

Duisburg, 5. Februar 2019

3. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses

Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Abscheideverhalten neuer und gealterter Elektretfilter

Laufzeit: 01.09.2016 – 31.07.2019

S. Schumacher¹, R. Jasti¹, C. Asbach¹

M. Kerner², K. Schmidt³, S. Antonyuk²

¹ Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA), Duisburg

² Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik

³ IT for Engineering (it4e) GmbH, Kaiserslautern

An-Institut der

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

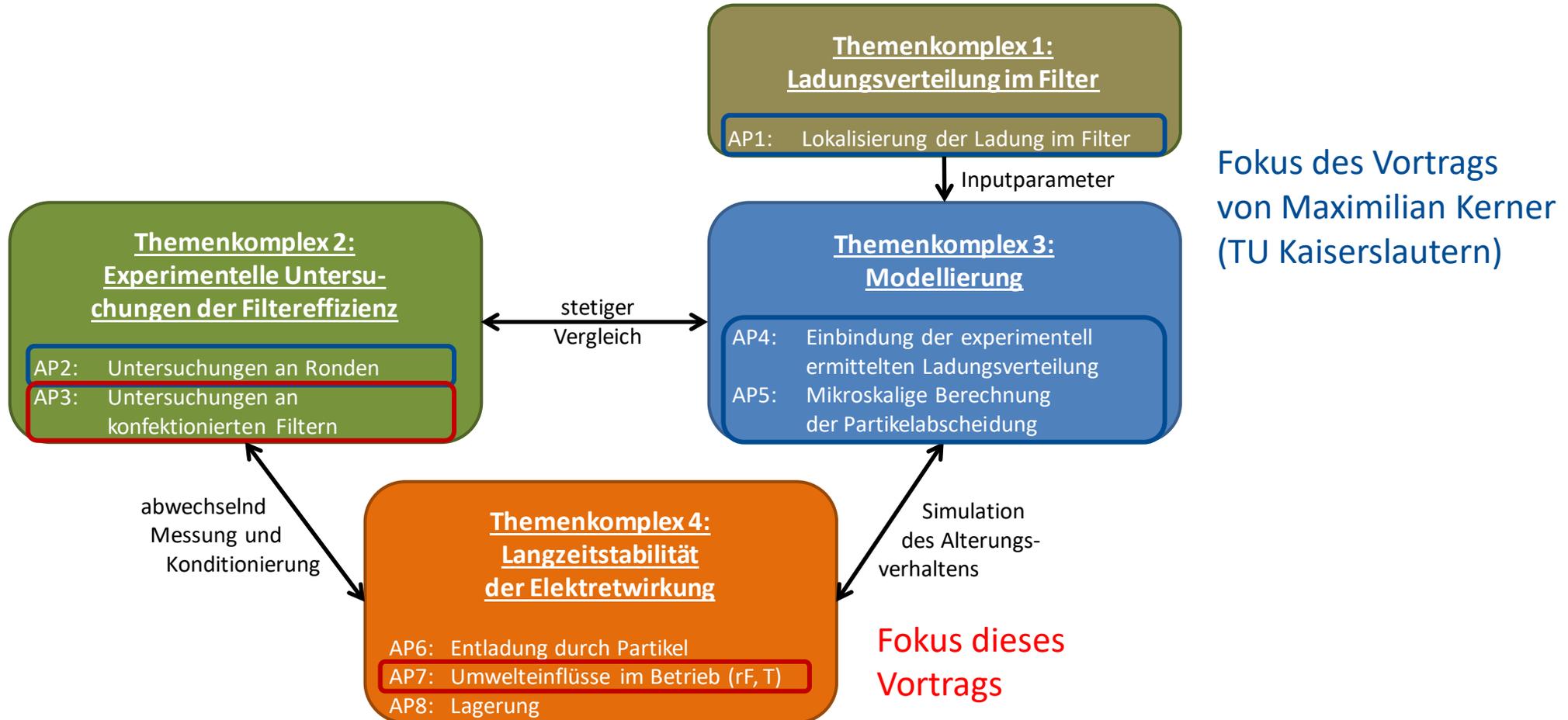


JRF
MITGLIED Johannes-Rau-
DER Forschungsgemeinschaft



AF Mitglied

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



Unterschiede in der Abscheideeffizienz für NaCl und DEHS

- drei gleich konfektionierte Filtertypen aus drei verschiedenen Medien untersucht
- vermessen bei 200 m³/h an Prüfstand nach DIN 71460-1

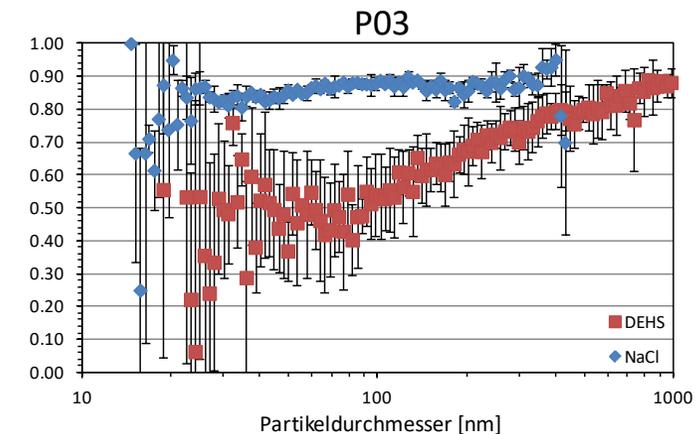
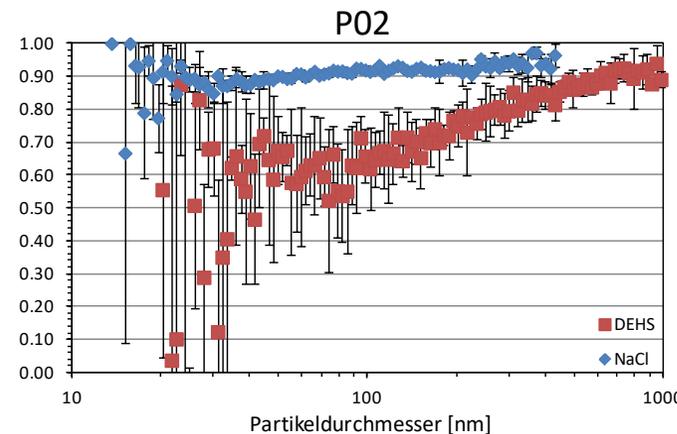
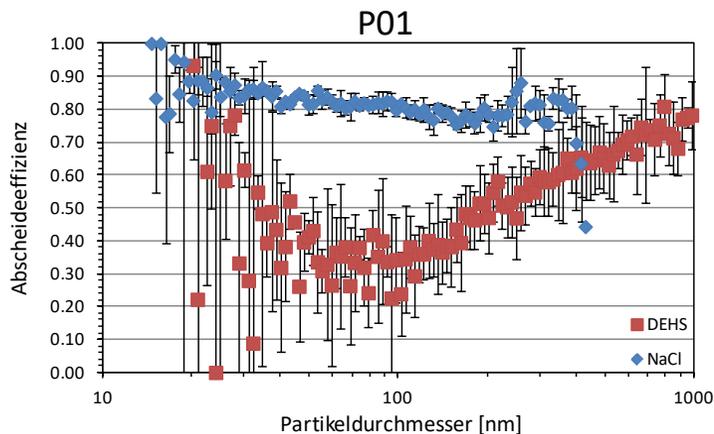
| | Medium P01 | Medium P02 | Medium P03 |
|------------------------------------|------------|------------|-------------|
| Material | PA/PE/PP | PP/PET | PP |
| LDL (200 Pa) [l/m ² /s] | 505 ± 21 | > 800 | > 700 |
| Grammatur [g/m ²] | 110 ± 10 | 116 ± 17 | 140 ± 15 |
| Dicke [mm] | 0,9 ± 0,3 | 0,7 ± 0,1 | 1,15 ± 0,15 |

PP Polypropylen
 PA Polyamid
 PE Polyethylen
 PET Polyethylenterephthalat



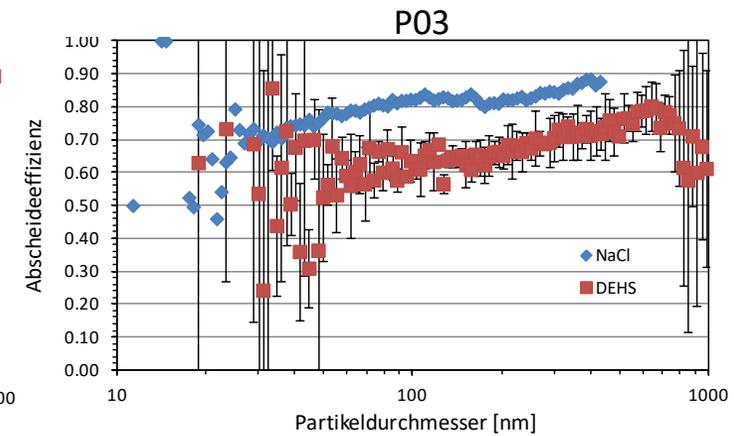
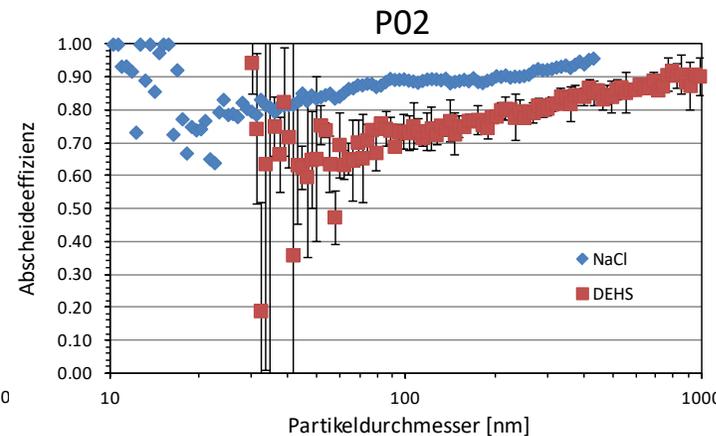
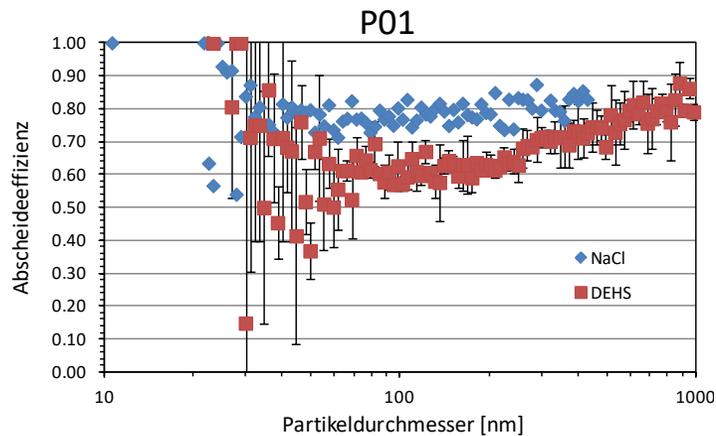
- Abscheidung von NaCl im gesamten Größenbereich höher als für DEHS

S. Schumacher *et al.* Gefahrstoffe –
 Reinhaltung der Luft **78** 316 (2018)



Mögliche Ursache für die Abweichungen

- Effekt auch schon in anderen Forschungsprojekten und der Industrie beobachtet
- gängigste Vermutung: unterschiedlicher Ladungszustand nach Generierung
→ definierte Neutralisation des Aerosols (bipolarer Gleichgewichtszustand)

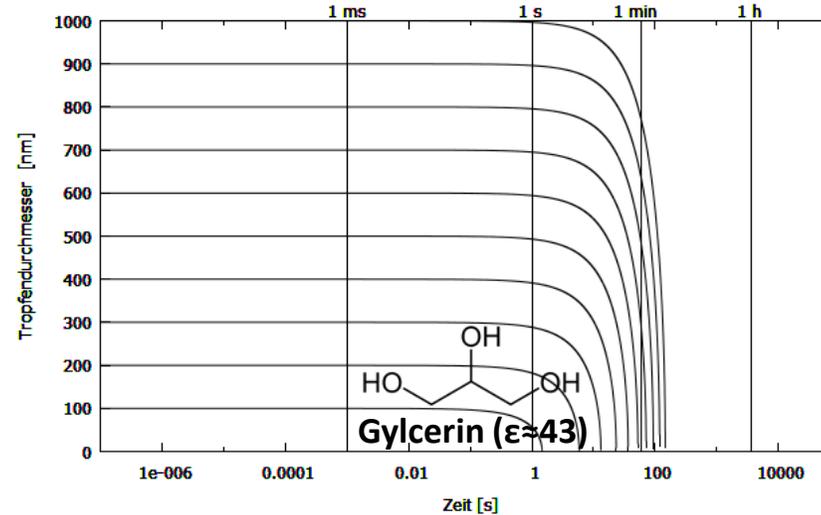
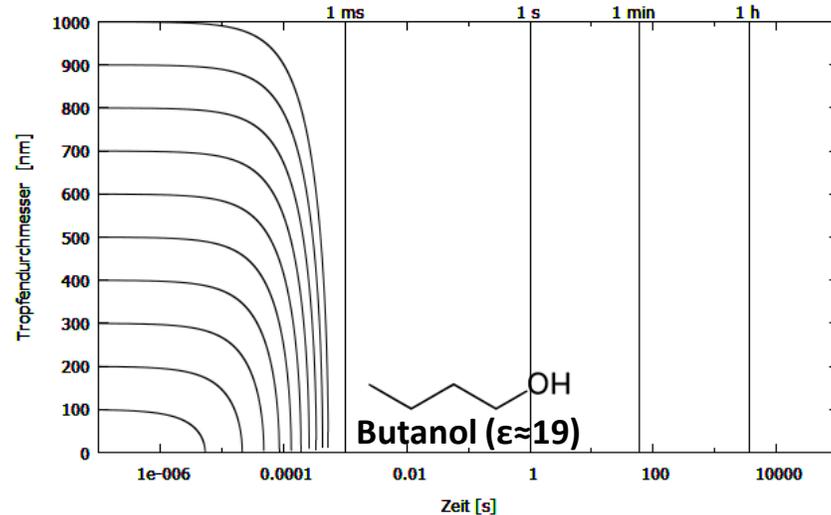
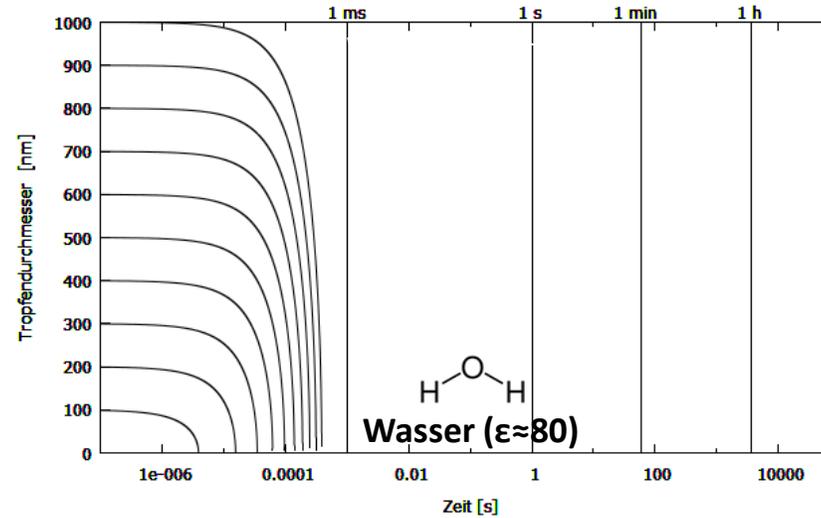
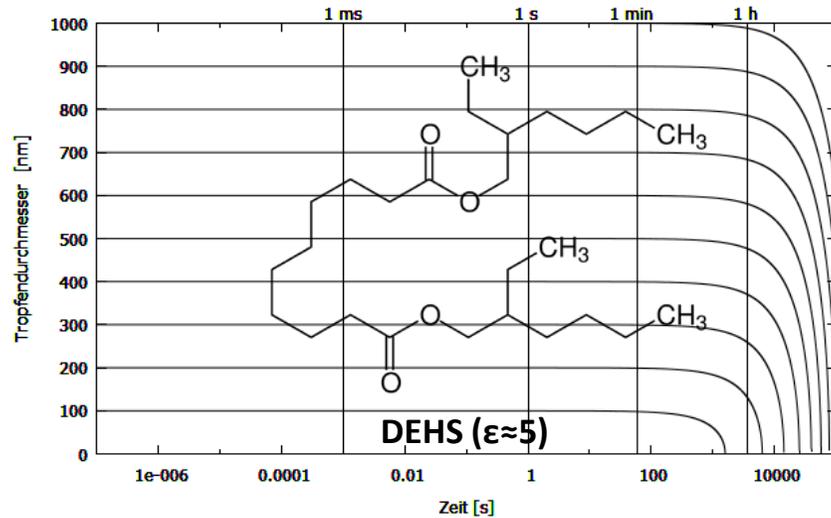


- geringe Unterschiede für NaCl, leicht höhere Abscheideeffizienz für DEHS
→ NaCl bereits nahe am Gleichgewicht, DEHS weitgehend ungeladen
- weiterhin Diskrepanzen: Ladungsverteilung kann nicht alleinige Ursache sein
- Dielektrophorese möglicherweise relevant ($\epsilon_{r,NaCl} = 5,9 \leftrightarrow \epsilon_{r,DEHS} = 5,1$)
→ Versuche mit stärker dielektrisch polarisierbaren Aerosolen

$$K_{In} = \frac{(\epsilon_p - 1)C\pi^2\bar{\sigma}^2 d_p^2}{6\epsilon_0(\epsilon_p + 2)(\epsilon_f + 1)^2 \mu d_f U}$$

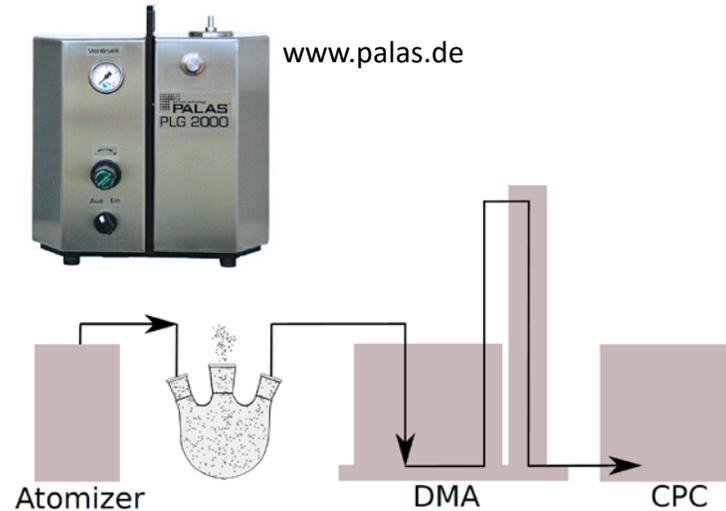
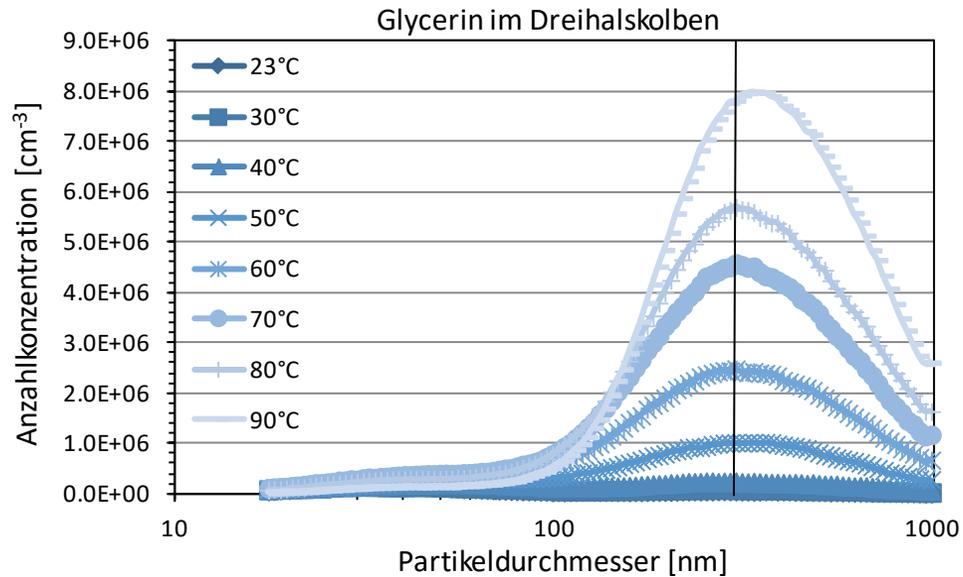
charakteristischer Parameter zur Berechnung der dielektrophoretischen Abscheidung

- Suche stark polare Flüssigkeiten mit ausreichender Stabilität als Aerosol

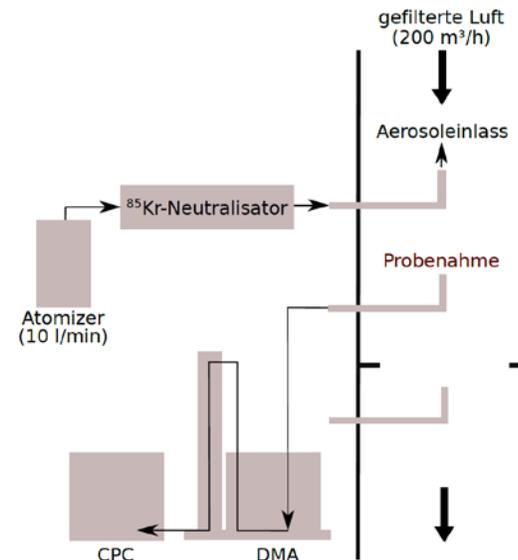
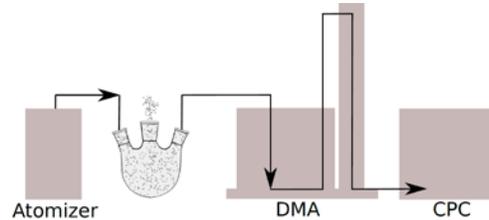
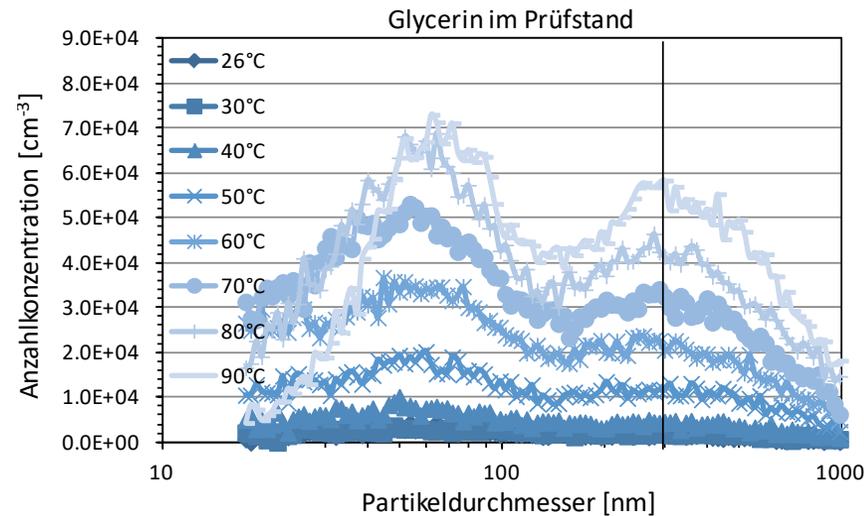
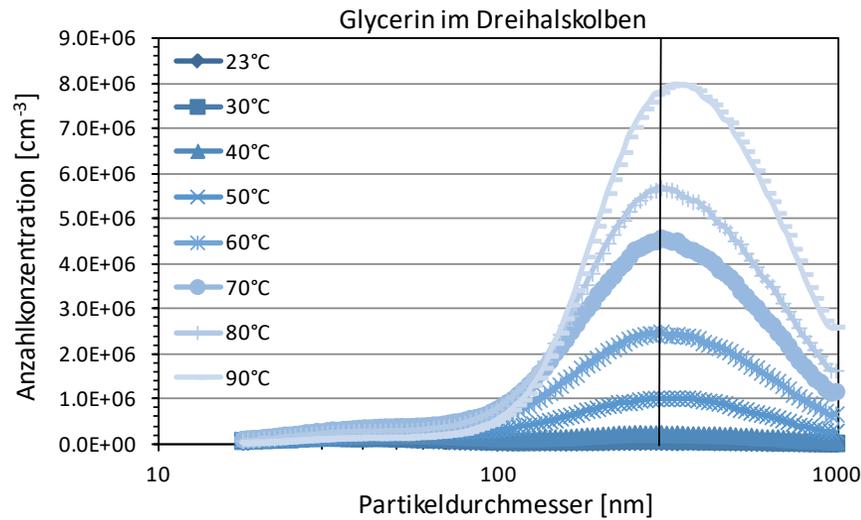


Verdampfungszeiten sind als grobe Abschätzung zu betrachten

- Problem: Glycerin ist sehr viskos, Vernebelung bei Raumtemperatur nicht möglich
- Lösung: Absenken der Viskosität in beheizbarem Atomizers (Palas PLG 2000)

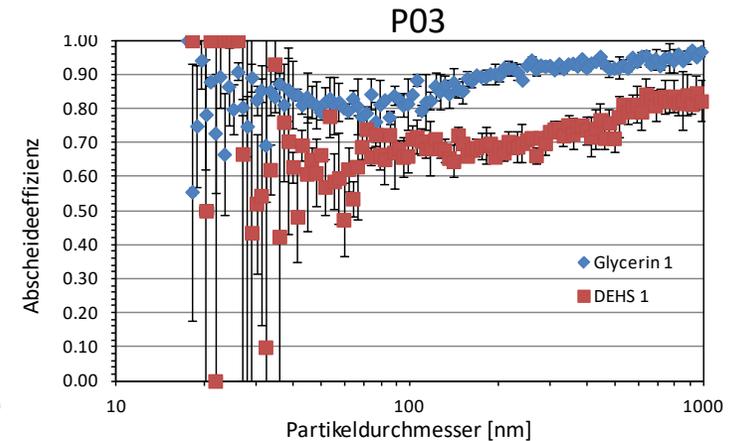
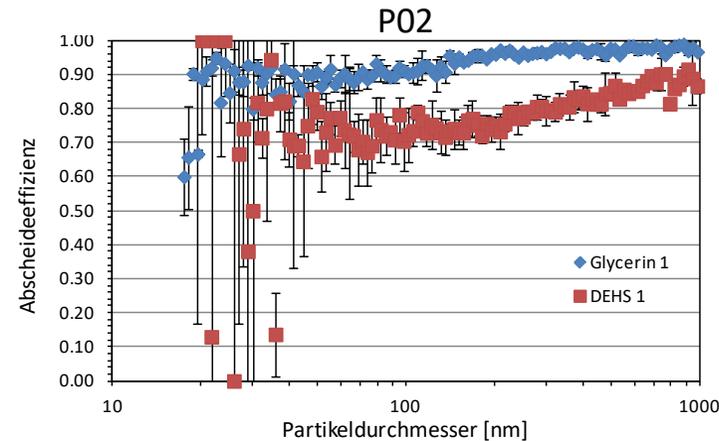
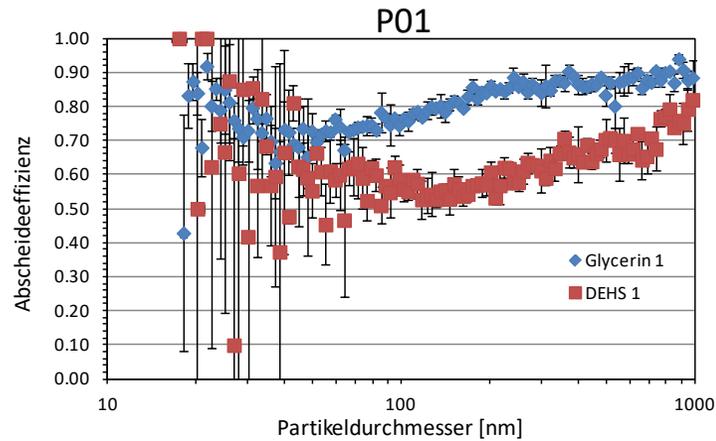


- Vernebelung von Glycerin bei erhöhter Temperatur möglich
- Größenverteilung prinzipiell sehr ähnlich zu DEHS (Modalwert ~ 300 nm)
- schwach ausgeprägter zusätzlicher Feinmode bei etwa 40 nm

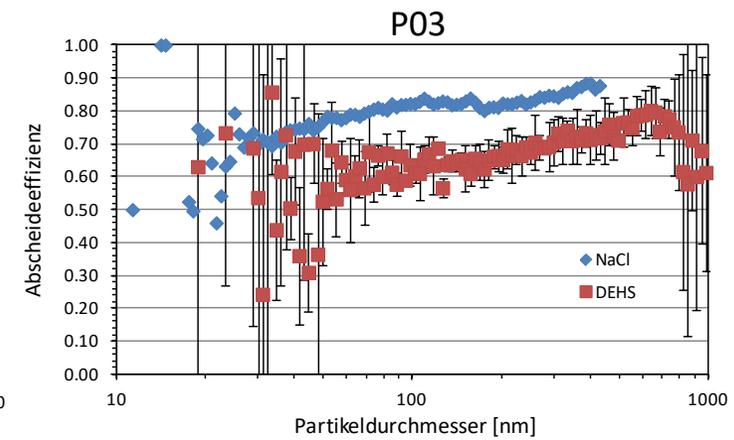
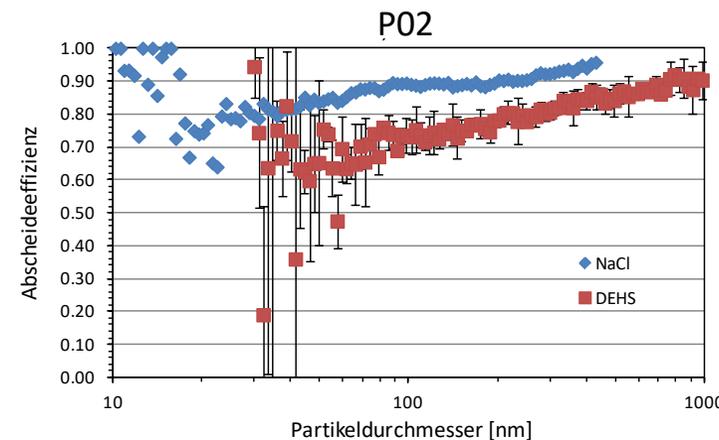
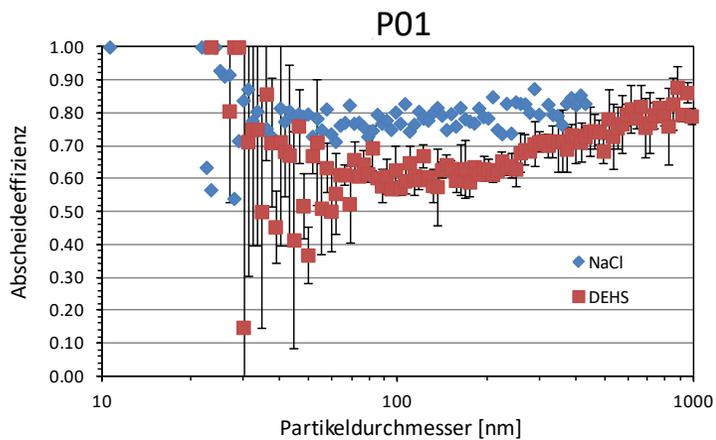


- Grobmode nur verdünnt ($200 \text{ m}^3/\text{h} : 10 \text{ l}/\text{min} = 333$)
- Feinmode im Prüfstand wesentlich ausgeprägter
→ Ursache bisher noch nicht verstanden
- breite Verteilung grundsätzlich gut für Statistik

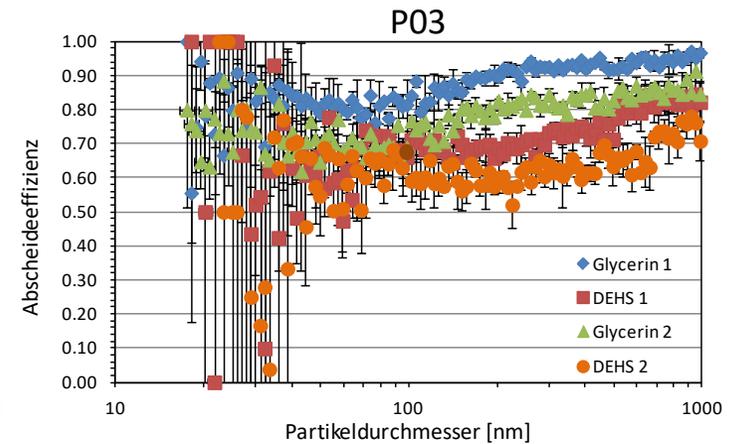
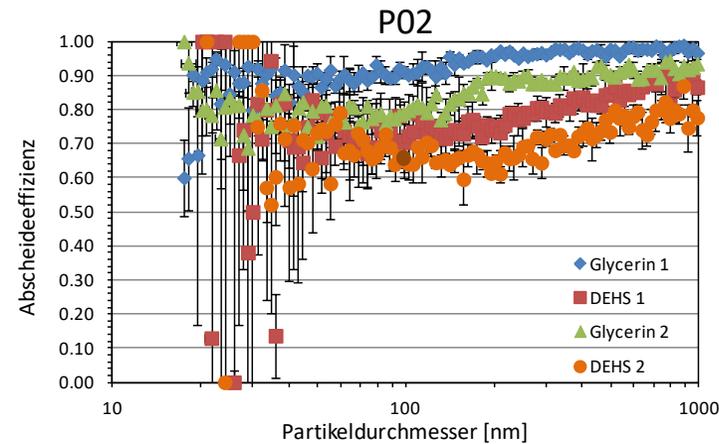
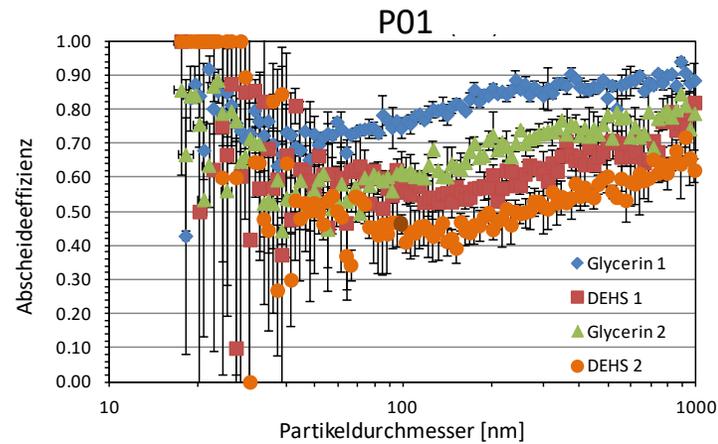
Vergleich der Fraktionsabscheidegrade mit DEHS und Glycerin



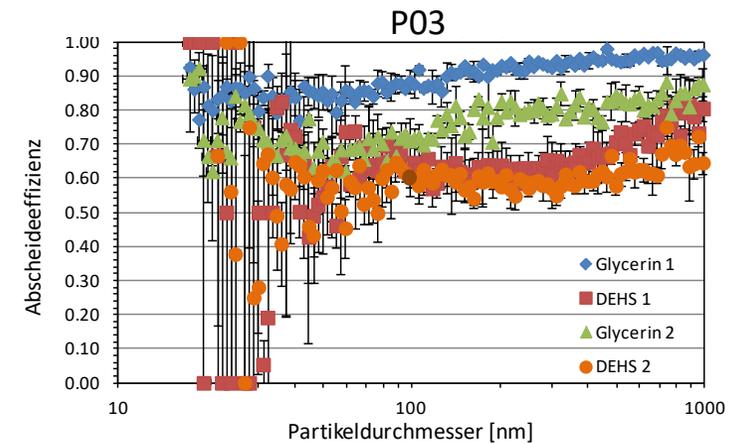
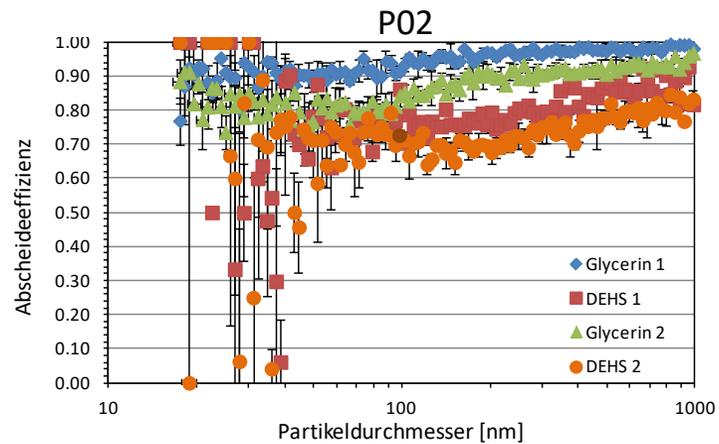
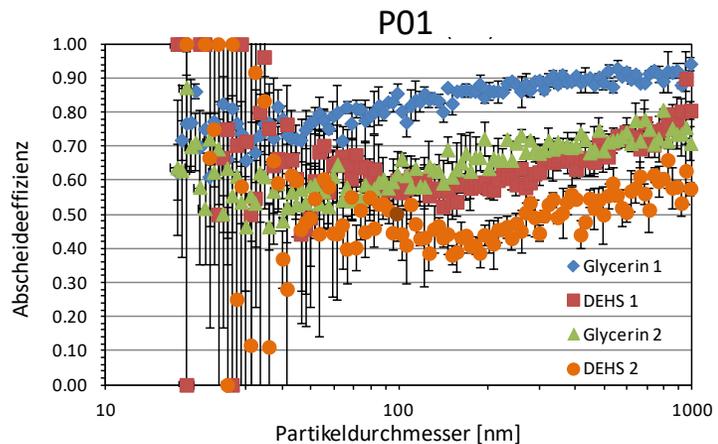
- deutliche Unterschiede auch zwischen Glycerin und DEHS (beide neutralisiert und sphärische Tropfen)
- Verlauf der Fraktionsabscheidegrade für Glycerin sehr ähnlich zu NaCl
→ keine deutlich bessere Abscheidung trotz höherer Dielektrizitätskonstante



Wiederholung der Messungen an denselben Filtern

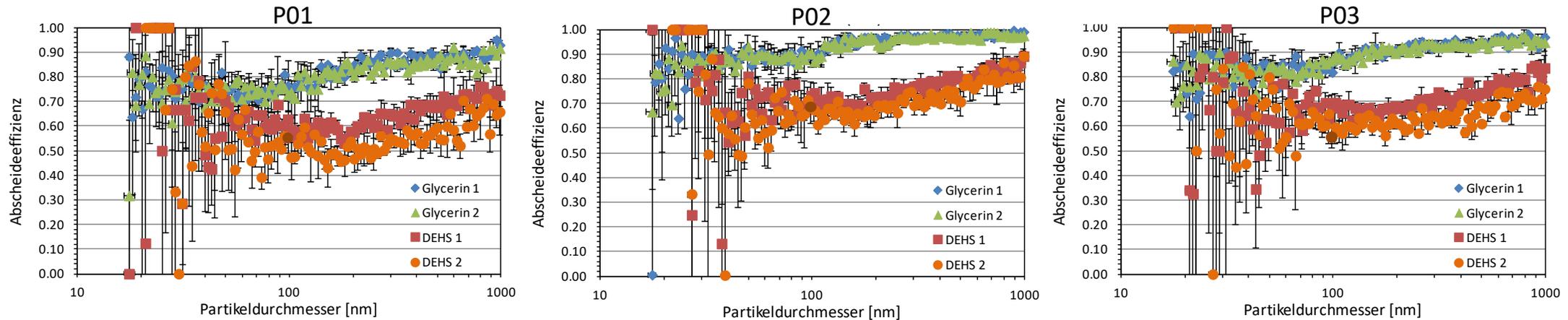


- Abscheideeffizienz sowohl für Glycerin als auch DEHS bei wiederholter Messung geringer
- Ist dieser Effekt reproduzierbar? → Wiederholung der Versuchsreihe an zweitem Filterset



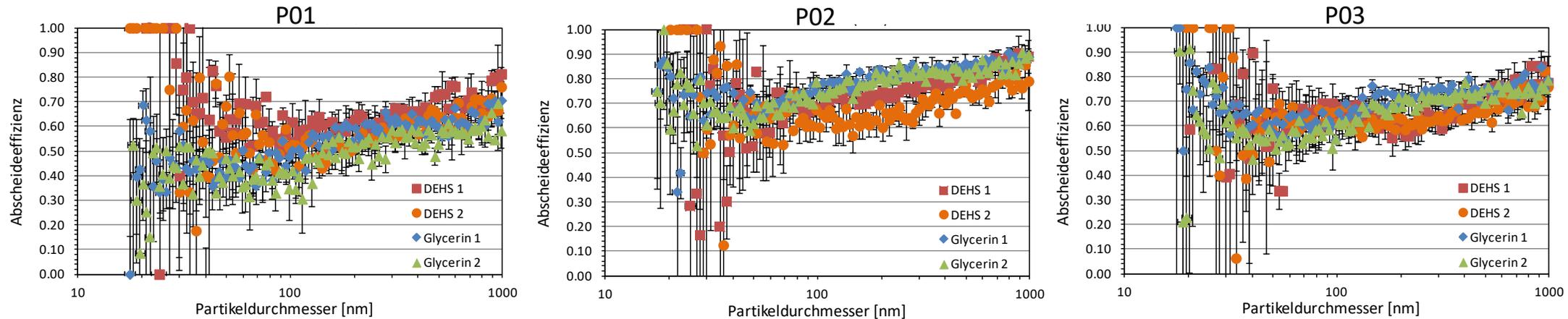
- sehr ähnliche Ergebnisse → Filtereffizienz wird offenbar durch die Messung reduziert

- Ist DEHS, Glycerin oder beides gleichermaßen für die Reduktion der Effizienz verantwortlich?
→ Versuche mit geänderter Reihenfolge (erst zweimal Glycerin, dann zweimal DEHS)



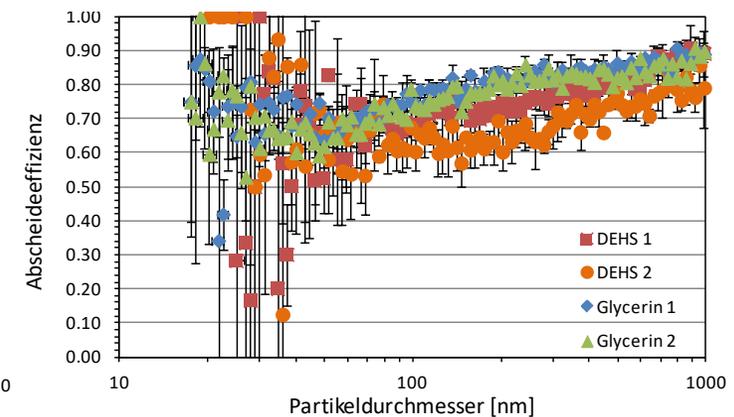
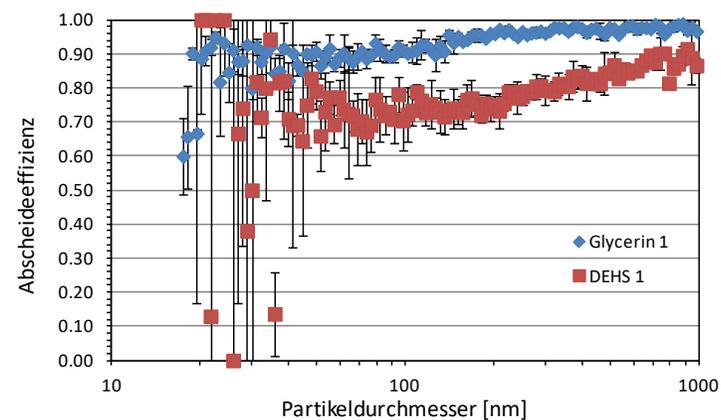
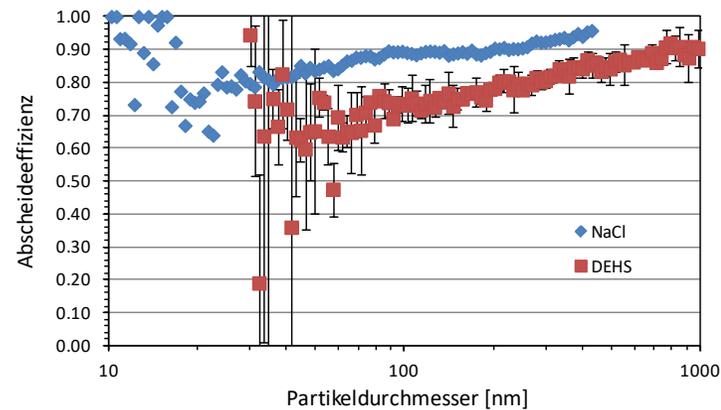
- Beladung der Filter mit ca. 500 mg pro Messung sowohl für Glycerin als auch DEHS
- Messung mit Glycerin hat keinen Einfluss auf die Abscheideeffizienz
- Effizienz für DEHS geringer → zu klären, ob bereits durch Entladung oder materialbedingt
- wiederholte Messung mit DEHS mindert die Abscheideeffizienz weiter

- Ist diese Interpretation (kein Einfluss durch Glycerin, Entladung durch DEHS) in sich konsistent?
→ Versuche mit nochmals geänderter Reihenfolge (erst zweimal DEHS, dann zweimal Glycerin)



- vorherige Messung mit Glycerin hat keinen Einfluss auf die Abscheideeffizienz für DEHS
- Abscheideeffizienz für Glycerin geringer nach vorheriger Messung mit DEHS
→ konsistent zu vorher aufgestellter These, dass DEHS den Filter entlädt
- zweite Glycerin-Messung liegt leicht unter der ersten (vorher fast genau identisch)
→ langsam fortschreitende Entladung durch bereits deponiertes DEHS?
- weitere Experimente zur genauen Klärung notwendig

- Unterschiede in der Abscheidung von NaCl und DEHS beobachtet
- Verlauf für Vergleich Glycerin vs. DEHS (identische Partikelmorphologie) sehr ähnlich
→ Dielektrizitätskonstante ($\epsilon_{r,NaCl} = 5,1 \leftrightarrow \epsilon_{r,Glycerin} = 42,5$) vermutlich nicht ausschlaggebend
- DEHS senkt die Filtereffizienz im Gegensatz zu Glycerin (und vermutlich NaCl) deutlich ab
- Wenn dies die alleinige Ursache ist, muss der Effekt zu Beginn besonders stark sein

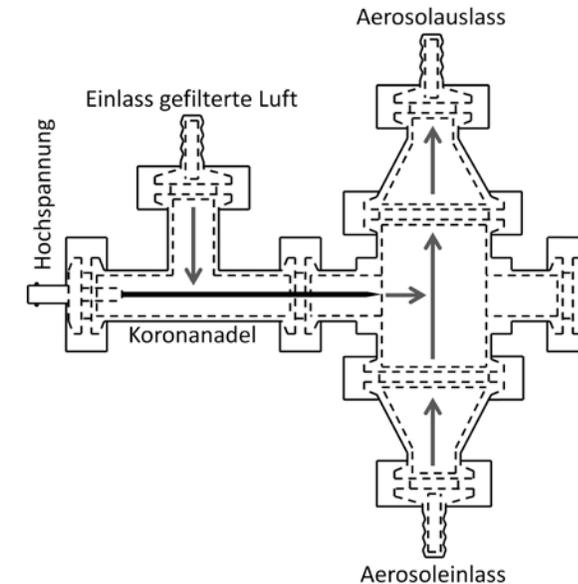


Entladung der Filter mit Isopropanol (flüssig und gasförmig)

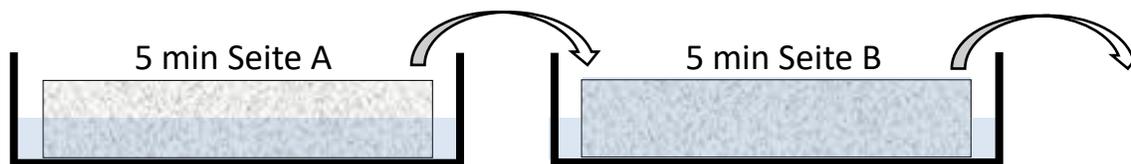
- Entladung über 24 h in Konditionierungskabinett gemäß ISO 16890-4



(TDC 584, Topas GmbH)

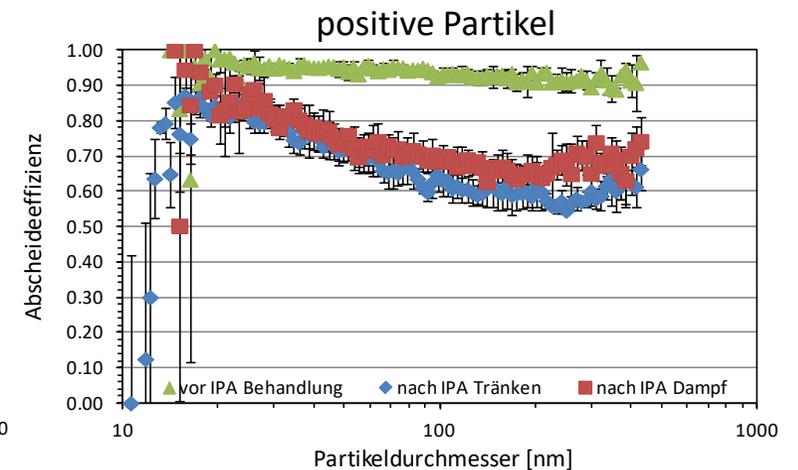
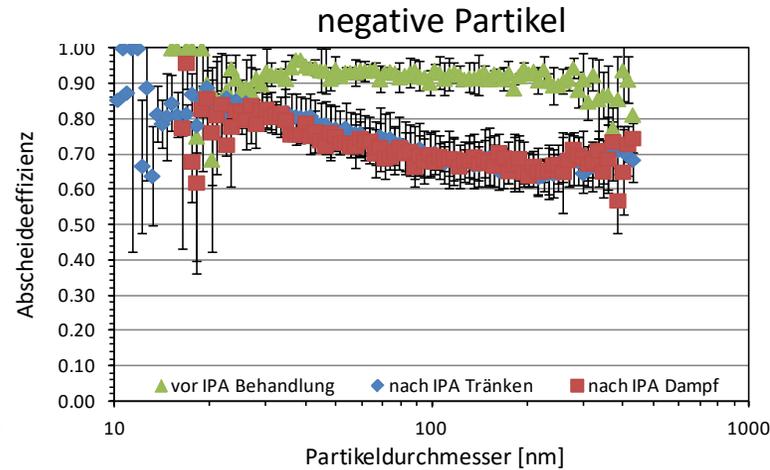
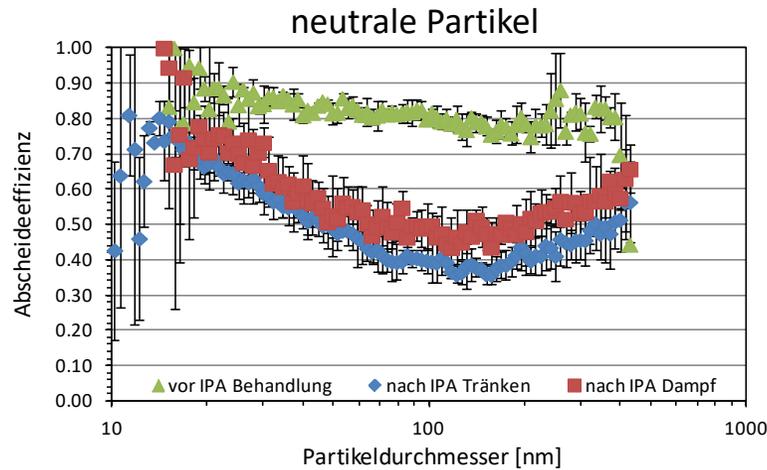


- Tränken der Filter für 5 min in Isopropanol (ähnlich EN 779)

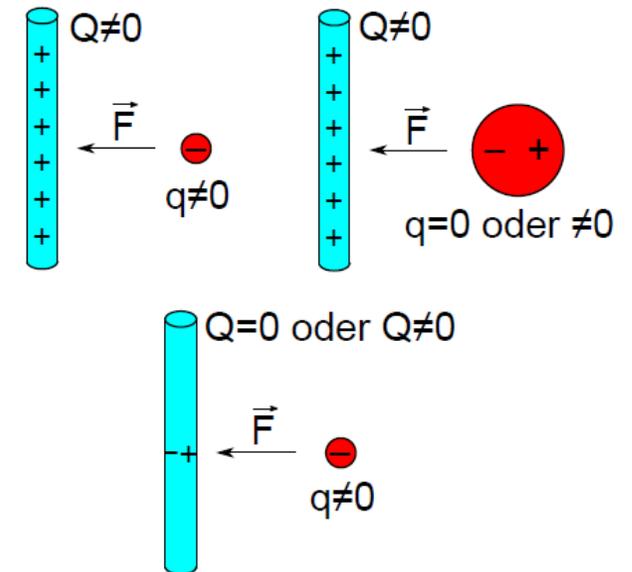


- Messung für neutrale und geladene Partikel (mit selbstgebautem Diffusionsauflader)
-
- The diagram shows a rectangular filter tilted at an angle. Blue droplets are falling from the bottom edge, and blue cloud-like shapes are rising from the top edge. To the right of the filter, the text 'min. 24 h Trocknen' (minimum 24 hours drying) is written.

Vergleich der Ergebnisse für Filtertyp P01

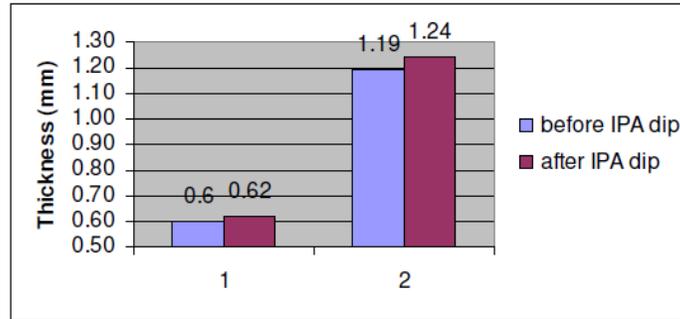


- Unterschiede zwischen den beiden Methoden relativ gering
- Abscheideeffizienz für geladene Partikel auch nach Entladung höher
→ Bildladungseffekte zusätzlich zur (Di-)Elektrophorese relevant
- Abscheideeffizienz nach Tränken etwas niedriger als bei IPA-Dampf
- zwei verschiedene Erklärungsansätze:
 1. strukturelle Veränderungen durch IPA-Tränken
 2. Entladung durch IPA-Dampf nicht vollständig

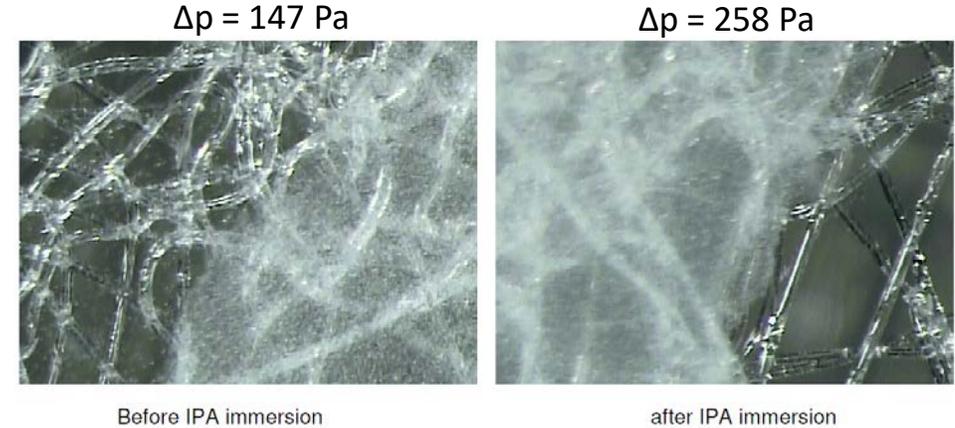


- verschiedene Beobachtungen in der Literatur:

Auflockern der Fasern, Auflösen des Bindemittels
 → Medium wird dicker, Abscheideeffizienz sinkt



Veränderung in Nanofaserlage (wie bei Medium P01)
 → sichtbar im Mikroskop, Druckverlust steigt



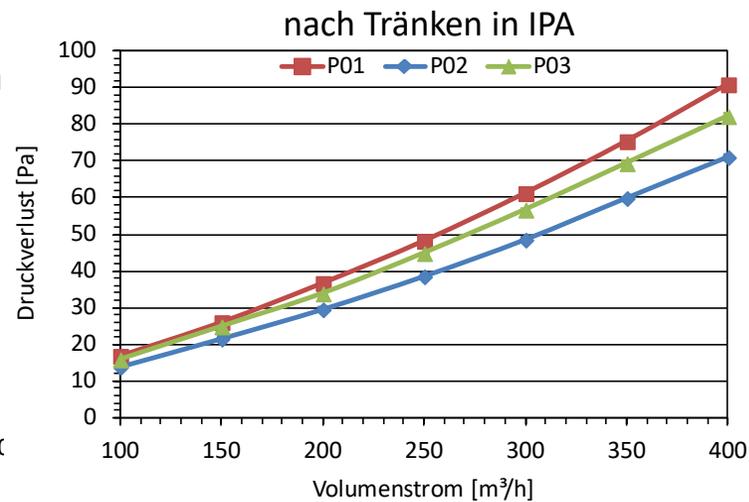
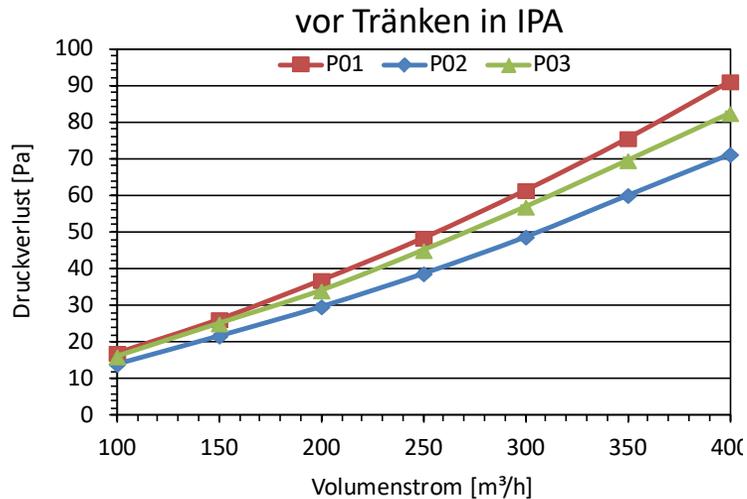
C. Sun „Implications of Discharging Conditioning on Air Filter Media“ (2009)

irreversible Veränderungen des Filtermediums
 → Änderung der Glasübergangstemperatur

| Film Sample | Glass Transition Temperature (°C) |
|--|-----------------------------------|
| Extrusion Cast Control | 4.8 + 0.01 |
| Extrusion Cast Following 2-propanol Immersion | 7.8 + 1.3 |

D. Myers et al. „Electret media for HVAC filtration applications“ *INJ Winter* **12** 43-54 (2003)

- keine Änderung des Druckverlust nach Tränken in IPA



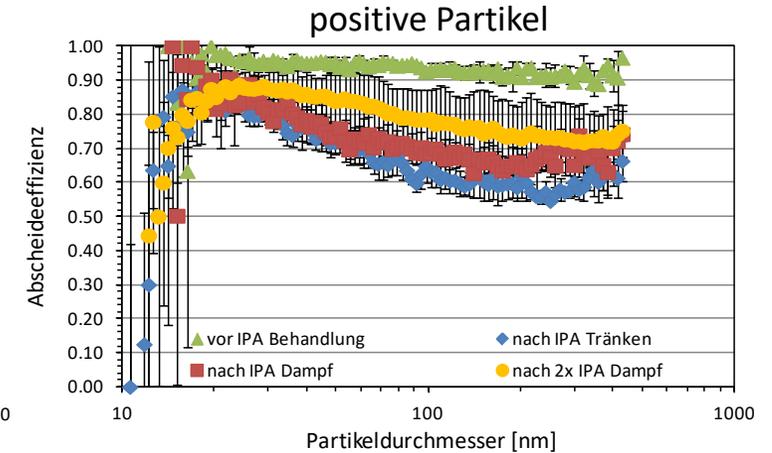
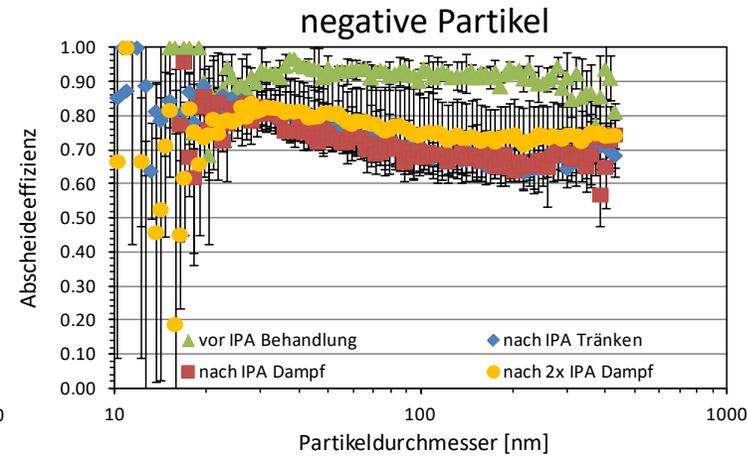
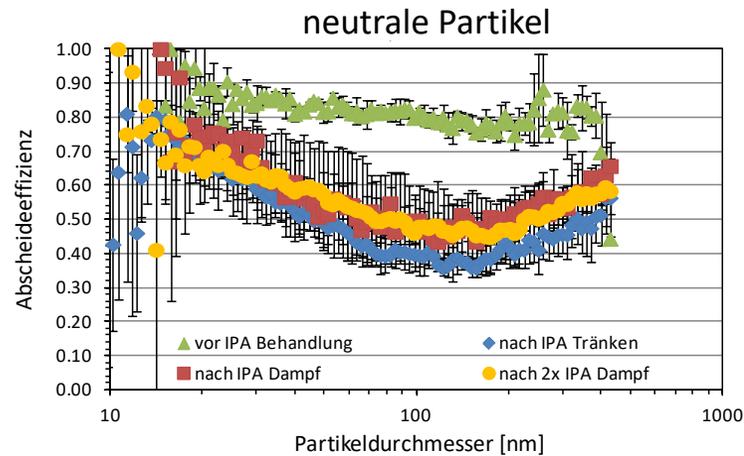
- keine beobachtbaren Veränderungen in
 - Rasterelektronenmikroskopie → Nanofaserlage strukturell intakt
 - maximaler Zugstärke → mechanische Eigenschaften unverändert
 - Differenzkalometriespektren → Eigenschaften auf Polymerskala unverändert
- Schlussfolgerung: Entladung mit IPA-Dampf nicht vollständig

REM, mechanische und differenzkalometrische Messungen vom Deutschen Textilforschungszentrum Nord-West e.V. (DTNW), Krefeld durchgeführt

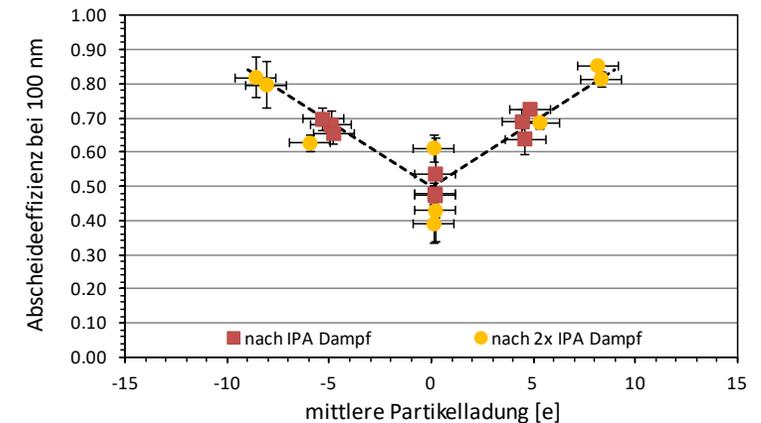


War die Dampfentladung bei Filtertyp P01 nicht vollständig?

- Filter zum zweiten Mal im Konditionierungskabinett für 24 h entladen

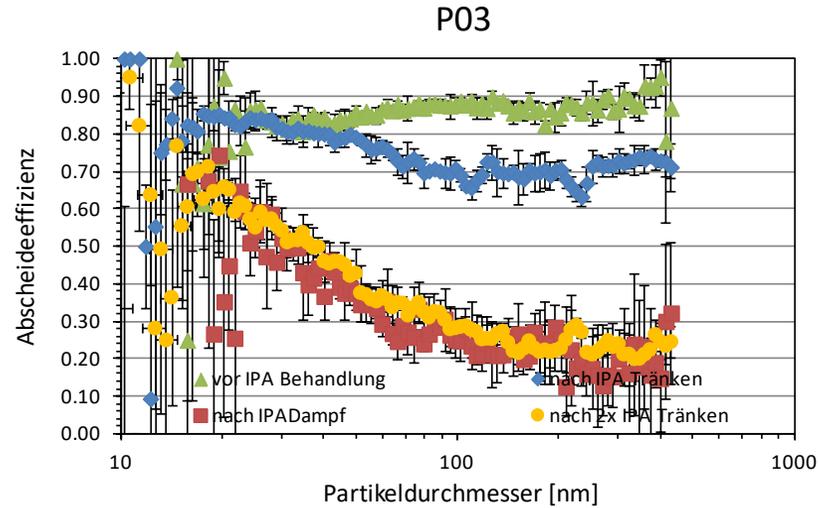
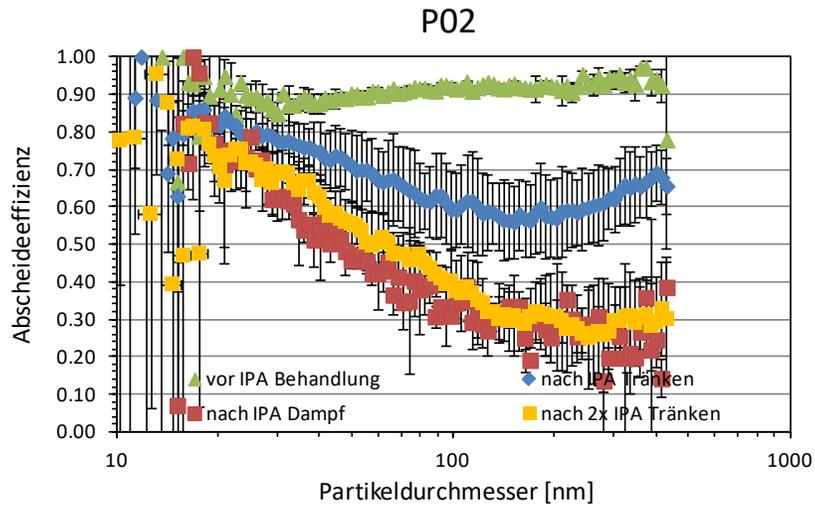


- Ergebnis nicht eindeutig für neutrale Partikel, da Schwankungen groß (vermutlich durch Beladung mit NaCl)
- geladene Partikel: Effizienz nach zweiter Entladung scheinbar erhöht
- Grund: Ladung höher als bei ersten Messungen (vermutlich Veränderungen an der Koronanadel)



Vergleich der Methoden für die Filtertypen P02 und P03

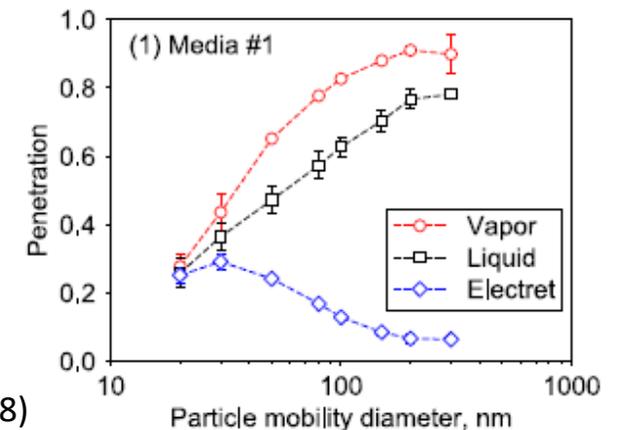
- Entladung mit IPA-Dampf effizienter als in flüssigem IPA



| Medium | C Nom. Eff. = 77% | |
|-----------|-------------------------|------|
| Treatment | Dip | Vap |
| Lab 1 | 40 | 57 |
| Lab 2 | 32 | 51 |
| Lab 3 | 60 | 65 |
| Lab 6 | 43 | 60 |
| Lab 8 | 23 | 31 |
| Lab 10 | 43 | 42 |
| Lab 11 | 38 | 58 |
| Lab 12 | 43 | 51 |
| Average | 40.6 | 51.8 |

Tronville *et al.* 11th World Filtration Congress (2012)

- ähnliche Effekte aus der Literatur bekannt
 - Hypothese: Filter laden sich bei Verdampfung des flüssigen IPA wieder auf
 - hier führte zweites Tränken in IPA zur gleichen Effizienz wie nach IPA-Dampf
 - widerspricht der Hypothese von Tang et al.
- weitere Untersuchungen notwendig



M. Tang et al. Build. Environ. **141** 206 (2018)

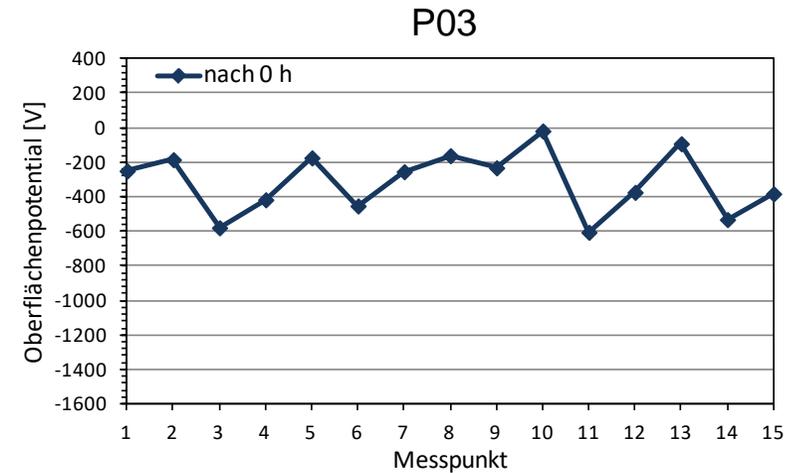
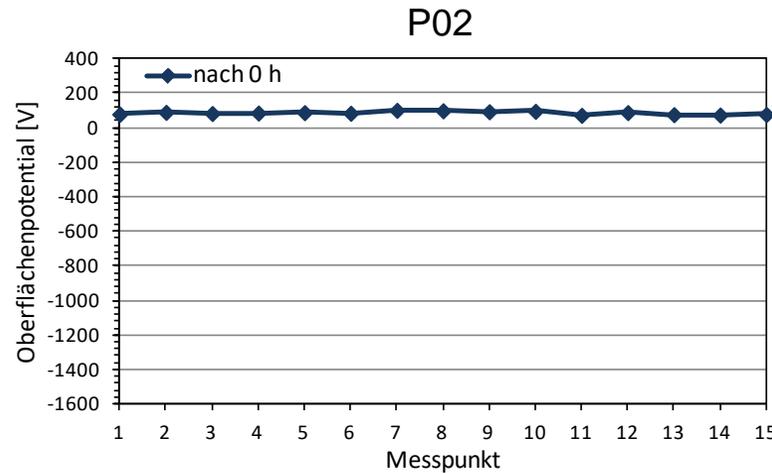
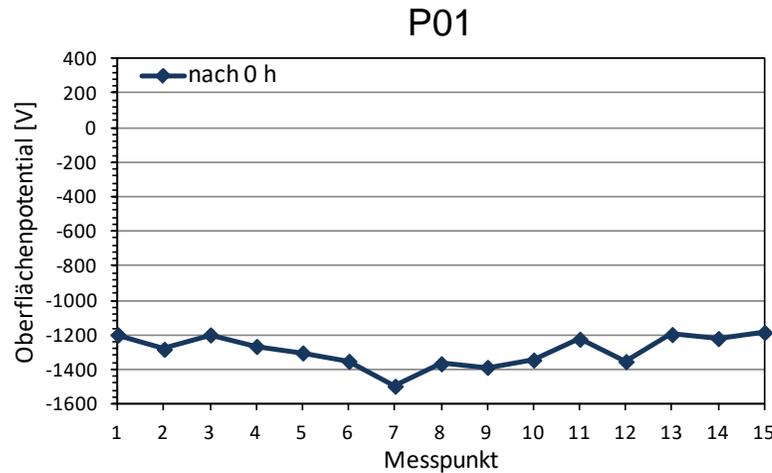
- Fragestellung: Welchen Einfluss haben Feuchte und Temperatur auf die Alterung von Elektretfiltern?
→ Konditionierung der Filter in Klimaprüfschrank Vötsch VC 4034
- Konditionierung derselben Filter für dreimal 1 h
- jeweils Untersuchung des Oberflächenpotentials und der Abscheideeffizienz
- Frage: ist die relative oder absolute Feuchte entscheidend?
→ Untersuchung verschiedener Temperaturen bei gleicher relativer Feuchte

| Relative Feuchte [% rF] | Temperatur [°C] | Absolute Feuchte [g/m ³ _{Luft}] |
|-------------------------|-----------------|--|
| 80 | 23 | 16,8 |
| 80 | 40 | 43,4 |
| 80 | 80 | 123,3 |

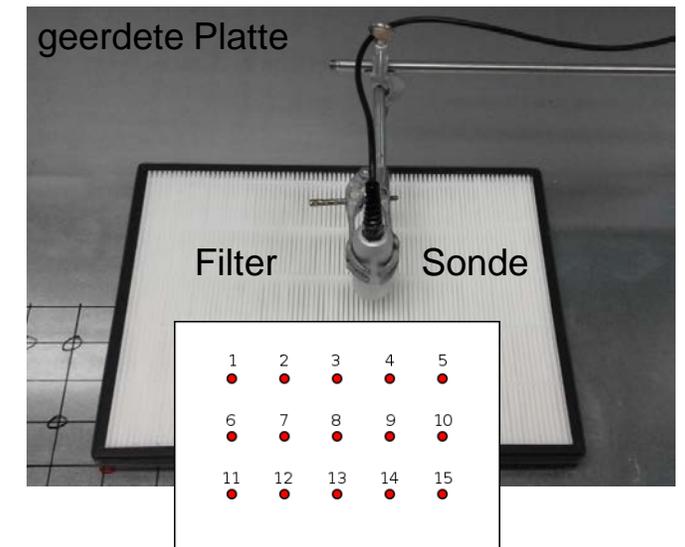


- Anmerkung: Feuchte fällt bei Öffnen des Klimaschranks zum Einlegen der Filter auf bis zu 50% rF ab
- Wert steigt jedoch innerhalb von maximal 3 min wieder auf den eingestellten Sollwert an
→ Effekt gegenüber der Gesamtkonditionierungszeit von 1 h vernachlässigbar

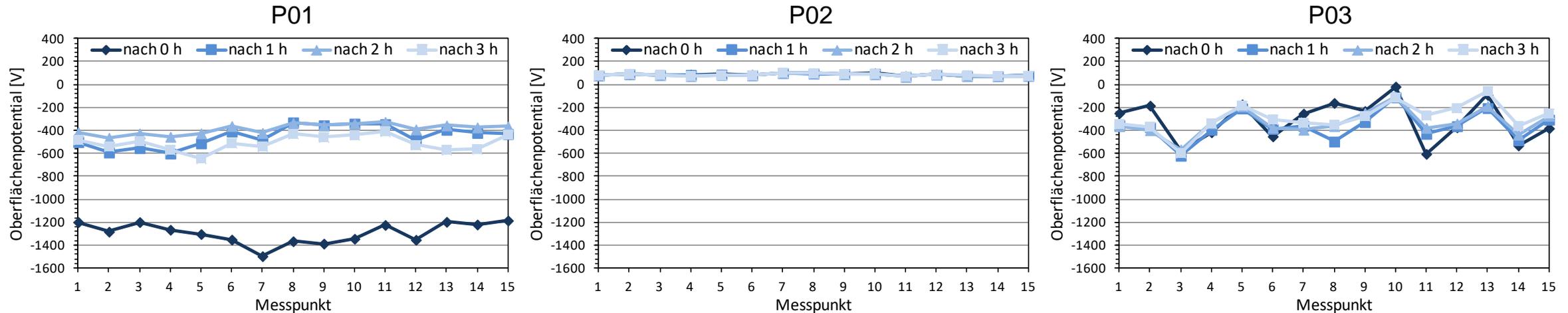
- Oberflächenpotential an den 15 Messpunkten (in 2,5 cm Abstand jeweils dreimal gemessen und gemittelt)



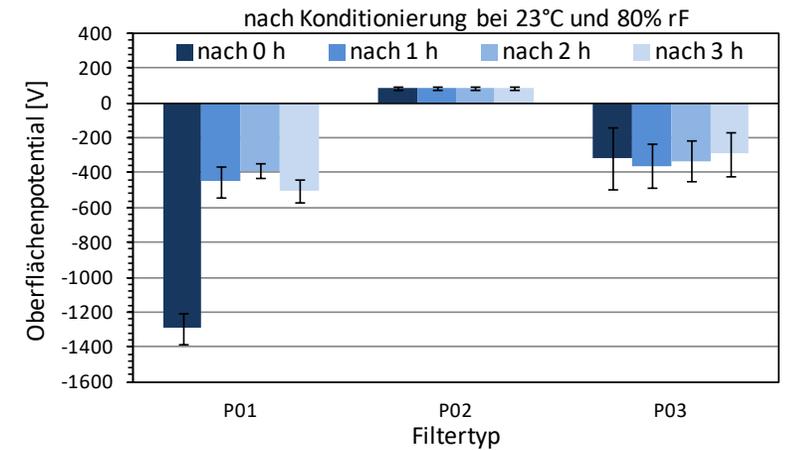
- Ergebnisse für neue Filter konsistent zu vorherigen Untersuchungen:
 - P01: hohes negatives Potential, räumlich relativ homogen
 - P02: geringes positives Potential, räumlich sehr homogen
 - P03: im Mittel leicht negatives Potential, räumlich stark inhomogen



- Änderung der des Oberflächenpotentials nach Konditionierung für 1 h, 2 h und 3 h



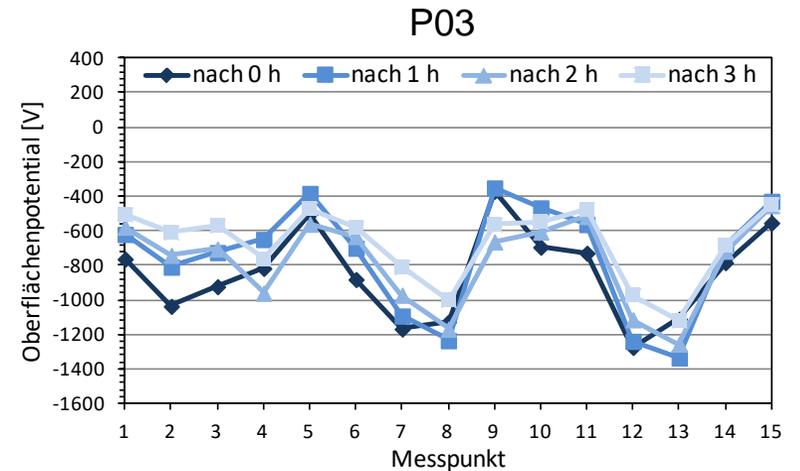
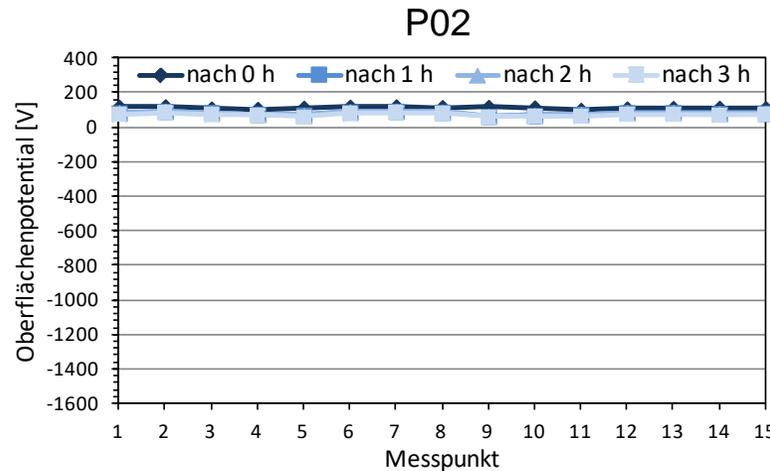
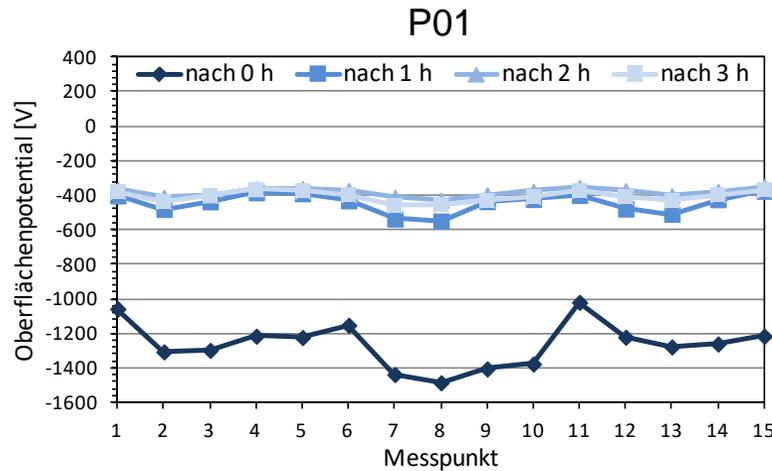
- Änderung des Oberflächenpotentials nach Konditionierung
 - P01: deutlich Abnahme nach 1 h, danach kaum weitere Änderung
 - P02: keine signifikante Änderung über den gesamten Zeitraum
 - P03: im Mittel keine deutliche Änderung, aber Streuung sehr groß



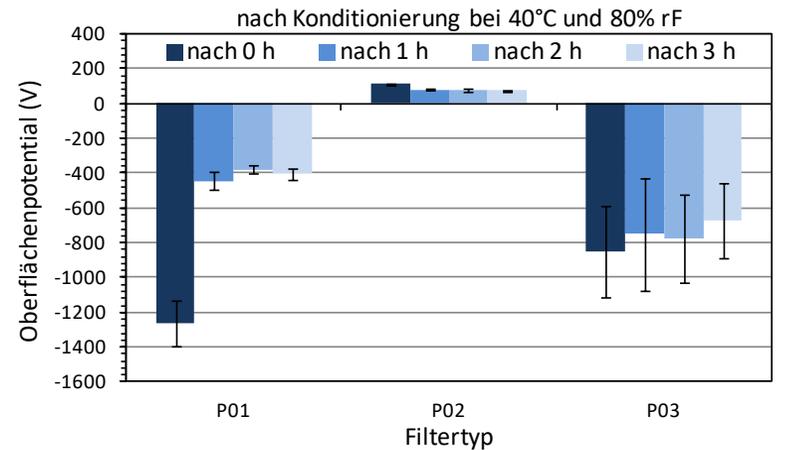
Mittelwert und Streuung über 15 Messpunkte

Konditionierung bei 80% rF bei 40°C

- Erhöhung der Temperatur auf 40°C (drei neue Filter untersucht)



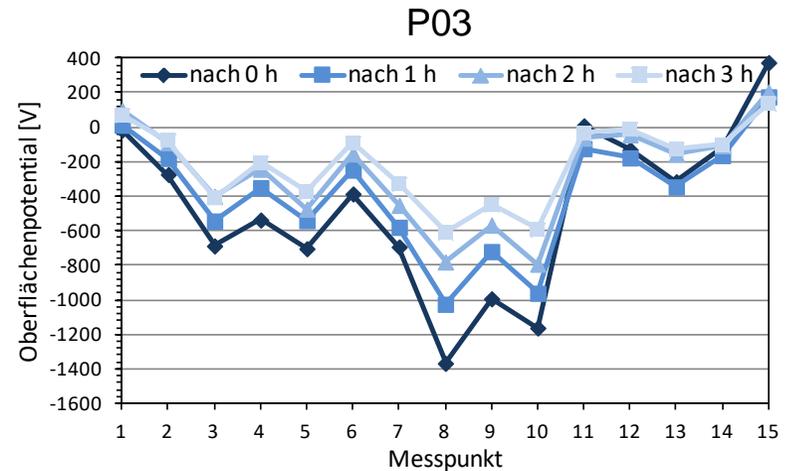
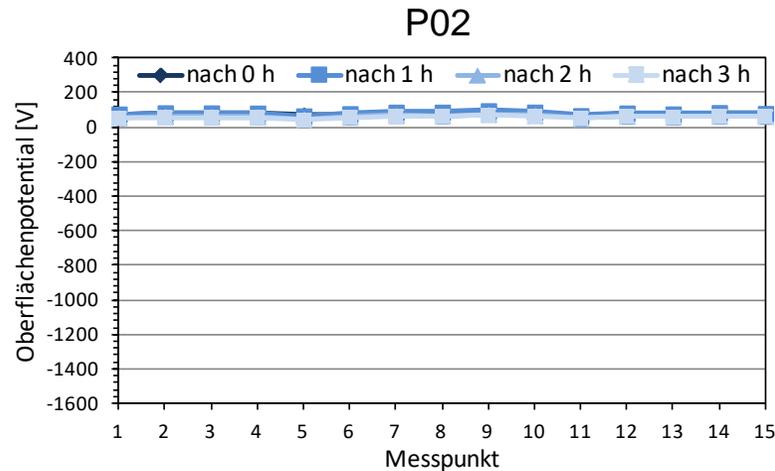
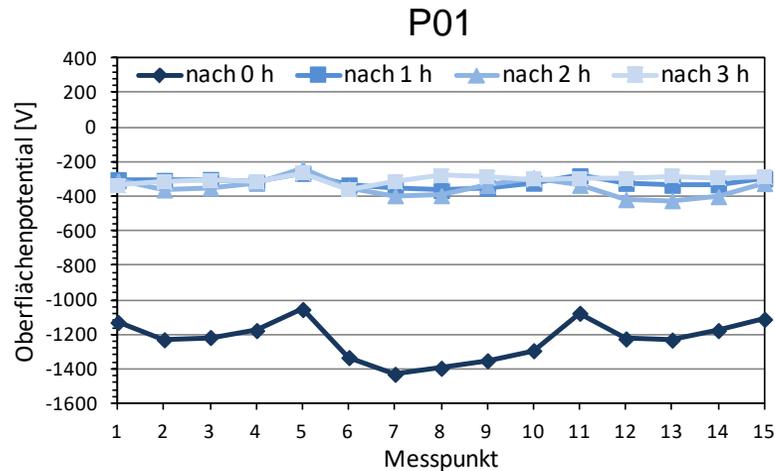
- Verhalten bei Konditionierung:
 - P01: keine signifikanten Änderungen gegenüber 23°C
 - P02: leichte Entladung nach erstem Konditionierungsschritt
 - P03: im Mittel leichte Abnahme, aber Streuung sehr groß



Mittelwert und Streuung über 15 Messpunkte

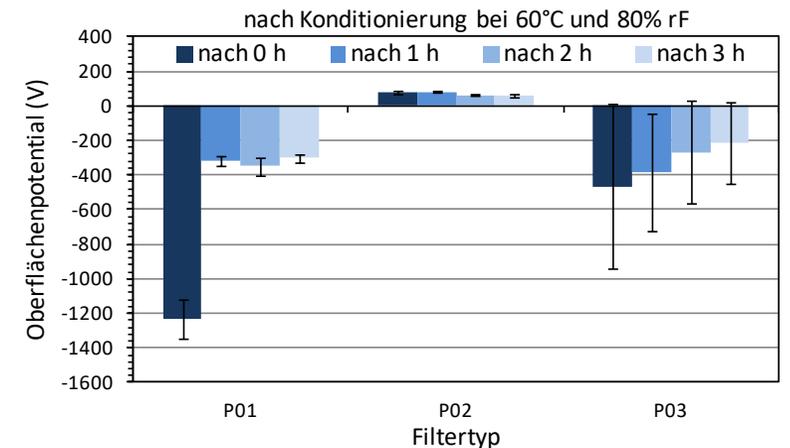
Konditionierung bei 80% rF bei 60°C

- Erhöhung der Temperatur auf 60°C (drei neue Filter untersucht)



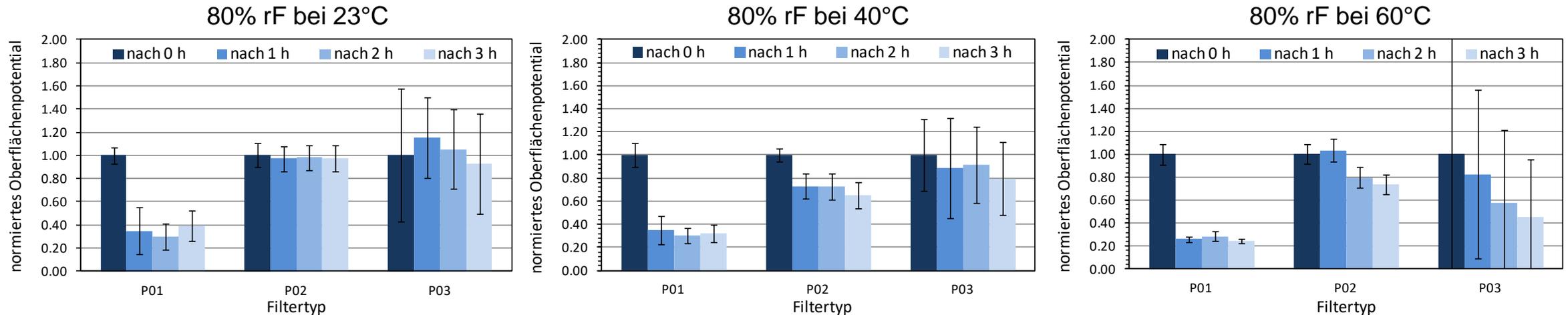
- Verhalten bei Konditionierung:

- P01: etwas stärkere Abnahme als bei 23°C und 40°C
- P02: minimal stärkere Entladung bei als bei 40°C
- P03: Abnahme mit zunehmender Alterung, aber Streuung sehr groß



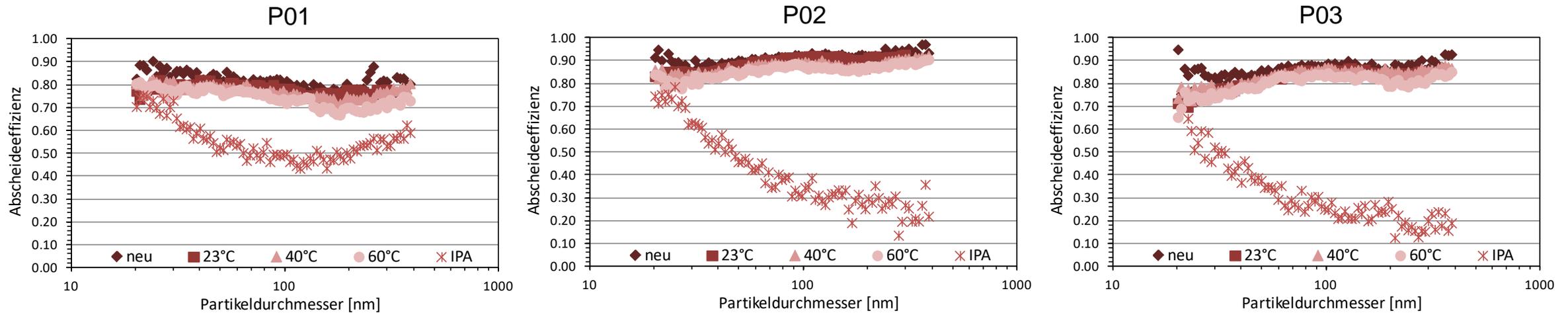
Mittelwert und Streuung über 15 Messpunkte

- Oberflächenpotential jeweils normiert auf den Ausgangswert



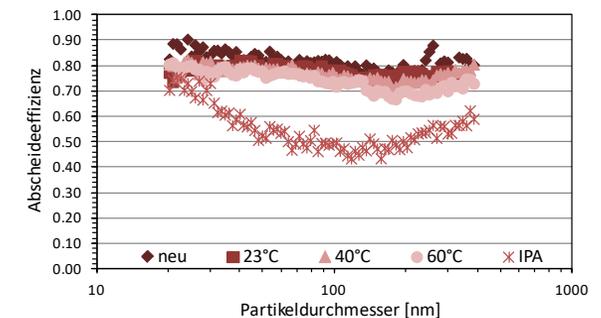
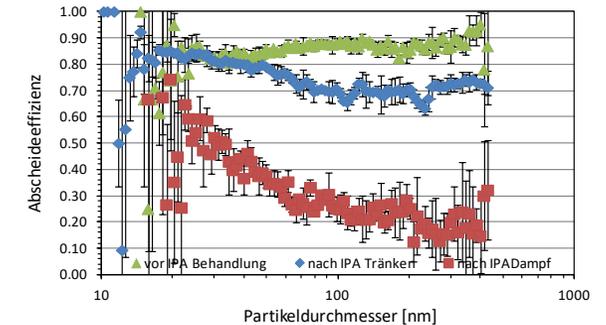
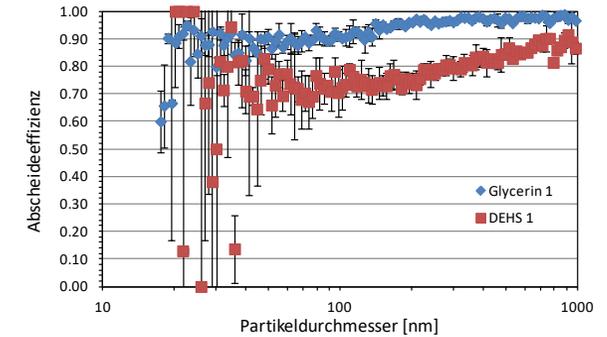
- P01: starke Abnahme des Oberflächenpotentials bereits nach 1 h Konditionierung, danach kaum weitere Änderung, leicht stärkere Entladung mit zunehmender Temperatur
- P02: sehr stabil bei Raumtemperatur und hoher Feuchte, leichte Abnahme des Potentials bei erhöhter Temperatur, Verhalten nicht systematisch aus Einzelversuchen ableitbar
- P03: Verhalten aufgrund starker lokaler Schwankungen des Oberflächenpotentials schwer nachvollziehbar, tendenziell Abnahme mit zunehmender Konditionierungszeit, am ausgeprägtesten bei höchster Temperatur

- Vermessung der Filter nach jeweils 3 h Konditionierung, Vergleich mit Messungen im Neuzustand



- in allen Fällen leichte Abnahme der Abscheideeffizienz nach der Konditionierung
- Effekt geringer als bei Oberflächenpotential → vermutlich hauptsächlich Abbau von Überschussladung
- etwas stärkere Abnahme mit zunehmender Temperatur bzw. absoluter Feuchte
→ Messungen bei gleicher absoluter Feuchte zur Differenzierung
- Vergleich mit 24 h Entladung mit IPA gesättigter Luft zeigt, dass vollständige Entladung noch nicht erreicht
→ Messungen mit höherer Temperatur/Feuchte geplant

- Abscheideeffizienz hängt teils stark vom Aerosolmaterial ab
- Unterschiedliche Partikelladung und Morphologie als Ursache ausgeschlossen
- Entladung der Filter durch manche Testaerosole scheint maßgeblich zu sein
- Unterschiede bei der Entladung mit flüssigen und dampfförmigem IPA
- hängt stark vom untersuchten Filtermedium ab
- bisherige Theorien alle nicht vollständig in sich schlüssig
- Konditionierung bei 80% rF und bis zu 60°C reduziert die Abscheideeffizienz
- abhängig vom Filtermedium, Effekte geringer als bei vollständiger Entladung
- noch zu klären, ob die Temperatur oder absolute Feuchte ausschlaggebend ist
- offene Fragen sollen in restlicher Projektlaufzeit und Masterarbeit geklärt werden



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!