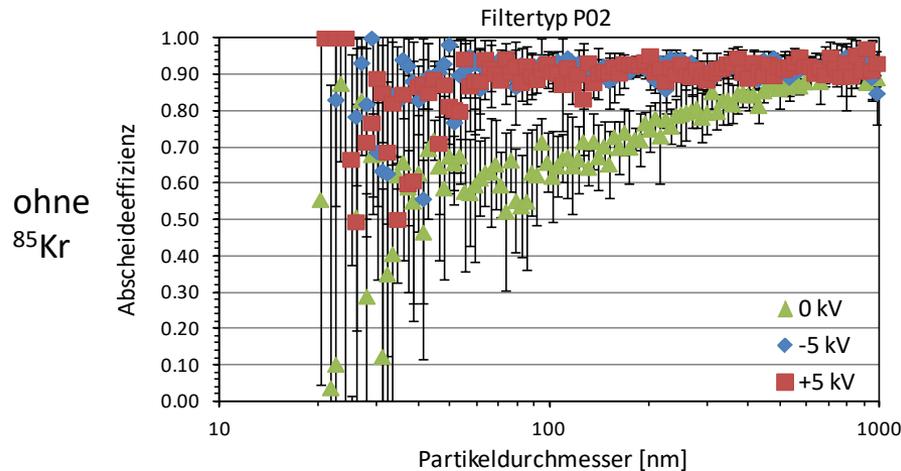
- Frage: Hat der Neutralisator einen Einfluss auf die Abscheidung?

Vergleich mit Messungen mit DEHS als Testaerosol

- für P01 leichte Unterschiede, aber Streuung insgesamt sehr groß

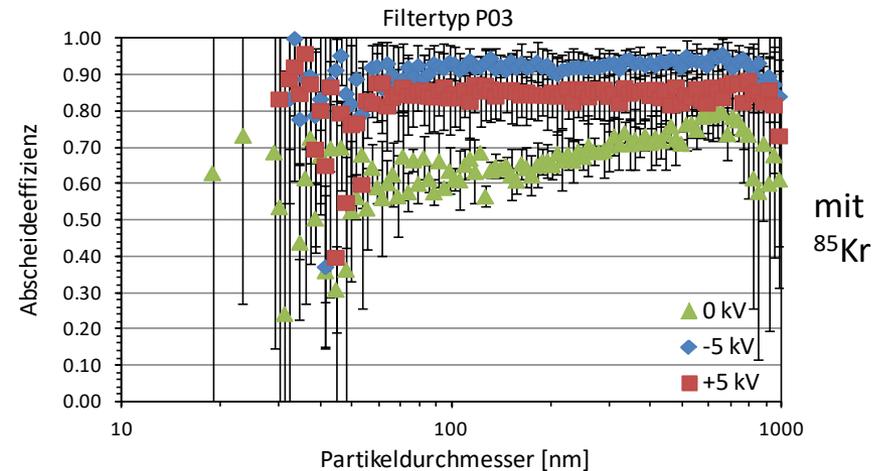
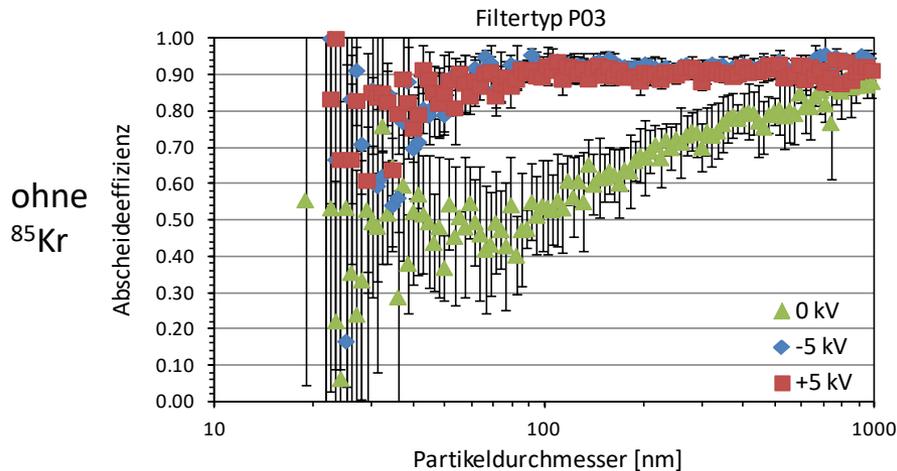


- für P02 Unterschiede insgesamt eher gering



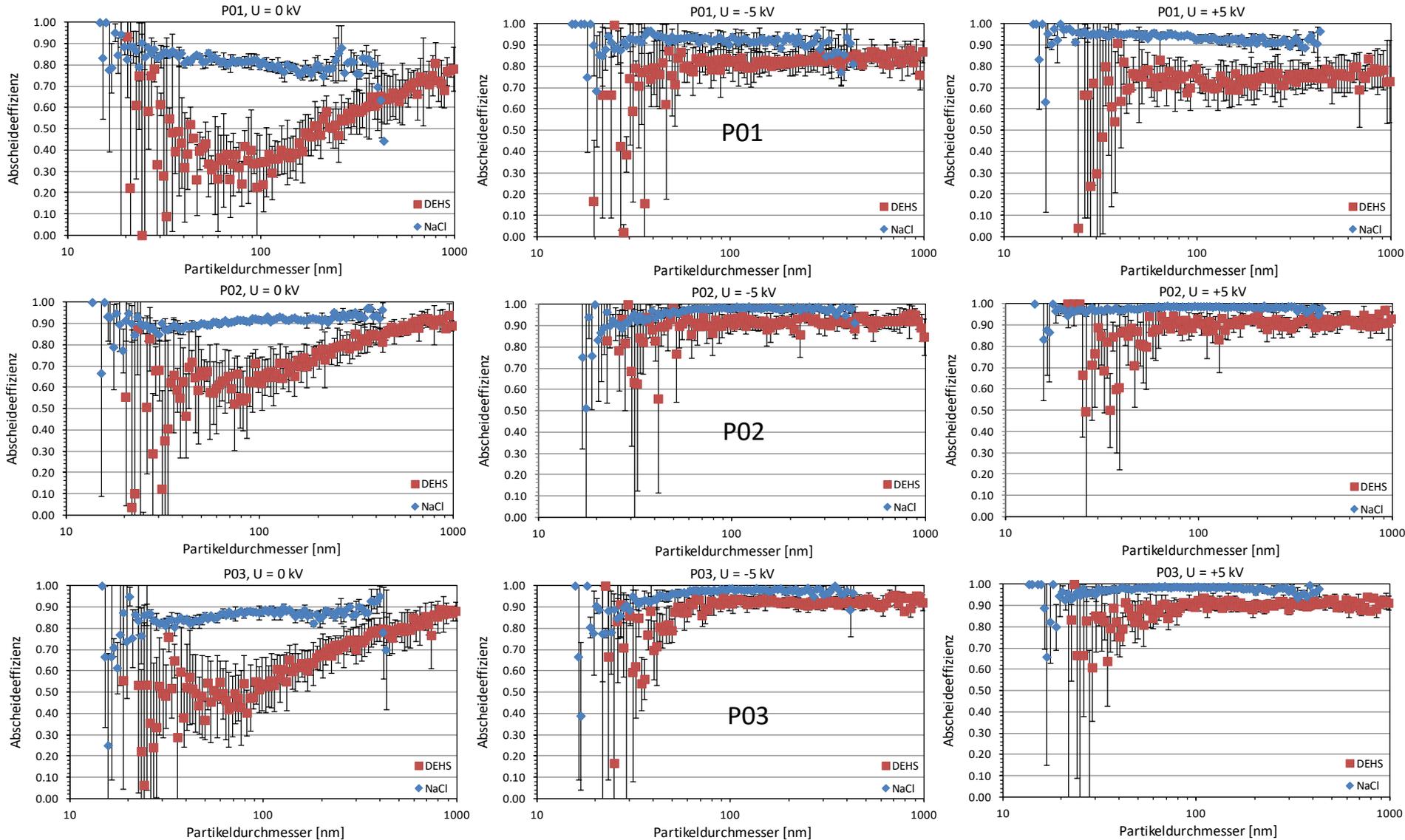
Vergleich mit Messungen mit DEHS als Testaerosol

- für P03 deutliche Unterschiede, insbesondere für geladene Partikel
- negative Partikel werden effizienter abgeschieden → anders als bei NaCl

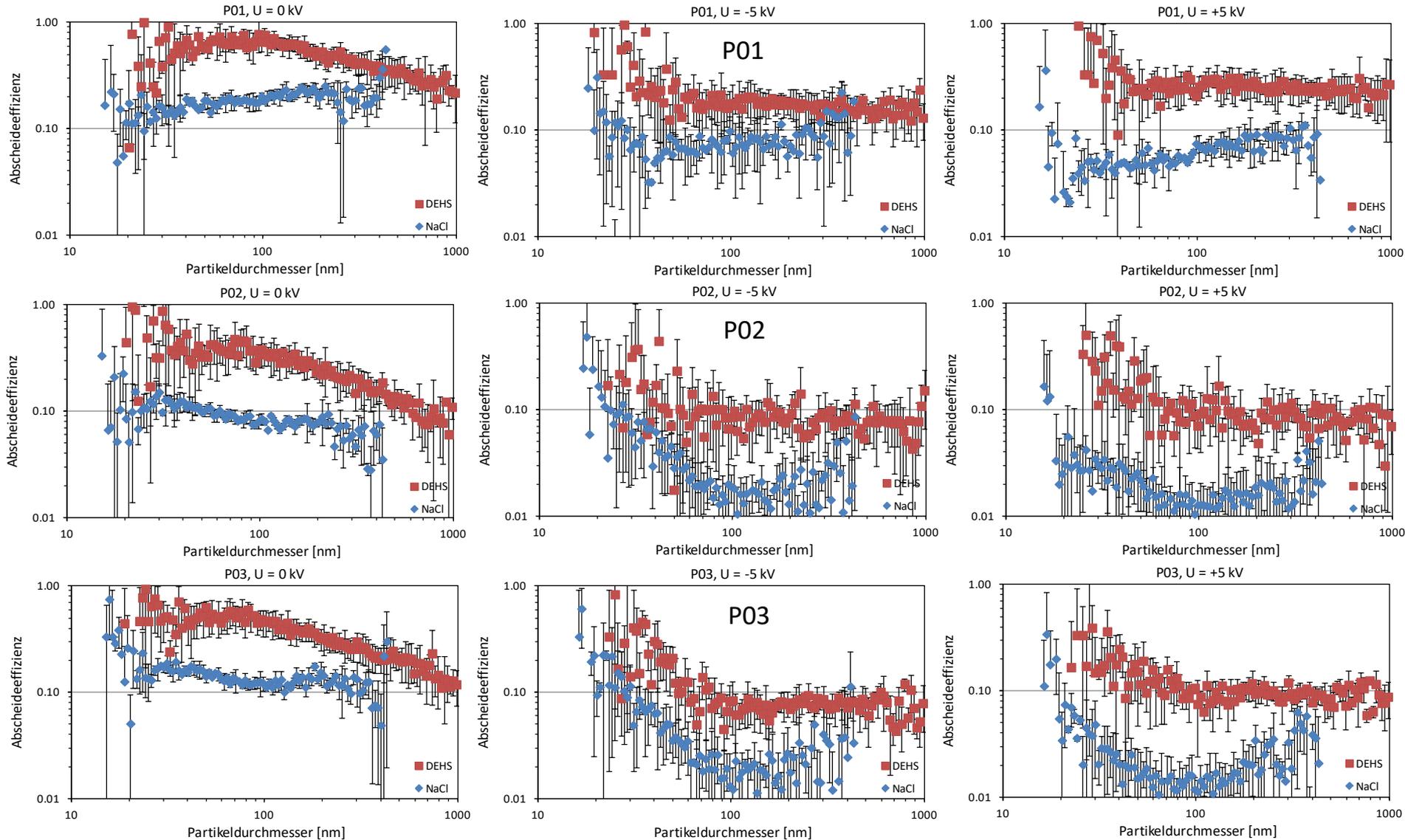


- genaue Erklärung für mögliche Unterschiede steht noch aus
- Messung mit Neutralisator generell definierter als ohne
- Einfluss für NaCl-Abscheidung noch zu klären (bisher ohne Neutralisator)

Vergleich der Abscheidung von NaCl und DEHS

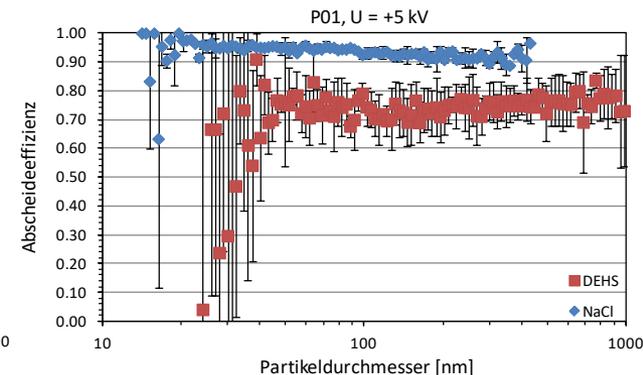
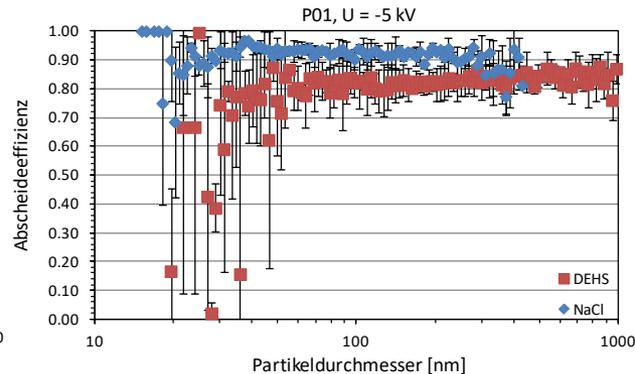
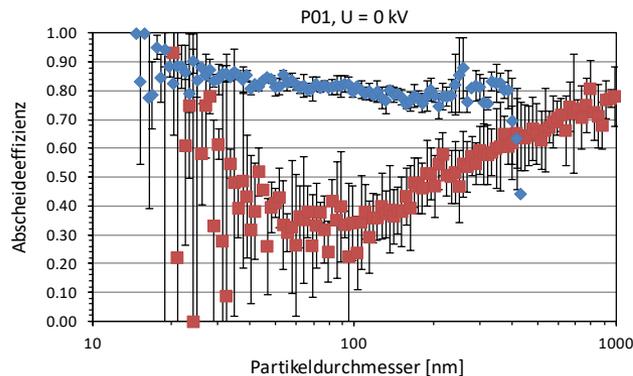


Vergleich der Abscheidung von NaCl und DEHS (Penetration)



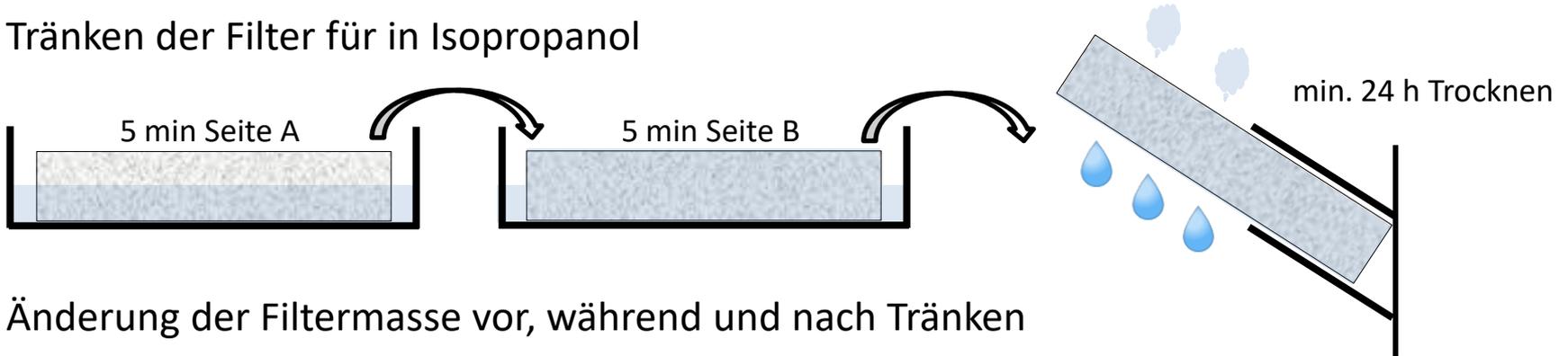
Vergleich der Abscheidung von NaCl und DEHS

- Abscheideeffizienz für NaCl über gesamten Größenbereich deutlich höher
- für geladene Partikel leichte Unterschiede im Ladungszustand möglich (z.B. Feuchteffekt)
- für ungeladene Partikel könnte die Dielektrophorese eine Rolle spielen
 - $\epsilon_{r,NaCl} = 5,9$ (Robinson *et al.* Can. J. Phys. **44** 2211 (1966))
 - $\epsilon_{r,DEHS} = 5,1$ (Aardahl *et al.* J. Colloid Interface Sci. **192** 228 (1997))
- Unterschied relativ gering \rightarrow Abschätzen des Effekts mit Simulationen oder Modell
- Bemerkung: Schlussfolgerungen für Messungen mit Neutralisator prinzipiell gleich



Entladung der Filter in Isopropanol

- Tränken der Filter für in Isopropanol



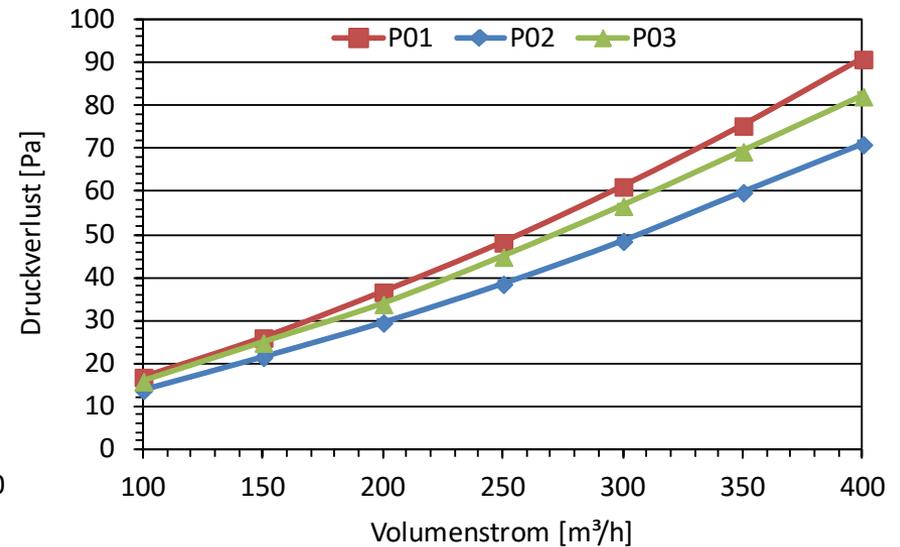
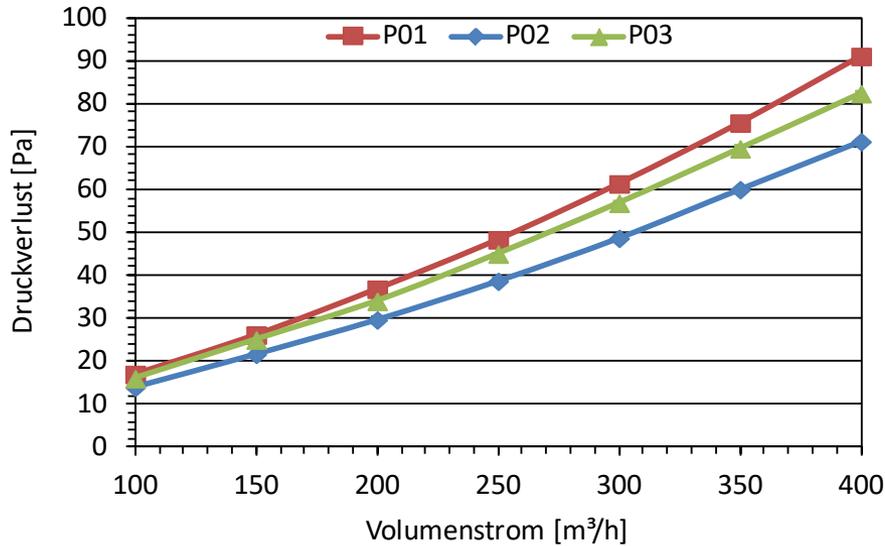
- Änderung der Filtermasse vor, während und nach Tränken

Masse [g]	Filter P01	Filter P02	Filter P03
Filter vorher	105 ± 1	111 ± 2	135 ± 1
Filter getränkt	561 ± 6	397 ± 3	495 ± 1
IPA aufgenommen	456 ± 6	286 ± 4	360 ± 1
Filter getrocknet	105 ± 1	111 ± 2	135 ± 1

Werte konsistent mit Grammatik

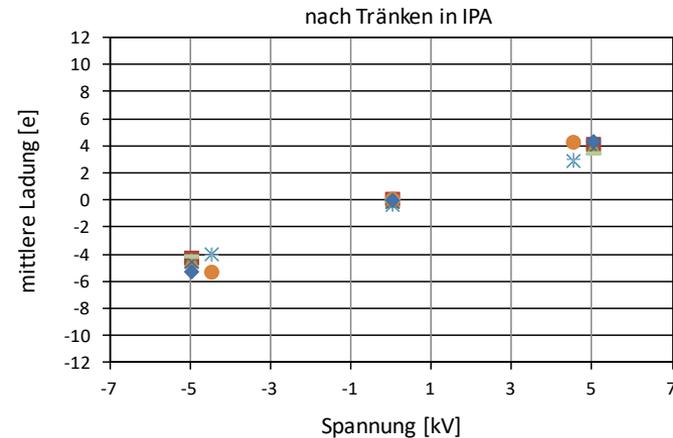
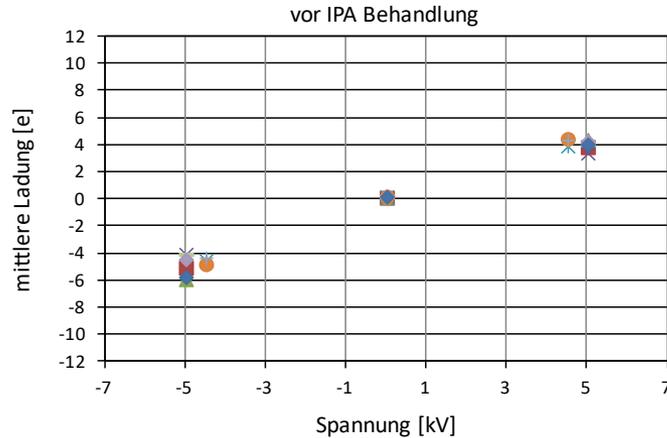
- aufgenommene IPA-Menge unterscheidet sich deutlich
- getrocknete Filter haben wieder die Ursprungsmasse

- relative Änderung des Druckverlustes unter 2% für alle Volumenströme
→ keine signifikante strukturelle Veränderung der Filter

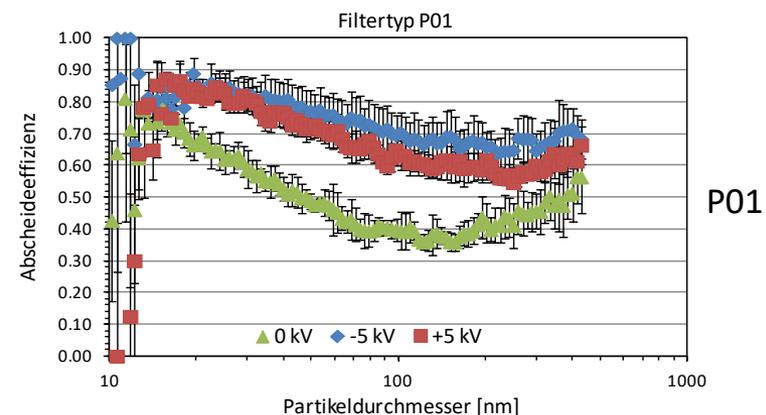
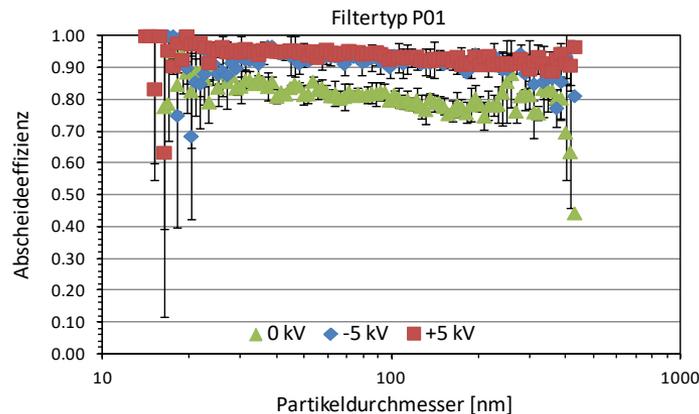


Abscheideeffizienz nach Entladung in Isopropanol

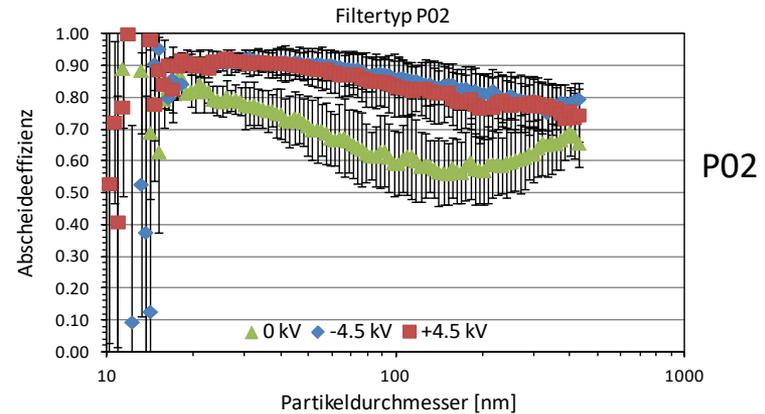
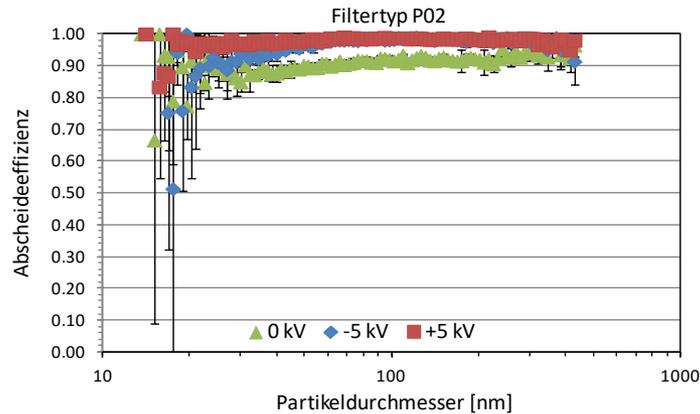
- gleiche mittlere Ladung des Testaerosols → Ergebnisse direkt vergleichbar



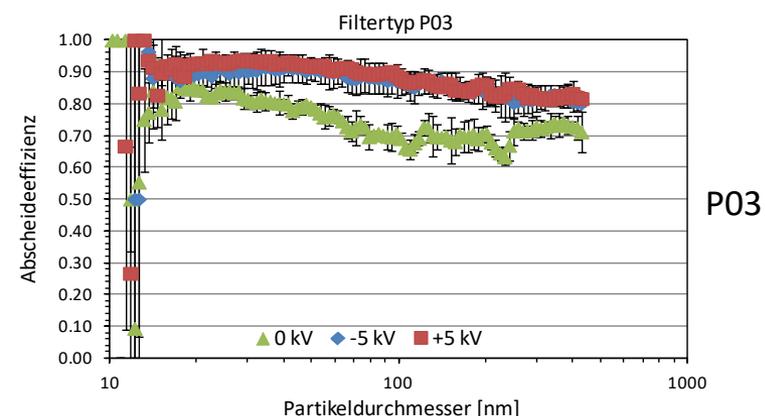
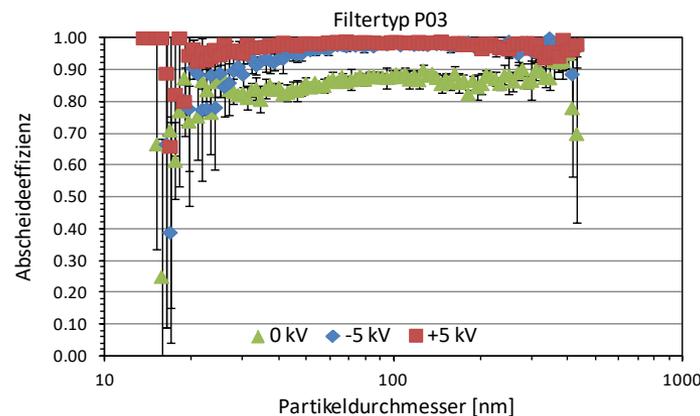
- Abscheideeffizienz insgesamt reduziert, weiter bessere Abscheidung geladener Partikel → Effekt in den Simulationen nicht erfasst (kein Elektret effekt für $Q_F=0$ implementiert)



- starke Streuung nach Isopropanoltränken → Entladung möglicherweise nicht komplett



- Abscheideeffizienz insgesamt reduziert, weiter bessere Abscheidung geladener Partikel → Effekt in den Simulationen nicht erfasst (kein Elektret effekt für $Q_F=0$ implementiert)

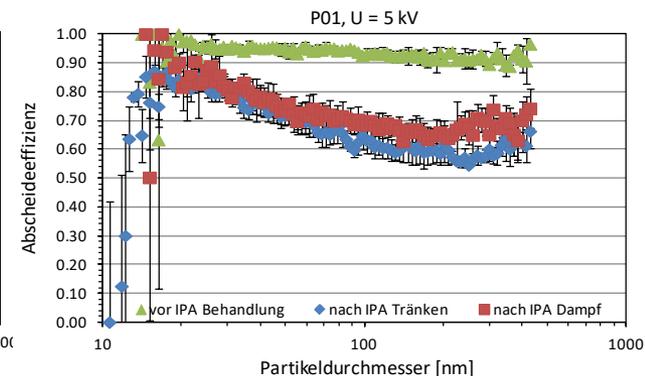
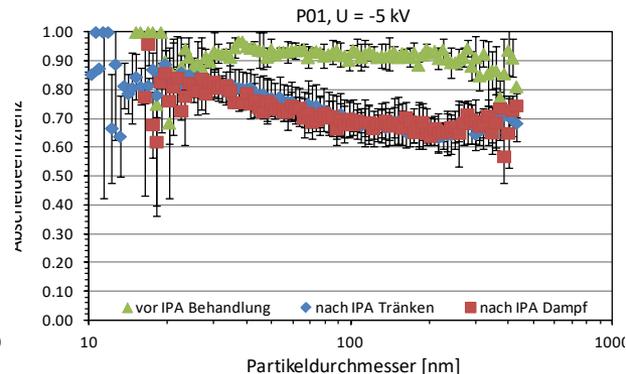
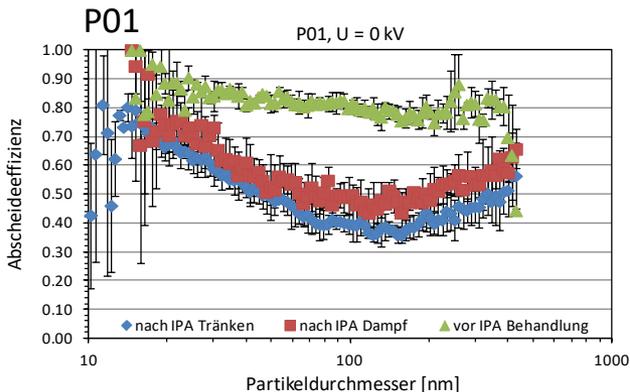


Entladung der Filter in mit Isopropanoldampf gesättigter Luft

- Entladung über 24 h in Konditionierungskabinett von Topas GmbH (gemäß ISO 16890-4)
- Vergleich der Fraktionsabscheidegrade für je drei
 - neue Filter (grün)
 - in IPA getränkte Filter (blau)
 - in IPA gesättigter Luft entladene Filter (rot)
- für P01 relativ gute Übereinstimmung
- leicht geringere Abscheidung nach Tränken in IPA
→ Entladung durch IPA-Dampf womöglich nicht vollständig

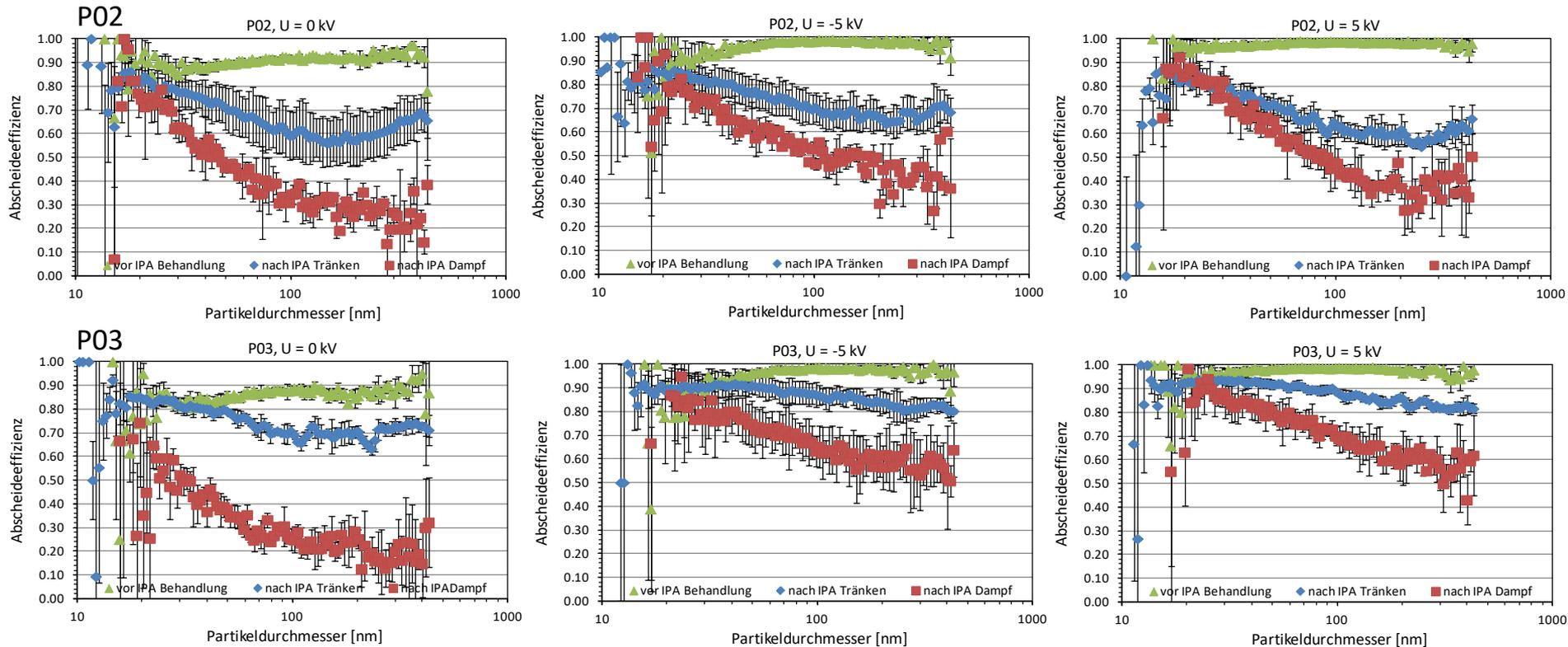


(Topas GmbH)



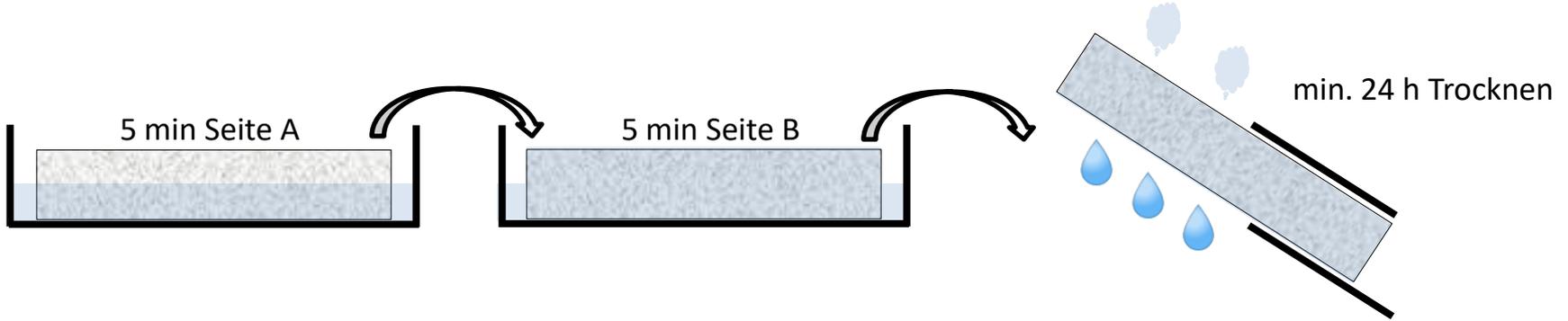
Entladung der Filter in mit Isopropanoldampf gesättigter Luft

- für P02 und P03 deutliche Abweichungen, Schwankung zwischen gleichen Filtern gering
- Entladung durch IPA-Dampf gesättigte Luft offenbar effizienter als Tränken in IPA
- War das Tränken von 10 Minuten nicht ausreichend zur vollständigen Entladung ?
→ widerspricht bisherigen Erfahrungen, weitere Versuche notwendig

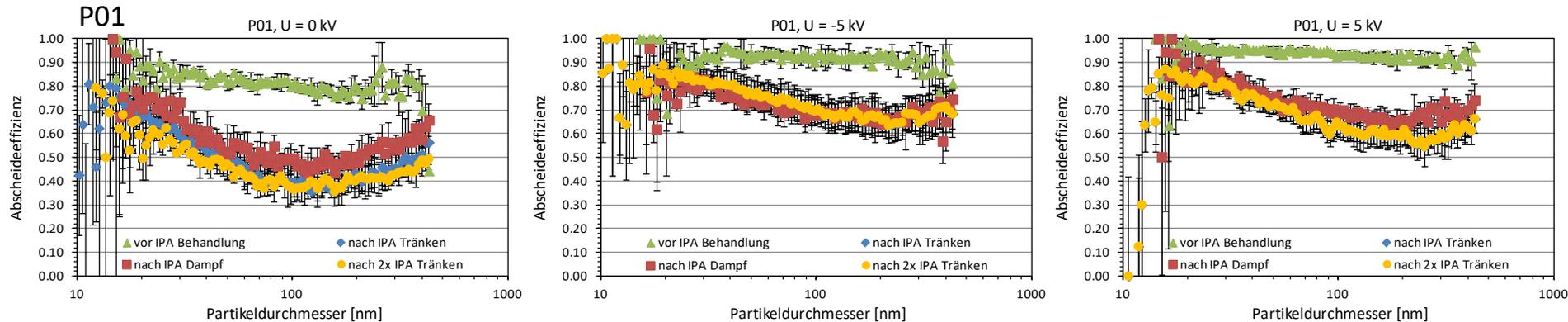


Wiederholung des Tränkens in Isopropanol

- Wiederholung der gleichen Prozedur für die bereits einmal in IPA getränkten Filter



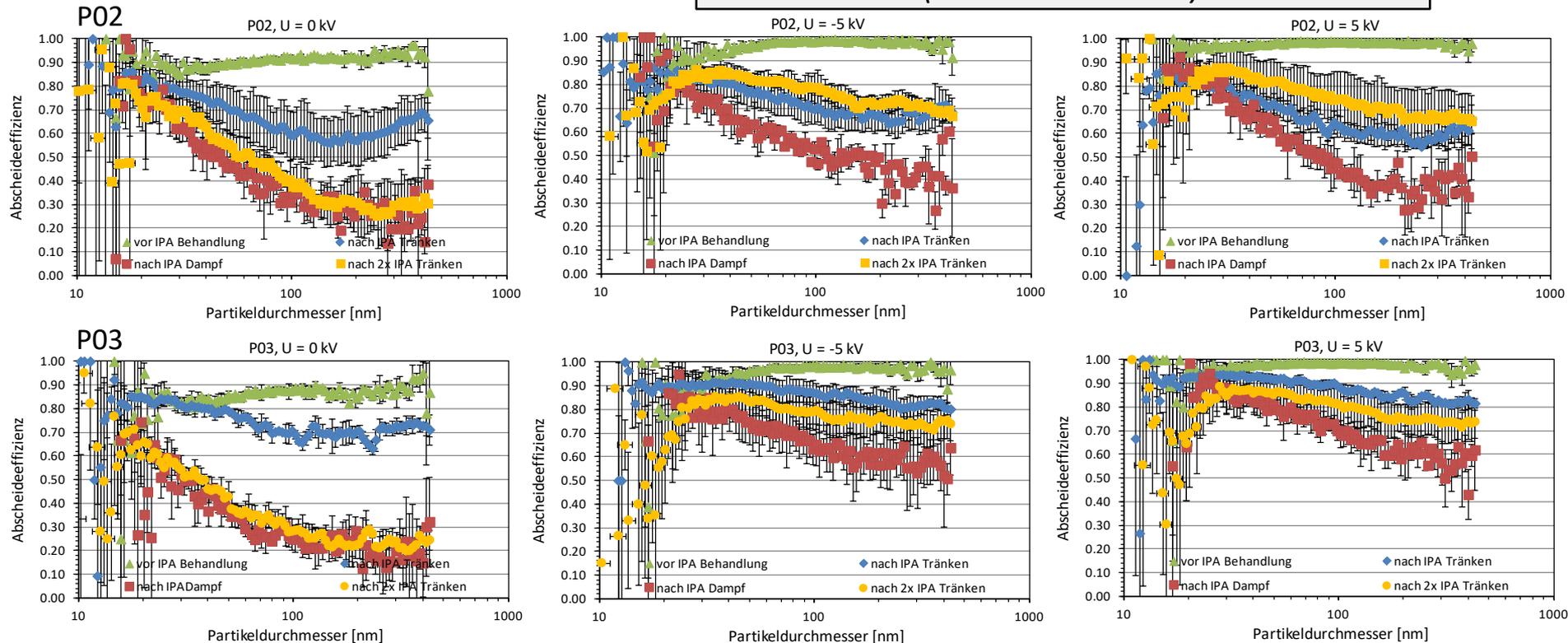
- für Filter P01 keine nennenswerten Abweichungen gegenüber dem ersten Tränken
 - Filter offenbar beim ersten Tränken bereits vollständig entladen
 - Entladung durch IPA-Dampf offenbar nicht ganz vollständig



Wiederholung des Tränkens in Isopropanol

- für neutrale Partikel gute Übereinstimmung für Dampfentladung und zweimal Tränken
 → erstes Mal Tränken hat die Filter offenbar nicht vollständig entladen
- für geladene Partikel immer noch deutliche Abweichungen zur Dampfentladung
 → Ursache bisher nicht klar

Die meisten Probleme entstehen bei ihrer Lösung.
(Leonardo da Vinci)



Gibt es vergleichbare Berichte in der der Literatur?

- japanischer Bericht: Entladung durch Dampf deutlich effektiver als Tränken in IPA
- Abscheideeffizienz nach Dampfentladung durch anschließendes Tränken wieder erhöht

Initial IPA Vapor Exposure								Subsequent Liquid Immersion	
Time, h	0.0	0.5	1.1	2.2	4.3	16	24	25	40
Average E, %	87.6	19.8	19.0	19.6	18.2	18.8	18.8	42.5	40.7
Uncertainty, %	0.8	0.8	0.4	1.0	0.4	0.3	0.5	3.6	2.9
Initial Liquid IPA Exposure								Subsequent Vapor Exposure	
Time, h	0.0	0.8	1.2	2.2	4.3	16	24	25	40
Average E, %	88.9	54.3	53.6	52.6	52.2	50.2	50.3	18.2	20.0
Uncertainty, %	0.3	3.7	3.7	3.1	3.5	3.7	4.2	0.5	0.5

Cai *et al.* Dokument für ISO/TC142/WG9 N0087 (2010) zitiert in Tronville *et al.* 11th World Filtration Congress (2012)

- Patent (US 6375886, 2002) „Method and apparatus for making a nonwoven fibrous electret web from free-fiber and polar liquid“
- Entladung durch Dampf offenbar schneller als durch Tränken
- spiegelt nicht die Zeitvorgaben der entsprechenden Normen wider
 - EN 779: Tränken der Medien für mindestens zwei Minuten
 - ISO 16890-4: Entladen der Filter in mit IPA gesättigter Luft für 24 h

Möglicher Einfluss des Filtermaterials auf die Entladung

- Xiao: Entladung umso wirkungsvoller, je mehr das Polymer durch das Lösemittel aufquillt
- gute Quellbarkeit für geringen Abstand der Hansen-Löslichkeitsparameter

Xiao *et al.*
J. Electrostat.
72 **311** (2014)

Lösemittel	δ_d	δ_p	δ_h
Wasser	15.6	16.0	42.3
Ethanol	15.8	8.8	19.4
Isoropropanol	15.8	6.1	16.4
Aceton	15.5	10.4	7.0

Polymere	δ_d	δ_p	δ_h
PP	18.0	0.0	1.0
PE	17.6	0.0	0.0
PBT	18.0	5.6	8.4

δ_d van-der-Waals-Wechselwirkungen
 δ_p dipolare Wechselwirkungen
 δ_h Wasserstoffbrückenbindungen

$$\delta^2 = \sqrt{4(\delta_{d,poly} - \delta_{d,solv})^2 + (\delta_{p,poly} - \delta_{p,solv})^2 + (\delta_{h,poly} - \delta_{h,solv})^2}$$

Löslichkeitsabstand	Wasser	Ethanol	IPA	Aceton	Entladung
PP	44.6	20.9	17.1	13.0	gut
PE	45.4	21.6	17.9	13.2	mittel
PBT	35.8	12.3	9.1	7.1	schlecht

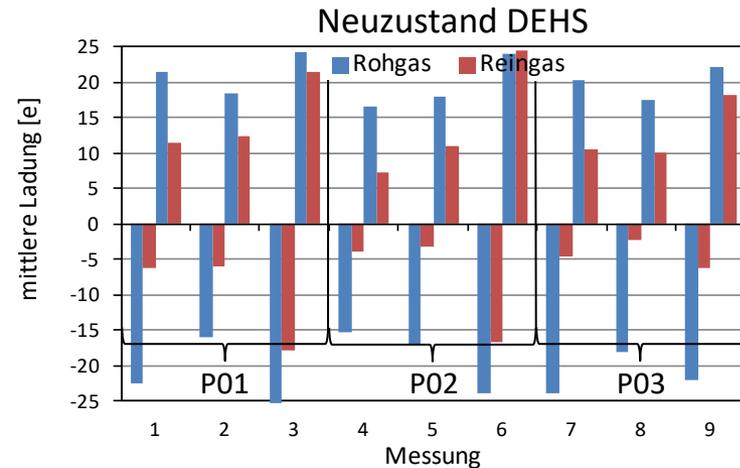
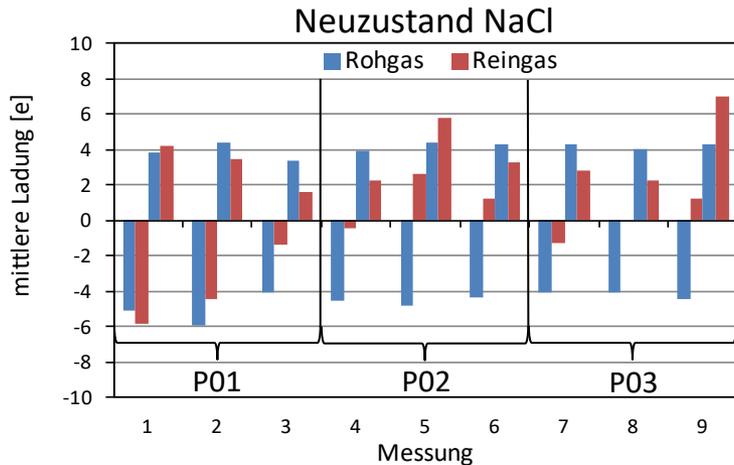
- PBT sollte noch besser durch IPA entladen werden → passt nicht zu den Messungen
- generelles Problem: Erklärung passt auch nicht für weitere Lösemittel aus Literatur

Löslichkeitsabstand	Wasser	Ethanol	IPA	Aceton	MEK	Hexan	Heptan	Isooktan	Cyclohexan	Toluol	Benzol
PP	44.6	20.9	17.1	13.0	10.7	6.3	5.5	3.0	2.5	1.7	1.3
PE	45.4	21.6	17.9	13.2	10.8	5.4	4.6	3.5	1.6	2.6	2.6
PBT	35.8	12.3	9.1	7.1	8.5	11.8	11.4	10.8	10.2	7.7	8.5

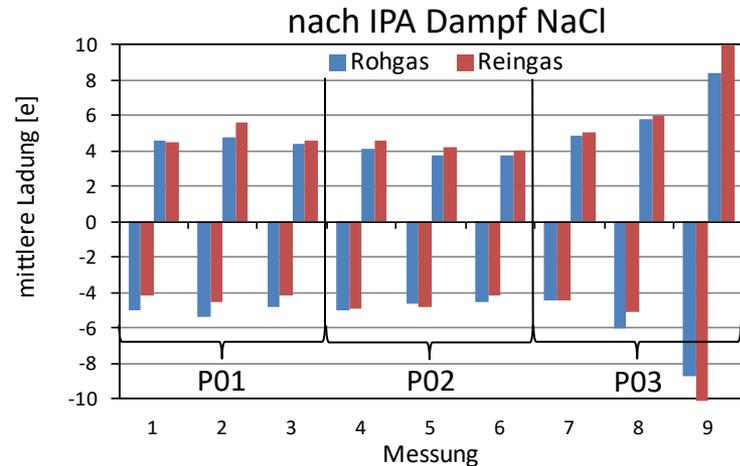
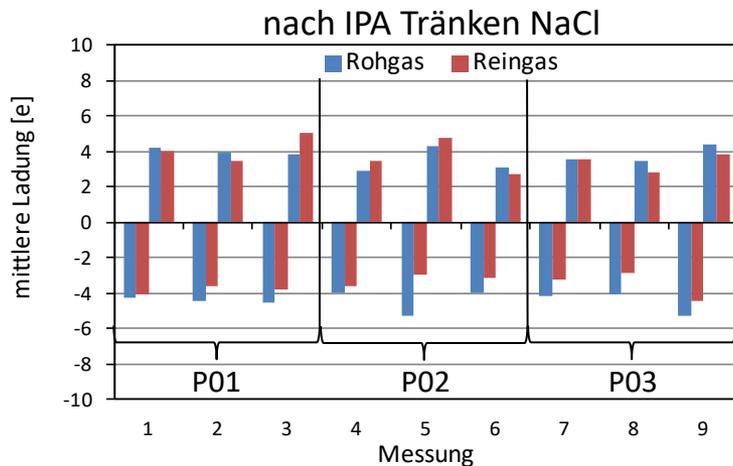
Biermann *et al.* *Evaluation of permanently charged electrofibrous filters* (1982)

Änderung des Ladungszustandes hinter dem Filter

- Reduktion der mittleren Ladung im Reingas für Filter im Neuzustand (Streuung sehr groß)

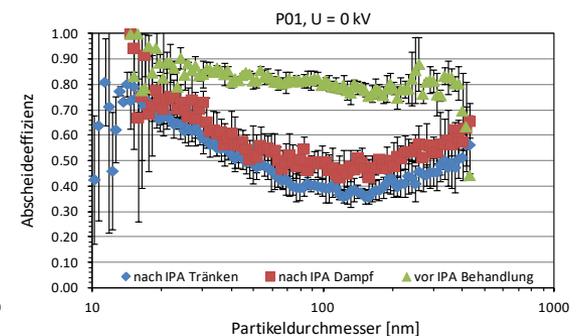
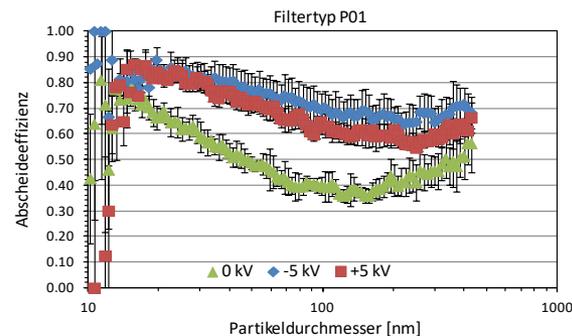
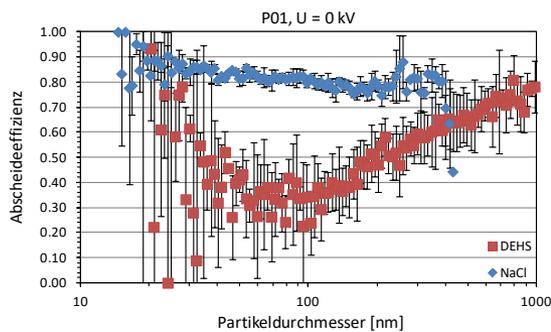


- geringere Reduktion der mittleren Ladung im Reingas für entladene Filter



Zusammenfassung

- erfolgreiche Entwicklung eines unipolaren Diffusionsaufladers
- Charakterisierung von drei Filtertypen bezüglich der Abscheidung NaCl und DEHS
- Entladung der Filter durch Isopropanol mit zwei verschiedenen Methoden
- Versuch der Korrelation mit Messungen des Oberflächenpotentials
- als nächstes weitere Untersuchungen zu drei zentralen Themen
 - Abweichungen zwischen DEHS- und NaCl-Abscheidegraden
 - Einfluss von Bildladungseffekten auf die Abscheidung
 - Übertragbarkeit für Entladung durch flüssiges und gasförmiges IPA



Das IGF-Vorhaben 19145 N der Forschungsvereinigung Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. – IUTA, Bliersheimer Straße 58–60, 47229 Duisburg wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!