

Innovationsreport 2026

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF-Forschungsvorhaben 01IF22804N / 22804 N

Vergleich der unterschiedlichen Prüfverfahren nach DIN EN 1822-1 bzw. DIN EN ISO 29463 für plane Filtermedien und Filterelemente (Hochleistungs-Partikelfilter und -Schwebstofffilter, EPA, HEPA und ULPA)

Laufzeit:

01.02.2023 – 31.12.2025

Beteiligte Forschungsstelle(n):

Universität Duisburg Essen
Lehrstuhl Nanopartikel-Prozeßtechnologie NPPT

Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V. (IUTA)
Forschungsabteilung Luftreinhaltung & Gasreinigung

Schlussbericht vom 31.05.2026

zum IGF-Vorhaben 01IF22804N

Thema

Vergleich der unterschiedlichen Prüfverfahren nach DIN EN 1822-1 bzw. DIN EN ISO 29463 für plane Filtermedien und Filterelemente (Hochleistungs-Partikelfilter und -Schwebstofffilter; EPA, HEPA und ULPA)

Berichtszeitraum

01.02.2023 bis 31.12.2025

Forschungsvereinigung

Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V. (IUTA)
Bliersheimer Straße 58 - 60
47229 Duisburg

Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1
Universität Duisburg-Essen
Lehrstuhl Nanopartikel-Prozesstechnik
47057 Duisburg

Forschungseinrichtung 2
Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V. (IUTA)
Bliersheimer Straße 58 - 60
47229 Duisburg

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	4
Ausgangssituation und Problemstellung	4
Forschungsziele / Ergebnisse.....	5
1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	9
1.1 Arbeitspaket 1: Auswahl von Filtermedien und konfektionierten Filtern, Auswahl der Aerosolsubstanzen und Planung von Rundversuchen (Uni + IUTA)	9
1.1.1 Materialauswahl	9
1.1.2 Druckverlustmessungen	9
1.1.3 Auswahl Prüfparameter Rundversuch.....	14
1.2 Arbeitspaket 2: Messungen der Fraktionsabscheidegrade nach DIN EN ISO 29463-3: Monodisperse und polydisperse Vorgehensweise mit unterschiedlichen Aerosolen (Uni)	16
1.2.1 Monodisperse Messung	16
1.2.2 Polydisperse Messung	25
1.2.3 Unterschiede monodisperse/polydisperse Messung	27
1.2.4 Alternatives Prüfaerosol	27
1.3 Arbeitspaket 3: Umbau, Erweiterung und Ertüchtigung eines an der FE 2 vorhandenen Prüfstandes zur Messung der Fraktionsabscheidegrade nach DIN EN ISO 29463-5 (IUTA)	29
1.3.1 Geräteausstattung am IUTA	30
1.3.2 Umbaumaßnahmen am Prüfstand	31
1.4 Arbeitspaket 4: Messungen der Fraktionsabscheidegrade nach DIN EN ISO 29463-5: Monodisperse und polydisperse Vorgehensweise mit unterschiedlichen Messgeräten (IUTA) ..	32
1.4.1 Monodisperse Vorgehensweise	32
1.4.2 Polydisperse Vorgehensweise	34
1.4.3 Hintergrundmessung	35
1.5 Arbeitspaket 5: Auswahl geeigneter Prüflinge für die Rundversuche (Uni + IUTA)	36
1.5.1 Rundversuch Glasfasermaterial (Filterklasse mindestens H13)	36
1.5.2 Parametervariation.....	43
1.5.3 Rundversuch konfektionierte Filter aus Glasfasermaterial (Filterklasse H13)	61
1.5.3.1 Prüflinge und Prüfparameter.....	61
1.5.3.2 Messaufbauten der Teilnehmer	62
1.5.3.3 Druckverlustmessungen und Abgleich am Lochblech	63
1.5.3.4 Fraktionsabscheidegrade und Filterklassen	66
1.5.3.5 Parametervariation am IUTA.....	70

1.5.3.6	Vergleichsmessung TROX Laseraerosolspektrometer am IUTA-Prüfkanal.....	72
1.5.3.7	Diskussion	73
1.5.4	Rundversuch synthetische Medien (Filterklasse H13)	74
1.5.5	Rundversuch konfektionierte Filter aus synthetischem Material (Filterklasse H13)	78
1.5.5.1	Prüflinge und Prüfparameter.....	78
1.5.5.2	Messtechnische Herausforderung: MPPS unterhalb des OPC-Messbereichs.....	80
1.5.5.3	Ergebnisse IUTA	81
1.5.5.4	Parametervariation am IUTA	83
1.5.5.5	Ergebnisse der weiteren Labore	84
1.5.5.6	Diskussion Rundversuch 2	90
1.6	Arbeitspaket 6: Organisation und Auswertung eines Rundversuches zur Evaluierung der Vorgehensweisen nach DIN EN ISO 29463-3 (Uni + IUTA)	91
1.7	Arbeitspaket 7: Organisation und Auswertung eines Rundversuches zur Evaluierung der Vorgehensweisen nach DIN EN ISO 29463-4 und -5 (Uni + IUTA).....	91
1.8	Arbeitspaket 8: Entladung von Filtermedien und gesamter konfektonierter Filter: Vergleichbarkeit der Abscheidegrade (Uni + IUTA)	92
1.8.1	Entladung an Filtermedien	92
1.8.2	Entladung der konfektonierten Filterelemente.....	92
1.9	Arbeitspaket 9: Einfluss des Aerosol-Ladungszustandes auf die Filterklassifizierung (Uni)	92
Fazit		93
2	Verwendung der Zuwendung	95
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	95
4	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	96
5	Wissenstransfer in die Wirtschaft.....	97
6	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	98
6.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen (vom Projektstart bis zum Projektende).....	98
6.2	Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende)	98
7	Abbildungsverzeichnis.....	100
8	Tabellenverzeichnis.....	103
9	Literaturverzeichnis.....	104

Einleitung

Ausgangssituation und Problemstellung

Ganz allgemein haben raumluftechnische Anlagen die Aufgabe, ein physiologisch günstiges Raumklima und eine hygienisch einwandfreie Qualität der Raumluft zu schaffen. Die Partikelfilter in diesen Anlagen dienen zum Schutz der Komponenten der RLT-Anlage und sollen eine Mindestqualität der Zuluft gewährleisten. Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik mit einem Abscheidegrad ePM1 von weniger oder gleich 99 % werden nach DIN EN ISO 16890 Teil 1 bis 4 ([1], [2], [3], [4]) geprüft und klassifiziert.

Im Bereich der Raum- und Prozesslufttechnik war bislang die Europäische Normenreihe DIN EN 1822 Teil 1 bis Teil 5 ([5], [6], [7], [8], [9]) für Hochleistungs-Partikelfilter (EPA), Schwebstofffilter (HEPA) und Hochleistungs-Schwebstofffilter (ULPA) gültig. Eingesetzt werden diese Filter insbesondere in der pharmazeutischen Industrie, in medizinischen Bereichen und in der Reinraumtechnik. Im Rahmen der Internationalisierung und damit der Harmonisierung der Normen wurden im Mai 2019 Teil 2 bis 5 der Normreihe durch die entsprechenden Teile von DIN EN ISO 29463 ([10], [11], [12], [13]) ersetzt.

Der Teil 1 dagegen wurde aktualisiert und liegt nun in der Version vom Oktober 2019 als DIN EN 1822-1:2019-10 [5] vor und ist damit in Deutschland auch weiter gültig. Teil 2 der ISO 29463 beinhaltet die Aerosolerzeugung, Messgeräte und Partikelzählstatistik. In Teil 3 wird die Prüfung des planen Mediums im Detail ausgeführt. Die Teile 4 und 5 beschreiben die Leckageprüfung (Scan-Verfahren, auf welches im Rahmen dieses Antrages nicht weiter eingegangen wird) sowie die Prüfung der Filterelemente.

Bei der Prüfung des Filtermediums wird der Fraktionsabscheidegrad mit einem Partikelzählverfahren ermittelt. Beim Referenzverfahren wird ein (quasi-)monodisperses Testaerosol verwendet. Mit einem Differentiellen Mobilitätsanalysator (DMA) wird aus einem zunächst polydispersen Aerosol die (quasi-)monodisperse Fraktion mit der erforderlichen Partikelgröße klassiert. Die Bereitstellung erfolgt in mehreren Schritten ausgehend von z. B. einer verdünnten DEHS-Isopropanol-Lösung. Die Anzahlkonzentration auf der An- und Abströmseite des Filters wird mit einem Kondensationskernzähler (CPC) gemessen. Alternativ kann die Prüfung des planen Filtermediums mit einem polydispersen Aerosol durchgeführt werden. Zur Ermittlung der Anzahlkonzentration und Anzahlverteilung werden in diesem Fall optische Partikelzähler verwendet. Als Testsubstanzen sind neben DEHS (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat) auch PAO (Polyalphaolefin), Paraffinöl (dünnflüssig) und DOP (Di-n-octylphthalat) explizit benannt, allerdings sind weitere möglich. Diese sollten sich bzgl. Brechungsindex, Dampfdruck und Dichte nicht wesentlich von den genannten Substanzen unterscheiden. Die polydisperse Partikelerzeugung erfolgt mit einer Zweistoffdüse wie bspw. der Laskin-Düse.

Die Ausführungen zur elektrischen Neutralisierung der Prüfaerosole in DIN EN ISO 29463-2 [10] sind dabei sprachlich unpräzise (sollte, meist, ...) und beinhalten viele Annahmen: „... sollten Filter mit elektrisch neutralen Aerosolen geprüft werden.“, „Erreicht wird dies meist, indem man das Trägergas des Aerosols durch eine radioaktive Quelle oder eine Korona-Entladung ionisiert.“

Beim Referenz-Abscheidegradprüfverfahren für Filterelemente wird der Abscheidegrad bei der Partikelgröße im Abscheidegradminimum (MPPS) bestimmt. Die Prüfung kann, wie bei den Filtermedien, mit einem monodispersen oder einem polydispersen Aerosol durchgeführt werden. Für das monodisperse Aerosol kann zur Bestimmung der Gesamtpartikelanzahl ein Kondensationspartikelzähler oder ein optischer Partikelzähler verwendet werden. Bei Verwendung eines polydispersen Aerosols muss neben der Partikelanzahl auch die Größenverteilung z. B. mit einem optischen Partikelzähler oder einem DMPS (Differential Mobility Particle Sizer) bestimmt werden.

Eine verbindliche Prüfung der Filterelemente nach Entladung war und ist bislang nicht vorgeschrieben. Ersatzweise erfolgt in der noch gültigen Version der Norm von 2019 eine Prüfung der entladenen Medienprobe ab einem Massenanteil an synthetischen Fasern von 20 %. Neu im veröffentlichten Entwurf (Juli 2021) der DIN EN ISO 29463-5 [14] ist die normative Prüfung aller Filtermedien (nach Konditionierung / Entladung) gemäß Anhang C. Diese Prüfung dient weiterhin zur Beurteilung der Reduzierung des Abscheidegrades nach Entladung durch Isopropanol- Dampf; alternativ darf jetzt aber auch der gesamte Filter nach DIN EN ISO 16890-4 [4] entladen werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die normkonforme Prüfung der Filtermedien und Filterelemente an unterschiedlichen Prüfaufbauten mit unterschiedlichen Messprinzipien zur Partikelzählung und Verfahrensschritten erfolgen kann. Dies kann dazu führen, dass sich je nach Methode unterschiedliche Abscheideeffizienzen und daraus resultierend unterschiedliche Filterklassen ergeben.

Forschungsziele / Ergebnisse

Ein Hauptziel des Vorhabens war es zu überprüfen, welche Komponenten bei der Prüfung der Filtermedien bzw. der konfektionierten Filter Einfluss auf die Einstufung der Filterklasse haben. Dieser Punkt wurde ausführlich in Rundversuchen (siehe 1.5.1, 1.5.3, 1.5.4 und 1.5.5) und in weiteren Messungen an den Forschungseinrichtungen behandelt

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens in der Reihenfolge der im Antrag beschriebenen Arbeitspakete dargestellt.

Tabelle 1: Ziele und Ergebnisse des Forschungsvorhabens

AP	Ziele	Ergebnisdarstellung
1.1	Medienauswahl und Parameterfestlegung	In Absprache mit dem PA wurde für den ersten Rundversuch ein Glasfasermaterial der Filterklasse H14 ausgewählt. Für den Zweiten Rundversuch, bei dem auch die Entladung untersucht werden sollte, wurden zwei verschiedene vollsynthetische Materialien ausgewählt, bei dem eines über eine Membranschicht verfügen sollte. (siehe 1.1.1)
1.2	Druckverlustmessung	Der Druckverlust der ausgewählten Medienproben wurde an der FE1 bestimmt. Es wurden nur Proben an die teilnehmenden Labore verschickt, die innerhalb einer Toleranz von +/- 2% des gemessenen Mittelwertes lagen (siehe 1.1.2 und 1.5.4)
1.3	Prüfung der Stabilität des Messplatzes	Vor der Untersuchung der ausgewählten Medienproben wurde der Messplatz an der FE1 die Wiederholgenauigkeit bezüglich Druckverlustes und Fraktionsabscheidegrad, sowie die Materialschwankung überprüft und angepasst. (siehe 1.1.2 und 1.2)
2.1	Monodisperse Vorgehensweise (Filtermedien)	In der DIN EN ISO 29463-3 ist die monodisperse Vorgehensweise (Klassierung mit DMA und Partikelzählung mit CPC) als Referenzverfahren deklariert. Daher wurden die Medienproben an der FE1 zunächst mittels dieses Verfahrens untersucht. (siehe 1.2)
2.2	Polydisperse Vorgehensweise (Filtermedien)	Um die Vergleichbarkeit zu überprüfen, wurden an der FE1 anschließend Messungen mit polydisperser Vorgehensweise durchgeführt. (siehe 1.2.2)
3	Erweiterung des vorhandenen Prüfstandes	Umbau und Ertüchtigung des IUTA-Prüfstandes für ISO-29463-5-konforme Messungen; Integration zusätzlicher Messgeräte und Dichtheitsoptimierungen. (siehe 1.3)

AP	Ziele	Ergebnisdarstellung
4.1	Monodisperse Vorgehensweise (Filterelemente)	Durchführung der MPPS-Messungen an konfektionierten Filtern mittels SMPS; Identifikation von Prüfstands- und Probenahmeeinflüssen. (siehe 1.4.1)
4.2	Polydisperse Vorgehensweise (Filterelemente)	Vergleichsmessungen mit OPC. (siehe 1.4.2)
4.3	Unterschiedliche Messgeräte	Bewertung verschiedener OPC-Systeme (z. B. Light-house, LAP 340/L) und deren Einfluss auf MPPS-Bestimmung und Klassifizierung. (siehe 1.4.2)
5.1	Auswahl von Medienproben	Auswahl geeigneter Medienproben für beide Rundversuche; Sicherstellung geringer Materialstreuung durch Vorselektion. (siehe 1.5.1 und 1.5.4)
5.2	Auswahl von Filterelementen	Auswahl und Bereitstellung konfektionierter Filterelemente aus Glasfaser und Synthetik; Dokumentation der Prüfparameter. (siehe 1.5.3 und 1.5.5)
6	Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Vorgehensweisen (Filtermedien)	An der FE 1 wurden alle Medienproben mit Mono- und polydispenser Vorgehensweise untersucht und abschließend verglichen. (siehe 1.2.3) Die unterschiedlichen Vorgehensweisen der Prüflabore wurden ebenfalls an der FE1 analysiert und verschiedene Parameter auf ihren Einfluss auf das Messergebnis überprüft. (siehe 1.5.2)
7	Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Vorgehensweisen (Filterelemente)	Rundversuchsauswertung: Einfluss von Prüfstands-Dichtheit, Probenahmeleitung, OPC-Typ, DEHS-Beladung und IPA-Konditionierung auf Klassifizierung. (siehe 1.7)
8.1	Entladung von Filtermedien	An der FE1 wurden sowohl an Glasfasermedien als auch an den vollsynthetischen Filtermedien Entladungsversuche durchgeführt. (siehe 1.5.2 und 1.5.4)

AP	Ziele	Ergebnisdarstellung
8.2	Entladung von Filterelementen	IPA-Konditionierung konfektionierter Filter; teils deutliche Effizienzverluste und MPPS-Verschiebungen; Identifikation von IPA-Rückständen und DEHS-Interaktionen. (siehe 1.8)
9	Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Entladertypen	Dieser Punkt wurde im Rahmen des Rundversuches mit Filtermedien untersucht. (siehe 1.5.2)

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

1.1 Arbeitspaket 1: Auswahl von Filtermedien und konfektionierten Filtern, Auswahl der Aerosolsubstanzen und Planung von Rundversuchen (Uni + IUTA)

Im Forschungsvorhaben wurden Rundversuche zur Prüfung und Klassifizierung nach EN 1822 bzw. ISO 29463 gemeinsam mit Unternehmen aus dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) durchgeführt. Die Planung und Organisation der Rundversuche an Filtermedien erfolgte durch die FE1 (Uni), während die Rundversuche an konfektionierten Filtern von der FE2 (IUTA) koordiniert wurden.

1.1.1 Materialauswahl

In Abstimmung mit dem PA wurden die für die Versuche vorgesehenen Filterklassen auf E12 bis H14 begrenzt. Bei den zu untersuchenden Filtermedien handelt es sich u. a. um dasselbe Glasfasermaterial, aus dem auch die konfektionierten Filterelemente gefertigt sind, die im ersten Rundversuch vermessen wurden. Darüber hinaus wurden zwei unterschiedliche vollsynthetische Filtermedien ausgewählt, die sich aufgrund ihrer Materialeigenschaften besonders gut für die geplanten Entladungsversuche eignen.

Für den ersten Rundversuch wurden sieben Laboren konfektionierte Filterelemente der Klasse H13 aus Glasfasermaterial zur Verfügung gestellt. Um die Übertragbarkeit von Medientests auf konfektionierte Filter bewerten zu können, stellte der Hersteller ausreichend Material derselben Charge für die FE1 bereit. Die FE1 wählte daraus geeignete Prüflinge für den Rundversuch aus, wozu in Vorversuchen zunächst der Druckverlust der Prüflinge bestimmt wurde. So konnte sichergestellt werden, dass die Streuung der verwendeten Prüflinge hinsichtlich dieses Kriteriums gering war.

Zusätzlich wurde in weiteren Vorversuchen die Messtechnik eingehend überprüft, um potenzielle Messfehler identifizieren und bewerten zu können.

1.1.2 Druckverlustmessungen

In einem ersten Schritt wurde der Druckverlust von bereitgestellten Filtermedien der Klasse H14 unter kontrollierten Umgebungsbedingungen (Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeit) gemessen. Die Schwankungen des Volumenstroms lagen normkonform innerhalb einer Toleranz von $\pm 2\%$. Zur Einstellung des Volumenstroms wurde ein Massenflussregler verwendet (Vögtlin red-y (0°C, 1 bar)). Zur Kontrolle des tatsächlichen Volumenstroms ist ein Massenflussmesser der Firma TSI nachgeschaltet (TSI 4000 series). Die verwendete Druckmessdose von MKS Instruments (Model: 223BD-00010ABBS) hat einen Messbereich von 0-10mbar (entsprechend 0-1000 Pa) und einen Messfehler von $\pm 0,3\%$ v. Endwert bidirektional oder unidirektional.

Um die Zuverlässigkeit und Korrektheit der gemessenen Werte der vorhandenen, 20 Jahre alten, Druckmessdose zu überprüfen, wurde eine zweite Druckmessdose mit ähnlichen Spezifikationen

vom gleichen Hersteller angeschafft und mit der vorhandenen verglichen. Die neue Druckmessdose hat einen Messbereich von 0-13,33mbar (Messfehler $\pm 0,3\%$ v. Endwert bidirektional oder unidirektional).

Für die Überprüfung wurden 10 Proben eines Polyesterkalandervlieses mit ePTFE-Membran mit beiden Druckmessdosen bei drei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten vermessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Vergleich alte und neue Druckmessdose

6f Nr.	u [cm/s]					
	2		2,5		8,3	
	11.03.2024	10.07.2023	11.03.2024	10.07.2023	11.03.2024	10.07.2023
	neue DMD [Pa]	alte DMD [Pa]	neue DMD [Pa]	alte DMD [Pa]	neue DMD [Pa]	alte DMD [Pa]
001	60	59,4	75	76,05	258	247,65
002	55	54,9	69	68,5	237	225,4
003	54	53,25	67	67,55	230	221,05
004	52	52,45	65	65,45	234	214,35
005	55	54,65	69	68,15	233	224,35
006	52	52,45	66	65,55	223	214,65
007	51	52	65	64,95	221	212,9
008	55	54,6	69	68,2	234	225,35
009	60	59	76	75,5	256	246,55
010	57	56,9	72	72,35	244	234,5

Um erste Anhaltspunkte für die Streuung der Proben unterschiedlicher Chargen bzw. ein- und derselben Charge sowie die Wiederholgenauigkeit des gewählten Messaufbaus zu erhalten, wurden zunächst 10 Proben verschiedener Chargen vermessen. Im Anschluss wurde der Mittelwert und die Standardabweichung für die jeweilige Charge bei einer Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s bestimmt (siehe Tabelle 3). Bei der Druckverlustmessung schwankt der Messwert in einem geringen Bereich. Deshalb wurde bei allen Messungen der Maximal- und Minimalwert der Anzeige aufgenommen und der Mittelwert bestimmt.

Tabelle 3: Druckverlustmessung an H14- Filtermedien aus 3 unterschiedlichen Chargen

Nr.	H 14								
	2g (10 Proben)			2f (10 Proben)			13 (10 Proben)		
	ΔP [Pa]	Mittelwert		ΔP [Pa]	Mittelwert		ΔP [Pa]	Mittelwert	
001	136,3	138	137,15	138	139,4	138,7	153,7	154,4	154,05
002	137,4	138,3	137,85	139,2	140	139,6	154	155,4	154,7
003	134,9	136,3	135,6	138,6	139,6	139,1	144,2	144,8	144,5
004	134	135,4	134,7	138	139,2	138,6	145,4	147,1	146,25
005	134,1	135	134,55	139,4	139,1	139,25	151,6	152,6	152,1
006	134,5	135,3	134,9	139,5	140,9	140,2	154,7	154,8	154,75
007	136,3	138	137,15	139,5	141	140,25	153,4	154,8	154,1
008	134,5	135	134,75	142,2	143,5	142,85	151	152	151,5
009	136,6	137,1	136,85	139,2	139,6	139,4	145,7	146,8	146,25
010	134,9	135,4	135,15	140,7	142,5	141,6	147,4	148	147,7
Mittelwert 10 Proben			135,865 Pa	Mittelwert 10 Proben			150,59 Pa		
Standardabweichung			1,24967774	Standardabweichung			4,00983513		

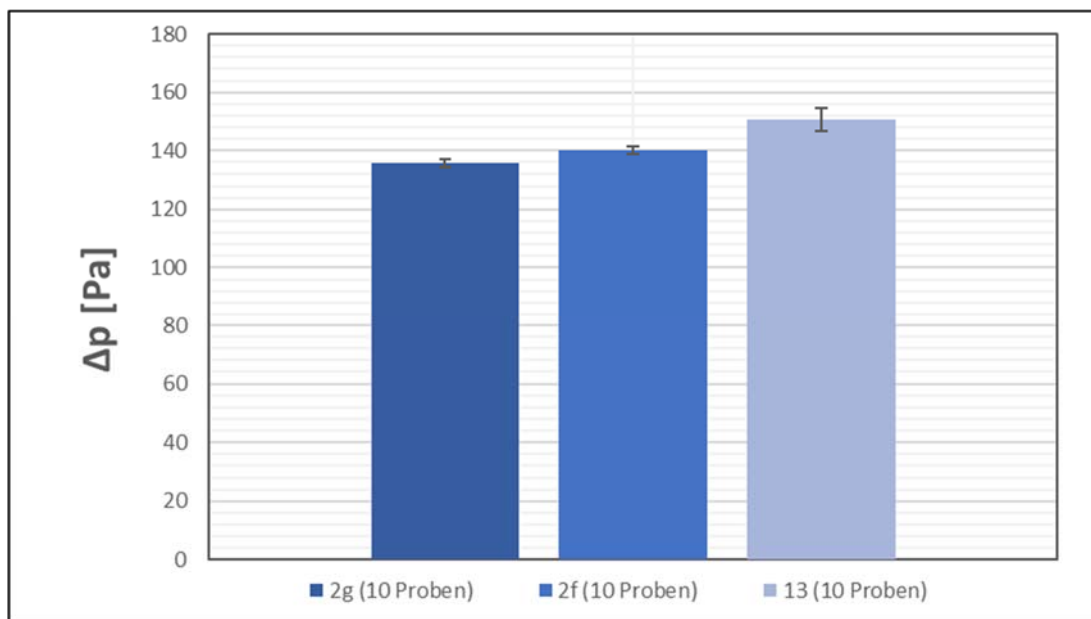


Abbildung 1-1: Mittelwert Druckverlust von H14- Filtermedien aus 3 unterschiedlichen Chargen

In Abbildung 1-1 ist zu erkennen, dass sich die Mittelwerte je nach Charge signifikant unterscheiden. Die Schwankungen innerhalb der Charge (siehe eingezeichnete Standardabweichung) variieren ebenfalls. Um zu unterscheiden zu können, ob diese Schwankungen materialabhängig sind oder vom Messsystem verursacht werden, wurden aus jeder Charge die 3 Proben ausgewählt, die dem Gesamtmittelwert am nächsten waren (in Tabelle 3 gelb markiert) und jeweils 3x hintereinander gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Druckverlust an H14-Filtermedien /Wiederholungsmessungen)

2g (1 Probe 3 mal gemessen)			2f (1 Probe 3 mal gemessen)			13 (1 Probe 3 mal gemessen)					
Nr.	ΔP [Pa]		Mittelwert	Nr.	ΔP [Pa]		Mittelwert	Nr.	ΔP [Pa]		Mittelwert
3	135,2	136,2	135,7	6	139,9	141	140,45	8	151,3	152,3	151,8
	135,2	136,2	135,7		139,4	141	140,2		151,1	152,3	151,7
	135,2	136,6	135,9		139,2	141	140,1		151	152	151,5
Mittelwert 1 Probe 3 mal gemessen			135,766667 Pa	Mittelwert 1 Probe 3 mal gemessen			140,25 Pa	Mittelwert 1 Probe 3 mal gemessen			151,666667 Pa
Standardabweichung			0,11547005	Standardabweichung			0,18027756	Standardabweichung			0,15275252

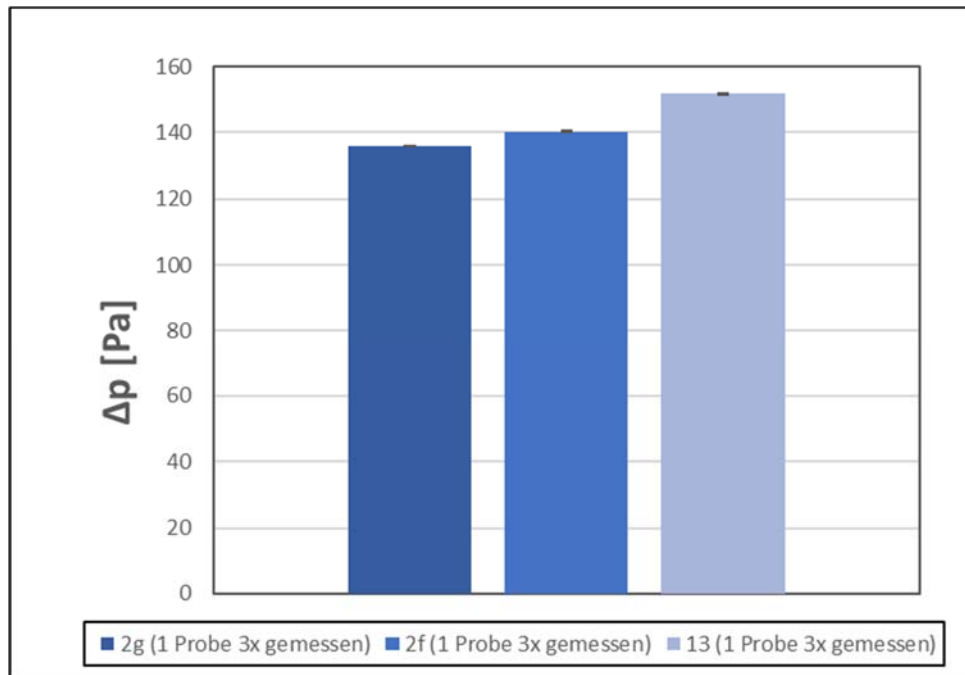


Abbildung 1-2: Wiederholungsmessungen an 3 Proben unterschiedlicher Chargen

Vergleicht man die Höhe der Standardabweichung in Abbildung 1-1 und Abbildung 1-2, so fällt auf, dass der Wert bei den Wiederholungsmessungen deutlich niedriger ist als bei den Messungen der unterschiedlichen Proben. Dies zeigt deutlich, dass es innerhalb einer Charge erhebliche Materialschwankungen geben kann. Eine Selektierung der Prüflinge vor dem Ringversuch kann die Schwankungsbreite minimieren.

Zusätzlich wurde an drei unterschiedlichen H14-Filtermedien aus Glasfasermaterial der Druckverlust bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten mit beiden vorhandenen Druckmessdosen gemessen und mit einem externen Institut verglichen. Bei den Messungen wurde jeweils dieselbe Probe verwendet. Die Ergebnisse zeigen Abbildung 1-3, Abbildung 1-4 und Abbildung 1-5.

Bei allen drei Proben gab es nur geringe Abweichungen bei den höheren Anströmgeschwindigkeiten.

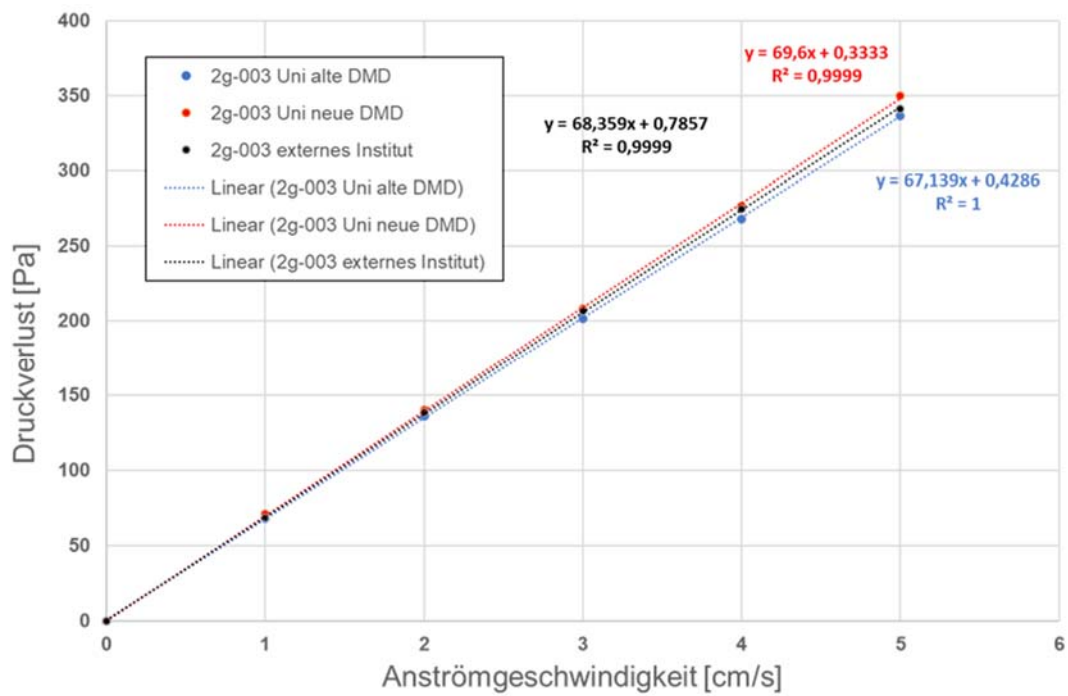


Abbildung 1-3: Vergleich alte DMD, neue DMD und externes Institut (Material 2g)

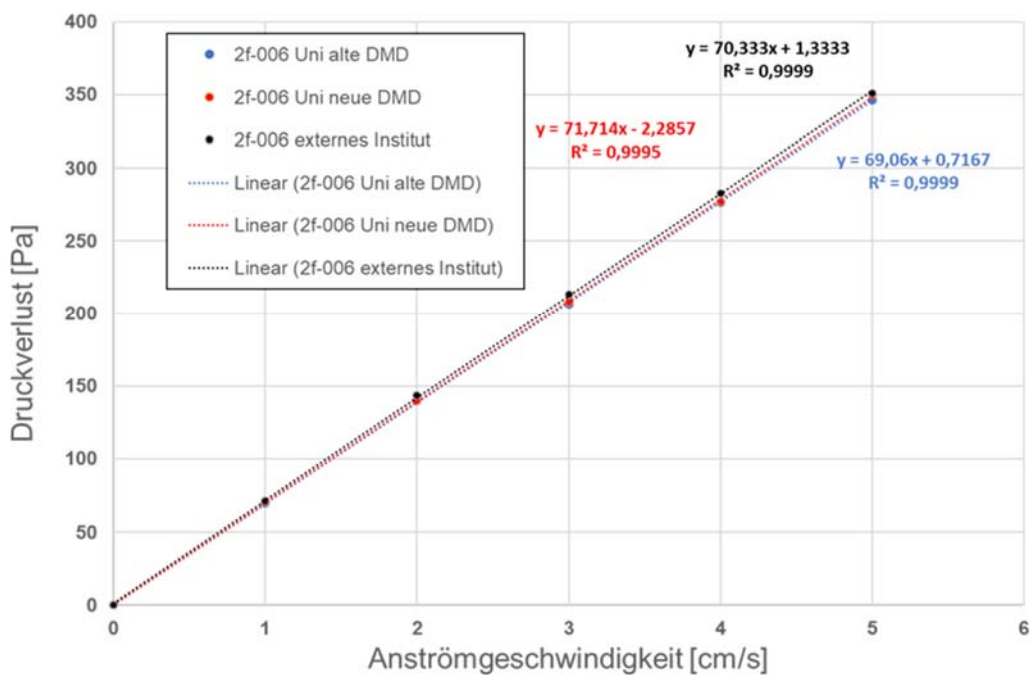


Abbildung 1-4: Vergleich alte DMD, neue DMD und externes Institut (Material 2f)

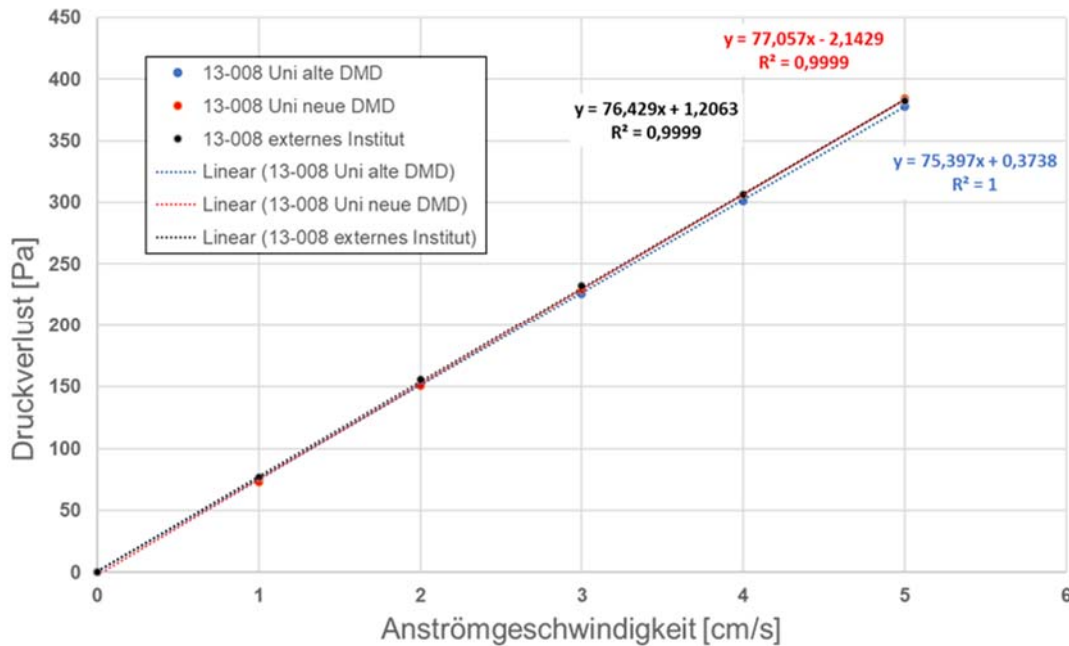


Abbildung 1-5: Vergleich alte DMD, neue DMD und externes Institut (Material 13)

1.1.3 Auswahl Prüfparameter Rundversuch

Filtermedien

In Abstimmung mit den PA-Mitgliedern wurden folgende Randbedingungen für die Rundversuche der Filtermedien festgelegt:

- Versuchsdurchführung nach Norm DIN EN ISO 29463-3
- Anströmgeschwindigkeit: $v = 2\text{cm/s}$
- Aerosolerzeugung mit DEHS (rein oder mit IPA verdünnt, Verdünnungsverhältnis wird angegeben)

Der Druckverlust wird von der FE1 vor dem Versand der Proben bei der vorgegebenen Anströmgeschwindigkeit bestimmt und unter Angabe der Messtoleranz an die teilnehmenden Labore übermittelt. Dies soll den Prüflaboren als Anhaltspunkt für ihre eigenen Messungen dienen.

Für die Auswertung sollten von den Teilnehmern folgende Prüfparameter übermittelt werden:

- Druckverlust
- Fraktionsabscheidegrad (grafisch oder tabellarisch)

Zusätzlich erhielten die Prüflabore einen Fragebogen, auf dem freiwillige Auskünfte zum Messaufbau und den verwendeten Messgeräten gegeben werden konnten. Diese Angaben dienen der statistischen Auswertung und sollten Hinweise auf mögliche Ursachen bei Unterschieden in den Messergebnissen liefern.

Filterelemente

Mit den Teilnehmern der Rundversuche an den Filterelementen wurde folgendes Vorgehen abgestimmt:

- Klassifizierung gemäß DIN EN 1822-1 (Abschnitt 7.5.3) bzw. DIN EN ISO 29463-5
- Nennvolumenstrom:
 - 1.190 m³/h (Glasfasermaterial)
 - 1.200 m³/h (Synthetikmaterial)
- Prüfaerosol: DEHS

Die Durchführung der Prüfungen sollte mit den in den Laboren vorhandenen Aerosolgeneratoren und Messgeräten erfolgen. Wird zur Entladung das Konditionierungskabinett TDC 584 (Topas) eingesetzt, sollte die Vorgehensweise an die standardisierte Isopropanol-Konditionierung eines Filterelements angelehnt werden.

Für die Dokumentation sollten allgemeine Angaben zur Prüfung übermittelt werden:

- Nennvolumenstrom
- Temperatur und relative Luftfeuchte
- Typ des verwendeten Partikelzählers
- Typ des Aerosolgenerators
- Partikelgröße im Abscheidegradminimum des Filters
- Prüfaerosol (Substanz, Mediandurchmesser, geom. Standardabweichung)
- Verdünnungsfaktor (Anströmseite)

Weitere Angaben:

- Probenahmestelle (an- und abströmseitige Messung oder Messung ohne und mit eingebautem Filter)
- Probenahmeleitung (Länge, Durchmesser)
- Wurde DEHS verdünnt?

Und Prüfergebnisse:

- Druckverlustanstieg bei der Messung des FAG dokumentieren
- Partikelkonzentration und -größe (anströmseitig)
- Partikelkonzentration und -größe (abströmseitig)
- Abscheidegrad E
- Minimaler Abscheidegrad $E_{95} \%, \min$
- Erreichte ISO-Filterklasse

1.2 Arbeitspaket 2: Messungen der Fraktionsabscheidegrade nach DIN EN ISO 29463-3: Monodisperse und polydisperse Vorgehensweise mit unterschiedlichen Aerosolen (Uni)

Die Medien und Aerosolsubstanzen aus AP 1 werden für Fraktionsabscheidegradetests nach DIN EN ISO 29463-3 verwendet. Die Klassifizierung beruht auf der in Deutschland weiterhin gültigen DIN EN 1822-1. Der Fokus liegt auf dem Vergleich zwischen den beiden beschriebenen Vorgehensweisen:

- monodispers (Klassierung mit DMA und Partikelzählung mit CPC)
- polydispers (keine Klassierung; Messung mit OPC (Optical Particle Counter))

Beide Verfahren sind nach der Norm zugelassen – in Blatt 3 (unter Punkt 9.3) wird die monodisperse Vorgehensweise lediglich als „Referenzverfahren“ bezeichnet. Zusätzlich sollen einige nach Norm zugelassene Aerosolsubstanzen verglichen werden.

1.2.1 Monodisperse Messung

Abbildung 1 6 zeigt den Versuchsaufbau aus der Norm DIN EN ISO 29463-3 für die Prüfung von planen Filtermedien mit monodispersen Prüfaerosol.

In einem ersten Schritt wird durch einen oder mehrere Aerosolgenerator(en) (4) ein polydisperses Aerosol hergestellt. Das Größenspektrum des erzeugten Aerosols ist zum einen abhängig vom eingestellten Volumenstrom, zum anderen von der verwendeten Flüssigkeit bzw. Lösung. Durch einen nachgeschalteten Impaktor können größere Partikel abgetrennt werden und damit die Größenverteilung eingeengt werden.

Das Aerosol wird anschließend durch einen Neutralisator (5) in ein bipolares Gleichgewicht gebracht. Die Neutralisation kann durch eine radioaktive Quelle, einen Röntgenstrahler oder durch eine Korona-Entladung erfolgen.

Um aus dem polydispersen Aerosol gezielt eine Mobilitätsklasse für die monodisperse Messung zu extrahieren, wird ein differentieller Mobilitätsanalysator (DMA) (6) verwendet, dem ein zweiter Neutralisator nachgeschaltet ist.

Die Messung der Partikelanzahlkonzentration im Roh- bzw. Reingas erfolgt mittels Kondensationspartikelzähler (CPC) (11), wobei die Messung mit zwei Geräten (ein Gerät für das Rohgas, eines für das Reingas) oder mit nur einem Gerät (abwechselnd Roh- bzw. Reingasmessung) durchgeführt werden kann.

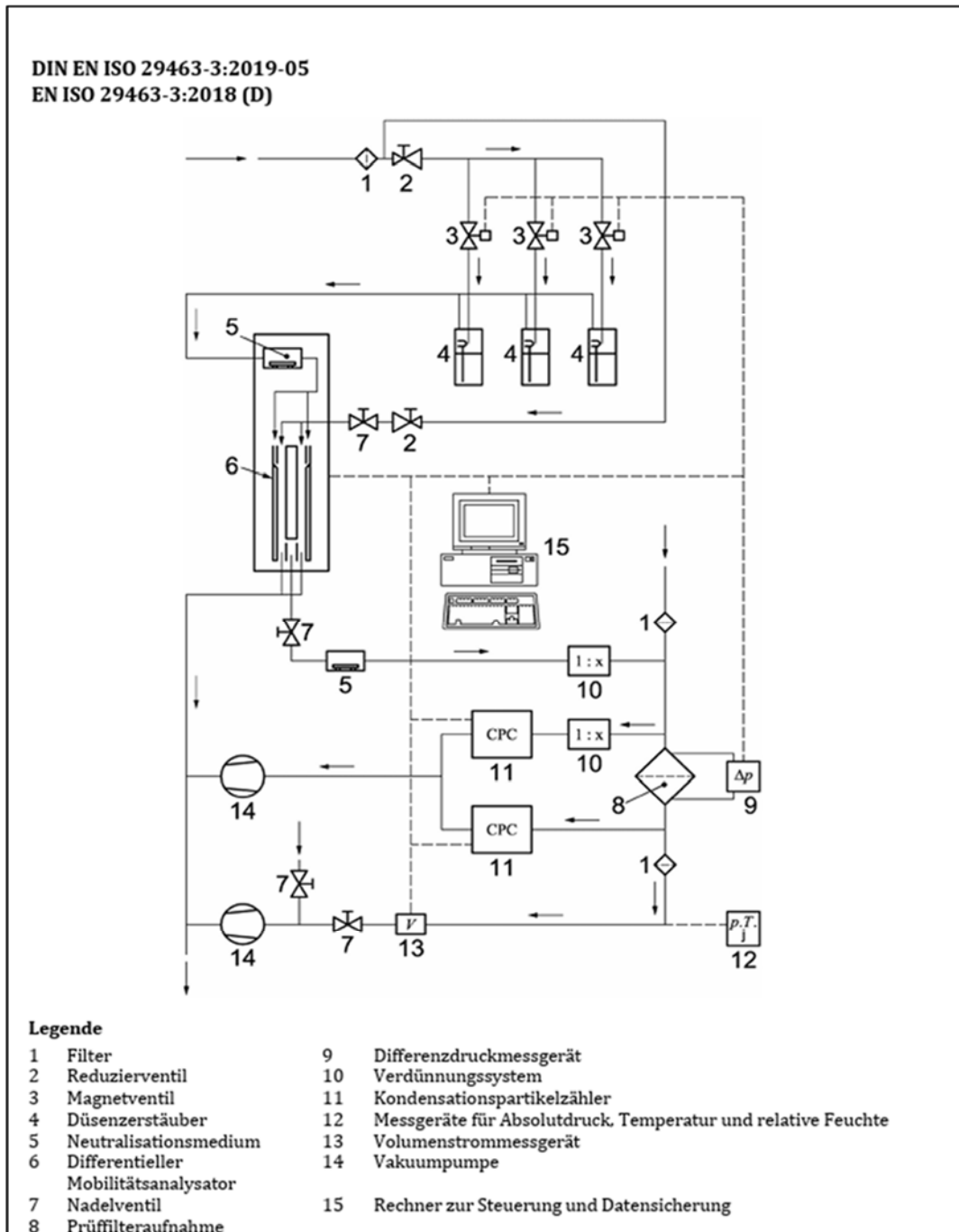


Abbildung 1-6: Versuchsaufbau / Skizze aus der ISO-29463-3

Da die Partikelkonzentration bei den HEPA-Filtern im Rohgas erheblich höher als im Reingas ist, kann es notwendig sein, die Rohgaskonzentration vor dem Messgerät zu verdünnen, um eine Übersteuerung des CPCs zu verhindern. Dazu werden dem Messgerät Verdünnungsstufen (10) mit bekanntem Verdünnungsverhältnis vorgeschaltet.

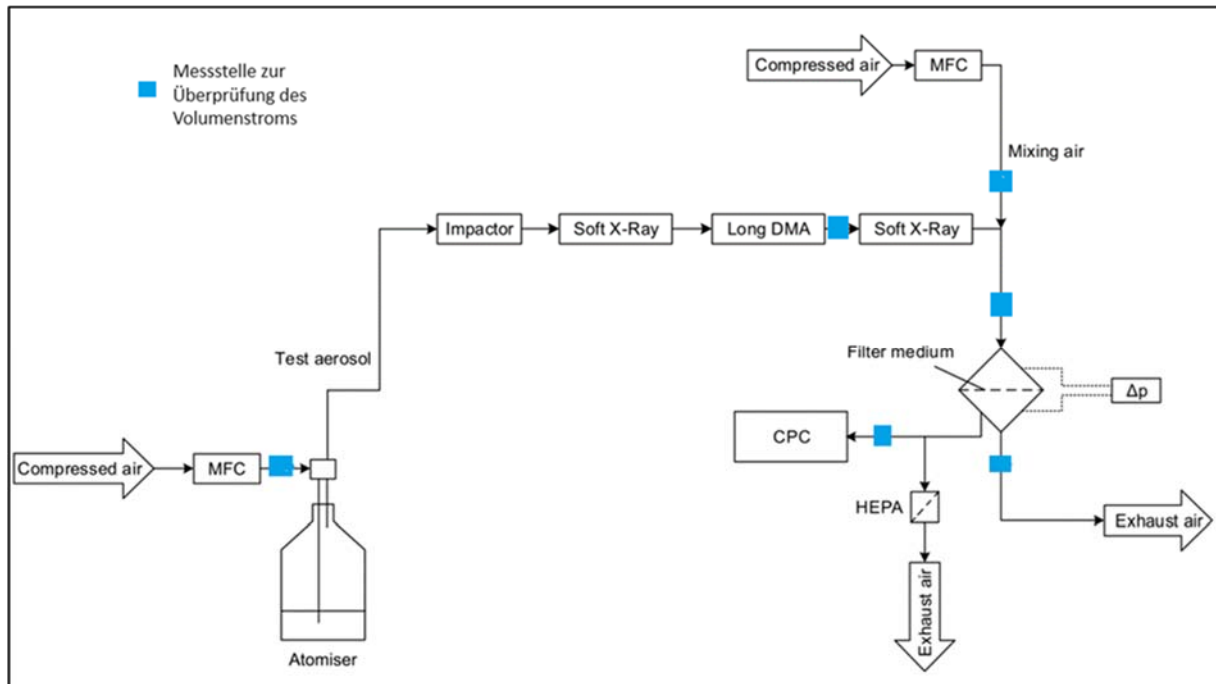


Abbildung 1-7: Versuchsaufbau an der FE1

Der Messaufbau an der FE1 entspricht den oben genannten Vorgaben und ist in Abbildung 1-7 dargestellt. Zur Erzeugung des Aerosols wird ein Aerosolgenerator der Firma TSI verwendet (Modell 3076). Der Volumenstrom der benötigten Druckluft wird durch einen Massenflussregler von Vögtlin, Modell RTU (GSC-D9TA-BB12) eingestellt und mit einem Massendurchflussmesser von TSI (Serie 4000) überprüft. Das polydisperse Aerosol gelangt dann zum SMPS-System von Palas. Dieses besteht aus einem Impaktor am Eingang, in dem größere Partikel abgetrennt werden. Dann wird das Aerosol intern durch eine Röntgenquelle neutralisiert. Das bedeutet, dass die Partikel im Aerosol in ein nach außen neutralem Gleichgewicht mit bekannter Ladungsverteilung (Boltzmann Ladungsverteilung) gebracht werden. Im anschließenden DMA wird durch Variation der angelegten Spannung gezielt eine Mobilitätsklasse extrahiert (-> monodisperses Aerosol), welche nach dem Durchlaufen eines zweiten Neutralisators (TSI 308801) und der eingelegten Filtermedienprobe mit einem Kondensationspartikelzähler (Palas UF-CPC50) analysiert wird. Zunächst wurde der Messaufbau an der Uni DUE ohne Verdünnung betrieben. Die Rohgasmessung erfolgt analog, jedoch ohne eingelegte Filtermedienprobe. Anstelle der Analyse einzelner Mobilitätsklassen kann im sogenannten Scan-Modus die Größenverteilung der Partikel sowie die Konzentration in einem eingestellten Bereich gemessen und dargestellt werden.

Vor Beginn der Messungen wurde der Volumenstrom an verschiedenen Stellen im Messaufbau mit einem Gilian Gilibrator-2 von SENSIDYNE überprüft (siehe Abbildung 1-7). Bei der Kontrolle wurde die „standard flow cell“ mit einem Messbereich von 20 cm³/min bis 6 LPM verwendet. Im Anschluss wurden Vorversuche zur Stabilität und Reproduzierbarkeit der Messungen bezüglich des Fraktionsabscheidegrades durchgeführt.

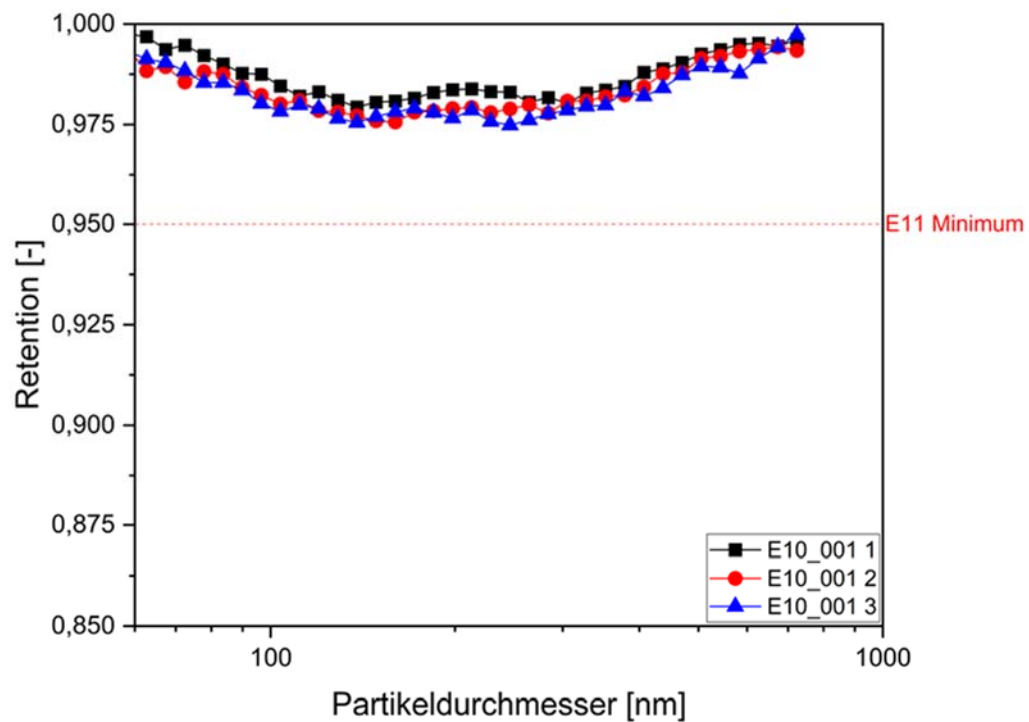


Abbildung 1-8: Scan eines vorhandenen E10-Filtermediums

Die Fraktionsabscheidegradmessung eines E10-Filters zeigt eine gute Reproduzierbarkeit. Der MPPS ist deutlich zu erkennen (Abbildung 1-8).

Anschließend wurden Wiederholmessungen an einem H14-Filtermedium durchgeführt. Dazu wurde ein vorhandenes H14-Filtermedium in Scan-Modus (80 nm – 600 nm) vermessen. Bei der Auswertung war jedoch im erwarteten Bereich kein aussagekräftiges Minimum zu erkennen (Abbildung 1-9).

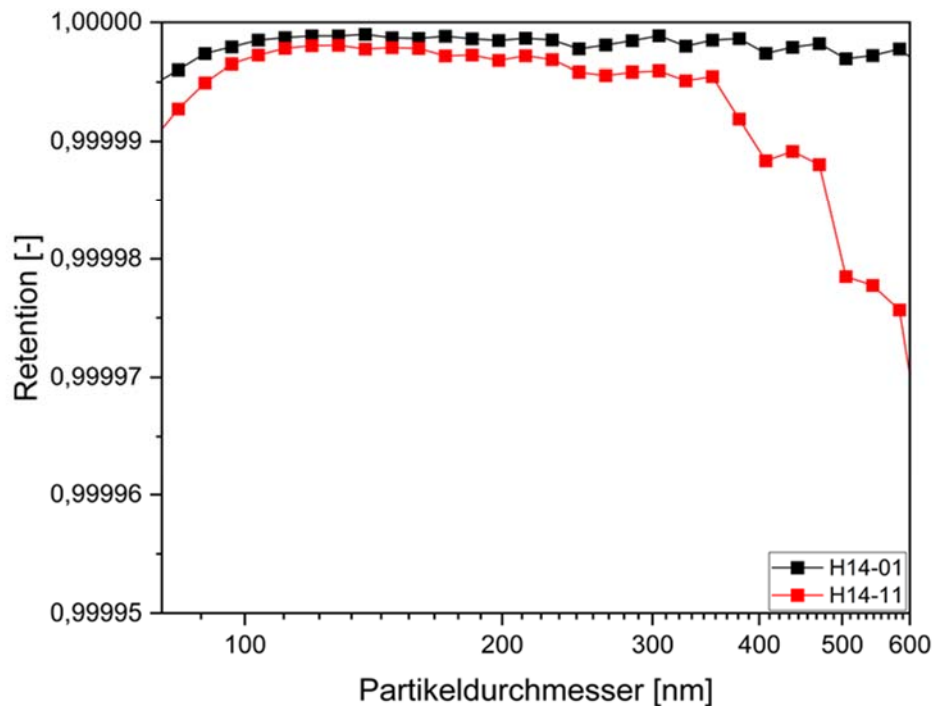


Abbildung 1-9: Scan eines vorhandenen H14-Filtermediums

Eine Analyse ergab, dass die Partikelanzahl im Reingas bei der eingestellten Rohgaskonzentration deutlich zu niedrig war (Abbildung 1-10). Hier ist eine Mindestteilchenanzahl von 100 notwendig, um eine statistisch sichere Aussage zu treffen. Bei der durchgeführten Messung wurde diese Anzahl nicht erreicht (Abbildung 1-11).

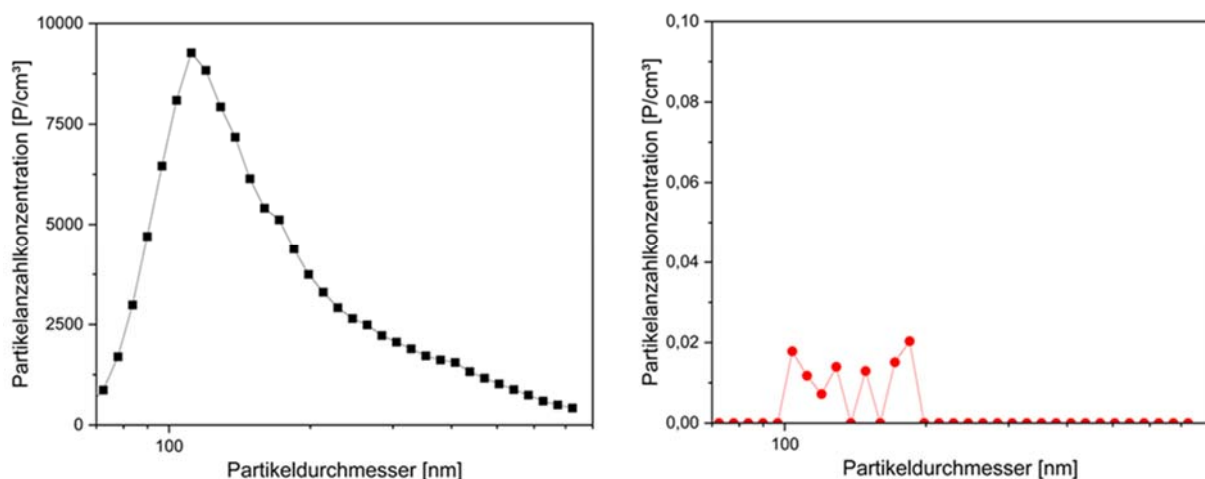


Abbildung 1-10: Partikelanzahlkonzentration im Rohgas (links) und Reingas (rechts) bei der H14-Filtermediummessung

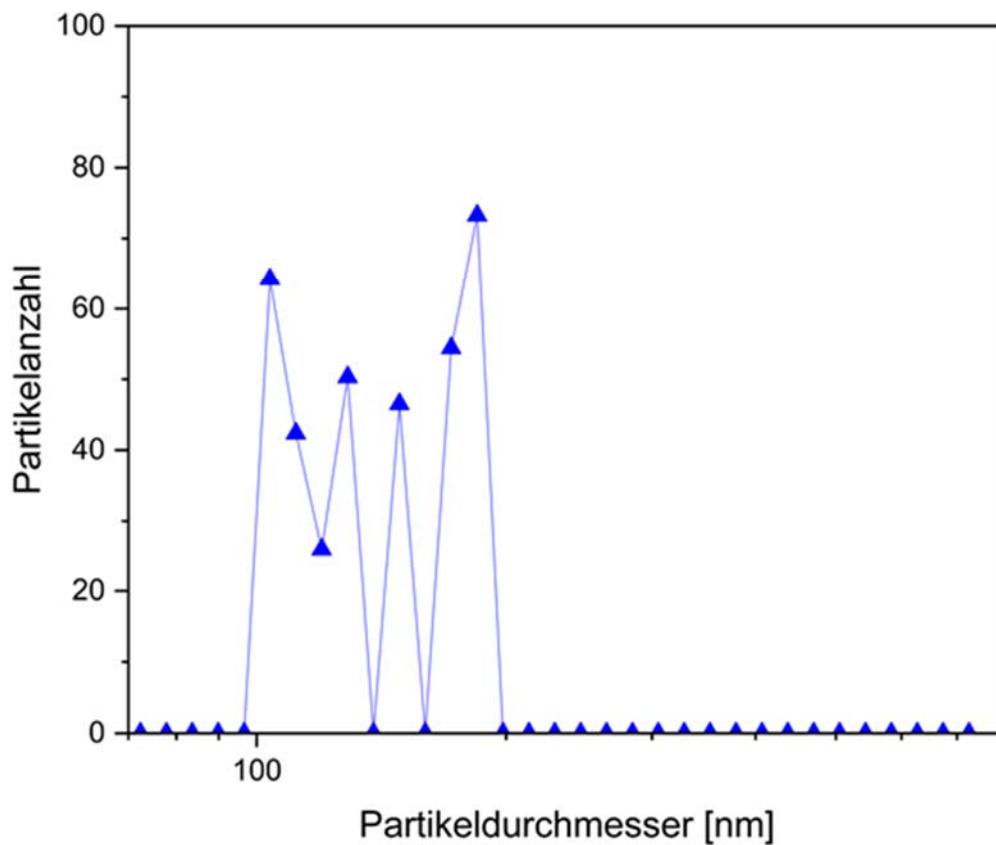


Abbildung 1-11: Partikelanzahl im Reingas bei der H14-Filtermediummessung

Im Messaufbau musste beim H14-Material eine Verdünnung eingebaut werden, um bei der Reingasmessung (ohne Verdünnung) die erforderliche Mindestteilchenanzahl zu erhalten und den CPC bei der Rohgasmessung (mit Verdünnung) nicht zu übersteuern (Abbildung 1-12).

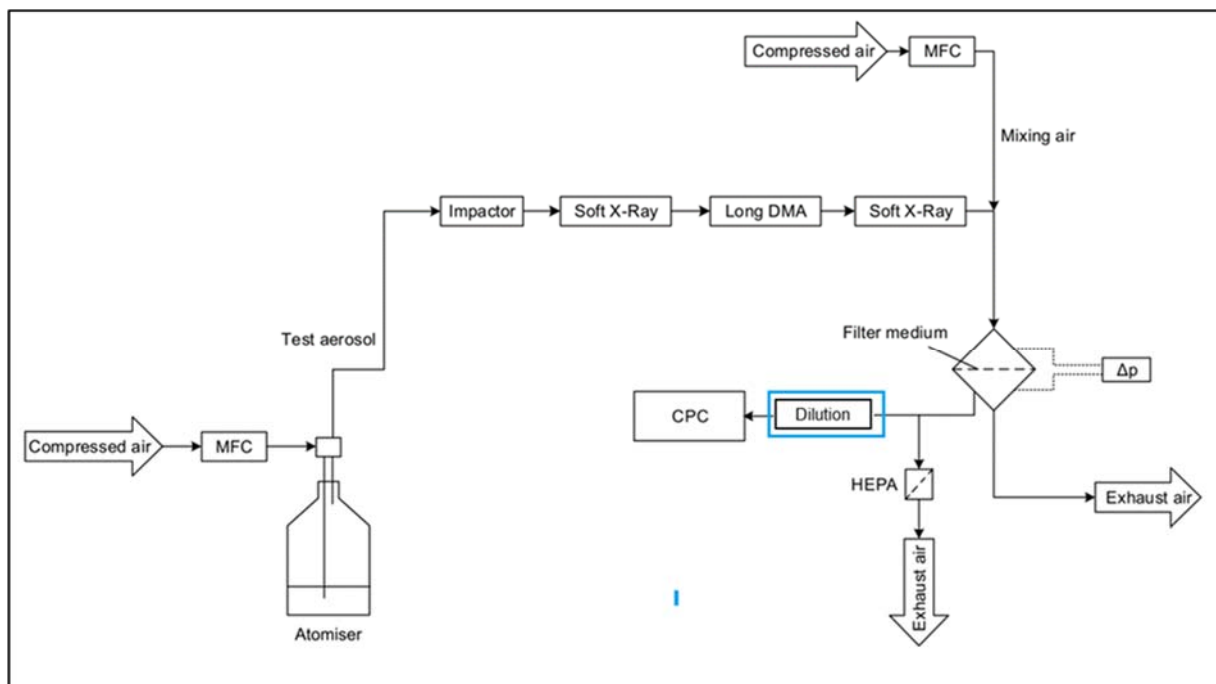


Abbildung 1-12: angepasster Versuchsaufbau an der FE1 für die Rohgasmessung

Das tatsächliche Verdünnungsverhältnis wurde aus Messungen mit verschiedenen Partikelanzahlkonzentrationen bestimmt (Abbildung 1-13).

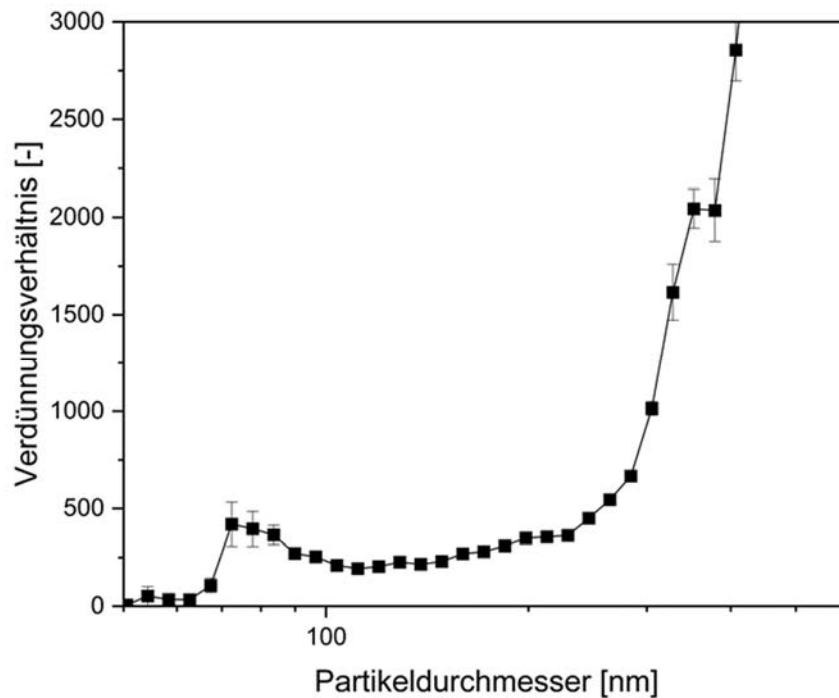


Abbildung 1-13: gemessenes Verdünnungsverhältnis bei der Rohgasmessung

Zur Überprüfung wurde anschließend ein E12-Filtermedium mit und ohne Verdünnung bei der Rohgasmessung vermessen und die Retention bestimmt. Die Messergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung (Abbildung 1-14).

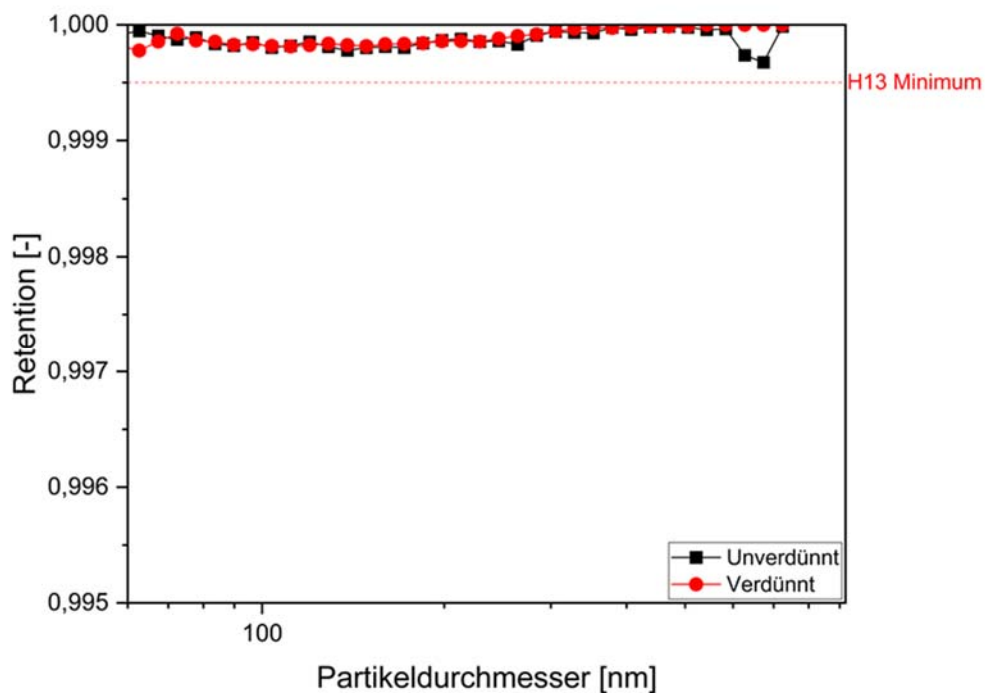


Abbildung 1-14: Scan eines E12-Filtermediums mit und ohne Verdünnung bei der Rohgasmessung

Bei der erneuten Messung des H14-Filtermediums ist mit Verdünnung bei der Rohgasmessung der MPPS deutlich zu erkennen (Abbildung 1-15). Auch bei einem zweiten Material ist das erwartete Minimum bei der Messung erfasst worden (Abbildung 1-16). Die gute Übereinstimmung der Wiederholungsmessungen zeigt zudem die Stabilität des angepassten Messaufbaus.

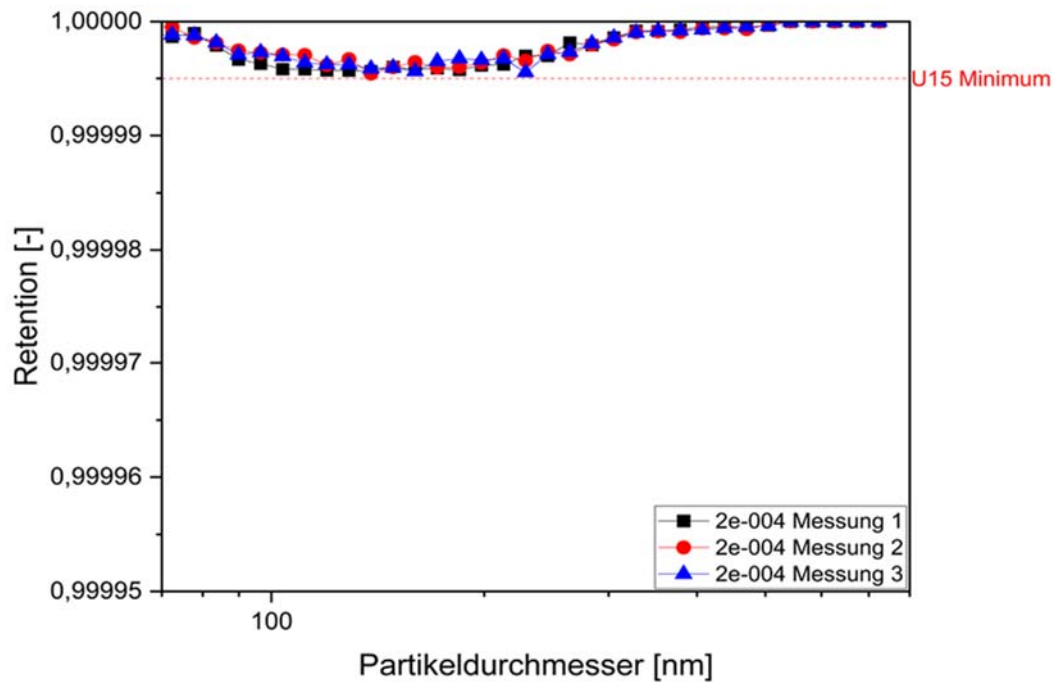


Abbildung 1-15: Scan eines H14-Glasfasermediums mit Verdünnung bei der Rohgasmessung

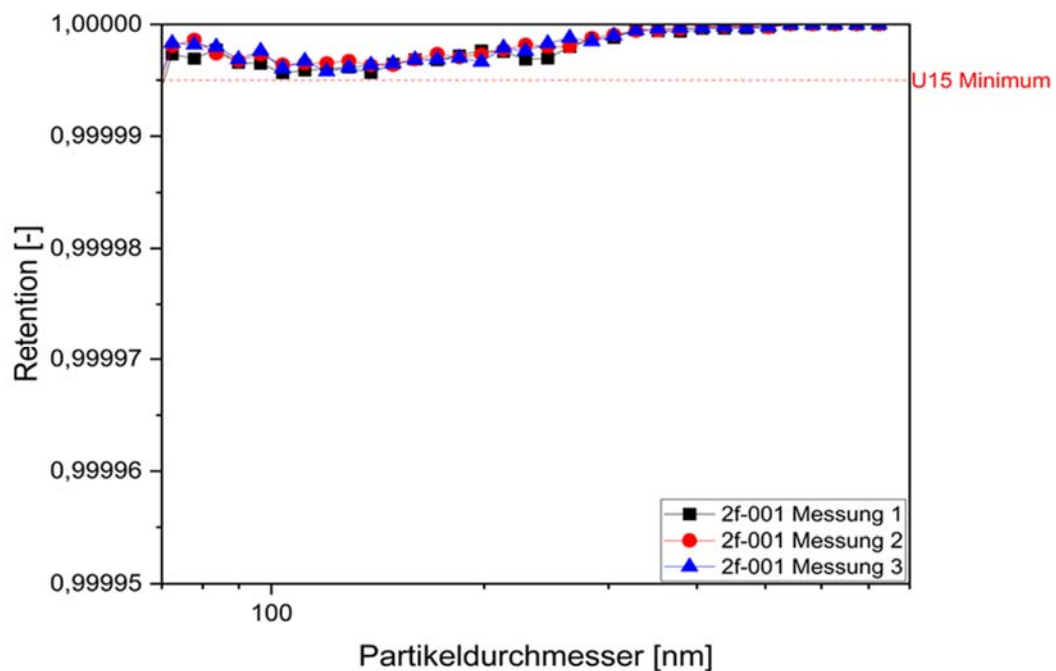


Abbildung 1-16: Scan eines zweiten H14- Glasfasermediums mit Verdünnung bei der Rohgasmessung

Anschließend wurde das Korrekturtool der Auswertesoftware für Mehrfachmessungen hinsichtlich der Auswirkungen auf die Messergebnisse untersucht. Dazu wurden zwei Messungen einmal mit eingeschalteter Korrektur und einmal ohne Korrektur ausgewertet und diese miteinander verglichen (Abbildung 1-17). Dabei konnten im Bereich des MPPS keine nennenswerten Unterschiede festgestellt werden.

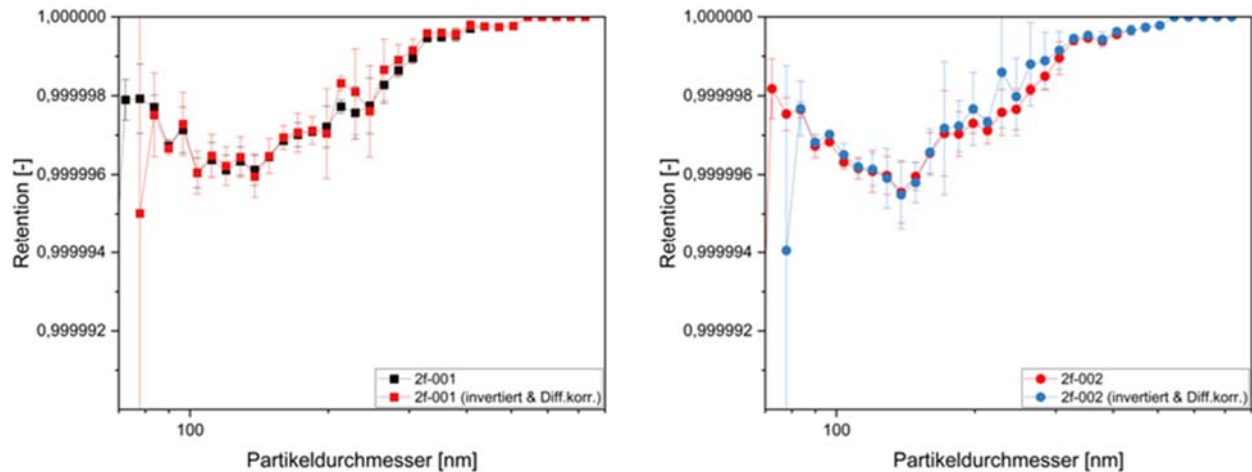


Abbildung 1-17: Vergleich Auswertung mit und ohne Korrektur der Rohdaten

Nach Abschluss der Vorversuche und dem dadurch erbrachten Nachweis der Stabilität des Messaufbaus, wurde mit den Messungen des Glasfasermaterials für den ersten Rundversuch (H13-Filtermedien) begonnen (siehe 1.5.1).

1.2.2 Polydisperse Messung

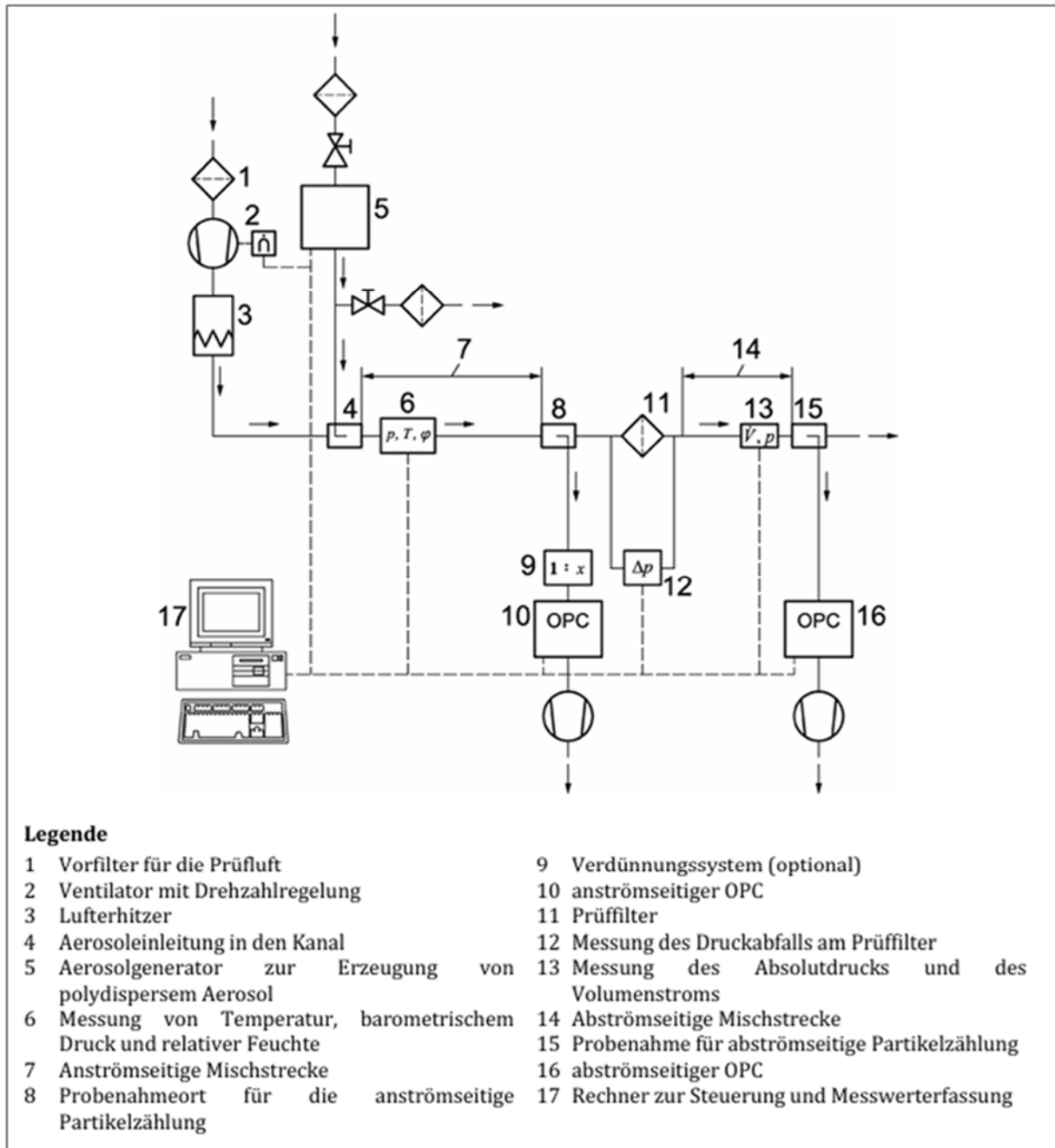


Abbildung 1-18: Versuchsaufbau / Skizze aus der ISO-29463-3

Abbildung 1-18 zeigt den Versuchsaufbau aus der Norm DIN EN ISO 29463-3 für die Prüfung von planen Filtermedien mit polydispersem Prüfaerosol. Nach Norm wird bei der polydispersen Vorgehensweise an Stelle des einzelnen oder der parallel geschalteten CPCs ein optischer Partikelzähler verwendet, der fraktionierend die Anzahlverteilung und die Anzahlkonzentration des Prüfaerosols bestimmt. Wie bei der monodispersen Messweise werden bei Bedarf Verdünnungsstufen eingesetzt um die Anzahlkonzentration des Prüfaerosols an den Konzentrationsbereich des Messgerätes anzupassen.

Ebenso wie bei der monodispersen Messweise wurde an der FE1 mit nur einem optischen Partikelzähler gemessen. Zur Ermittlung des Fraktionsabscheidegerades wurde dreimal nacheinander abwechselnd mit und ohne eingelegtem Filtermedium gemessen.

Erste Probemessungen mit polydisperser Messweise an dem Glasfasermaterial zeigten, dass bei dieser Messweise eine Verdünnung des DEHS-Prüfaerosols mit Isopropanol notwendig ist. Ohne Verdünnung steigt der Druckverlust am Medium innerhalb kürzester Zeit so stark an, dass die Messung abgebrochen werden muss.

Dies wurde bereits in der Bachelorarbeit von T. Bange (Abbildung 1-19 und Abbildung 1-20) eingehend untersucht.

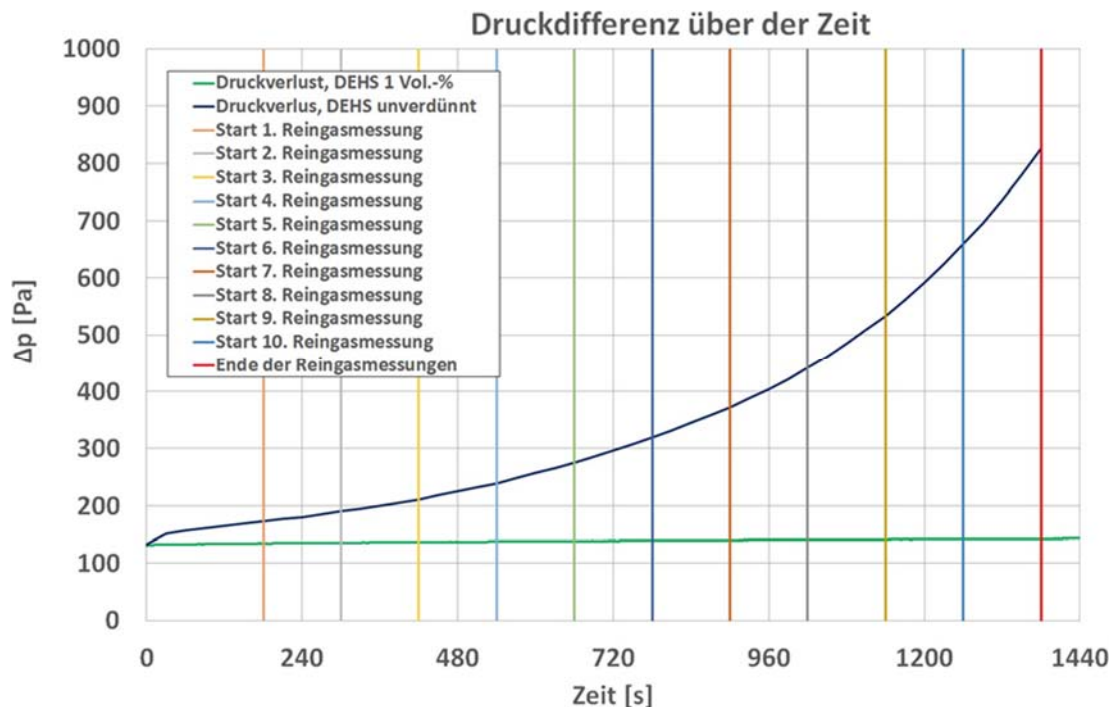


Abbildung 1-19: Ergebnisse Druckverlust bei polydisperser Messweise mit reinem und mit IPA verdünntem DEHS (BA-Arbeit T. Bange)

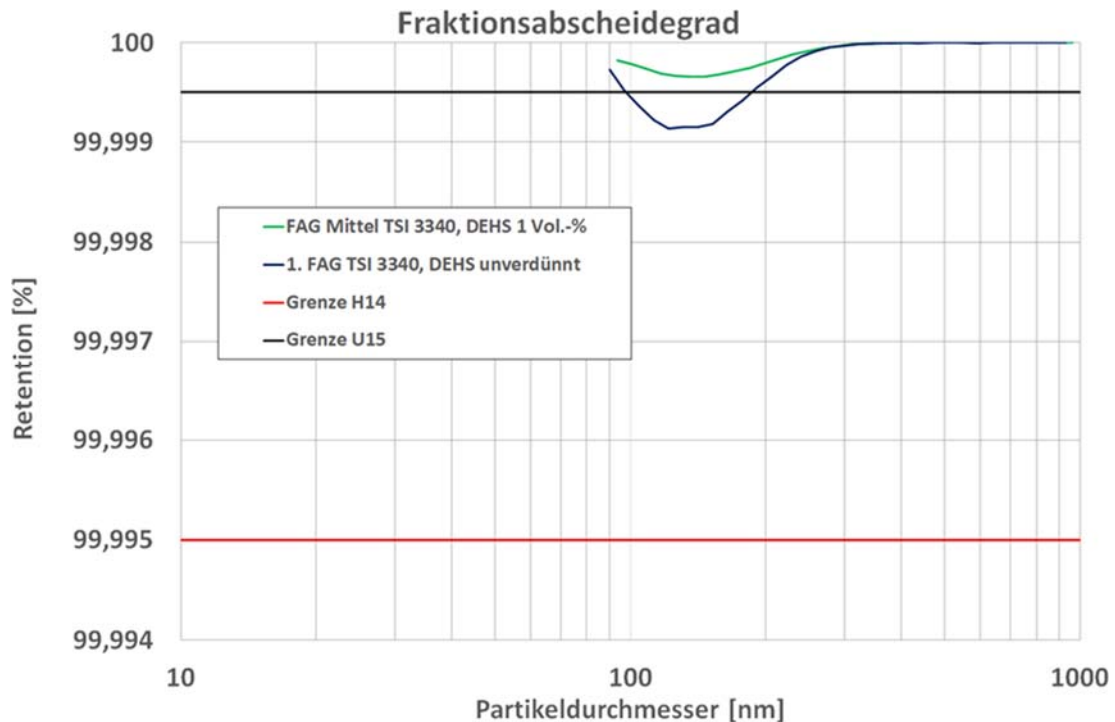


Abbildung 1-20: Ergebnisse Fraktionsabscheidegrad bei polydisperser Messweise mit reinem und mit IPA verdünntem DEHS (BA-Arbeit T. Bange)

Beim synthetischen Material kann dieses Verfahren nicht angewendet werden, da das enthaltene Isopropanol bereits eine Entladung des Filtermediums und damit eine Reduzierung des Fraktionsabscheidegrades verursachen würde.

Ergebnisse der polydispersen Messungen siehe 1.5.1.

1.2.3 Unterschiede monodisperse/polydisperse Messung

Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen ist, dass man bei Glasfasermaterial vergleichbare Messergebnisse bei monodisperser und polydisperser Messweise erzielen kann. Bei diesem Material wirkt sich eine bei polydisperser Messweise erforderliche Verdünnung des Prüfaerosols (DEHS, mit IPA verdünnt) nicht negativ auf den Fraktionsabscheidegrad aus. Bei synthetischem Material bewirkt das bei der Verdünnung verwendete IPA jedoch eine Entladung der Fasern und reduziert somit den Fraktionsabscheidegrad deutlich, was letztendlich zu einer Einstufung in eine geringere Filterklasse führt.

1.2.4 Alternatives Prüfaerosol

An der FE1 wurden Versuche durchgeführt, bei denen statt des Referenzprüfaerosols DEHS, Latexpartikel verwendet wurden.

Zunächst wurden Latexpartikel mit einem angegebenen Partikeldurchmesser von 513 nm und 200 nm jeweils in IPA dispergiert und die Partikelanzahlkonzentration in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser bestimmt. Reines IPA enthält ebenfalls eine gewisse Anzahl von Partikeln verschiedener Durchmesser. Diese Verteilung wurde ebenfalls bestimmt und die Differenz der beiden Verteilungskurven bestimmt. Abbildung 1-21 und Abbildung 1-22 zeigen die Ergebnisse. In beiden Fällen konnte nur eine vergleichsweise geringe Anzahl von Latexpartikeln gemessen werden.

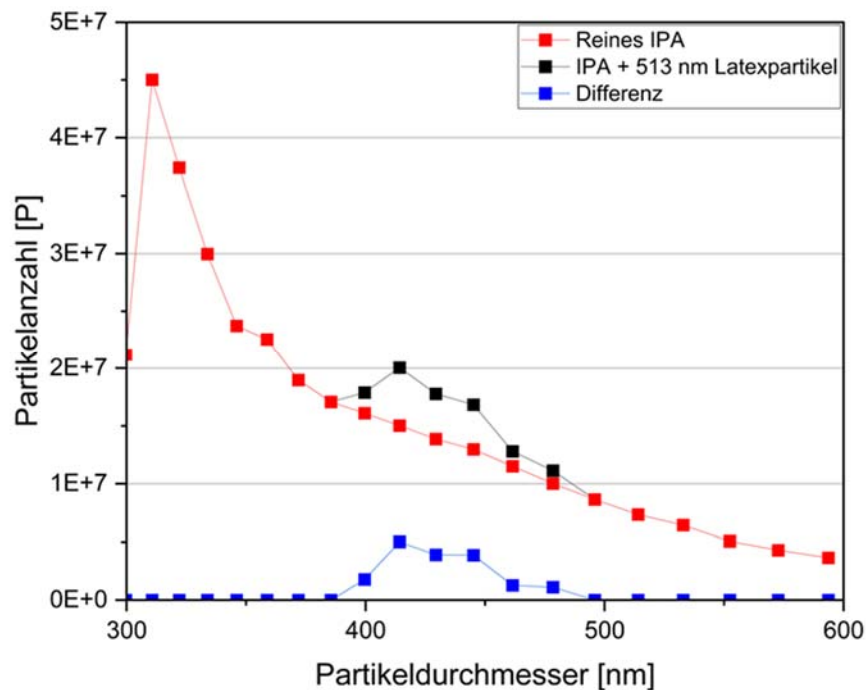


Abbildung 1-21: Vergleich Partikelanzahlkonzentration von reinem IPA und mit in IPA dispergierten Latexpartikeln (513nm)

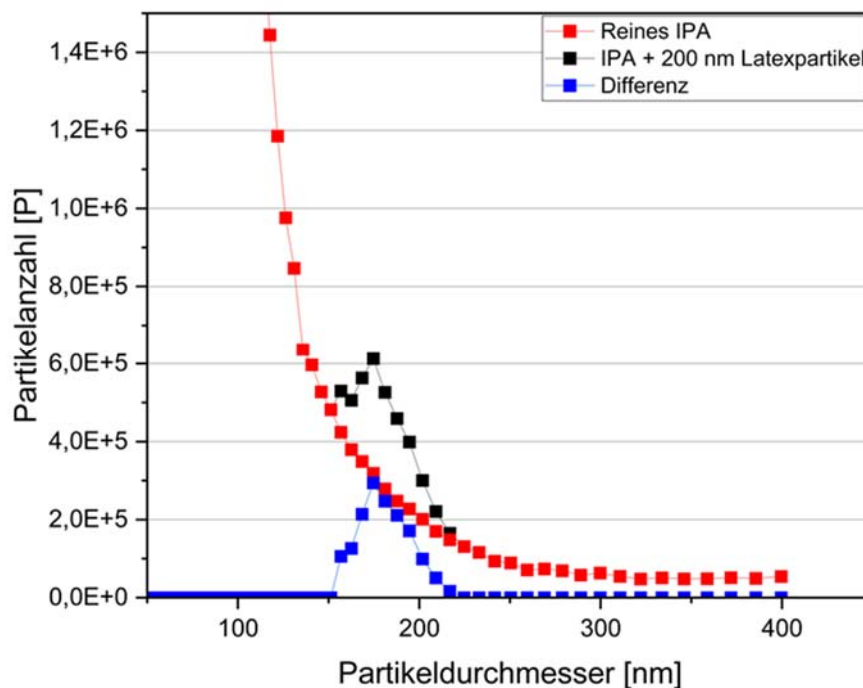


Abbildung 1-22: Vergleich Partikelanzahlkonzentration von reinem IPA und mit in IPA dispergierten Latexpartikeln (200nm)

Abschließend wurden Messungen des Fraktionsabscheidegrades am Glasfasermaterial mit den dispergierten Latexpartikeln durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 1-23. Die Messungen zeigen keinen signifikanten Unterschied zu den Messungen mit DEHS bzw. den Messungen mit verdünntem DEHS an der FE1. Aufgrund der nur geringen Anzahl der dispergierten Latexpartikel war das zu erwarten.

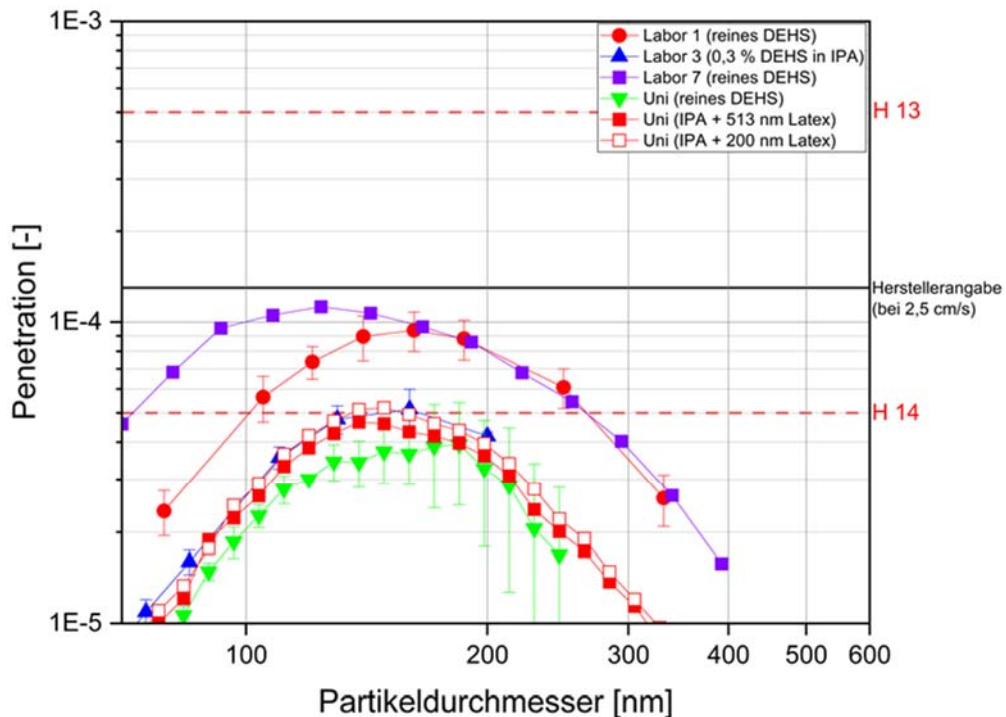


Abbildung 1-23: Vergleich Penetrationsmessungen mit DEHS und in IPA dispergierten Latexpartikeln (200nm und 513nm)

Fazit der Untersuchungen mit Latexpartikeln als alternatives Prüfaerosol ist, dass die Messungen zum einen sehr teuer sind, da eine große Menge an Partikeln notwendig ist. Zum anderen sind die Messungen aufwendiger, da für verschiedene Partikeldurchmesser mehrere Latexpartikelproben dispergiert werden müssen. Ein weiterer, negativer Punkt ist die Reinigung des Messplatzes von den Latexpartikeln.

1.3 Arbeitspaket 3: Umbau, Erweiterung und Ertüchtigung eines an der FE 2 vorhandenen Prüfstandes zur Messung der Fraktionsabscheidegrade nach DIN EN ISO 29463-5 (IUTA)

Für die Messungen an konfektionierten Filterelementen nach DIN EN ISO 29463-5 wurde der an der FE 2 vorhandene Filterprüfstand zur Klassifizierung von Luftfiltern für die allgemeine Raumlufttechnik ertüchtigt. Der Prüfstand ist für den Nennvolumenstrombereich der Rundversuchs-Prüflinge (1.190 m³/h bzw. 1.200 m³/h) geeignet.

1.3.1 Geräteausstattung am IUTA

Der verwendete Prüfstand und das Konditionierungskabinett TDC 584 der Firma Topas zur Entladung der Filterelemente mit IPA-Dampf sind in Abbildung 1-24 gezeigt.



Abbildung 1-24: Filterprüfstand und Konditionierungskabinett an der FE2

Die Geräteausstattung des Prüfstandes umfasst einen Aerosolgenerator PLG 2010 der Firma Palas zur Zerstäubung von DEHS. Der Generator arbeitet im Volumenstrombereich von 10 – 35 l/min und erzeugt Aerosole mit einem mittleren Partikeldurchmesser von etwa 200 – 400 nm (Abbildung 1-25).

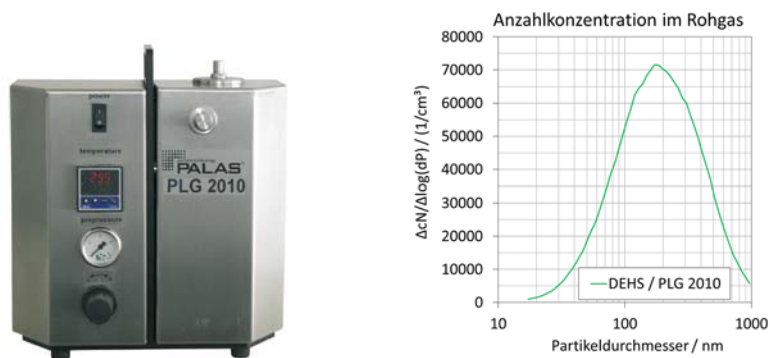


Abbildung 1-25: Aerosolgenerator PLG 2010 (Palas) (Bildquelle: www.palas.de) und erzeugte Partikelanzahlgrößenverteilung

Für die monodisperse Partikelmessung stehen zwei SMPS-Systeme zur Verfügung. Das erste System stammt von der Firma TSI (Abbildung 1-26) und besteht aus dem elektrostatischen Klassierer SMPS 3080 mit der Klassiersäule DMA 3081 (Klassierbereich 10 – 1.000 nm) sowie dem butanolbasierten Kondensationspartikelzähler CPC 3776 (Messbereich 2,5 – 5.000 nm; Volumenstrom 0,06 l/min).



Abbildung 1-26: SMPS-System TSI (3080/3081 + CPC 3776) (Bildquelle: www.tsi.com)

Das zweite SMPS-System stammt von der Firma Palas (Abbildung 1-27) und umfasst die DEMC XB Control Unit mit der Klassiersäule DEMC 3000 (Klassierbereich 8 – 1.600 nm) sowie den butanolbasierten Kondensationspartikelzähler UF-CPC 50 (Messbereich 4 – 5.000 nm; Volumenstrom 0,9 l/min).



Abbildung 1-27: SMPS-System Palas (DEMC 3000 + UF CPC 50) (Bildquelle: www.palas.de)

Ergänzend stand für polydisperse Messungen ein von der Fa. TROX SE leihweise bereitgestelltes Laseraerosolspektrometer LAS-X II (Particle Measuring Systems, PMS) inklusive zweier Verdünnungsstufen der Fa. Topas GmbH (Verdünnungsfaktor Rohluft: 994) zur Verfügung. Dadurch war es möglich, am IUTA monodisperse (SMPS) und polydisperse (OPC) Messweisen an denselben Prüflingen direkt miteinander zu vergleichen.

1.3.2 Umbaumaßnahmen am Prüfstand

Um den Prüfstand für die Anforderungen der Klassifizierung nach DIN EN 1822 und DIN EN ISO 29463 zu optimieren, wurden mehrere Maßnahmen umgesetzt. Ziel war es, die Prüfbedingungen zu homogenisieren und Messunsicherheiten zu reduzieren.

Hierzu gehörte zunächst die Modifizierung der Aerosolaufgabe, um ein über den gesamten Kanalquerschnitt homogenes DEHS-Prüfaerosol bereitzustellen. Darüber hinaus wurden die Probenahmeeinrichtungen auf der An- und Abströmseite überarbeitet und mit kurzen, strömungsgünstigen Probenahmeleitungen (Länge ca. 0,6–0,75 m; Durchmesser 5 mm bzw. 8 mm) ausgestattet, um Partikelverluste zu minimieren. Die Abdichtung der Filteraufnahme wurde so verbessert, dass auch sehr

hohe Abscheidegrade deutlich oberhalb von 99,95 % zuverlässig bestimmt werden können. Zusätzlich erfolgte eine Ertüchtigung der Volumenstrom- und Druckverlustmesstechnik, sodass der gesamte für die Prüfungen relevante Bereich präzise abgedeckt wird. Im Zuge der Anpassung des Prüfkanals wurden außerdem die Volumenstrombestimmung auf Grundlage der Druckdifferenzmessungen an einem von der Fa. TROX SE bereitgestellten Lochblech neu justiert.

Nach Abschluss der Umbaumaßnahmen wurde der Prüfstand systematisch hinsichtlich Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit überprüft. Der ertüchtigte Prüfstand stand anschließend für sämtliche Messungen an konfektionierten Filterelementen (Rundversuche, Parametervariationen und Entladungsversuchen) zur Verfügung.

1.4 Arbeitspaket 4: Messungen der Fraktionsabscheidegrade nach DIN EN ISO 29463-5: Monodisperse und polydisperse Vorgehensweise mit unterschiedlichen Messgeräten (IUTA)

An der FE 2 wurden Fraktionsabscheidegrade an konfektionierten Filterelementen nach DIN EN ISO 29463-5 bestimmt. Ziel war es, die beiden in der Norm zugelassenen Vorgehensweisen (monodispers mit SMPS und CPC bzw. polydispers mit optischem Partikelzähler) direkt zu vergleichen sowie den Einfluss ausgewählter Versuchsparameter systematisch zu bewerten.

1.4.1 Monodisperse Vorgehensweise

Die monodispersen Messungen wurden mit den oben beschriebenen beiden SMPS-Systemen der Firmen Palas und TSI durchgeführt. Als Prüfaerosol wurde DEHS eingesetzt, das über den Aerosolgenerator PLG 2010 (Palas) jeweils unverdünnt zerstäubt wurde. Die Probenahme erfolgte im Wechsel auf der An- und Abströmseite des Filterelements.

Abbildung 1-26 zeigt die mit dem SMPS-System der Fa. TSI gemessene Effizienz in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser. Zusätzlich ist als gestrichelte Linie der berechnete minimale Abscheidegrad $E_{95\%,\min}$ dargestellt, der den Vertrauensbereich von 95 % der Partikelzählstatistik berücksichtigt. Der minimale Abscheidegrad bildet die Grundlage für die Klassifizierung nach ISO 29463-1.

Der CPC 3776 von TSI arbeitet mit einem Probenvolumenstrom von lediglich 0,06 l/min, wodurch insbesondere im Reingas nur wenige Zählereignisse registriert werden. Die daraus resultierenden zählstatistischen Unsicherheiten wirken sich unmittelbar auf die Bestimmung der minimalen Effizienz $E_{95\%,\min}$ und damit auf die resultierende Filterklassifizierung aus.

Die von der Fa. TROX mit dem Laseraerosolspektrometer gemessenen Effizienzen sind in der Darstellung als hellblaue Punkte wiedergegeben. Für die Filterklasse H13 muss die Effizienz größer als 99,95 % sein (rote gestrichelte Linie). Die am IUTA gemessene Effizienz im MPPS von 129 nm beträgt jedoch 99,868 % und liegt damit deutlich unterhalb des Grenzwerts für H13. Der Filter erreicht folglich lediglich die Klasse E12.

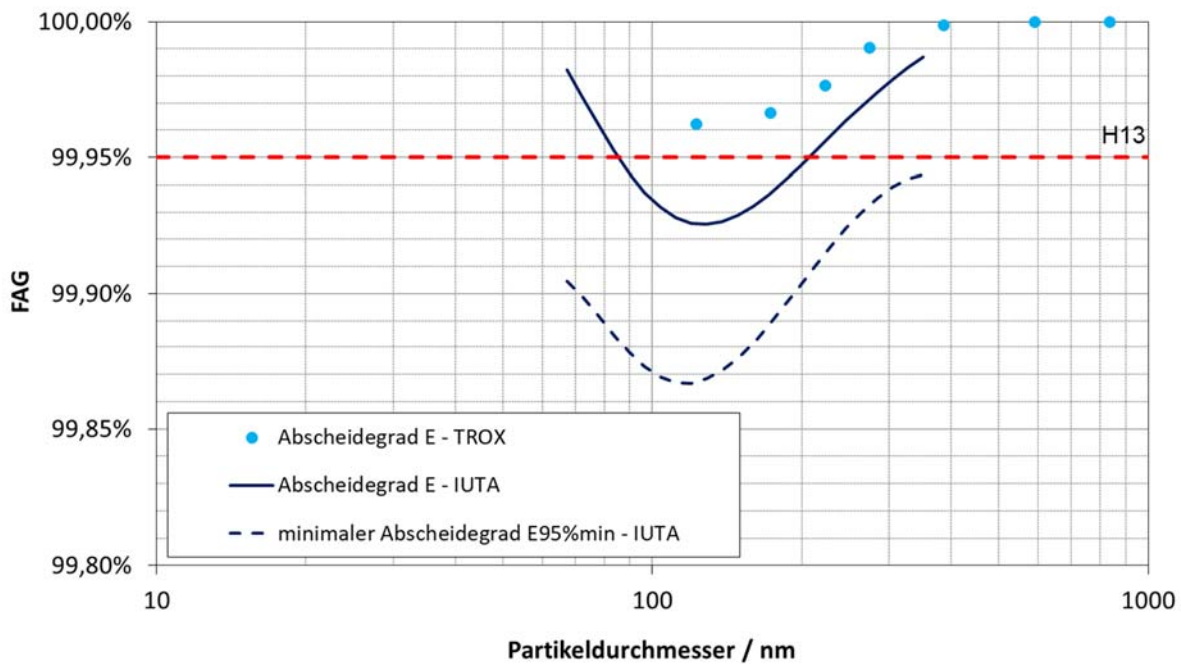


Abbildung 1-28: Abscheidegrade: IUTA mit TSI SMPS-System gemessen, TROX mit Laseraerosolspektrometer gemessen

Ergänzend wurden monodisperse Messungen mit dem SMPS-System der Firma Palas durchgeführt. Die entsprechende Effizienzkurve ist in Abbildung 1-27 über dem Partikeldurchmesser dargestellt (grüne Kurve). Die zugehörige minimale Effizienz $E_{95\%,\min}$ ist als grün gestrichelte Linie eingezeichnet. Der MPPS lag bei diesen Messungen bei 138 nm, und die minimale Effizienz im MPPS betrug 99,930 %.

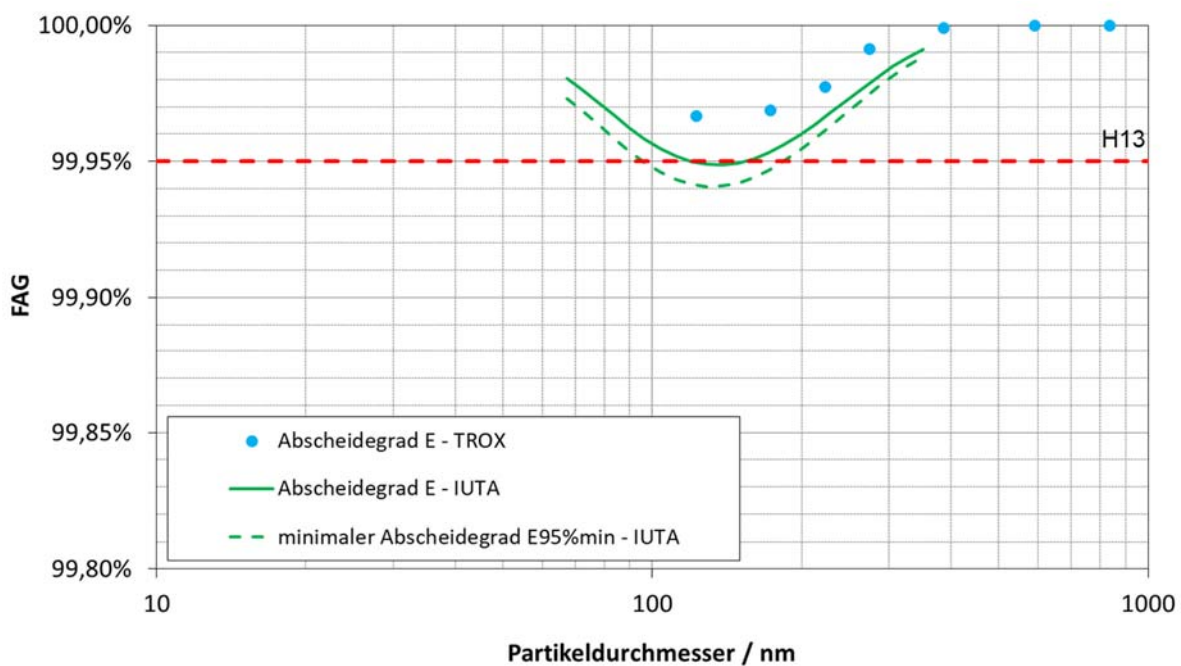


Abbildung 1-29: Abscheidegrade: IUTA mit Palas SMPS-System gemessen, TROX mit Laseraerosolspektrometer gemessen

Der eingesetzte UF-CPC 50 der Firma Palas arbeitet mit einem deutlich höheren Probenvolumenstrom von 0,9 l/min. Dadurch werden insbesondere im Reingasbereich wesentlich mehr Partikelergebnisse registriert, was die zählstatistische Unsicherheit reduziert. Aus statistischer Sicht ist dieses System daher für Messungen an HEPA-Filtern vorteilhafter.

Trotz der höheren Zählrate lag auch hier die minimale Effizienz unterhalb des Grenzwertes für die Klasse H13 (99,95 %), sodass der Prüfling ebenfalls nur die Klasse E12 erreichte.

1.4.2 Polydisperse Vorgehensweise

Für die polydispersen Messungen stellte die Firma TROX dem IUTA das Laseraerosolspektrometer LAS-X II leihweise zur Verfügung. Das Gerät wurde zusammen mit zwei Verdünnungsstufen der Firma Topas betrieben, wodurch im Rohgas ein Verdünnungsfaktor von 994 erreicht wurde.

Die Messungen wurden an drei Filterelementen durchgeführt. Abbildung 1-30 zeigt exemplarisch eine Gegenüberstellung der von TROX und vom IUTA ermittelten Abscheidegrade.

Die Messung am IUTA erfolgte mit einer deutlich kürzeren Probenahmeleitung (ca. 0,75 m, Ø 8 mm) als im Messaufbau von TROX (ca. 3 m, Ø 6,4 mm). Zudem wurde am IUTA ohne Umschalteinheit gearbeitet, der Wechsel zwischen An- und Abströmseite erfolgte durch manuelles Umstecken der Probenahmeleitung.

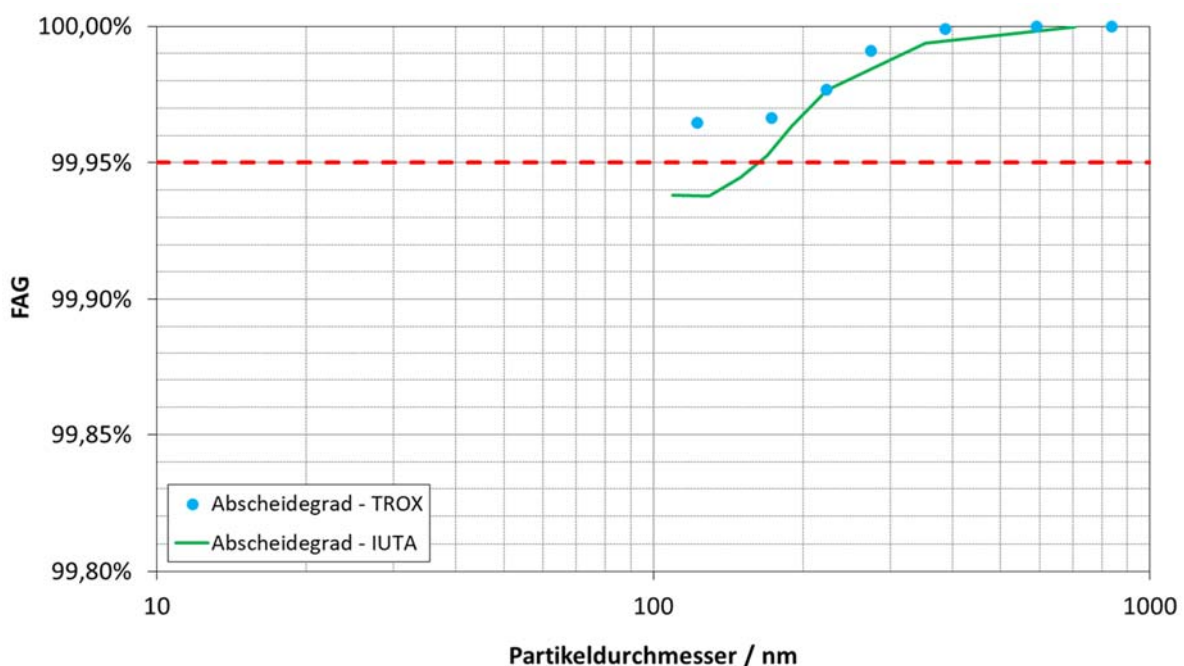


Abbildung 1-30: Mit dem Laseraerosolspektrometer LAS-X II gemessene Abscheidegrade (TROX und IUTA)

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die am IUTA gemessenen Effizienzen für Partikeldurchmesser unterhalb von 200 nm systematisch unter den von TROX bestimmten Werten liegen. In diesem Bereich unterschreiten die IUTA-Messungen zudem den Grenzwert für die Filterklasse H13. Der geprüfte Filter hätte damit nach polydisperser Bewertung ebenfalls nur die Klasse E12 erreicht.

1.4.3 Hintergrundmessung

Vor Beginn der eigentlichen Fraktionsabscheidegradmessungen wurde am Prüfkanal eine Hintergrundmessung durchgeführt. Dabei wurde die Partikelanzahlkonzentration ohne DEHS-Beaufschlagung bestimmt (Abbildung 1-31). Die Hintergrundbelastung lag deutlich unter der Anzahlverteilungsdichte der späteren DEHS-Beaufschlagung, wie in Abbildung 1-32 für die drei untersuchten Filter dargestellt. Damit war die Hintergrundkonzentration für die Bestimmung der Fraktionsabscheidegrade nicht relevant.



Abbildung 1-31: Anzahlverteilungsdichte bei Hintergrundmessung am IUTA-Prüfkanal

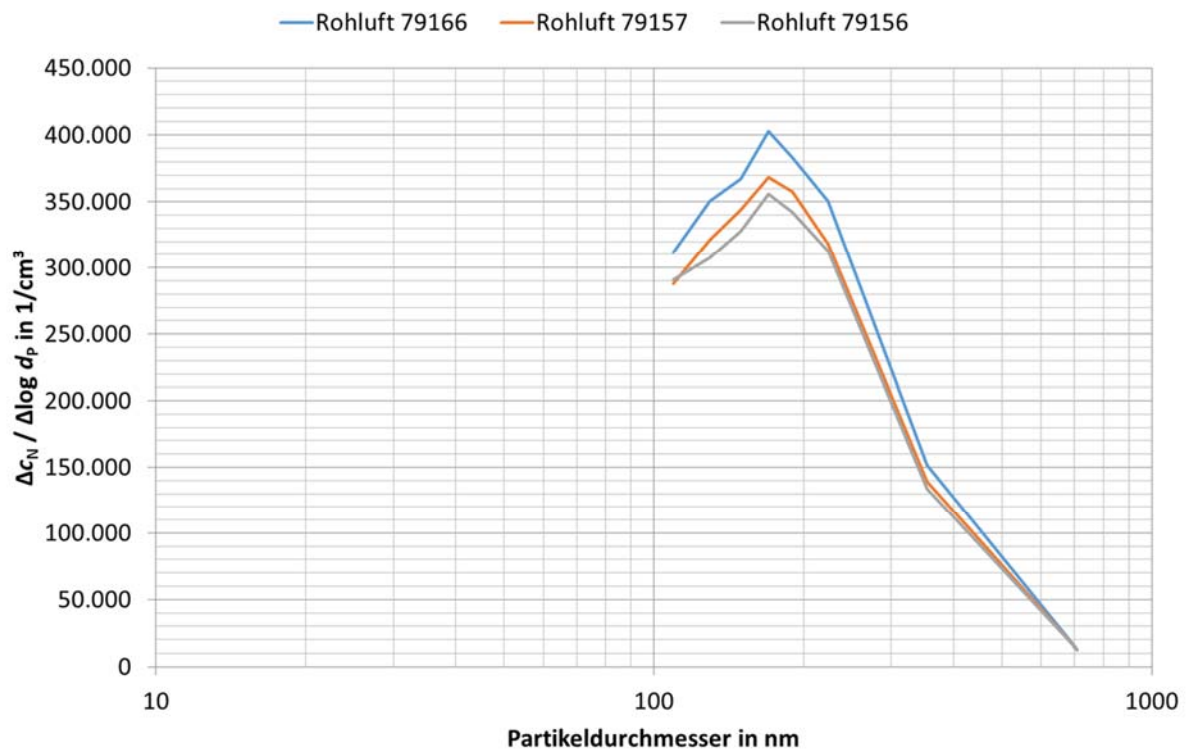


Abbildung 1-32: Anzahlverteilungsdichte bei DEHS-Beaufschlagung am IUTA-Prüfkanal

1.5 Arbeitspaket 5: Auswahl geeigneter Prüflinge für die Rundversuche (Uni + IUTA)

Idealerweise sind die ausgewählten Prüflinge identisch. Dies ist aus produktions-technischen Gründen allerdings nicht möglich. Daher müssen Filtermedien und Filterelemente sorgfältig ausgewählt werden, da ansonsten die Unterschiede in den gemessenen Effizienzen nicht auf die verschiedenen Prüfverfahren oder die „Filterfehler“ zurückzuführen sind. So müssen die Prüflinge u. a. aus derselben Charge stammen und die Druckverluste dürfen sich nicht signifikant unterscheiden.

1.5.1 Rundversuch Glasfasermaterialien (Filterklasse mindestens H13)

Für den ersten Rundversuch wurde von einem PA-Mitglied Glasfasermaterial der Filterklasse H13 in ausreichender Menge zur Verfügung gestellt. Aus derselben Charge wurden die konfektionierten Filter für die Rundversuche der konfektionierten Filter hergestellt.

Das Glasfasermaterial der Filterklasse H13 wurde als Rollenware zur Verfügung gestellt und an der FE1 für den Versand an die teilnehmenden Labore in Bögen der Größe DIN A4 zerteilt. Zudem wurden aus allen Bereichen (Rand, Mitte, Anfang) mehrere Proben genommen und bezüglich des Druckverlustes untersucht. Die Schwankung des Druckverlustes über alle Proben betrug lediglich

+/- 2 Pa (Abbildung 1-33). Die versendeten Proben wurden deshalb nicht nochmal separat vermessen.

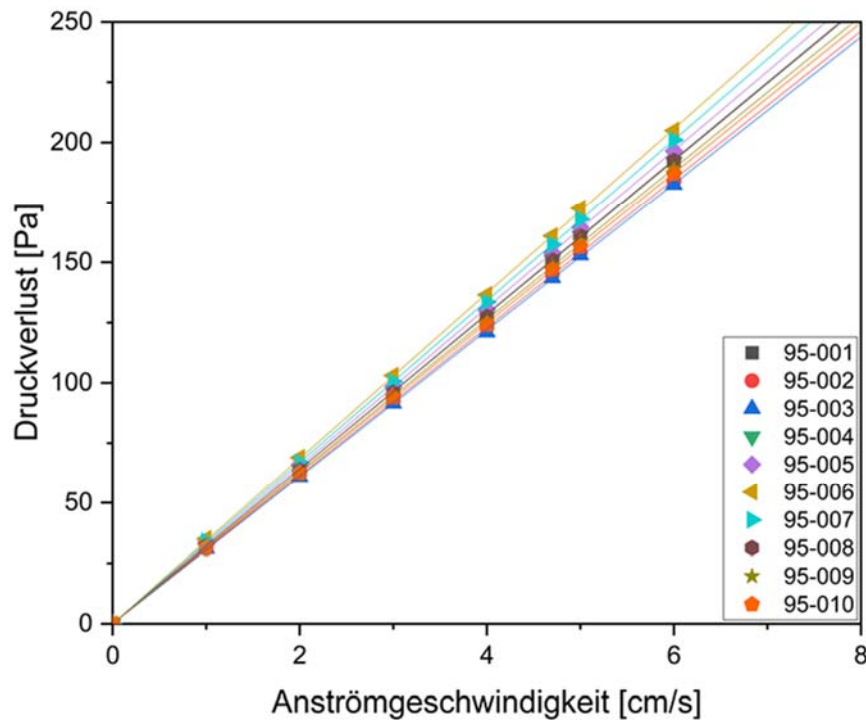


Abbildung 1-33: Wiederholmessungen des Druckverlustes

Um die Schwankungsbreite des Materials bezüglich des Fraktionsabscheidegrades bzw. der Penetration zu bestimmen, wurden an der FE1 Wiederholmessungen durchgeführt (Abbildung 1-34). Diese sollten später auch bei der Bewertung der Messergebnisse des Rundversuches berücksichtigt werden.

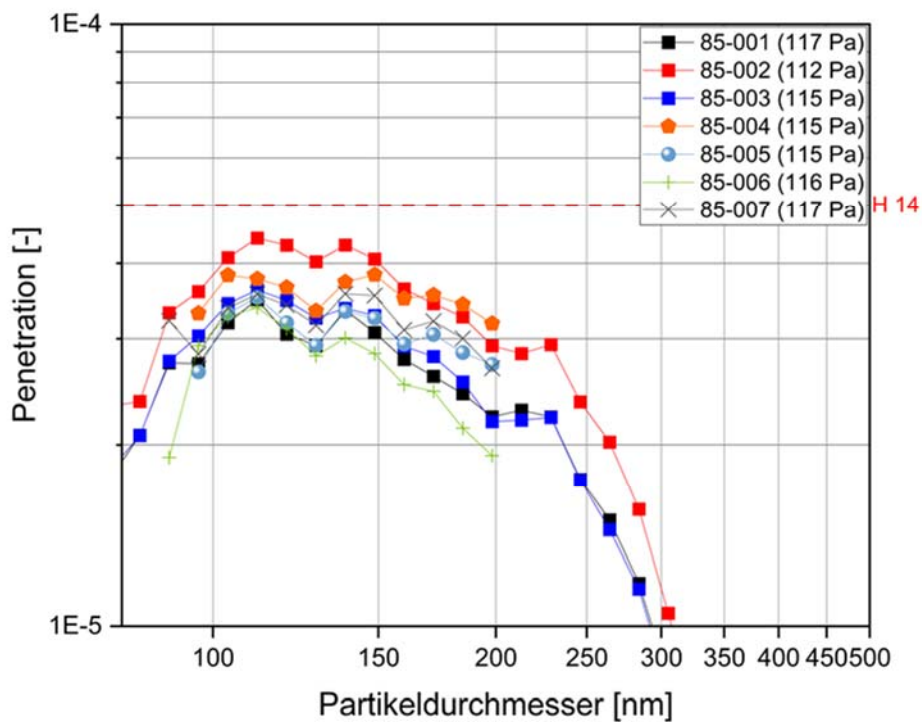


Abbildung 1-34: Wiederholmessungen der Penetration (Materialschwankung)

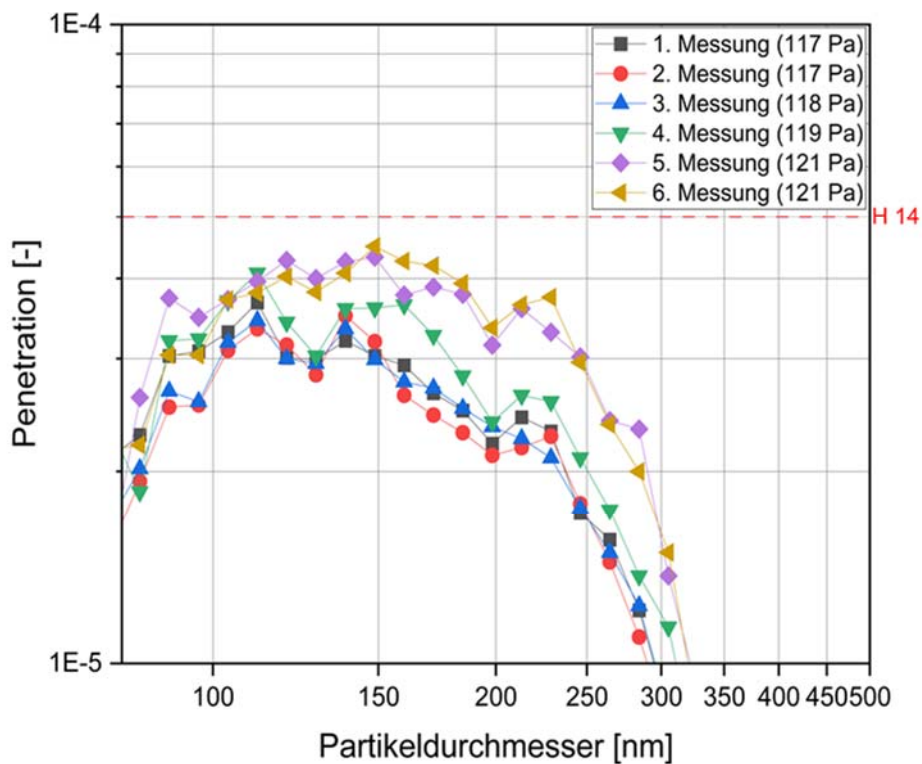


Abbildung 1-35: Wiederholmessungen der Penetration (Reproduzierbarkeit)

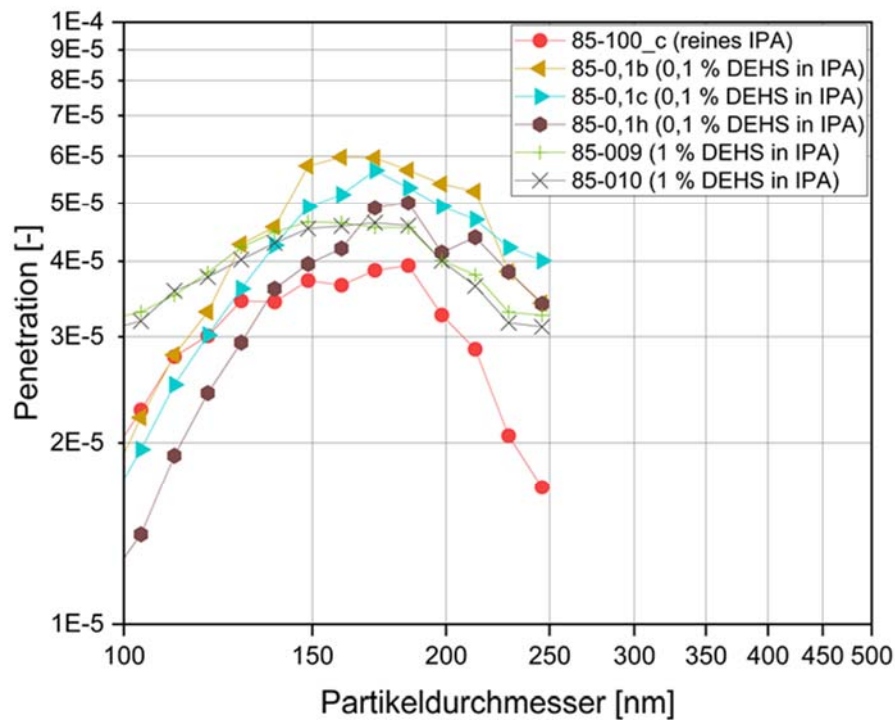


Abbildung 1-36: Penetrationsmessungen bei verschiedenen DEHS-Konzentrationen

Die Namen der Labore wurden für die Darstellung der Messergebnisse anonymisiert. Dies gilt auch für die Auswertung der Angaben zum Messaufbau (Tabelle 5).

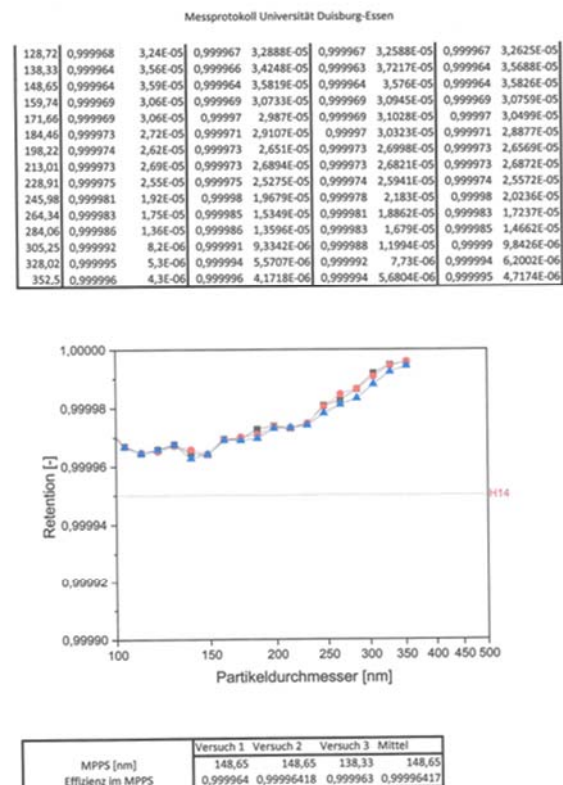
Durch die Angaben zum Messaufbau sollen eventuell Rückschlüsse auf Ursachen für Abweichungen der einzelnen Labore oder mögliche Fehlerquellen gezogen werden.

Tabelle 5: Angaben zum Messaufbau / zur Messung der einzelnen Labore

	Komponente	UDE	Labor 1	Labor 2	Labor 3	Labor 4	Labor 5	Labor 6	Labor 7
Betriebsart	Saugbetrieb				X		X	X	X
	Druckbetrieb	X	X	X		X			
Filterhalterbe- dienung	pneumatisch	X	X	X	X	X	X		
	manuell							X	X
Impaktor vorhanden	ja	X					X		X
	nein		X	X	X				
Neutralisator	Röntgenquelle	X	X	X					X
	radioaktive Quelle				X		X		
	Corona-Entlader ohne					X			
Messweise	monodispers	X	X	X	X		X		
	polydispers					X			X
Verdünnungs- stufe	ja	X	X	X	X		X		
	nein								X
SMPS-System	ja	X		X			X		X
	nein		X		X				
Messung Roh- /Reingas	im Wechsel	X	X	X	X				X
	zeitgleich						X		
Messung	Scan	X		X				X	X ?
	Einzelmesspunkte		X		X ?		X		
Aerosol	reines DEHS	X	X			X		X ?	X
	DEHS mit IPA verdünnt	X		X	X		X		

Abbildung 1-37 zeigt das Messprotokoll der FE1. So oder in ähnlicher Form wurden auch die Mess-
ergebnisse von den Teilnehmern des Rundversuches rückgemeldet und im Anschluss aufbereitet.

Messprotokoll Universität Duisburg-Essen	
Allgemein	
Datum:	24.05.2024
Medium:	85-100_c (H13)
Versuchsdurchführer:	Markus Wirt/Manuela Schroers
Versuchsparameter	
Aerosol:	DEHS/Isopropanol
Volumenstrom:	12 l/min
Anströmgeschwindigkeit:	2 cm/s
Anströmfläche:	100 cm²
Versuchsbedingungen und Geräte	
Aerosolbeaufschlagung:	mono-/polydispers
Aerosolgenerator:	TSI 3076
Druckmesser:	MKS Instruments 13,33 mbar
Massendurchflussmesser:	TSI 4000 series
Neutralisator:	TSI model 3088
DMA:	Palas DMC 3000 (Long)
SMPS:	Pallas U-SMPS 1050
Partikelzähler:	Pallas UF-CPC 50
Verdünnung:	VKI-10 x 2
Messmethode:	Scan
Filterprüfstand:	TSI 3160
Mittel	
Ergebnisse	
Druckdifferenzen	Δp_1 [Pa] Δp_2 [Pa] Δp_3 [Pa]
Vorher	113 113 113
Nachher	113 113 113,5
Mittel	
Versuch 1	
x_0 [nm]	Retention Penetration
37,88	0,999983 1,72E-05
40,706	0,999287 0,0007135
43,743	0,999541 0,0004593
47,006	0,999676 0,0003243
50,513	0,999785 0,0002151
54,282	0,999984 1,56E-05
58,332	0,999978 2,2E-05
62,684	0,999960 4,01E-05
67,361	0,999992 7,6E-06
72,386	0,999997 3,3E-06
77,787	0,999994 5,9E-06
83,59	0,999989 1,15E-05
89,827	0,999979 2,11E-05
96,529	0,999973 2,66E-05
103,73	0,999967 3,29E-05
111,47	0,999965 3,55E-05
119,79	0,999966 3,41E-05
Versuch 2	
x_0 [nm]	Retention Penetration
37,88	0,999983 1,7398E-05
40,706	0,998926 0,00107366
43,743	0,999413 0,00058749
47,006	0,999517 0,00048284
50,513	0,999652 0,00034778
54,282	0,999977 2,3407E-05
58,332	0,999963 3,657E-05
62,684	0,999969 3,0848E-05
67,361	0,999989 1,1453E-05
72,386	0,999993 6,6514E-06
77,787	0,999987 1,3165E-05
83,59	0,999978 2,2053E-05
89,827	0,999974 2,5683E-05
96,529	0,999967 3,3112E-05
103,73	0,999965 3,534E-05
111,47	0,999965 3,5349E-05
119,79	0,999966 3,4235E-05
Versuch 3	
x_0 [nm]	Retention Penetration
37,88	0,999978 2,2196E-05
40,706	0,999638 0,00346203
43,743	0,997715 0,00228525
47,006	0,996137 0,00168329
50,513	0,994121 0,00121211
54,282	0,991878 0,000914893
58,332	0,989851 0,000714893
62,684	0,987987 0,000510347
67,361	0,986299 0,000318E-05
72,386	0,984788 0,000218E-05
77,787	0,983376 0,00014893
83,59	0,982085 0,00010347
89,827	0,980894 0,0000714893
96,529	0,979799 0,00004893
103,73	0,978788 0,00003478
111,47	0,977850 0,000021211
119,79	0,976987 0,0000121211
Mittel	
x_0 [nm]	Retention Penetration
37,88	0,999981 1,8931E-05
40,706	0,99825 0,00174973
43,743	0,99889 0,0011068
47,006	0,99917 0,00083014
50,513	0,99940 0,0005916
54,282	0,99945 5,461E-05
58,332	0,99931 6,9165E-05
62,684	0,99942 5,8139E-05
67,361	0,99954 1,619E-05
72,386	0,99995 4,615E-06
77,787	0,99993 7,1517E-06
83,59	0,99997 1,306E-05
89,827	0,99977 2,2776E-05
96,529	0,99973 2,6588E-05
103,73	0,99965 3,3099E-05
111,47	0,99965 3,5426E-05
119,79	0,99966 3,4383E-05



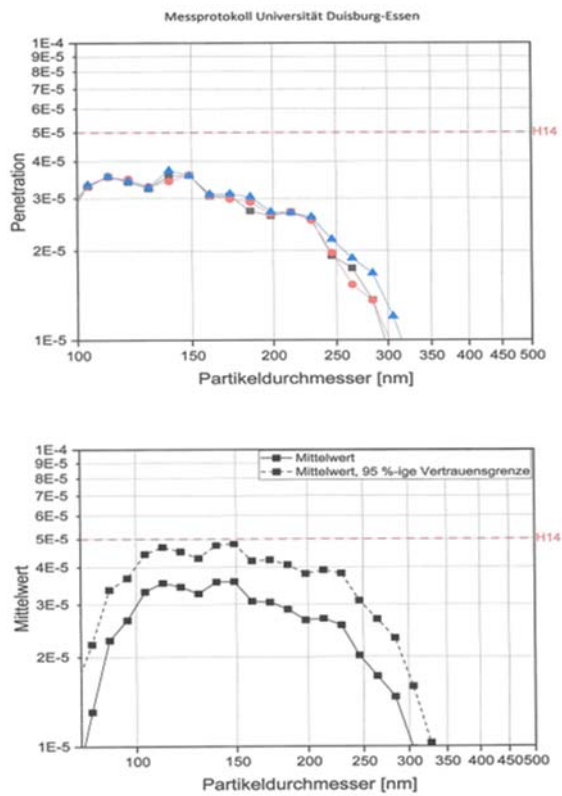


Abbildung 1-37: Messprotokoll FE1

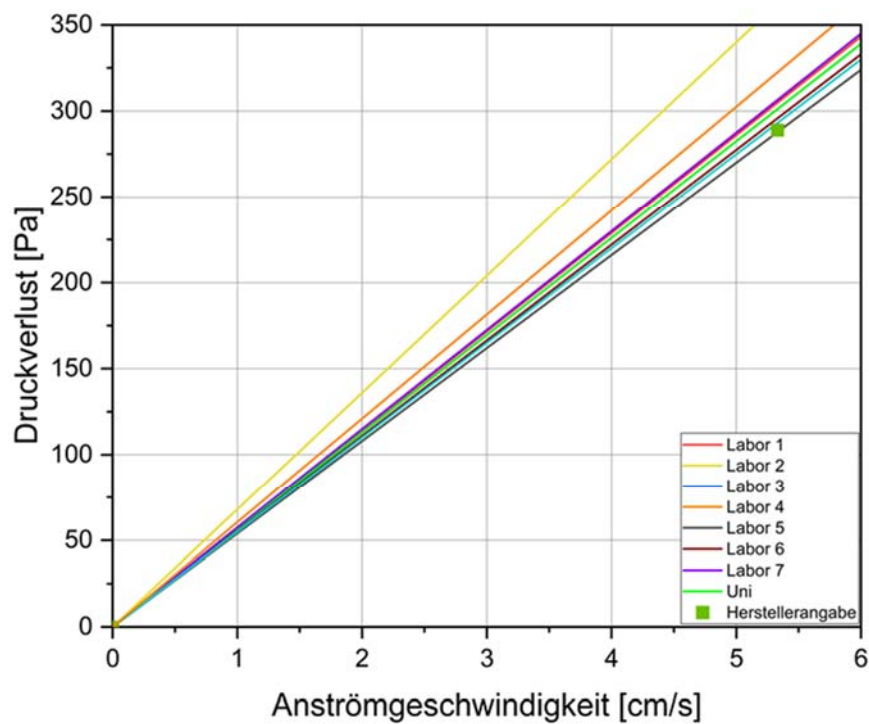


Abbildung 1-38: Vergleich der Druckverlustmessung

Aus Abbildung 1-38 wird die geringe Diskrepanz zwischen den Messergebnissen bezüglich des Druckverlustes der einzelnen Labore deutlich. Lediglich Labor 2 und 4 weisen eine signifikante Abweichung auf. Die Abweichungen entstehen im Wesentlichen durch Schwankungen bzw. Abweichungen im Volumenstrom und damit der Anströmgeschwindigkeit. Laut Norm ist eine Toleranz von $\pm 2\%$ des geforderten Volumenstroms zulässig. Die im Messaufbau durchströmte Fläche von 100 cm^2 darf ebenfalls eine Toleranz von $\pm 2\%$ aufweisen. Labor 2 hatte Schwierigkeiten bei der Einstellung des Volumenstroms, so dass die starke Abweichung von einer größeren Differenz zwischen tatsächlichem und gefordertem Volumenstrom herrühren könnte. Zusätzliche Fehlerquellen bei der Einstellung / Messung des Volumenstroms sind die Volumenstrommessgeräte selbst. Ihre Genauigkeit muss nach Norm bei $< 5\%$ vom Messwert liegen.

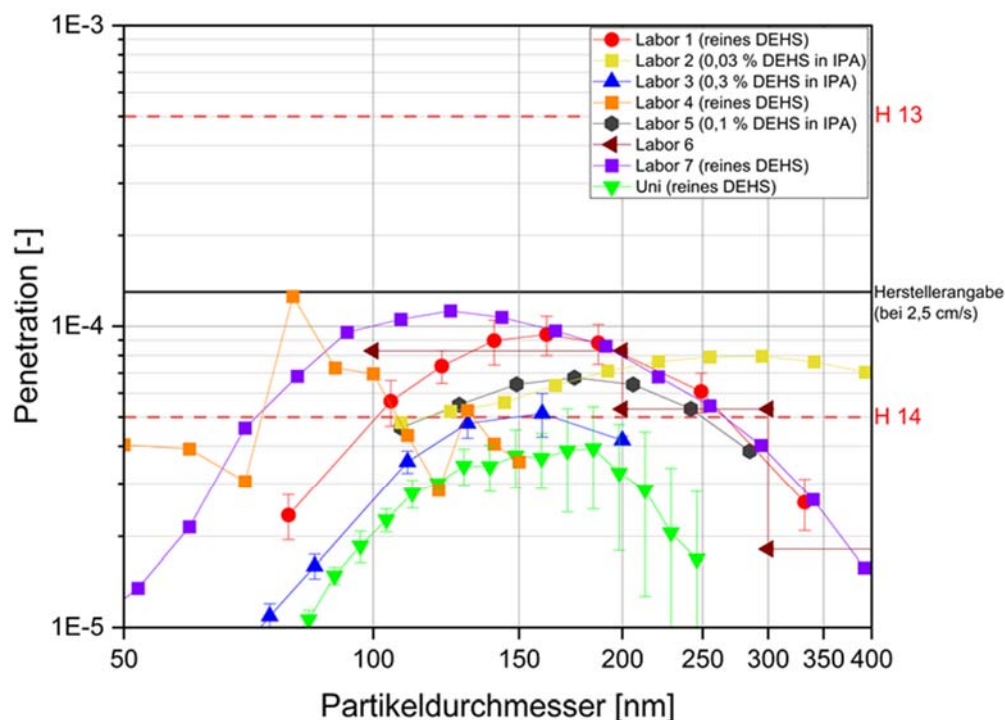


Abbildung 1-39: Vergleich der Penetrationsmessungen

Abbildung 1-39 zeigt die Ergebnisse des Ringversuches bezüglich der Penetration. Zur besseren Einordnung wurde die H14-Grenze in die Grafik eingefügt. Liegt das Maximum der Penetration oberhalb dieser Linie, wird das Filtermedium der H13-Klasse zugeordnet. Unterhalb dieser Linie erreicht das Filtermedium die Klasse H14. Der Großteil der Messkurven hat sein Maximum (MPPS) im Partikeldurchmesserbereich von 120 nm bis 150 nm. Kleinere Abweichungen in der Horizontalen können durch unterschiedliche Stützstellen während der Messung erklärt werden. Die Ursache für die größere Abweichung (Labor 2) ist durch einen höheren Volumenstrom zu erklären. Die Schwankungen bei der Penetration scheinen auf den ersten Blick gering zu sein. Bei genauerer Betrachtung und

Berücksichtigung der eingezeichneten H14-Grenze, kann dies jedoch für die Einstufung als H13- bzw. H14-Filter entscheidend sein. Die Filtermedium würden von der FE1 als H14 eingeordnet werden. Alle anderen Labore erreichen bei ihren Messungen die Qualitätsstufe H13. An der FE1 wurden deshalb weitere Untersuchungen durchgeführt, um mögliche Einflussfaktoren zu ermitteln.

1.5.2 Parametervariation

Zunächst wurden die Angaben aus den Fragebögen ausgewertet und verschiedene Parameter ausgewählt, die potentiell zu Unterschieden führen könnten:

- Saug- oder Druckbetrieb
- Filtermedienhalter: pneumatisch/manuell
- Filterfläche größer als 100 cm²
- Soft-X-Ray / Kr-Quellen; 1 / 2 Neutralisatoren
- mit (bis 10.000) / ohne Verdünnungsstufen
- DEHS: rein / extrem verdünnt (bis zu 0,01 % DEHS in IPA)
- polydisperse Beaufschlagung des Filters
- SMPS im Scanbetrieb, Einzelmesspunkte (auch mal nur 4 Stützstellen)
- SMPS und CPC von TSI und Palas und unterschiedliche Typen TSI - CPCs
- unterschiedliche Aerosolgeneratoren
- 2 Messstellen oder nur eine im Reingas (mit/ohne) Filter
- Innendurchmesser der Probenahmesonde bzw. -leitung 4 mm / 16 mm
- Länge der Probeleitung

In den verschiedenen Laboren wurden sowohl Röntgenquellen, als auch radioaktive Quellen zur Neutralisation des Prüfaerosols verwendet. Dies ergab keinen signifikanten Unterschied bei den Messergebnissen, so dass auf eine weitere Betrachtung dieses Punktes verzichtet wurde.

Scan / Einzelpunktmessung

Um größere Umbauten am Prüfstand vorerst zu vermeiden, wurde mit Untersuchungen begonnen, die sich schnell umsetzen lassen. Deshalb wurde zunächst der Fokus auf die Messung selbst gelegt und die Fragestellung bearbeitet, ob ein Unterschied zwischen Scan- und Einzelpunktmessung bestehe. Bei der Einzelpunktmessung wurde im zweiten Schritt die Messzeit auf 2 min verkürzt. Wie in Abbildung 1-40 gut zu erkennen, ergab sich zunächst zwischen dem Scan und der Einzelmessung kein signifikanter Unterschied. Bei der anschließenden Verkürzung der Messzeit pro Einzelpunkt auf 2 min ist eine deutliche Verschlechterung der Penetration zu erkennen. Die Messkurve lieferte ähnliche Ergebnisse wie Labor 1 und Labor 5.

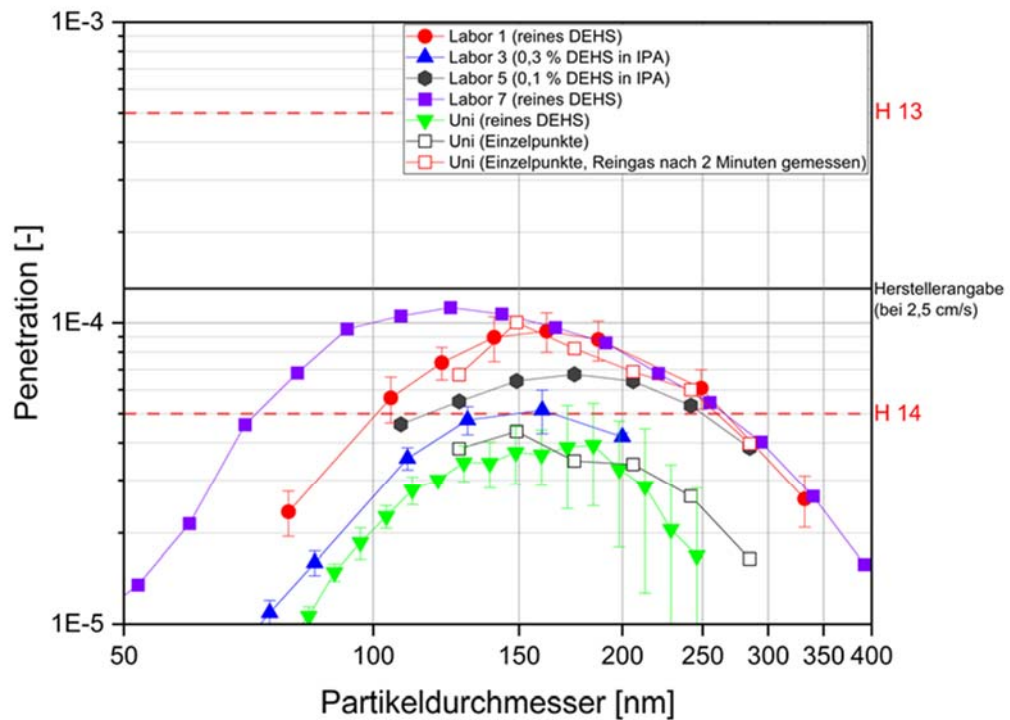


Abbildung 1-40: Vergleich Scan- und Einzelpunktmessung

Länge der Probenahmeleitung

Im nächsten Schritt wurde die Probenahmeleitung verkürzt, um den Einfluss der Länge der Zuleitungen zum CPC zu untersuchen. Wie in Abbildung 1-41 zu sehen, konnte durch die Verkürzung der Zuleitung keine Änderung festgestellt werden.

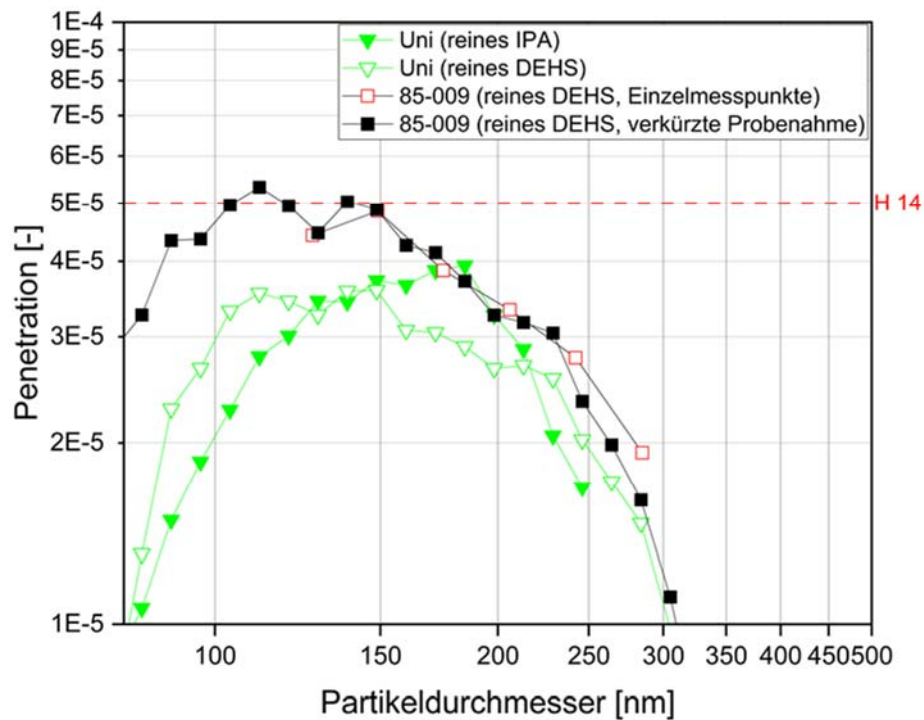


Abbildung 1-41: Vergleich der Penetration bei Variation der Probenahmeleitung

Anströmgeschwindigkeit

Einen großen Einfluss auf den ermittelten Fraktionsabscheidegrad hat die Anströmgeschwindigkeit. Abbildung 1-42 zeigt den Fraktionsabscheidegrad bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten. Deutlich zu sehen ist der Anstieg der Penetration bei steigender Anströmgeschwindigkeit.

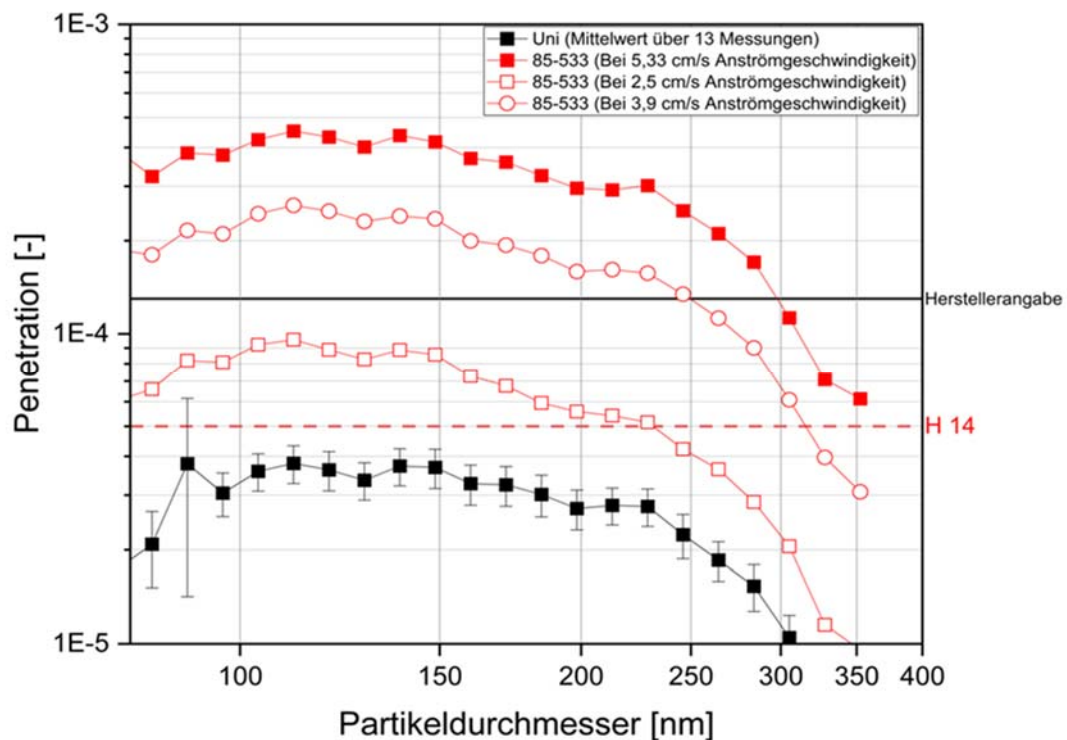


Abbildung 1-42: Vergleich der Penetration bei Variation der Anströmgeschwindigkeit

Linearität der Partikelkonzentration der verwendeten CPCs

Des Weiteren wurde die Linearität der Partikelkonzentration des verwendeten CPCs untersucht. Dazu wurden verschiedene Partikelkonzentrationen über das SMPS-System vorgegeben und mit zwei unterschiedlichen CPCs (1x Fa. Palas und 1x TSI 3022) gemessen. Anschließend wurden die gemessenen Konzentrationen der beiden CPCs ins Verhältnis gesetzt. Im Idealfall ergibt sich eine lineare Abhängigkeit, da beide Messgeräte im angegebenen Messbereich identische Ergebnisse liefern sollten. In Abbildung 1-43 ist das Ergebnis grafisch dargestellt. Die Messergebnisse des Vergleichs-CPCs von TSI weisen eine konstante systematische Abweichung von ca. - 40% auf, daher die unterschiedlichen Konzentrationsangaben der beiden CPCs. Im unteren und mittleren Messbereich bis ca. 6000 P/cm³ ist das Verhältnis annähernd linear. Bei höheren Partikelkonzentrationen ist die Abhängigkeit eher exponentiell. Diese hohen Konzentrationen sollten während der Messung nicht erreicht werden, da die Ergebnisse verfälscht werden.

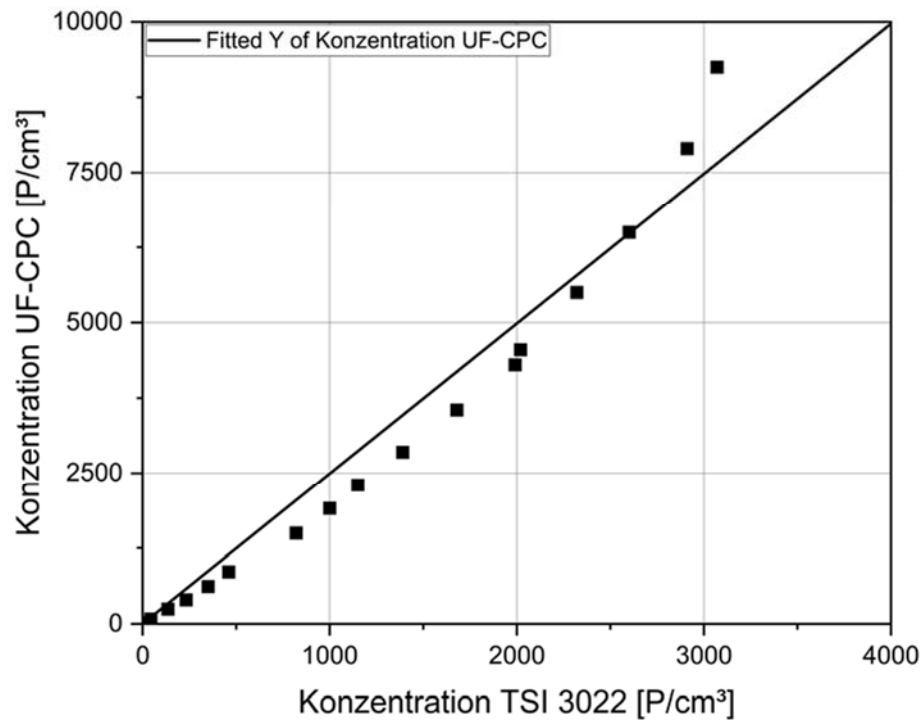


Abbildung 1-43: Vergleich Partikelkonzentration mit zwei unterschiedlichen CPCs

Position der Probenahmestelle

Des Weiteren wurde die Position der Probenahmestelle untersucht.

Die Abbildungen Abbildung 1-44 bis Abbildung 1-48 zeigen die Partikelanzahlkonzentration an verschiedenen Probenahmestellen.

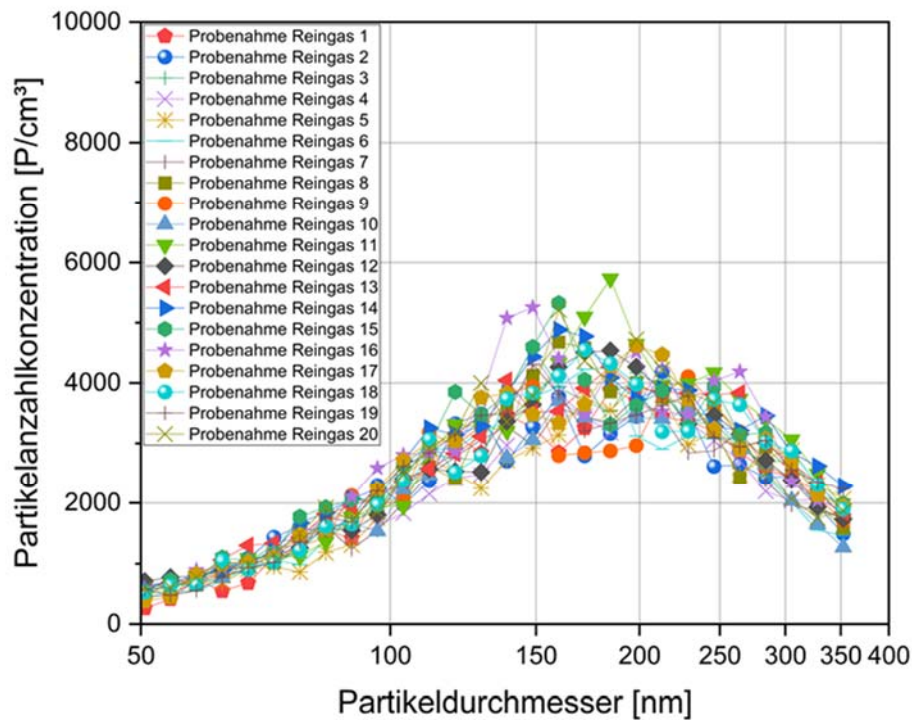


Abbildung 1-44: Probenahme Reingasseite ($v = 2\text{ cm/s}$)

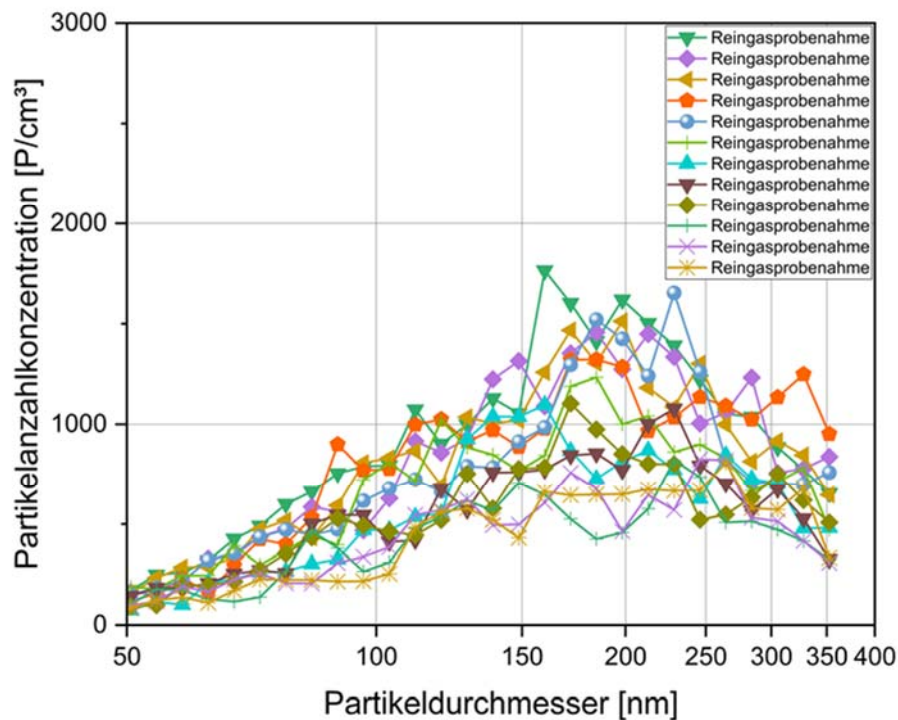


Abbildung 1-45: Probenahme Reingasseite ($v = \text{geändert}$)

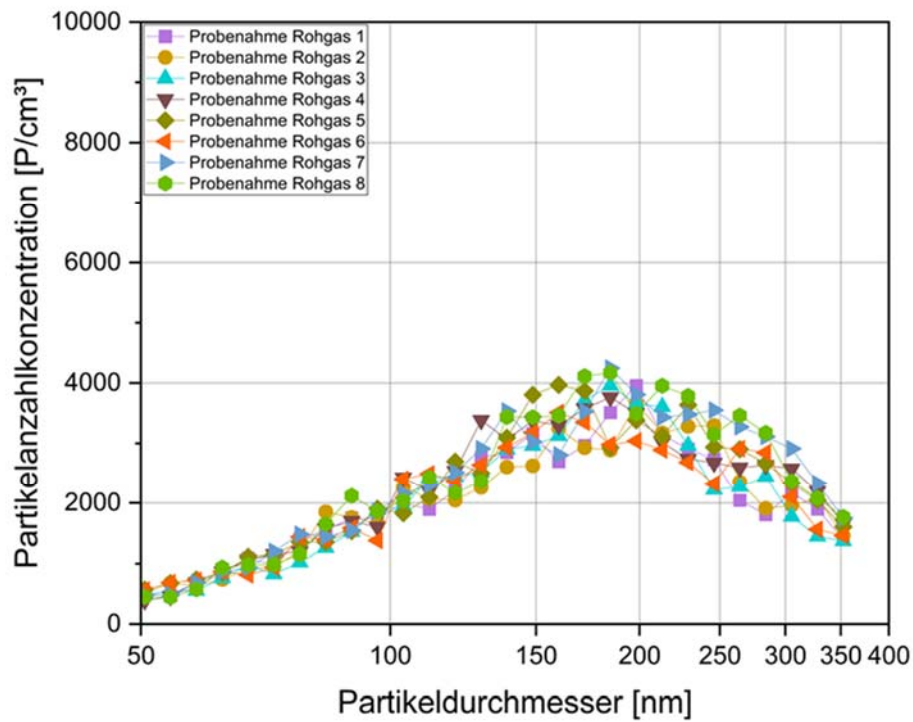


Abbildung 1-46: Probenahme Rohgasseite ($v = 2\text{cm/s}$)

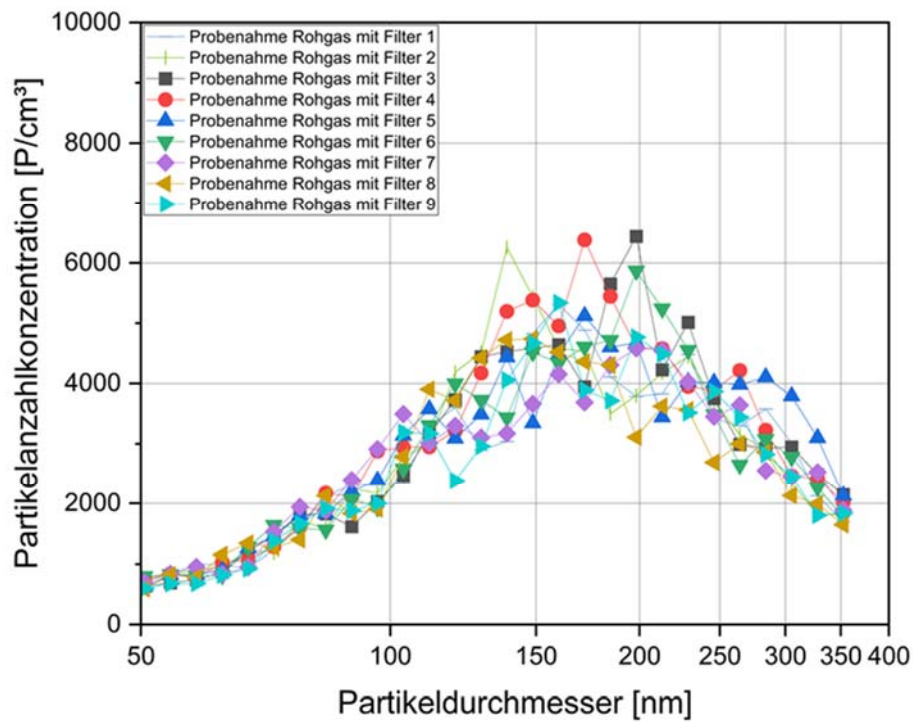


Abbildung 1-47: Probenahme Rohgasseite ($v = \text{geändert}$)

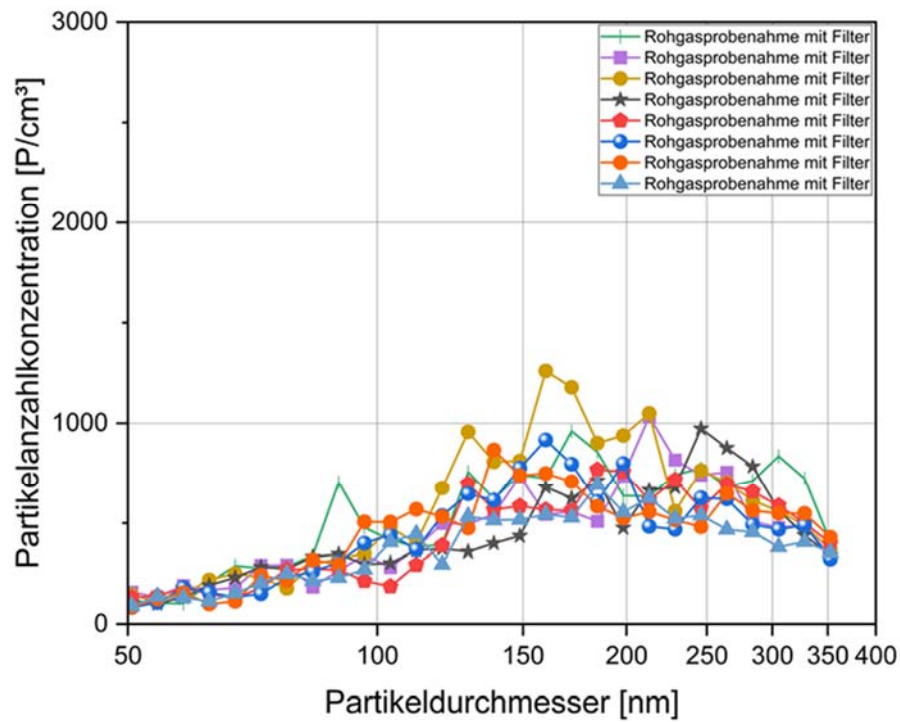


Abbildung 1-48: Probenahme Rohgasseite mit Filter ($v = \text{geändert}$)

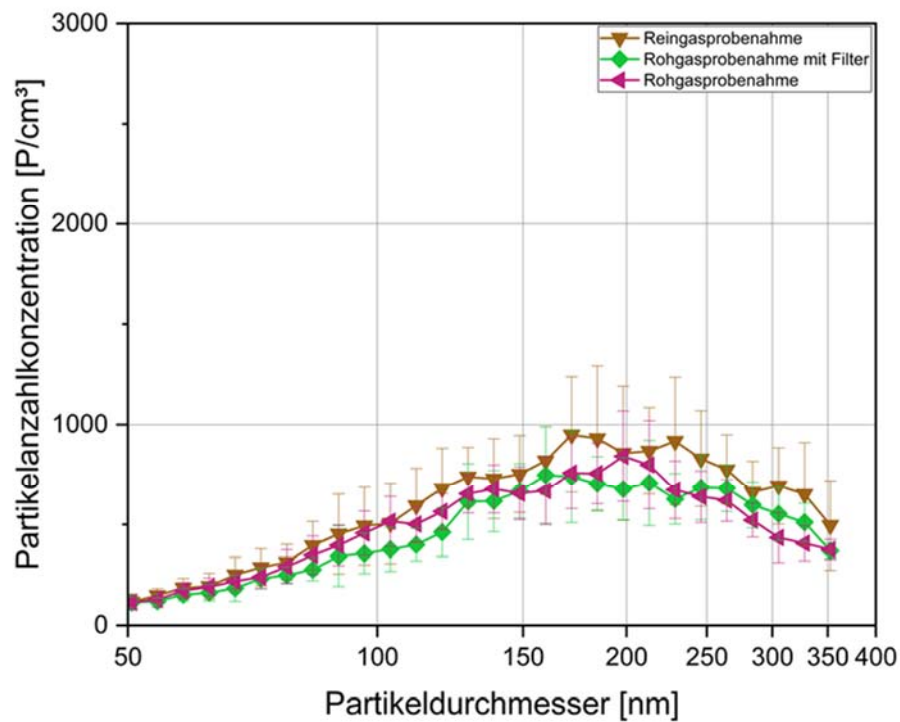


Abbildung 1-49: Probenahme Mittelwerte Vergleich

Wie Abbildung 1-49 deutlich zeigt, kann ein Einfluss der Probenahmestelle ausgeschlossen werden. Die Mittelwerte aller Messungen liegen innerhalb der Schwankungen der Einzelmessungen.

Verdünnungsstufe

Anschließend wurden Untersuchungen bezüglich der verwendeten Verdünnungsstufen bei der Rohgasmessung durchgeführt. Bei der, an der FE1 verwendeten Verdünnungsstufe handelt es sich um eine VKL-10 der Fa. Palas.

- Beispielrechnung Palas:

<u>Partikelgröße</u> [µm]	<u>Partikelanzahl</u> vorher	<u>Partikelanzahl</u> nachher	<u>Verhältnis</u>
0,2	151648	15166	~10
0,3	71604	7290	9,8
0,5	4305	524	8,2
0,7	360	65	5,5
1,0	82	21	3,9
<u>Gesamt</u>	227999	23066	9,9

- Verdünnung nicht über den kompletten Partikelgrößenbereich gleich

→ Daher: Überprüfung des Verdünnungsfaktors wichtig!

Ein weiterer Punkt, der untersucht wurde, war die Verwendung von reinem DEHS bzw. mit IPA verdünntem DEHS.

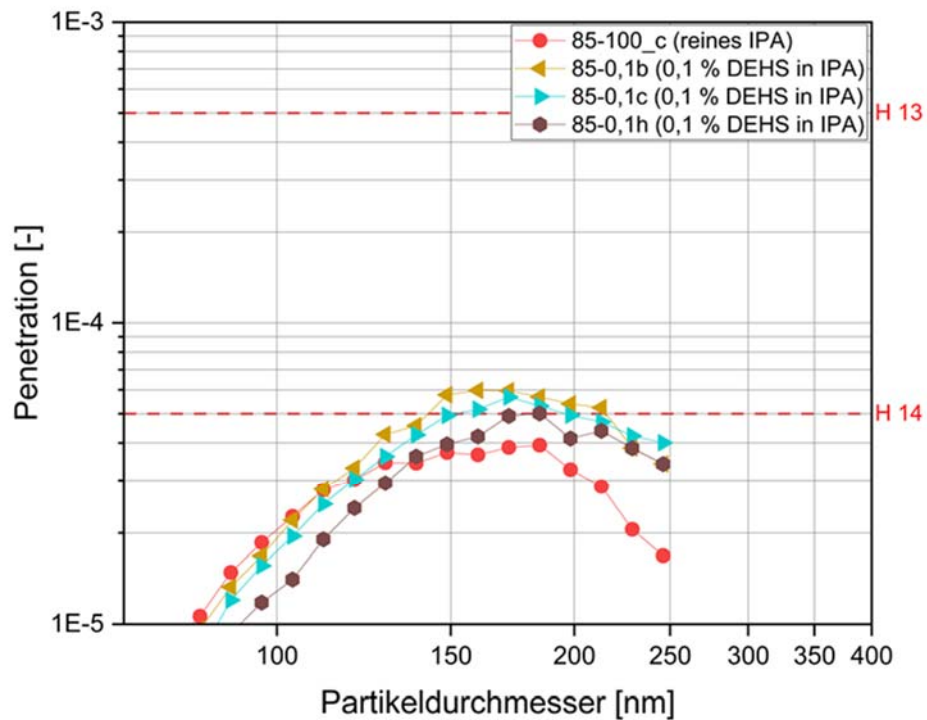


Abbildung 1-50: Messungen mit reinem und verdünntem DEHS (SMPS-Messung)

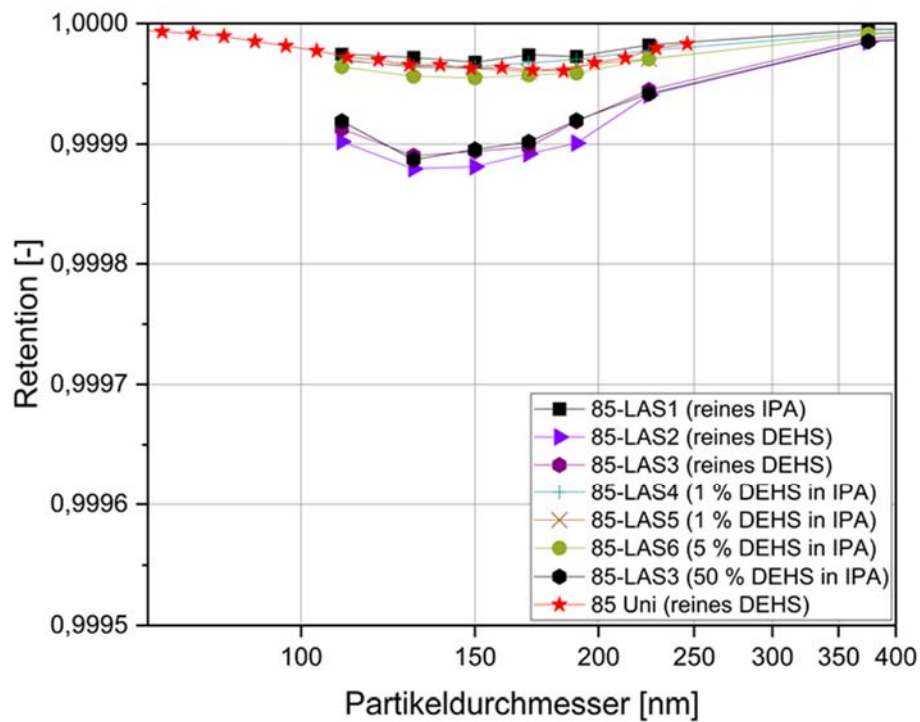


Abbildung 1-51: Messungen mit reinem und verdünntem DEHS (SMPS-Messung und LAS-Messung)

Messungen mit optischem Partikelzähler

Zusätzlich wurden an der FE1 Messungen mit einem optischen Partikelzähler (Laseraerosolspektrometer (3340 von TSI)) durchgeführt, welche mit den SMPS-Messungen verglichen werden sollen. In Abbildung 1-51 wird eine monodisperse (mobile) SMPS-Messung mit reinem DEHS (85 Uni (reines DEHS)) mit Messungen verglichen, die mit Hilfe des optischen Partikelzählers polydispers durchgeführt wurden (85-LAS1-3). Es ist zu erkennen, dass zwischen der polydispersen Messung 85-LAS1 mit Isopropanol und der monodispersen Messung 85 Uni mit DEHS eine gute Übereinstimmung besteht. Im Vergleich dazu liegen die Fraktionsabscheidegrade der beiden polydispersen Messungen mit DEHS niedriger. Dies könnte an dem Druckverlustanstieg und der damit stattfindenden Veränderung des Glasfasermaterials liegen. Bei der polydispersen Messung mit Isopropanol bzw. der monodispersen Messung mit DEHS erhöht sich der Druckverlust um 2-3 Pa (ca. 2 % relativer Druckverlustanstieg). Bei den polydispersen Messungen mit DEHS erhöht sich der Druckverlust jedoch um ca. 20 Pa pro Messung (ca. 17 % relativer Druckverlustanstieg).

In Abbildung 1-52 werden die Messergebnisse aus Abbildung 1-51 mit weiteren Messungen, welche mit verschieden stark verdünntem DEHS durchgeführt wurden, verglichen. Hierbei wird deutlich, dass eine niedrige Verdünnung des DEHS keinen Einfluss auf den Fraktionsabscheidegrad hat. Erst ab einer Verdünnung von 50 % nimmt der Fraktionsabscheidegrad einen ähnlichen Wert wie bei reinem DEHS an. Dies kann man wieder mit einem stärkeren Druckverlustanstieg aufgrund des DEHS erklären.

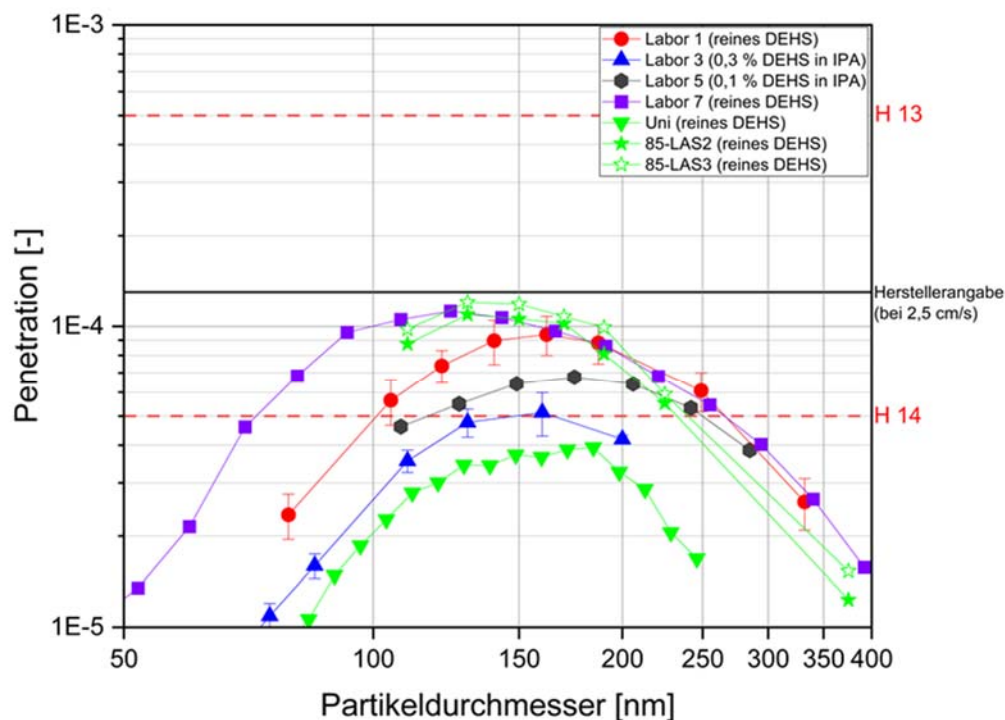


Abbildung 1-52: LAS-Messung mit reinem DEHS in den Laborvergleich eingefügt

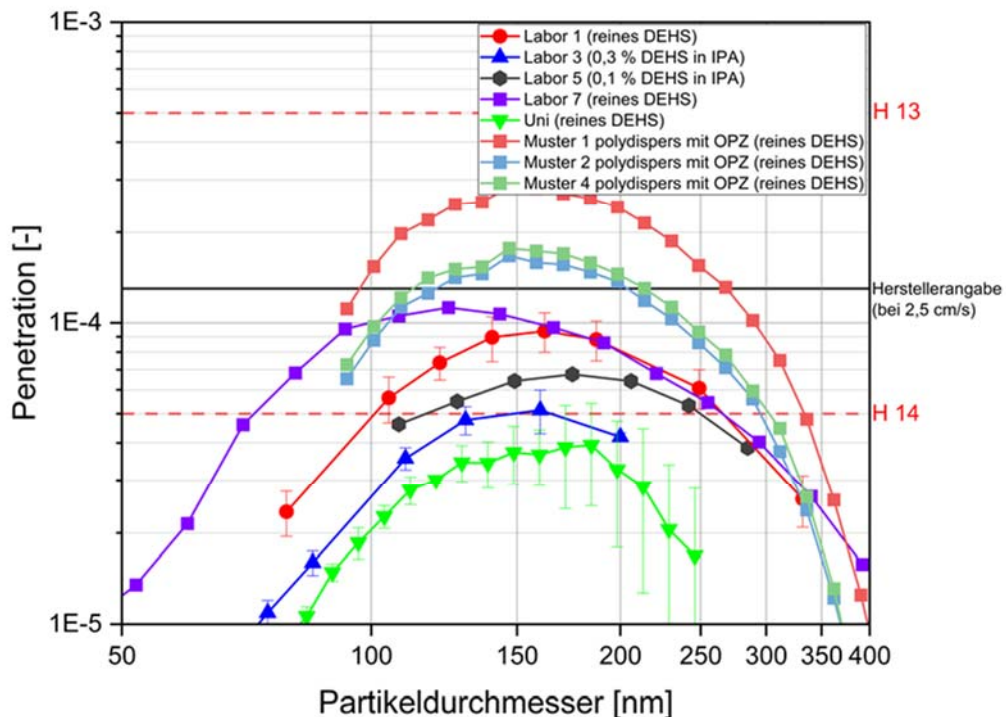


Abbildung 1-53: Vergleich der Ergebnisse verschiedener Labore mit polydispersen Messungen mit optischem Partikelzähler

Aus Abbildung 1-53 ist gut zu erkennen, dass die polydispersen Messungen mit dem optischen Partikelzähler etwas schlechtere Werte für den Fraktionsabscheidegrad als der Laborvergleich ergeben. Dies ist abermals mit dem steigenden Druckverlust während der polydispersen Beaufschlagung mit reinem DEHS zu erklären. In Abbildung 1-19 wurde bereits deutlich der exponentielle Anstieg des Druckverlustes bei polydisperser Messung dargestellt.

Auswertung mit / ohne Mehrfachladungskorrektur

Abschließend wurden die Messsoftware und die Rohdaten nochmal genauer überprüft.

Bei der Messsoftware gibt es die Möglichkeit einer Mehrfachladungskorrektur (MCC). Diese kann manuell ein- oder ausgeschaltet werden. Es wurden verschiedene Muster monodispers einmal mit und einmal ohne MCC ausgewertet. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 1-54. Es ist deutlich zu erkennen, dass alle Messungen mit MCC zum einen etwas schlechtere Ergebnisse bezüglich des Fraktionsabscheidegrades liefern, als auch eine geringfügige Verschiebung des MPPS zu höheren Partikeldurchmessern bewirken. Daher wurden das neutralisierte Aerosol anschließend bezüglich Mehrfachladungen genauer untersucht.

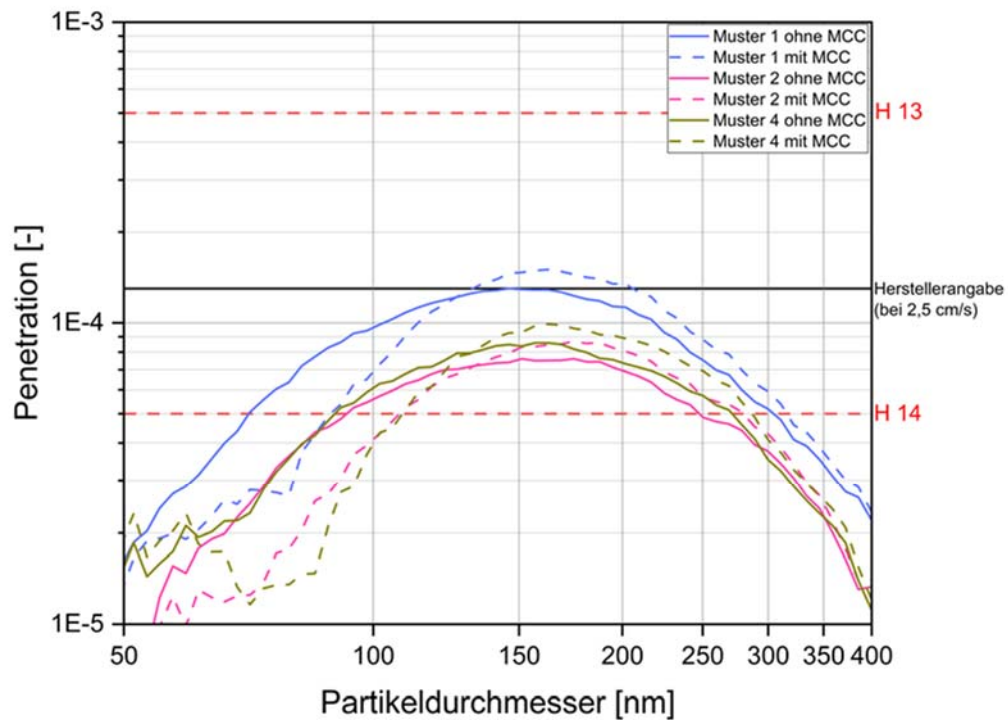


Abbildung 1-54: Messung verschiedener Muster mit und ohne multiple charge correction

Mittels DMA wurde verschiedene Partikelgrößenbereiche aus dem Aerosol extrahiert und anschließend mit einem optischen Partikelzähler die Anzahlkonzentration von Partikelgrößen ermittelt. In Abbildung 1-55 ist die Auswertung für mehrere Durchmesserbereiche und in Abbildung 1-56 nochmal gesondert für den Partikeldurchmesser von 140nm zu sehen. Die gemessene Partikelanzahlkonzentration im eingestellten Partikeldurchmesserbereich ist jeweils am größten. Es gibt aber in allen Bereichen auch Partikel mit größerem, als dem eingestellten Durchmesser. Dies zeigt, dass im Aerosol mehrfach geladene Partikel vorkommen und ohne Korrektur das wahre Messergebnis verfälschen. Die Abbildung 1-57 bis Abbildung 1-60 zeigen weitere Auswertungen der Messungen, die die Notwendigkeit der MCC untermauern.

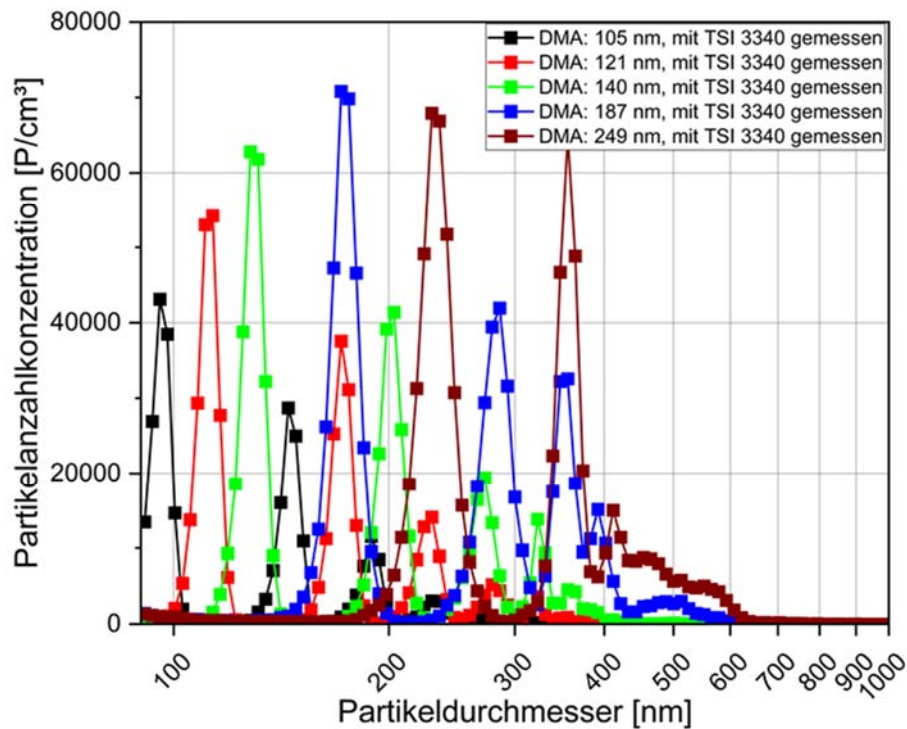


Abbildung 1-55: DMA-Klassierung und Messung mit optischem Partikelzähler

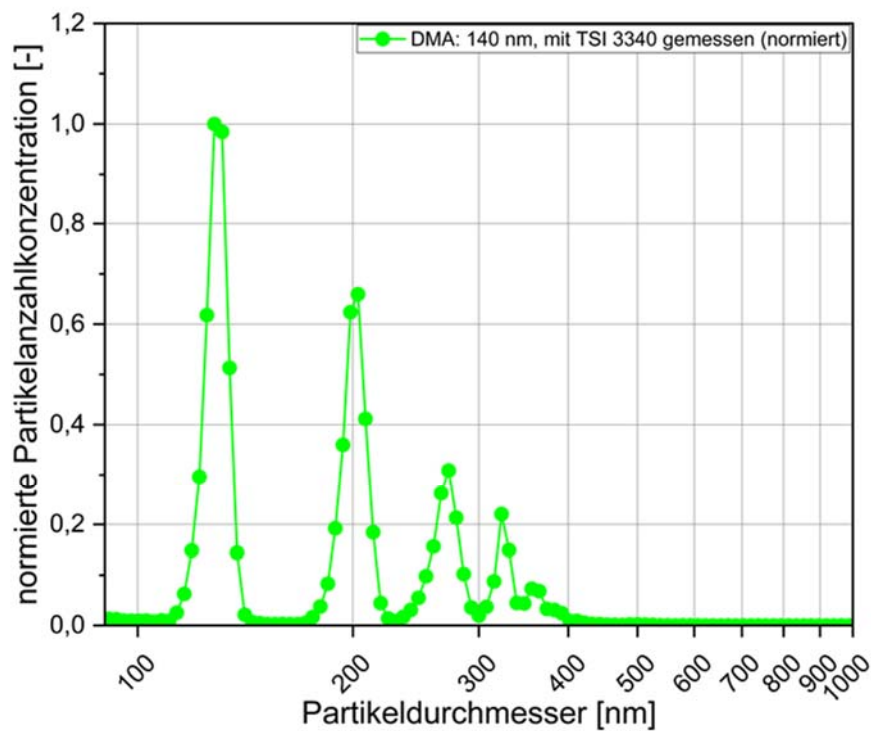


Abbildung 1-56: DMA-Klassierung (Partikelgröße 140 nm) und Messung mit optischem Partikelzähler

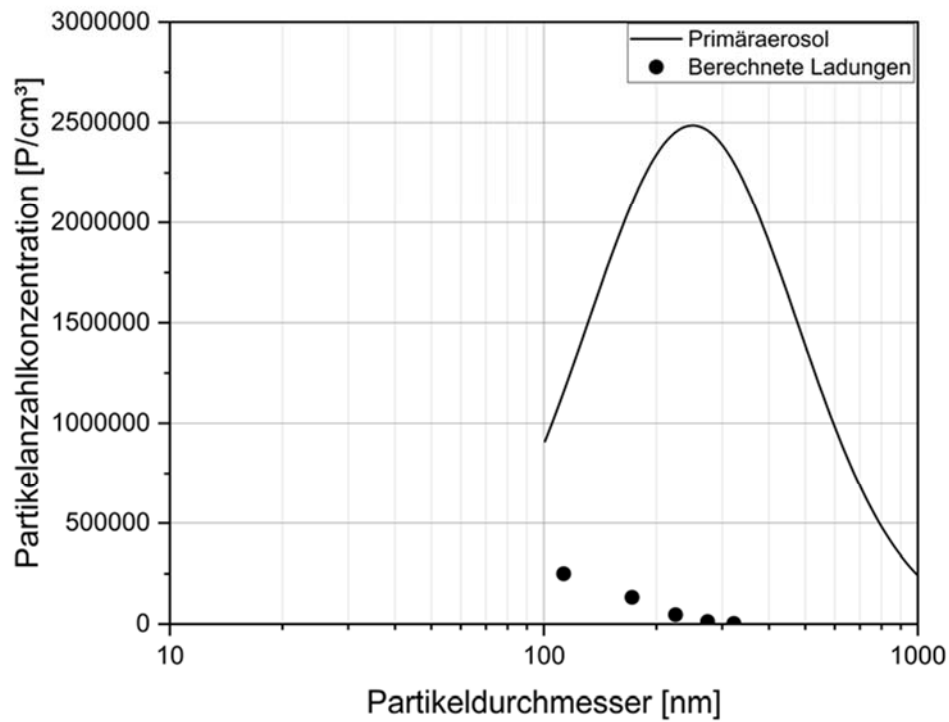


Abbildung 1-57: DMA-Klassierung des Primäraerosols mit berechneten Ladungen

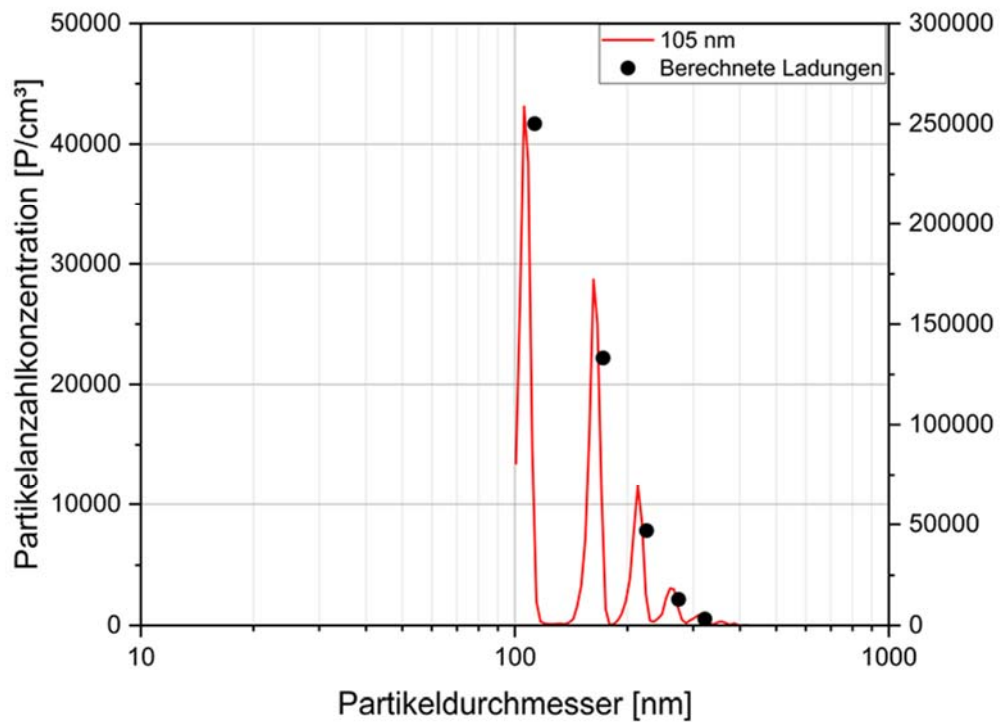


Abbildung 1-58: DMA-Klassierung der Partikelgröße 105nm im Vergleich mit berechneten Ladungen

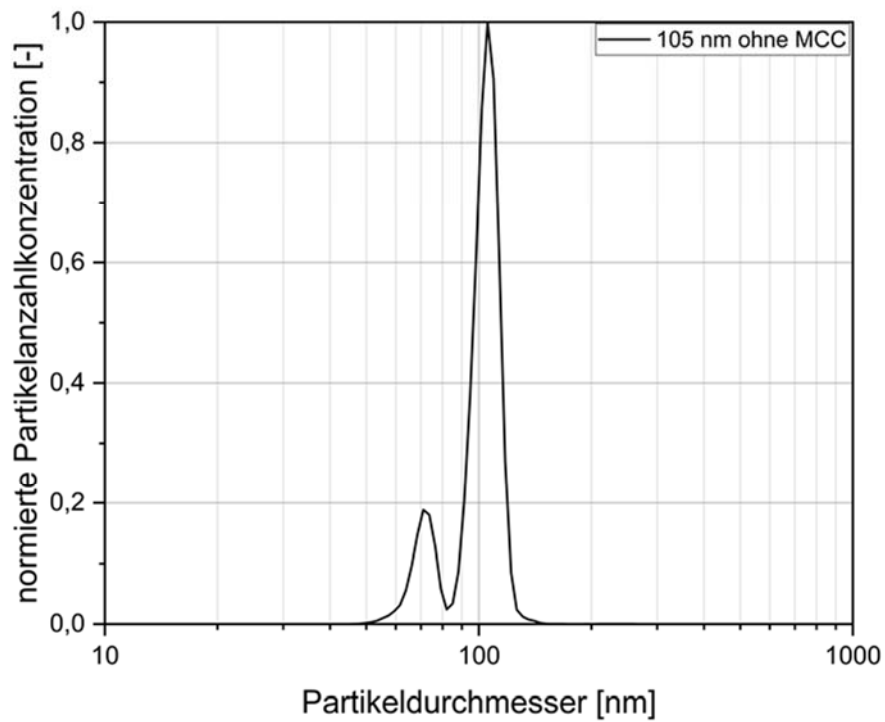


Abbildung 1-59: DMA-Klassierung der Partikelgröße 105nm ohne eingeschalteter multiple charge correction

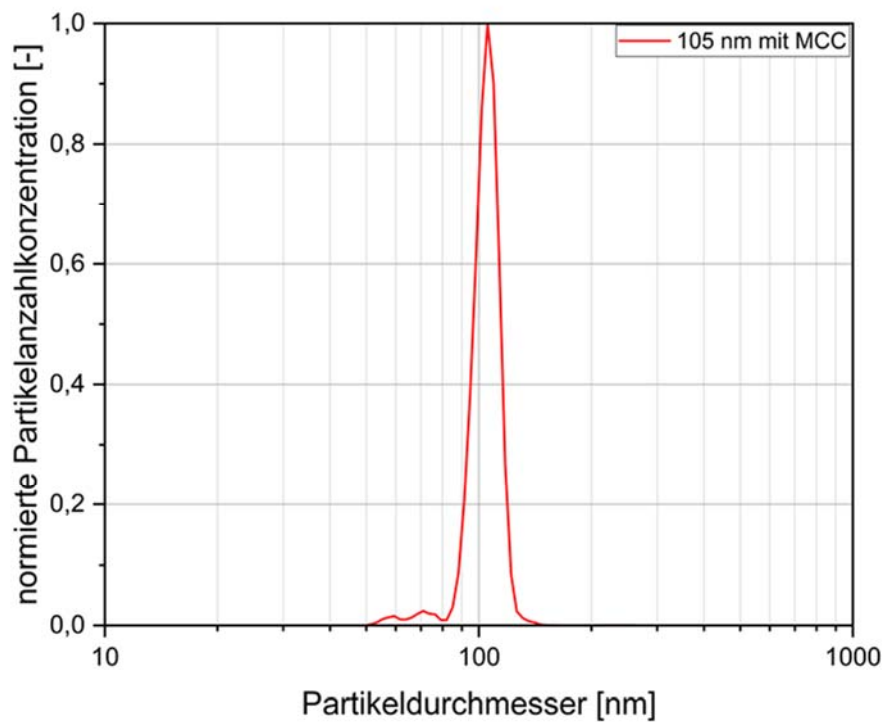


Abbildung 1-60: DMA-Klassierung der Partikelgröße 105nm mit eingeschalteter multiple charge correction

Entladung

Optional konnten die Labore im Rundversuch 1 das Filtermedium entladen und anschließend den Fraktionsabscheidegrad bzw. die Penetration bestimmen.

Zur Konditionierung und damit Neutralisierung der elektrostatischen Oberflächenladungen an den Fasern des Filters wird Isopropylalkohol (IPA, gemeinhin als Isopropanol oder 2-Propanol bekannt) verwendet. Isopropanol wird dazu in eine definierte Prüfkammer eingefüllt. Der Alkohol verdunstet, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Isopropanol-Dampf und der eingeschlossenen Umgebungsluft einstellt. Das flüssige Isopropanol kommt dabei nicht in Kontakt mit dem Filtermedium. Nachdem die Konditionierung durchgeführt wurde, erhält man bei der Filterprüfung den minimalen Fraktionsabscheidegrad; die elektrostatische Aufladung der Fasern wurde minimiert.

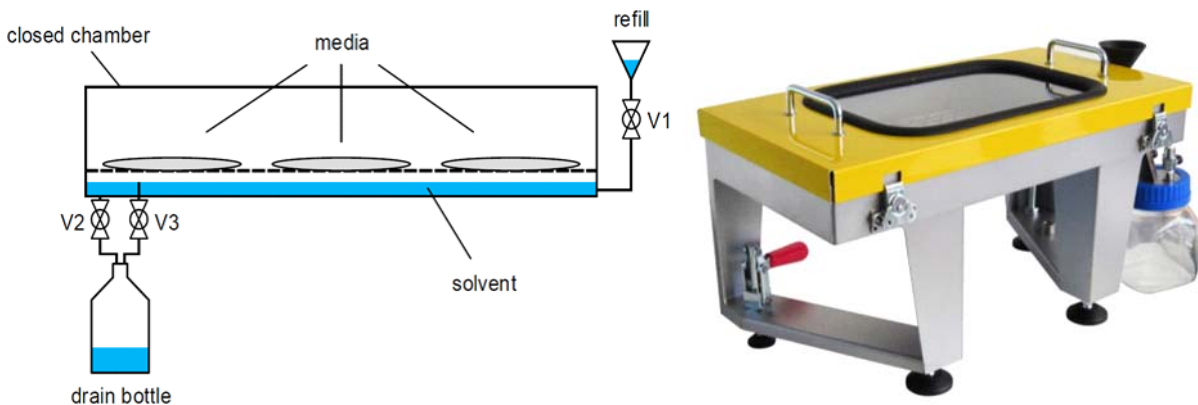


Abbildung 1-61: schematischer Aufbau der Konditionierungskammer (links) und die an der Uni DUE verwendete kleine Konditionierungskammer der Firma TOPAS (TDC 585)

Die Abbildung 1-61 links zeigt schematisch eine Ausführungsform der Prüfkammer zur Konditionierung von KFZ-Innenraumfiltern bzw. der entsprechenden Medien. Das zu prüfende Innenraumfilterelement (alternativ das Filtermedium) muss in voller Größe ohne Kontakt zu Seitenwänden oder Abdeckung eingebracht werden können. Das Stapeln von Prüflingen ist nicht zulässig. Günstig sind separate Zu- und Abflüsse für das IPA. Es muss gewährleistet sein (zum Beispiel durch ein grobmaschiges Gitter mit einer möglichst geringen Auflagefläche), dass der Prüfling keinen direkten Kontakt zum flüssig vorgelegten IPA hat, der Dampf jedoch ungehindert passieren kann. Zur Entladung muss jeweils der komplette Bodenbereich mit flüssigem IPA bedeckt sein. Die Höhe des Behältnisses muss derart ausgeführt sein, dass die IPA-Vorlage ausreichend ist, um nach dem Schließen des Deckels das eingeschlossene Innenvolumen an jeder Stelle komplett zu sättigen und nicht im Verlauf des Gesamtprozesses komplett zu verdampfen. Es ist sicherzustellen, dass das Gesamtsystem dicht ist und dass auch bei der Entleerung des Behältnisses kein direkter Kontakt zwischen Prüfling und IPA entstehen kann. Die großen Konditionierungskammern nach DIN EN ISO 16890-4 wurden aufgrund von Vorversuchen (s. Einleitung) als ungeeignet eingeschätzt.

Eine alternative Auslegung/Konstruktion für ein Prüfgehäuse darf eingesetzt werden, wenn der Anwender nachweisen kann, dass mit dieser alternativen Konstruktion ebenfalls eine vollständige Konditionierung, wie bei Einsatz eines Prüfgehäuses nach den o. g. Vorgaben, erzielt werden kann.

An der FE1 wurden Medien in der in Abbildung 1-61 gezeigten Kammer entladen und anschließend vermessen. Die Ergebnisse der FS1, sowie von anderen Laboren, die die Entladung der Medien durchgeführt haben, sind in Abbildung 1-62 dargestellt. Bei dem verwendeten Glasfasermaterial ist theoretisch keine Aufladung der Fasern zu erwarten, welche die Abscheideeffizienz beeinflussen könnte. Bei den Messergebnissen der FE1 ist eine minimale Beeinträchtigung durch die Entladung des Materials zu erkennen, die jedoch auch durch Materialschwankungen zu erklären sein könnte. Eine ähnliche Schwankungsbreite ist auch bei den Ergebnissen von Labor 3 zu sehen. Auch hier ist keine signifikante Beeinflussung des Messergebnisses durch die Entladung ersichtlich.

Bei den Entladungsversuchen wurde in folgenden Schritten vorgegangen:

1. Das Filtermedium wird zunächst im Neuzustand geprüft. Druckdifferenz, Fraktionsabscheidegrad und Gewicht werden gemessen und dokumentiert. Testaerosol für die Messung des Abscheidegrades ist DEHS.
2. Derselbe Prüfling wird bei Nennvolumenstrom und 23°C / 50 % rel. Feuchte bis zur Massenkonzanz auf 0,1 g hinsichtlich Feuchte und Temperatur konditioniert (24 Stunden normalklimatischen Bedingungen ausgesetzt). Das Zeitintervall muss mindestens 30 Minuten betragen. Die Angabe des Gewichtes erfolgt auf 0,01 g genau.
3. Die Konditionierung des Prüflings erfolgt in der Prüfkammer (Abbildung s.o.) Die Temperatur bei der Entladung soll bei $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ liegen. Für die Konditionierung werden 24 h für Filter (d.h. ohne Adsorbentien) oder entsprechende Medien angesetzt
4. Nach der unter 3 vorgegebenen Konditionierungszeit wird das Prüffilterelement unverzüglich aus der Kammer entnommen, gewogen und für mindestens 24h bei Raumklima unter dem Abzug abgedampft. Der Prüfling wird im Anschluss im Prüfstand nach DIN 71460-1 bei 23°C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit bis zur Massenkonzanz für mindestens 30 min bei Nennvolumenstrom durchströmt. Das Gewicht ist auf 0,01g zu bestimmen. Danach wird erneut die Druckdifferenzkurve und der Fraktionsabscheidegrad bestimmt.

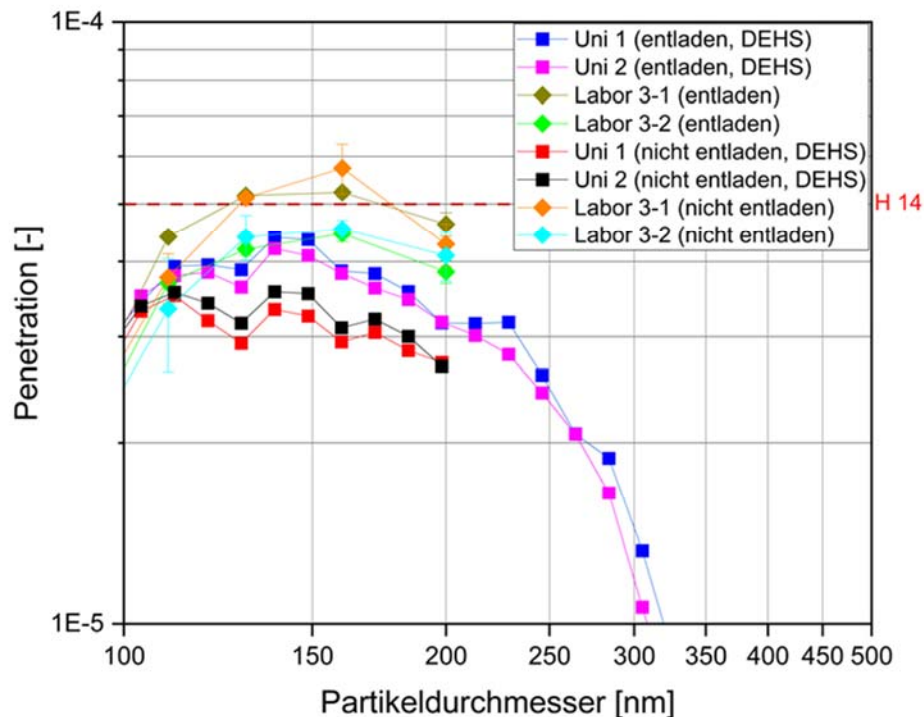


Abbildung 1-62: Penetrationsmessungen mit und ohne Entladung

1.5.3 Rundversuch konfektionierte Filter aus Glasfasermaterial (Filterklasse H13)

Der erste Rundversuch wurde mit konfektionierten Filterelementen aus Glasfasermaterial durchgeführt und von der FE 2 (IUTA) organisiert und koordiniert. An diesem Rundversuch nahmen insgesamt sieben Labore teil. Ziel war es, die Messergebnisse verschiedener Einrichtungen unter vergleichbaren Prüfbedingungen zu erfassen und die Reproduzierbarkeit der Klassifizierung nach DIN EN 1822 bzw. DIN EN ISO 29463 zu bewerten.

1.5.3.1 Prüflinge und Prüfparameter

Für den Rundversuch stellte die Firma TROX SE Mini-Pleat-Filterplatten aus Glasfaser (Abbildung 1-63) her. Aus der produzierten Charge wurden Filterplatten mit vergleichbarem Druckverlust und Abscheidegrad ausgewählt und anschließend an die teilnehmenden Labore versendet. Die wesentlichen Kenndaten der Prüflinge sind in Tabelle 6 zusammengefasst.



Abbildung 1-63: Mini Pleat Filterplatte (Glasfasermaterial)

Tabelle 6: Kenndaten der Mini-Pleat-Filterplatten (Rundversuch 1, Glasfaser)

Kenngröße	Wert
Medientyp	Glasfaser
Nenngröße	610 mm × 610 mm × 78 mm
Faltenanzahl	28/dm
Effektive Filterfläche	8,5 m ² (ohne Hot-Melt-Fäden)
Prüfvolumenstrom	1.190 m ³ /h
Medium-Anströmgeschwindigkeit	3,9 cm/s
Klassifizierung (Hersteller)	H13

1.5.3.2 Messaufbauten der Teilnehmer

Die teilnehmenden Labore führten die Prüfungen mit den jeweils vorhandenen Aerosolgeneratoren und Messgeräten gemäß den Vorgaben der Norm durch. Die eingesetzten Geräte sowie die Parameter der Probenahme unterschieden sich dabei deutlich zwischen den Laboren. Die folgende Übersicht fasst die verwendeten Messaufbauten zusammen:

TROX

- Laseraerosolspektrometer PMS LAS-X II (0,09–7,5 µm; 10–100 cm³/min)
- Zwei Verdünnungsstufen Topas, Verdünnungsfaktor Rohluft 994
- Partikelgenerator Topas (DEHS unverdünnt)
- An- und abströmseitige Messung mit Umschaltseinheit
- Probenahmeleitung ca. 3 m, Ø 6,4 mm.

IUTA

- Palas DEMC XB / DEMC 3000 / UF-CPC 50 (SMPS)
- Aerosolgenerator PLG 2010 (DEHS unverdünnt)
- An- und abströmseitige Messung
- Probenahmeleitung ca. 0,75 m, Ø 8 mm bzw. 6 mm.

Labor A

- TSI SMPS 3082 / DMA 3081 / CPC 3772
- Partikelgenerator TDA4B Laskin; DEHS unverdünnt.

Labor B

- TSI Laseraerosolspektrometer Model 3340
- Aerosolgenerator Topas ATM 241, DEHS unverdünnt
- Verdünnungsfaktor 1.000
- Scan-Messung abströmseitig (rechteckige Sonde 13 × 75 mm, 50 mm/s)
- Probenahmeleitung 5 m, Ø 6,2 mm.

Labor C

- TSI CPC 3750 (n-Butanol, 1 l/min; 7–3.000 nm)
- Aerosolgenerator TSI Mod. 108414 (modifiziert), DEHS verdünnt
- Verdünnungsfaktor Rohgas 114
- Probenahmeleitung Rohgas 1,45 m und Reingas 1,03 m, jeweils Ø 4,5 mm.

Labor D

- TSI Laseraerosolspektrometer Model 3340
- Aerosolgenerator Palas PLG 2010 (DEHS unverdünnt)
- Verdünnungsstufe Palas VKL 100, Verdünnungsfaktor Rohgas 111
- nur abströmseitige Messung mit/ohne eingebautem Filter im Kanal.

Labor E

- Partikelsensor Lighthouse Remote 1104LD (Laserdiode, 8 Partikelkanäle)
- Aerosolgenerator ATM Laskin (DEHS)
- Verdünnungsstufe Topas DIL-540/C
- Scanprüfstand mit quadratischer Sonde 30 mm.

Labor F

- Optischer Partikelzähler
- Aerosolgenerator TSI-Vernebler (DEHS)
- Verdünnungsfaktor 10.000
- gleichzeitige Probenahme an- und abströmseitig.

1.5.3.3 Druckverlustmessungen und Abgleich am Lochblech

Vor den Abscheidegradmessungen bestimmten alle teilnehmenden Laboren den Druckverlust der zugesandten Filterplatten, soweit dies technisch möglich war, im nach Norm vorgegebenen Volumenstrombereich (s. Abbildung 1-64). Zwischen den Laboren sowie im Vergleich zum Hersteller-Referenzwert der TROX SE zeigten sich dabei zum Teil deutliche Abweichungen (s. Abbildung 1-65). Das IUTA ermittelte im Mittel etwa 6 % niedrigere Druckverluste als TROX (Abbildung 1-66).

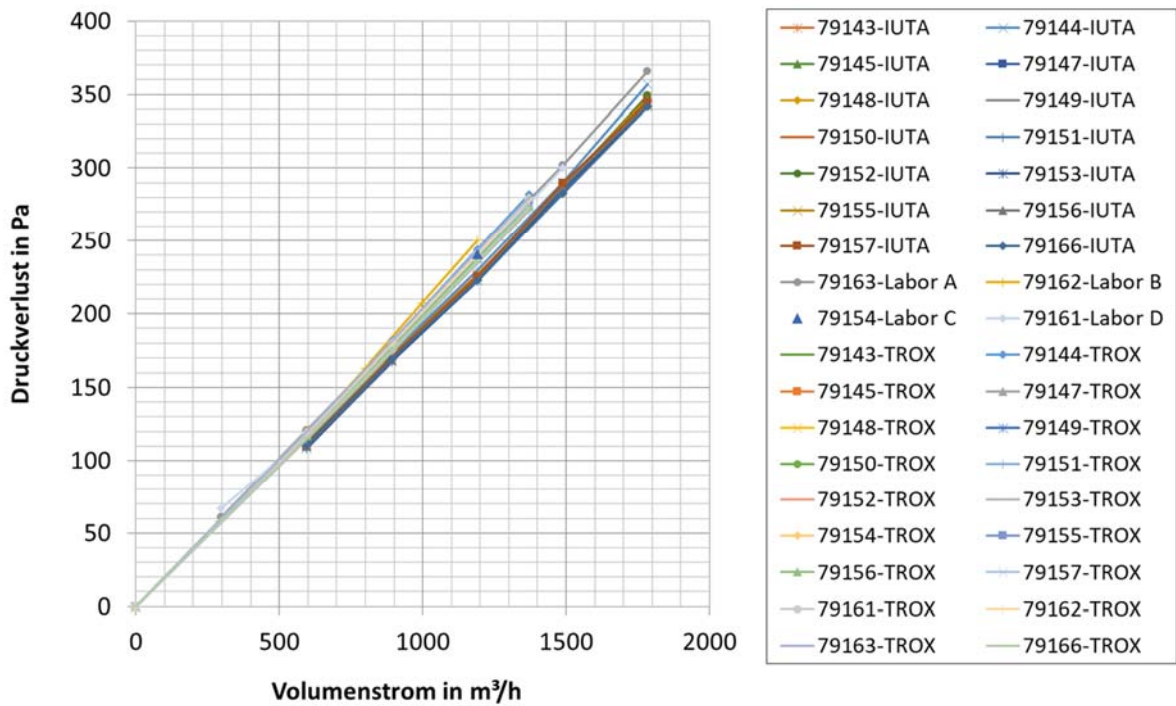


Abbildung 1-64: Druckverlust über dem Volumenstrom (TROX und Rundversuchsteilnehmer)

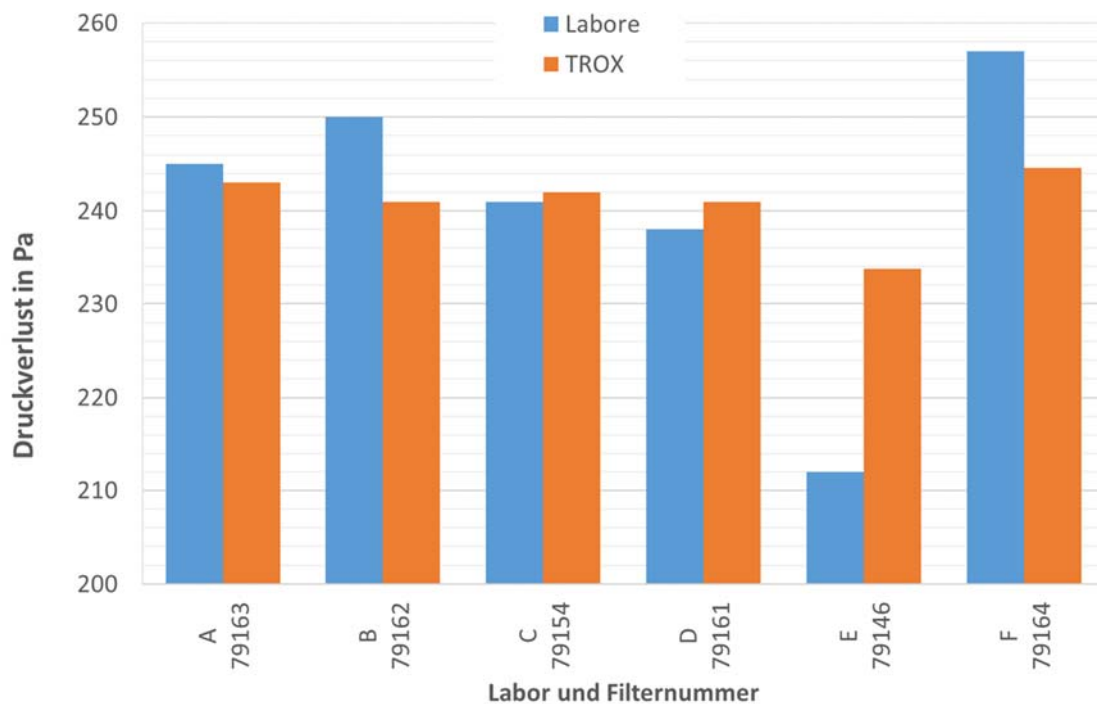


Abbildung 1-65: Druckverlust der Filterplatten bei 1.190 m³/h (TROX und Labore)

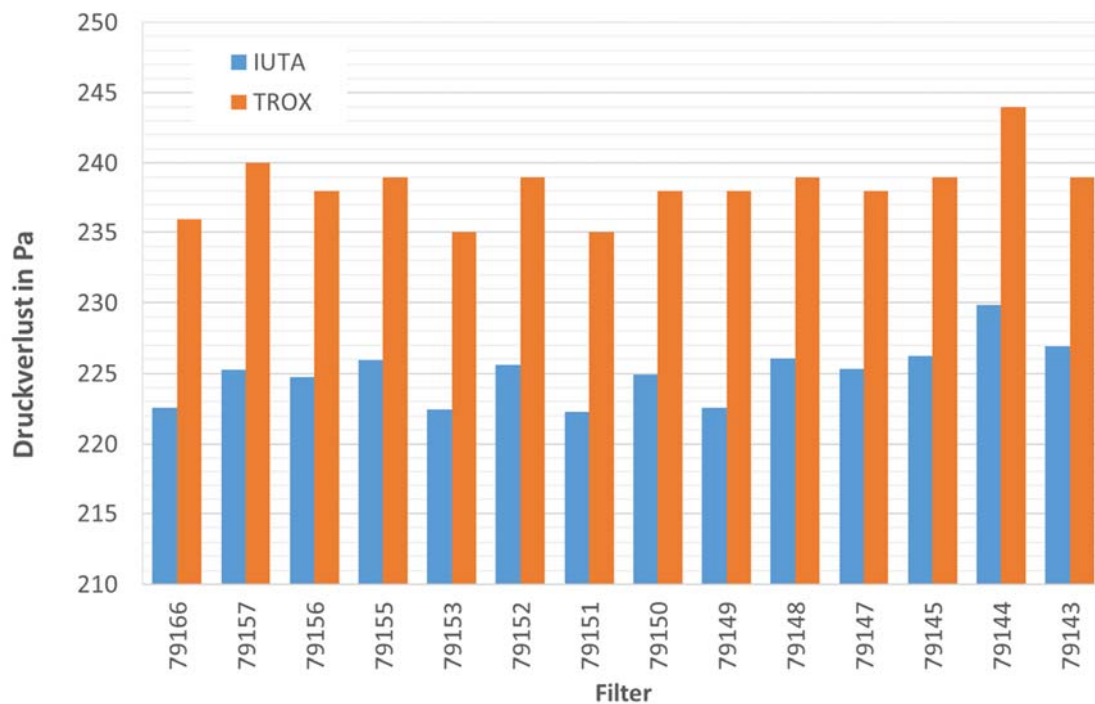


Abbildung 1-66: Druckverlust der Filterplatten bei 1.190 m³/h (TROX und IUTA)

Zur Klärung dieser Unterschiede wurde auf Beschluss der PA-Sitzung vom 19.03.2024 ein von der TROX SE bereitgestelltes Lochblech nacheinander an alle Labore versendet. Durch die Druckdifferenzmessungen am Lochblech konnten die Prüfkäle und die Volumenstrommesstechnik der beteiligten Einrichtungen miteinander abgeglichen werden. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Sehr gute Übereinstimmung der Druckdifferenzmessungen im mittleren Volumenstrombereich bei den teilnehmenden Laboren.
- Am IUTA zeigte sich bei Volumenströmen oberhalb von 3.000 - 4.000 m³/h ein systematisch zu niedriger Druckverlust; die Messkurven wichen dort von der TROX-Referenz ab (Abbildung 1-67). Nach Austausch der Kanaldichtungen und Anpassung der Kanaleinstellungen wurde eine erneute Überprüfung durchgeführt, die eine konsistente Übereinstimmung bestätigte.
- Labor C und Labor D zeigten bereits ohne Anpassungen eine sehr gute Übereinstimmung über den gesamten Volumenstrombereich.

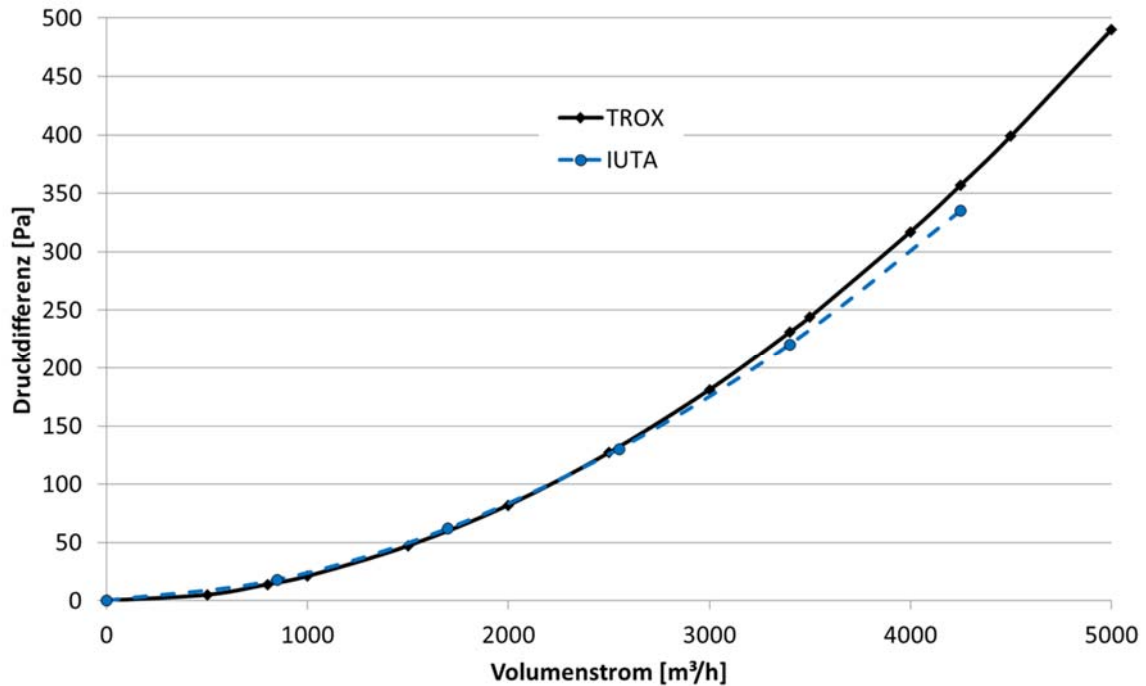


Abbildung 1-67: Druckdifferenzmessung am TROX-Lochblech zur Validierung des Volumenstrommessung (IUTA)

1.5.3.4 Fraktionsabscheidegrade und Filterklassen

Die Ergebnisse der Fraktionsabscheidegradmessungen der teilnehmenden Labore sind in Abbildung 1-68 bis Abbildung 1-71 dargestellt. In allen Darstellungen sind die gemessenen Effizienzen über dem Partikeldurchmesser als schwarzen Kurven wiedergegeben. Die berechnete minimale Effizienz $E_{95\% \min}$, welche den 95%-Vertrauensbereich der Partikelzählstatistik berücksichtigt, ist jeweils als gestrichelte Linie dargestellt. Die von der TROX SE mit dem Laseraerosolspektrometer ermittelten Effizienzen sind in den Darstellungen als hellblaue Punkte wiedergegeben. Der Grenzwert für die Filterklasse H13 (99,995 %) ist als rote gestrichelte Linie eingezeichnet.

Bei Labor A beträgt der MPPS 124 nm. Die gemessene Effizienz E sowie der minimale Abscheidegrad $E_{95\% \min}$ liegen mit 99,931 % bzw. 99,930 % unterhalb des Grenzwerts für H13 (s. Abbildung 1-68). Der Filter wird damit als E12 klassifiziert.

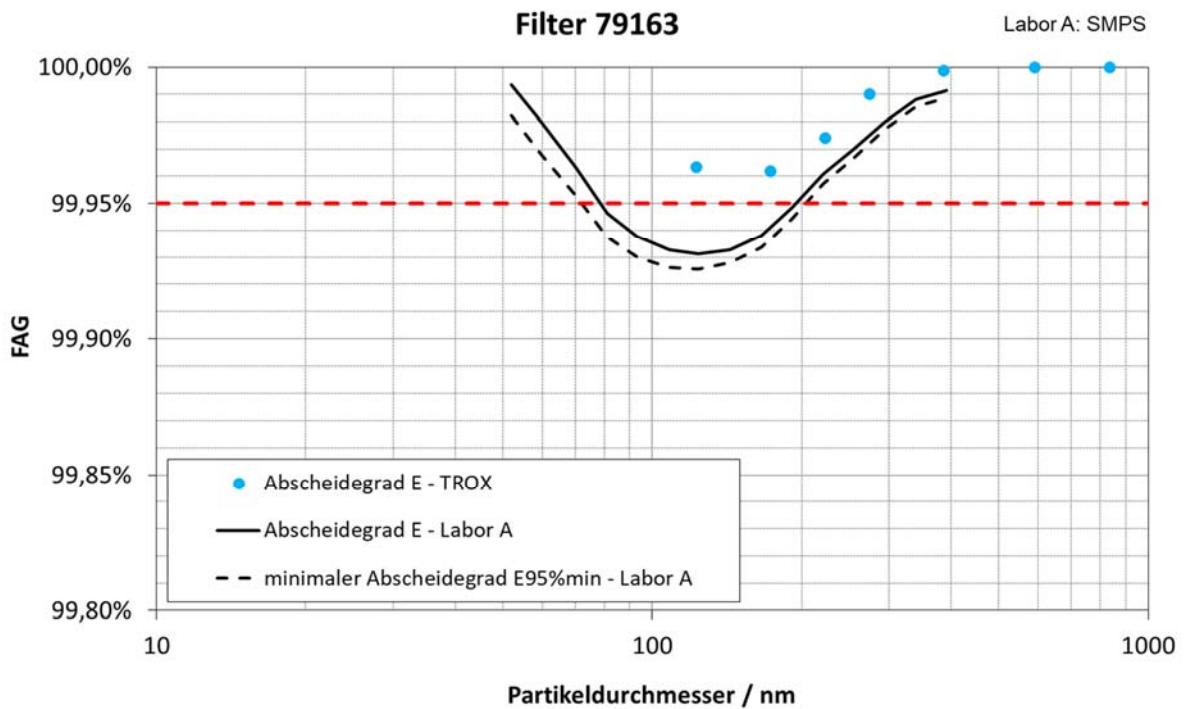


Abbildung 1-68: Fraktionsabscheidegrade im ersten Rundversuch Labor A

Labor B bestimmte den MPPS zu 130 nm. Die Effizienz E im MPPS beträgt 99,977 %, der minimale Abscheidegrad 99,976 % (s. Abbildung 1-69). Beide Werte liegen oberhalb des Grenzwerts für H13. Der Filter erreicht somit ebenfalls die Klasse H13.

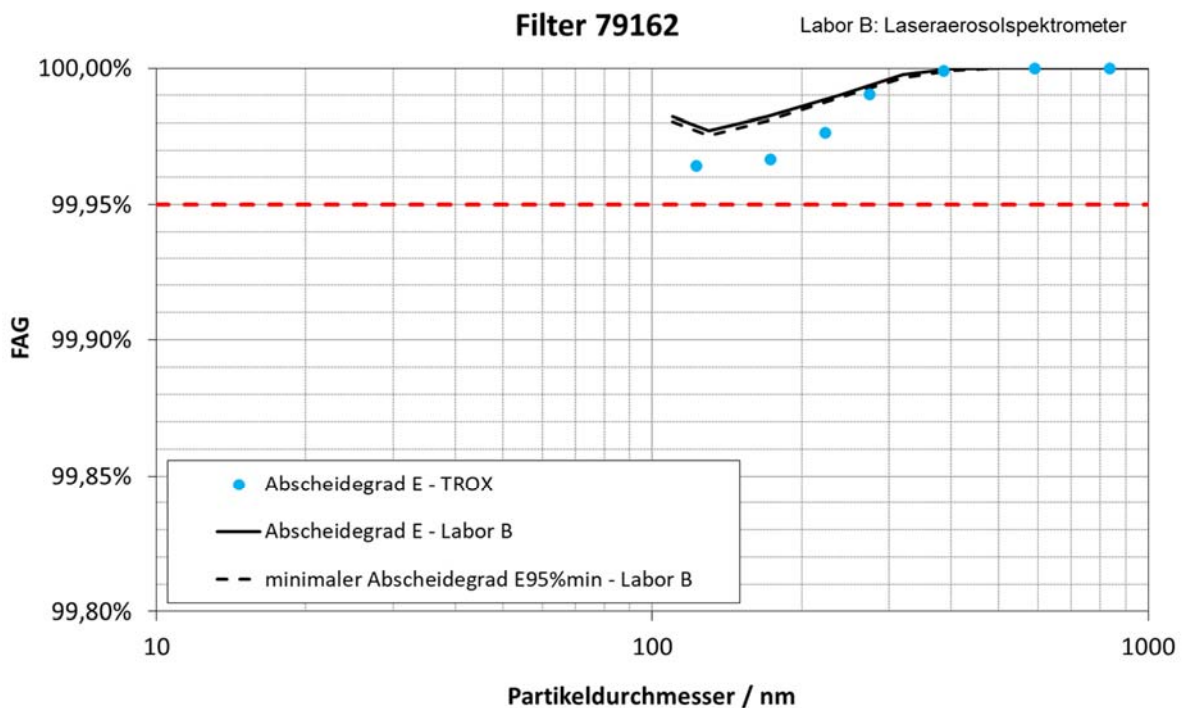


Abbildung 1-69: Fraktionsabscheidegrade im ersten Rundversuch Labor B

Die vom Labor C gemessene Effizienz E bzw. der minimale Abscheidegrad $E_{95\% \min}$ im MPPS von 140 nm betragen 99,966 % und 99,965 % und liegen damit oberhalb des Grenzwerts für H13 (s. Abbildung 1-70). Der Filter wird folglich als H13 klassifiziert.

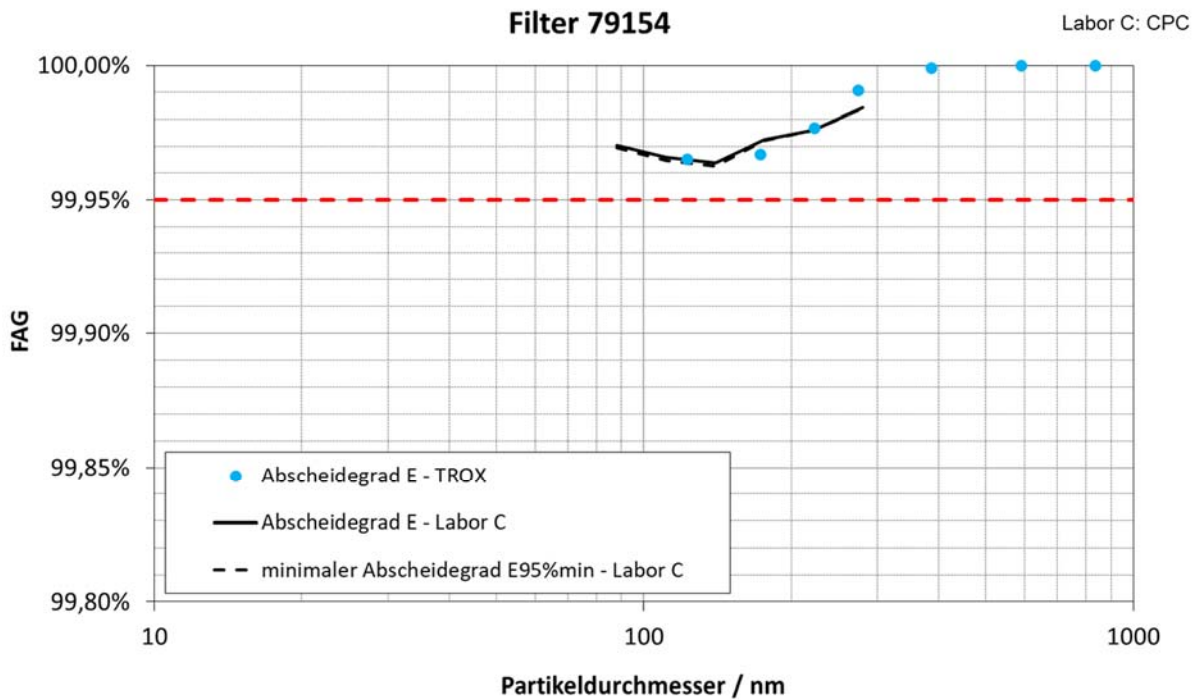


Abbildung 1-70: Fraktionsabscheidegrade im ersten Rundversuch Labor C

Labor D bestimmte MPPS zu 117 nm. Die Effizienz im MPPS beträgt 99,948 %, der minimale Abscheidegrad 99,945 % (s. Abbildung 1-71). Beide Werte liegen knapp unterhalb des Grenzwerts für H13. Der Filter erreicht daher nur die Klasse E12.

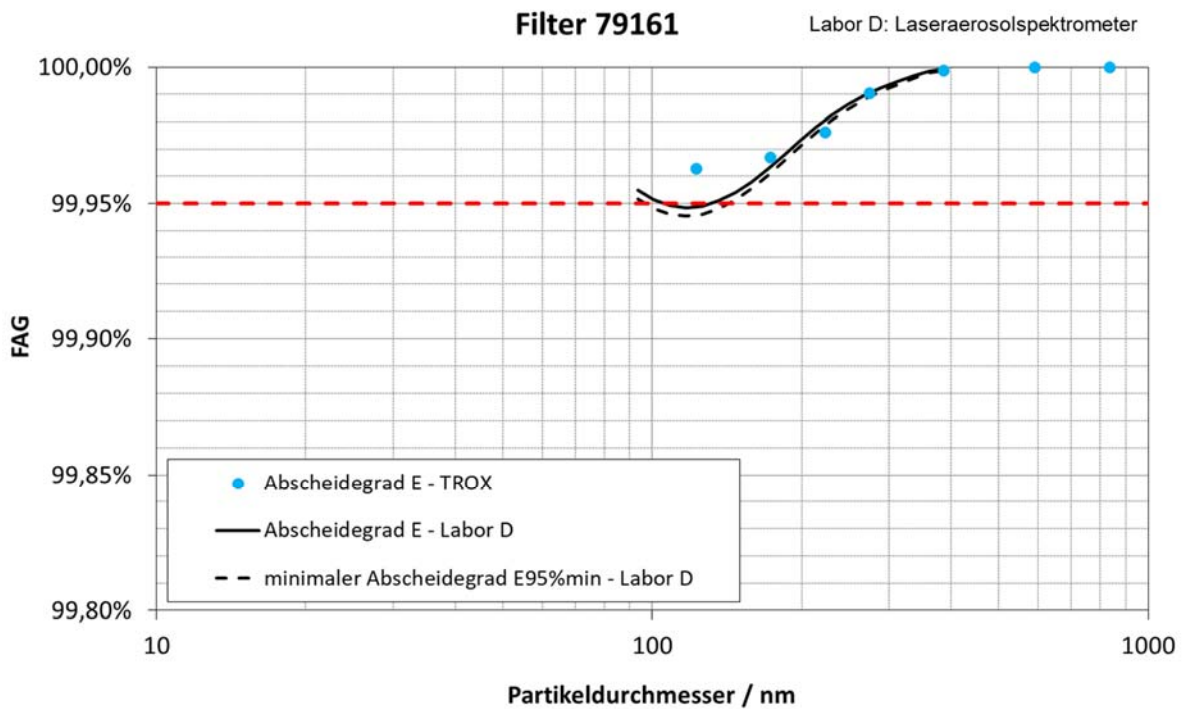


Abbildung 1-71: Fraktionsabscheidegrade im ersten Rundversuch Labor D

Die Ergebnisse des ersten Rundversuchs sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Auffällig ist, dass trotz identischer Prüflinge und normkonformer Vorgehensweise drei der acht Messstellen (IUTA, Labor A, Labor D) den Filter lediglich als E12 klassifizierten, während die übrigen Labore die vom Hersteller angegebene Klasse H13 bestätigten. Der ermittelte MPPS lag je nach Labor zwischen 117 nm (Labor D) und 140 nm (Labor C).

Tabelle 7: Ergebniszusammenstellung Rundversuch 1 (Filterelemente, Glasfaser H13); Nennvolumenstrom 1.190 m³/h

Labor	Messgerät	MPPS [nm]	E im MPPS [%]	E _{95%,min} [%]	Probe- nahme	Klasse
TROX	LAS	122	99,964	–	an-/ab	H13
IUTA	SMPS	138	99,942	99,930	an-/ab	E12
Labor A	SMPS	124	99,931	99,926	–	E12
Labor B	LAS (Scan)	130	99,977	99,976	an-/ab	H13
Labor C	CPC	140	99,966	99,965	an-/ab	H13
Labor D	LAS	117	99,948	99,945	nur ab	E12
Labor E	LAS (Scan)	100–200	99,980	–	–	H13
Labor F	OPZ	100–200	99,985	–	an-/ab	H13

1.5.3.5 Parametervariation am IUTA

Zur Aufklärung der im Rundversuch beobachteten Unterschiede zwischen den Laboren wurden am IUTA weitere Messungen an Prüflingen aus derselben Charge durchgeführt. Variiert wurden die folgenden Parameter:

- Art des Messsystems
SMPS-System der Firma TSI, SMPS-System der Firma Palas, identisches Laseraerosolspektrometer wie bei TROX SE
- Länge der Probenahmeleitung
75 cm bzw. 235 cm
- Verdünnung des Prüfaerosols
DEHS pur und 10 % DEHS in IPA

In Abbildung 1-72 sind die gemessenen Effizienzen bei Variation der Schlauchlänge über dem Partikeldurchmesser dargestellt (durchgezogene Linien). Die minimalen Effizienzen sind jeweils als gestrichelten Linien eingezeichnet. Die grünen Kurven zeigen die Ergebnisse mit der Standard-schlauchlänge von 75 cm, die braunen Kurven die Messungen mit 235 cm. Die von der TROX SE mit dem Laseraerosolspektrometer ermittelten Effizienzen sind als hellblaue Punkte dargestellt. Der Grenzwert für die Filterklasse H13 (99,995 %) ist als rote gestrichelte Linie eingezeichnet.

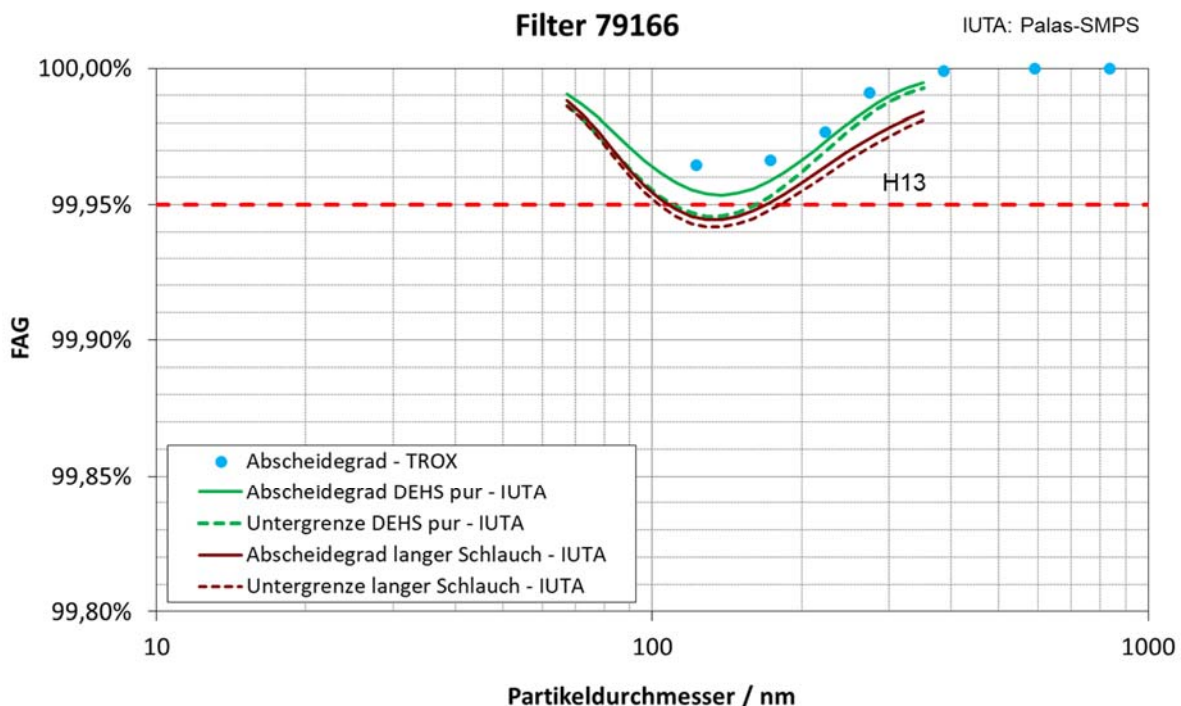


Abbildung 1-72: Einfluss der Schlauchlänge (75 cm vs. 235 cm) auf die gemessene Effizienz am IUTA

In Abbildung 1-73 sind die gemessenen Effizienzen mit purem und verdünntem DEHS über dem Partikeldurchmesser. Die grünen Kurven zeigen die Ergebnisse mit reinem DEHS, die braunen Kurven die Messungen mit 10 % DEHS in IPA. Auch hier sind die minimalen Effizienzen als gestrichelte

Linien dargestellt, die TROX-Messwerte als hellblaue Punkte und der Grenzwert für H13 als rote gestrichelte Linie.

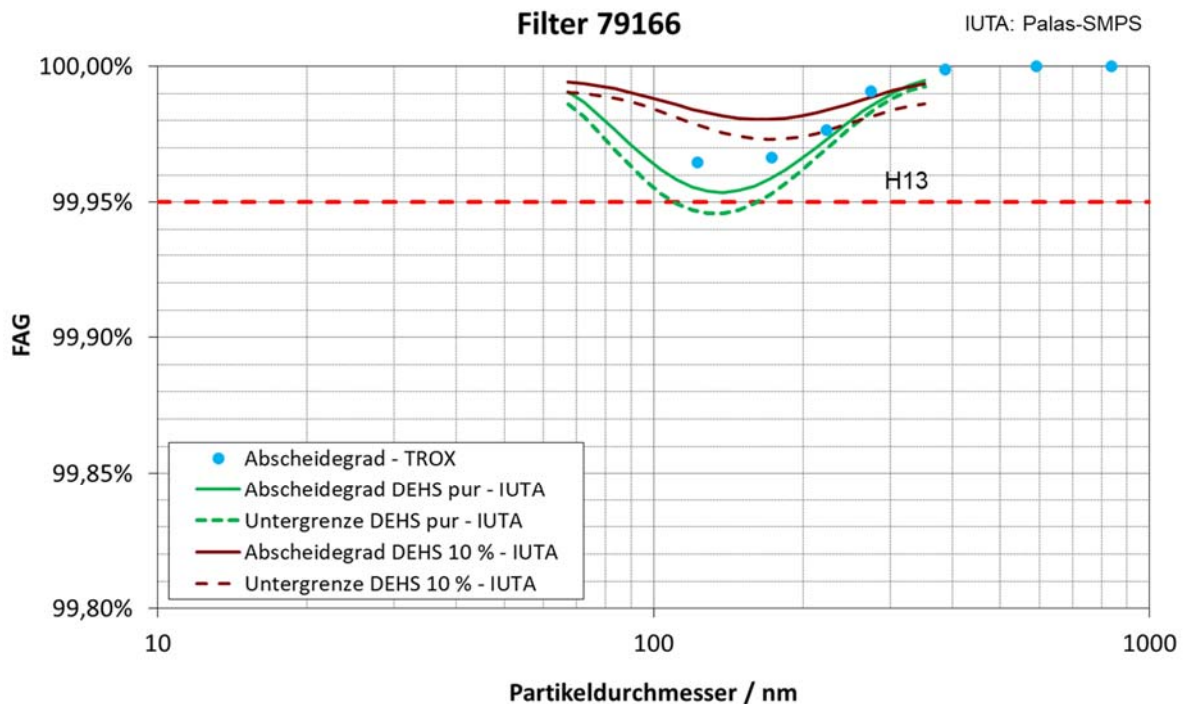


Abbildung 1-73: Einfluss der DEHS-Verdünnung (DEHS pur vs. 10 % DEHS in IPA) auf die gemessene Effizienz am IUTA

Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Die Variationen der Schlauchlänge im untersuchten Bereich zeige keinen nennenswerten Einfluss auf die gemessene Effizienz.

Deutlich ausgeprägter war hingegen der Einfluss der Verdünnung des Prüfaerosols. Wurde statt reinem DEHS ein Gemisch aus 10 % DEHS in IPA verwendet, erhöhte sich die gemessene Effizienz im MPPS signifikant, der MPPS verschob sich zu größeren Partikeldurchmessern, und der Filter wurde statt als E12 als H13 klassifiziert.

Dieser Effekt steht im Zusammenhang mit dem bei polydispenser Beaufschlagung mit reinem DEHS deutlich stärkeren Druckverlustanstieg am Prüfling während der Messung (siehe auch Abschnitt 1.2.3).

Tabelle 8: Variation von Messsystem, Schlauchlänge und DEHS-Verdünnung am IUTA, Nennvolumenstrom 1.190 m³/h

Labor	Messge- rät	DEHS	Schlauch [cm]	MPPS [nm]	E im MPPS [%]	E _{95%,min} [%] / Klasse
TROX	LAS	pur	300	122	99,965	– / H13
IUTA	SMPS	pur	75	138	99,954	99,946 / E12
IUTA	SMPS	pur	235	129	99,945	99,942 / E12
IUTA	SMPS	10 %	75	172	99,981	99,973 / H13

1.5.3.6 Vergleichsmessung TROX Laseraerosolspektrometer am IUTA-Prüfkanal

Um zu klären, ob die im Rundversuch beobachteten Abweichungen zwischen TROX und IUTA auf Unterschiede im Prüfkanal oder auf die verwendeten Messsysteme zurückzuführen sind, wurden am IUTA zusätzliche Vergleichsmessungen durchgeführt. Hierzu wurde das von der TROX SE leihweise bereitgestellte LAS-X II (inklusive zweier Verdünnungsstufen) am IUTA-Prüfkanal eingesetzt.

Dieselben Filterelemente (79156, 79157, 79166) wurden somit sowohl bei TROX mit 3 m Probenahmeleitung und Umschalteneinheit als auch am IUTA mit ca. 0,75 m Probenahmeleitung und manuellem Umstecken mit demselben Messgerät vermessen.

In Abbildung 1-74 sind die mit dem LAS-X II am TROX-Prüfstand gemessenen Fraktionsabscheidegrade als Punkte dargestellt, während die am IUTA aufgenommenen Messungen als Linienverläufe wiedergegeben sind.

Die Ergebnisse zeigen, dass die bei identischer Messtechnik am IUTA gemessenen Effizienzen für Partikeldurchmesser unterhalb von 200 nm systematisch unter den von TROX bestimmten Werten liegen. Die IUTA-Messungen unterschreiten den Grenzwert für die Filterklasse H13, während die TROX-Messungen diesen erfüllen.

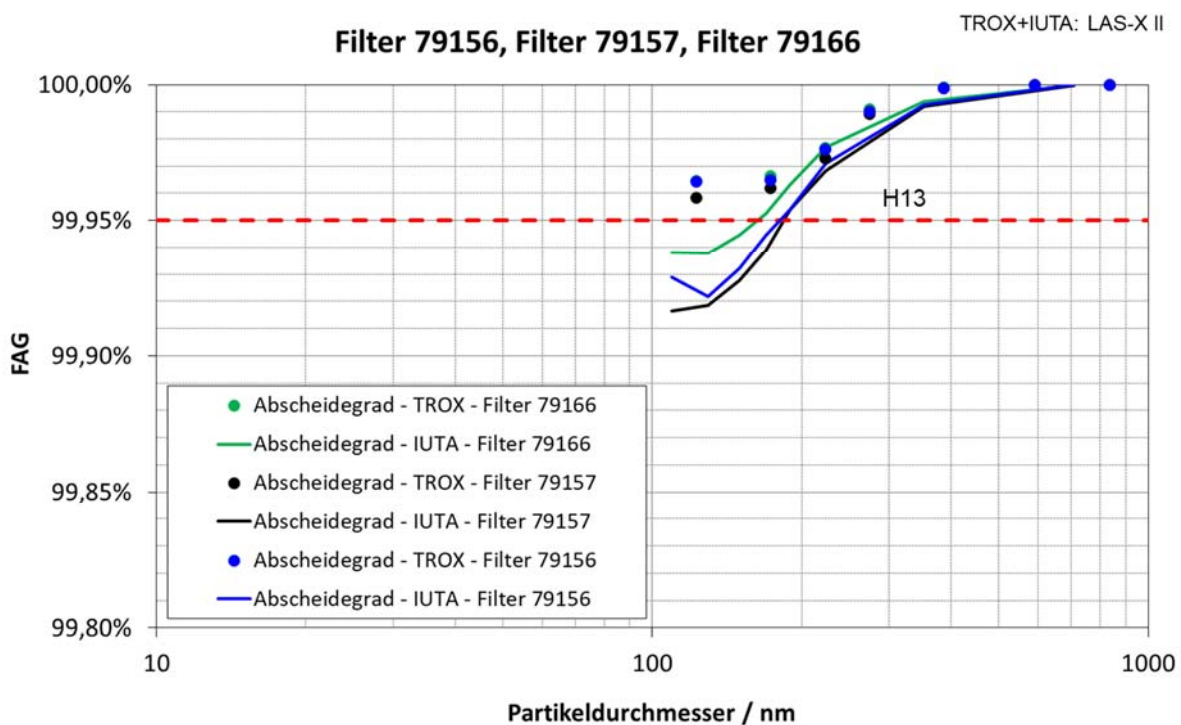


Abbildung 1-74: Vergleich der Fraktionsabscheidegradkurven (Filter 79156, 79157, 79166), aufgenommen mit demselben LAS-X II bei TROX und am IUTA

1.5.3.7 Diskussion

Im ersten Rundversuchs an konfektionierten Filterelementen zeigten sich zwischen den teilnehmenden Laboren deutliche Unterschiede in einer Vielzahl von Versuchs- und Auswerteparametern. Dazu gehörten insbesondere:

- Eingesetztes Messprinzip und Auswerteverfahren
SMPS, optischer Partikelzähler, Scan-Prüfstand
- Geräte unterschiedlicher Hersteller und Bauformen
TSI, Palas, PMS, Topas, Lighthouse
- Art des Prüfaerosols
DEHS pur vs. DEHS verdünnt
- Probenahmestrategie
an- und abströmseitig, nur abströmseitig
- Verdünnungsfaktoren
zwischen 111 und 10.000
- Geometrie der Probenahmeleitungen
deutliche Unterschiede in Länge und Durchmesser

Die am IUTA durchgeführten systematischen Untersuchungen zeigen, dass die beobachteten Klassendifferenzen durch mehrere Einflussgrößen gleichzeitig entstehen. Besonders relevant sind das Messprinzip und die Auswerteverfahren, die Handhabung des Prüfaerosols (Beladungsdynamik, Verdünnung) sowie in deutlich geringerem Maße der Prüfkanal und die Probenahmegeometrie.

Konkret wurde bei reiner DEHS-Beaufschlagung am IUTA mit den SMPS-Systemen die Filterklasse E12 bestimmt, während die TROX SE mit gleichem Prüfaerosol und dem LAS-X II für denselben Filter H13 ermittelte.

Die Variation der Schlauchlänge (75 cm vs. 235 cm bzw. die bei TROX eingesetzten ~3 m) zeigte dagegen nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die gemessenen Effizienzen. Damit ist die Schlauchlänge gegenüber den oben genannten Faktoren klar nachgeordnet. Unterschiede in Verdünnung, Messprinzip und Auswertung verschieben die Lage des MPPS und beeinflussen die Bestimmung der minimalen Effizienz deutlich stärker als die hier geprüften Änderungen der Probenahmeleitung.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass eine Verringerung der Messstreuung vor allem durch eine Harmonisierung der Aerosolbehandlung (z. B. Vorgaben zur Verdünnung und Beladungsdynamik) sowie durch eine Vereinheitlichung der Mess- und Auswerteverfahren erreicht werden kann. Anpassungen an Schlauchlängen sind demgegenüber nur von untergeordneter Bedeutung.

1.5.4 Rundversuch synthetische Medien (Filterklasse H13)

Auch für den Rundversuch 2 wurde vom projektbegleitendem Ausschuss Material in ausreichender Menge zur Verfügung gestellt. Bei dem bereitgestellten Material handelt es sich um synthetisches Material, welches eine PTFE-Schicht enthält. Durch das synthetische Material kommt es zu einer Aufladung der Fasern, welche eine Verstärkung der Effizienz des Filters bewirkt. Mit der Zeit und durch chemische Prozesse während des Einsatzes kommt es zur Entladung der Fasern und damit zur Abnahme der Effizienz des Filters. Im zweiten Rundversuch soll der Punkt „Entladung des Mediums“ deshalb näher untersucht werden.

In Anlehnung an den ersten Rundversuch wurde zunächst das Material bezüglich des Druckverlustes untersucht. Erwartungsgemäß waren die Materialschwankungen größer als bei dem Glasfaser-material aus Rundversuch 1. Es wurden vor dem Versand alle Materialproben vermessen und der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt (siehe Abbildung 1-75). Anschließend wurden die Proben mit größeren Abweichungen aussortiert und die restlichen Proben an die teilnehmenden Labore versendet bzw. für Versuche an der FE1 zurückgelegt.

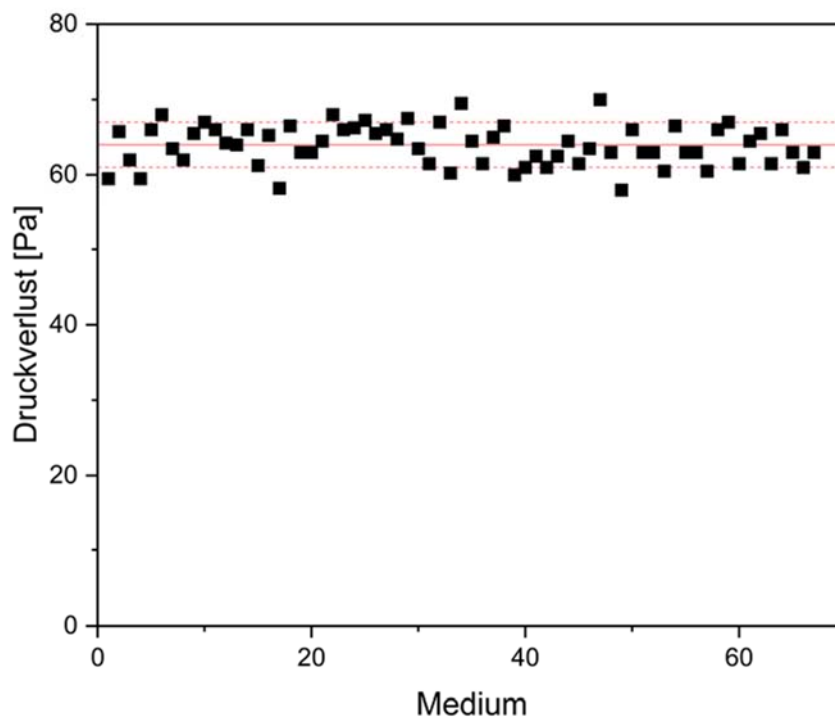


Abbildung 1-75: Druckverlustmessung aller Proben des synthetischen Materials

Anschließend wurden an der FE1 Messungen des Fraktionsabscheidegrades vor und nach der Entladung durchgeführt, um die Schwankungsbreite des Materials und die Auswirkung der Entladung auf den Fraktionsabscheidegrad zu bestimmen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1-76 und Abbildung 1-77 zu sehen. Die unterschiedlichen Proben zeigen eine relativ gute Übereinstimmung. Die

Entladung bewirkt bei diesem Material erwartungsgemäß eine deutliche Verschlechterung des Fraktionsabscheidegrades.

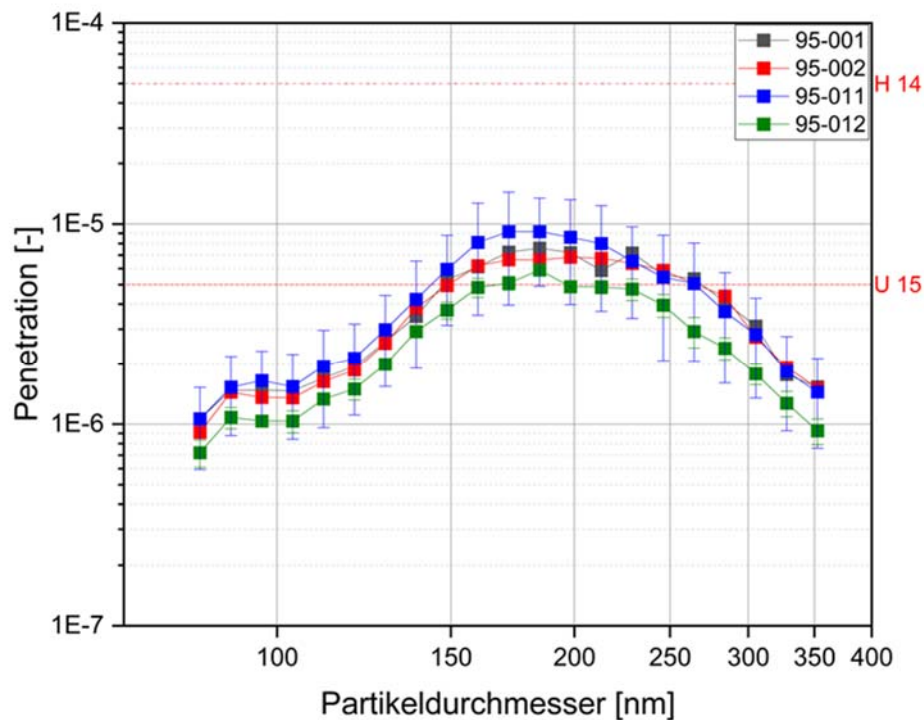


Abbildung 1-76: Penetration teilsynthetisches Material

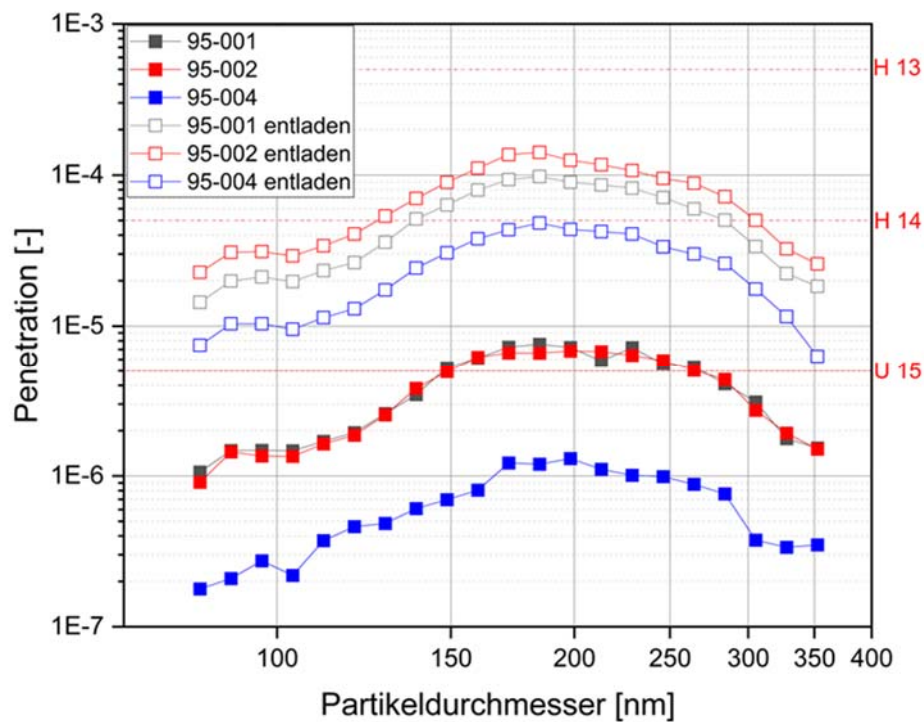


Abbildung 1-77: Penetration teilsynthetisches Medium vor und nach Entladung

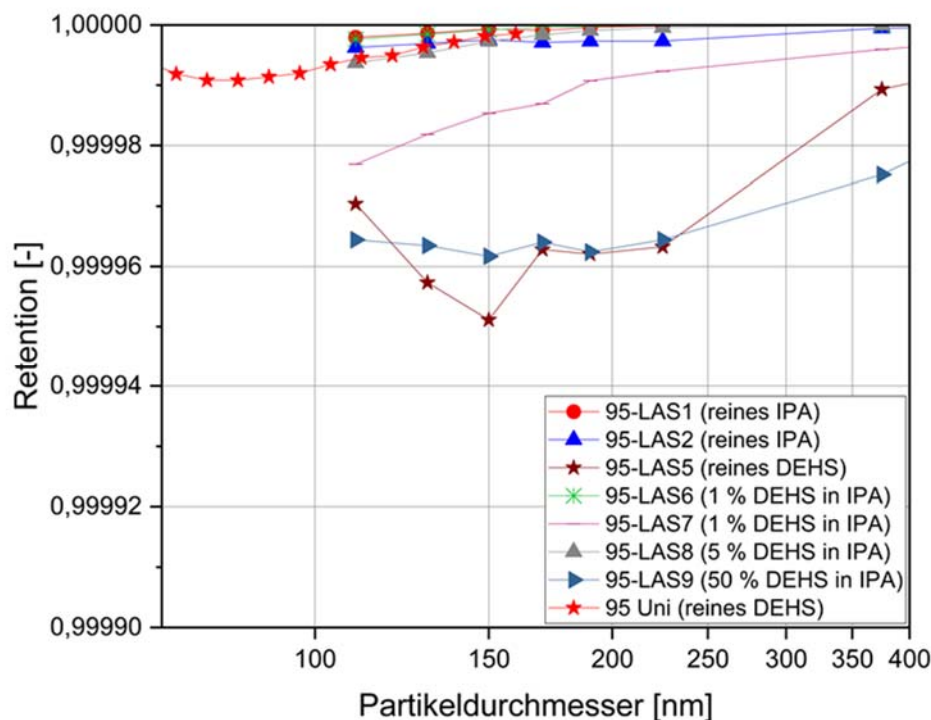


Abbildung 1-78: Vergleich SMPS und LAS: Teilsynthetisches Medium mit verschieden verdünntem DEHS

Abbildung 1-78 zeigt den Vergleich zwischen monodispersen Messungen des synthetischen Materials mittels SMPS und polydispersen Messungen, welche mit einem optischen Partikelzähler durchgeführt worden sind. Niedrige Mengen DEHS in Isopropanol zeigen keinen nennenswerten Unterschied zu Messungen, welche mit reinem Isopropanol durchgeführt wurden. Der Fraktionsabscheidegrad, welcher bei 50 % DEHS in 50 % Isopropanol gemessen wurde, ähnelt dem Fraktionsabscheidegrad, welcher bei reinem DEHS gemessen wurde. Auch hier kann der Druckverlustanstieg für die Unterschiede verantwortlich sein. Beim synthetischen Material ist dieser bei der Nutzung von DEHS deutlich höher. Der Druckverlust kann sich bei der polydispersen Vorgehensweise pro Messung um mehr als 100 % erhöhen.

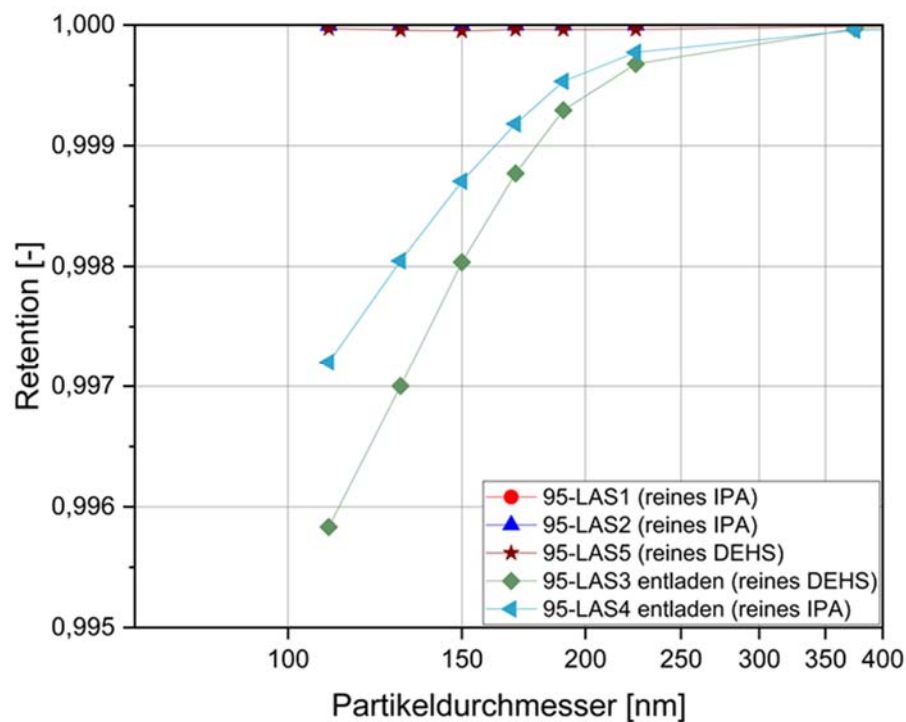


Abbildung 1-79: Vergleich Retention: Teilsynthetisches Material vor und nach Entladung

Abbildung 1-79 zeigt die Fraktionsabscheidegrade des synthetischen Materials vor und nach der Entladung. Wie zu erwarten war, ist eine deutliche Abnahme des Fraktionsabscheidegrads nach der Entladung zu erkennen, was aus der fehlenden Elektretwirkung resultiert.

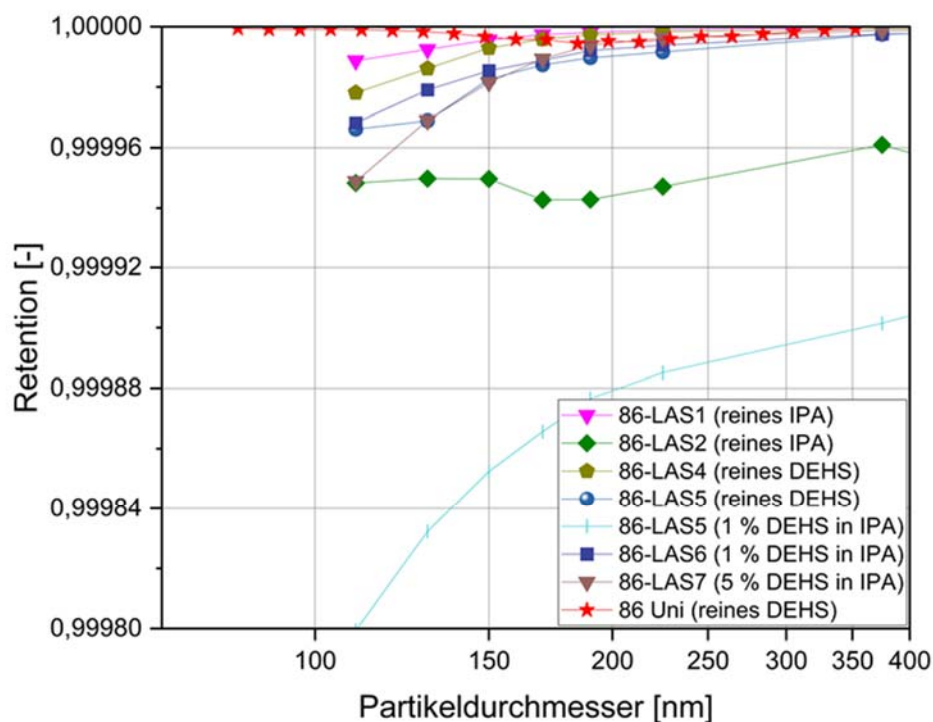


Abbildung 1-80: Vergleich SMPS und LAS: Zweites synthetisches Material mit verschiedenen DEHS-Verdünnungen

Die Fraktionsabscheidegrade des zweiten untersuchten synthetischen Materials bei verschiedenen DEHS-Verdünnungen sind in Abbildung 1-80 dargestellt. Bei diesem Material lässt sich jedoch kein erkennbarer Unterschied zwischen der Nutzung von reinem DEHS, reinem Isopropanol und verschiedenen DEHS-Verdünnungen erkennen.

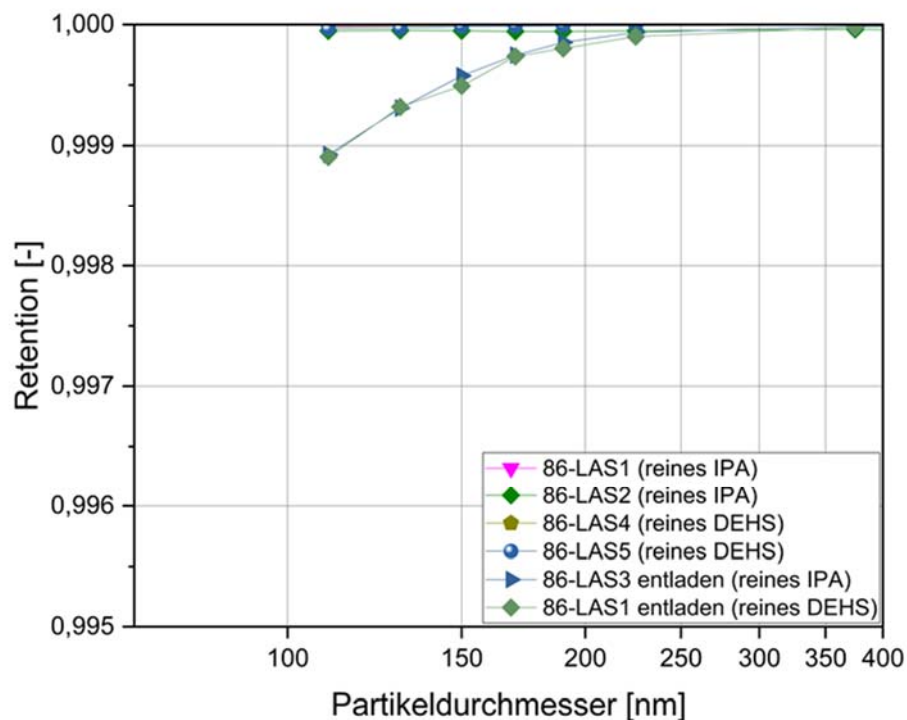


Abbildung 1-81: Retention LAS: Zweites synthetisches Medium vor und nach Entladung

Welchen Effekt die Entladung auf das zweite synthetische Material hat, ist in Abbildung 1-81 zu sehen. Wie beim ersten synthetischen Material ist auch hier eine deutliche Abnahme des Fraktionsabscheidegrades zu erkennen.

1.5.5 Rundversuch konfektionierte Filter aus synthetischem Material (Filterklasse H13)

Der zweite Rundversuch an konfektionierten Filterelementen wurde ebenfalls von der FE 2 (IUTA) organisiert. An dem Rundversuch nahmen sieben Labore teil.

1.5.5.1 Prüflinge und Prüfparameter

Die Camfil GmbH stellte Filterplatten aus einem PET-Medium mit ePTFE-Membran (Abbildung 1-82) her. Für die Herstellung der Filterelemente wurde ein H14-Medium verwendet. Aufgrund des im Rundversuch vorgesehenen höheren Prüfvolumenstroms von 1.200 m³/h, anstatt der für das Medium typischen 606 m³/h, wird das Filterelement bei dieser Betriebsbedingung nur noch als H13 klassifiziert.

Es wurden sowohl Druckverlust als auch Effizienz der Elemente bestimmt (Abbildung 1-83). Aus der produzierten Charge wurden Filterplatten mit vergleichbarem Druckverlust und Abscheidegrad ausgewählt und anschließend an die teilnehmenden Labore versendet.



Abbildung 1-82: Filterplatten (PET-Medium mit ePTFE-Membran)

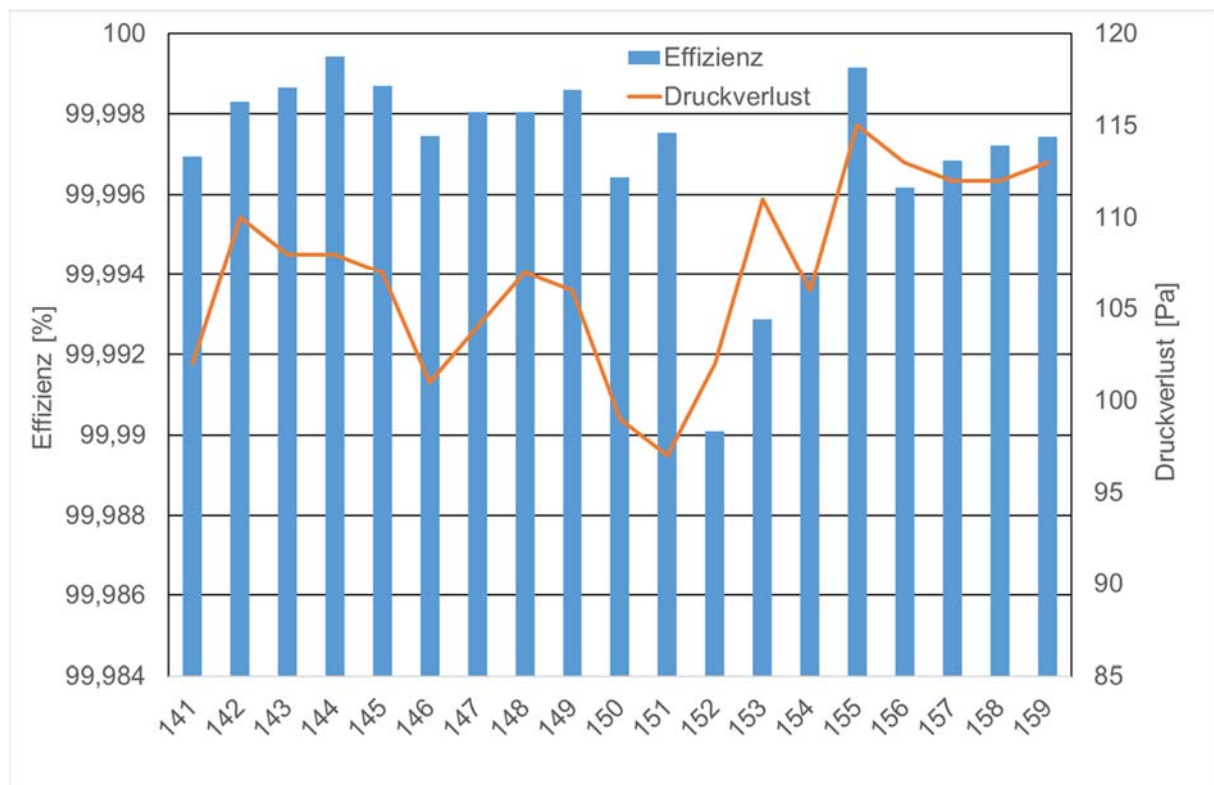


Abbildung 1-83: Druckverlust und Effizienz der PET/ePTFE-Filterplatten (Herstellerprüfung Camfil) bei 1.200 m³/h

Die wesentlichen Kenndaten der Prüflinge sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Kenndaten der PET/ePTFE-Filterplatten (Rundversuch 2, synthetisch)

Kenngröße	Wert
Medientyp	PET mit ePTFE-Membran
Nenngröße	610 mm × 610 mm × 66 mm
Effektive Filterfläche	9,88 m ²
Prüfvolumenstrom	1.200 m ³ /h
Medium-Anströmgeschwindigkeit	3,37 cm/s
Klassifizierung (Hersteller, @ 1.200 m ³ /h)	H13

Durch das synthetische Filtermaterial kommt es zu einer elektrostatischen Aufladung der Fasern, die zu einer erhöhten Abscheideeffizienz beiträgt. Diese Elektretwirkung nimmt jedoch im Laufe der Zeit während des Einsatzes ab, wodurch die Effizienz des Filters sinkt.

Ein Schwerpunkt des zweiten Rundversuchs war daher die Untersuchung der Entladung der Filterelemente mit IPA-Dampf.

1.5.5.2 Messtechnische Herausforderung: MPPS unterhalb des OPC-Messbereichs

Eine zentrale Herausforderung bei Filtern mit ePTFE-Membran ist die Lage des Abscheidegrad-Minimums (MPPS) unterhalb 100 nm. Optische Partikelzähler (OPC) haben ihren Messbereich typischerweise erst ab 0,1 µm bzw. 0,2 µm und können den Abscheidegrad unterhalb 100 nm nicht erfassen. Der tatsächliche MPPS eines solchen Filters liegt somit außerhalb des OPC-Messbereichs.

Die DIN EN ISO 29463-5, Anhang B.4.1.2, sieht für diesen Fall ein alternatives Verfahren vor. Aus einer Messung des Abscheidegrads am Medium im OPC-Messbereich (z. B. 0,14 µm) und der bekannten Penetration im tatsächlichen MPPS des Mediums wird ein Korrelationsfaktor

$$F = \frac{P_{MPPS}}{P_{0,14 \mu m}}$$

bestimmt. Der minimale Abscheidegrad am Filterelement lässt sich dann aus der am Filter bei 0,14 µm gemessenen Penetration über

$$P_{MPPS,C} = F \cdot P_{0,14 \mu m}$$

abschätzen.

Bei einem Korrelationsfaktor von $F = 4$ und einer gemessenen Penetration von 0,002 % bei 0,14 µm ergäbe sich eine MPPS-Penetration von 0,008 %, entsprechend einer Effizienz von 99,992 % also H13 statt H14.

Für das im Rundversuch eingesetzte Medium lagen jedoch keine empirischen Daten zur Penetration im tatsächlichen MPPS vor, der Korrelationsfaktor konnte somit nicht bestimmt werden. Daraus folgt, dass die Ergebnisse der Labore, die mit OPC gemessen haben, mit den Ergebnissen der Labore, die mit SMPS gemessen haben, im zweiten Rundversuch nur eingeschränkt vergleichbar sind.

1.5.5.3 Ergebnisse IUTA

Die Messungen am IUTA wurden mit dem SMPS-System der Firma Palas (DEMC XB / DEMC 3000 / UF-CPC 50) durchgeführt. Als Aerosolgenerator kam ein PLG-2010 (Palas) mit unverdünntem DEHS zum Einsatz. Die Probenahme erfolgte wechselseitig an- und abströmseitig über eine Probenahmeleitung von ca. 0,75 m Länge und 8 mm Durchmesser.

Die Effizienzmessungen wurden an zwei Filtern derselben Charge durchgeführt. Bei der Prüfung des ersten Filters (Filter 152) trat ein Problem mit dem SMPS-System auf, sodass die Messung unterbrochen und am Folgetag fortgesetzt werden musste.

Vor der Bestimmung der Abscheideeffizienzen wurden die Druckverlustkurven aufgenommen. Exemplarisch zeigt Abbildung 1-84 den gemessenen Druckverlust des zweiten Filters (Filter 157) über dem Volumenstrom im Vergleich zur Herstellerprüfung. IUTA misst dabei durchweg niedrigere Druckverluste.

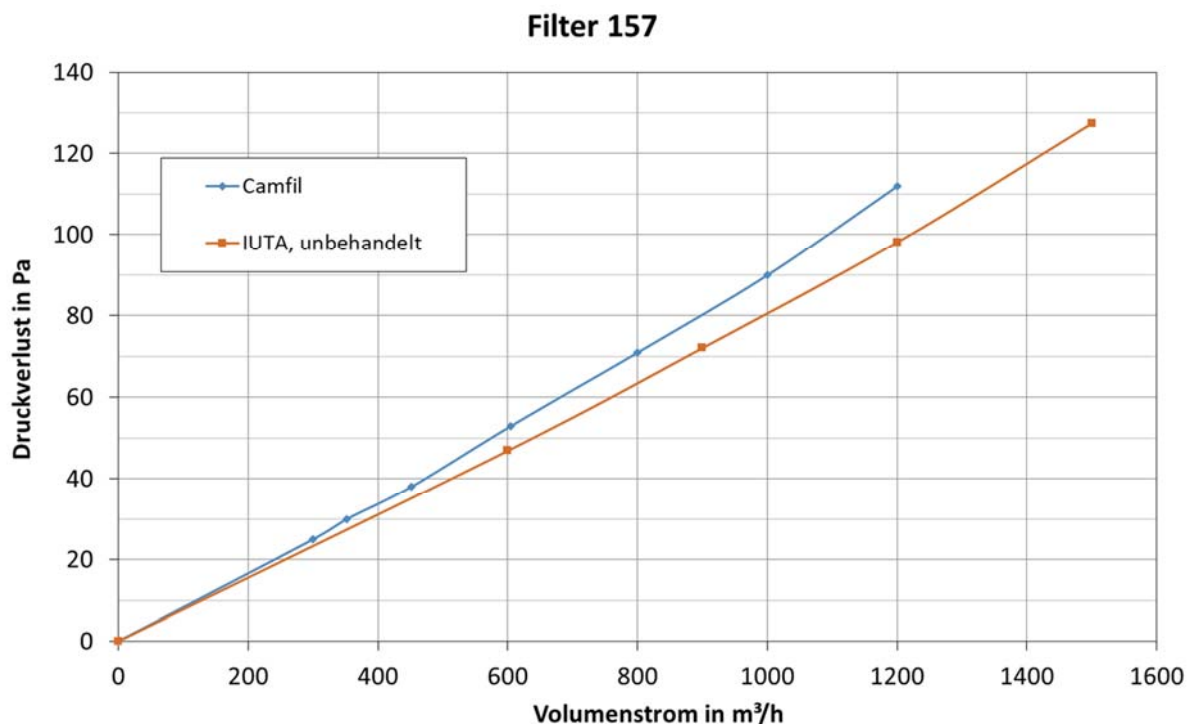


Abbildung 1-84: Druckverlustkurven des Filters 157 (Camfil und IUTA)

Das Ergebnis der Effizienzmessung des Filters 157 ist in Abbildung 1-85 über dem Partikeldurchmesser dargestellt (grüne Kurve). Die zugehörige minimale Effizienz $E_{95\%,\min}$ ist als grün gestrichelte Linie eingezeichnet. Der MPPS lag bei diesen Messungen bei 97 nm, und die minimale Effizienz im MPPS betrug 99,982 %. Der Filter wurde damit, wie vom Hersteller angegeben, als H13 klassifiziert.

Nach einer IPA-Konditionierung (blaue Kurve) zeigte sich eine deutliche Abnahme der Effizienz. Die minimale Effizienz $E_{95\%,\min}$ sank auf 99,948 %, sodass der Filter nur noch die Klasse E12 erreichte.

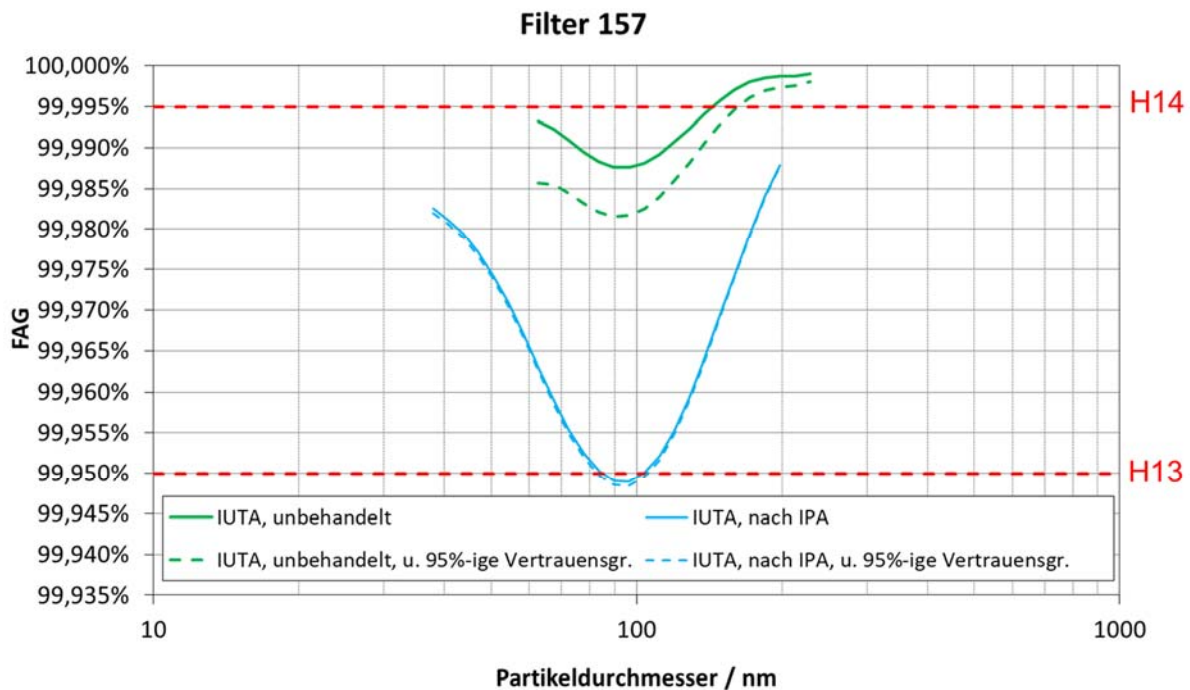


Abbildung 1-85: Effizienz des Filters 157 (IUTA) bei $1.200 \text{ m}^3/\text{h}$

Die Ergebnisse für beide Filter sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass es während der Messungen infolge der DEHS-Beaufschlagung zu einem deutlichen Druckverlustanstieg gekommen ist. Beim Filter 152 lag der Druckverlust bereits vor der Effizienzmessung um 6 Pa über dem Neuzustand, da der Versuch am Vortag abgebrochen werden musste und der Filter bereits eine Stunde mit DEHS beaufschlagt worden war.

Tabelle 10: IUTA-Ergebnisse, Rundversuch 2 (PET/ePTFE), SMPS Palas

Kenngröße	Filter 152	Filter 157
Masse vor Prüfung [g]	3.501,6	3.502,1
Masse nach Prüfung [g]	3.515,1	3.510,2
Druckverlust vor Messung [Pa]	101*	98
Druckverlust nach Messung [Pa]	136*	121
Abscheidegrad E [%]	99,962	99,988
Min. Abscheidegrad $E_{95\%,\min}$ [%]	99,951	99,982
MPPS [nm]	84	97
Filterklasse	H13	H13

* Prüfung am Vortag wegen eines Problems mit dem SMPS abgebrochen; Filter 1 h mit DEHS beaufschlagt. Der Druckverlust des neuen Filters lag bei 95 Pa.

1.5.5.4 Parametervariation am IUTA

Eine Variation war die Klassifizierung mit reinem und verdünntem DEHS. Abbildung 1-86 zeigt die gemessenen Effizienzen mit reinem und verdünntem DEHS über dem Partikeldurchmesser. Die grünen Kurven stellen die Messungen mit reinem DEHS dar, die braunen Kurven die Messungen mit 10 % DEHS in IPA. Die minimalen Effizienzen sind jeweils als gestrichelte Linien dargestellt, die Grenzwerte für die Klassen H13 und H14 sind als rote gestrichelte Linie eingezeichnet.

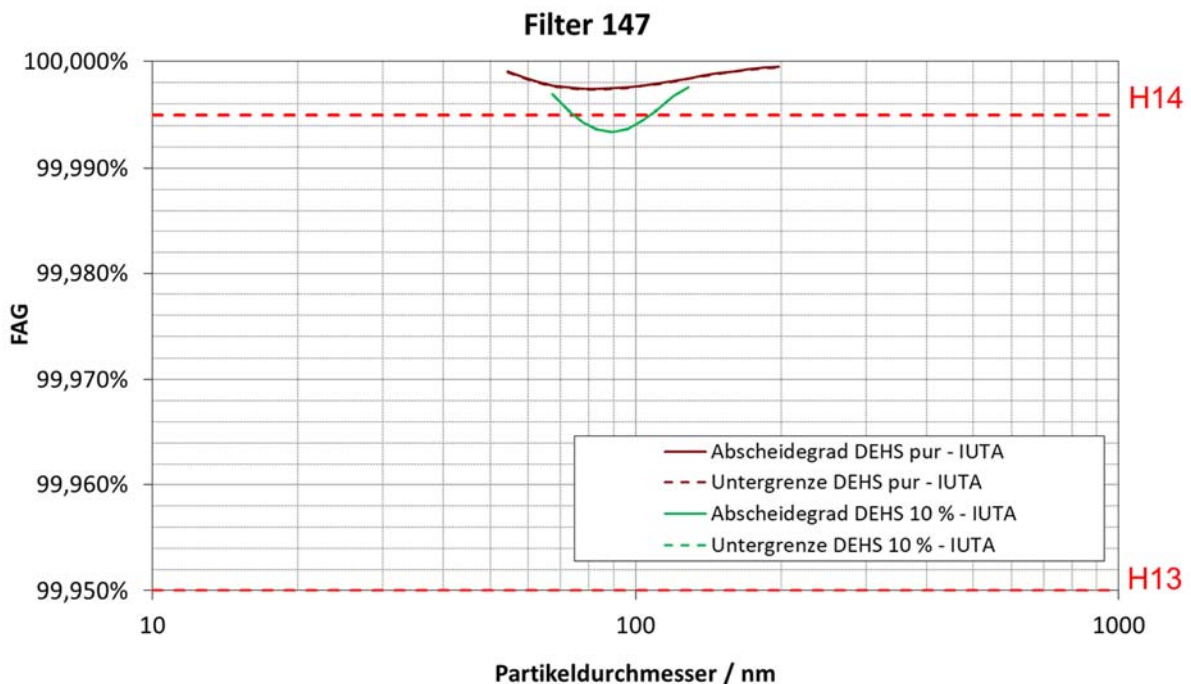


Abbildung 1-86: Einfluss der DEHS-Verdünnung (DEHS pur vs. 10 % DEHS in IPA) auf die gemessene Effizienz am IUTA

Der Einfluss der Verdünnung des Prüfaerosols war deutlich ausgeprägt. Wurde statt reinem DEHS ein Gemisch aus 10 % DEHS in IPA verwendet, erhöhte sich die gemessene Effizienz im MPPS signifikant. Gleichzeitig verschob sich der MPPS von 90 nm auf 84 nm zu kleineren Partikeldurchmessern. Die minimale Effizienz $E_{95\%,\min}$ stieg von 99,993 % auf 99,997 %, sodass der Filter statt als H13 als H14 klassifiziert wurde.

Eine weitere Variation betraf den Einfluss eines vom Nennvolumenstrom abweichenden Betriebs. Hierzu wurde derselbe Filter einmal beim Nennvolumenstrom von 1.200 m³/h und einmal bei einem um 10 % reduzierten Volumenstrom von 1.080 m³/h klassifiziert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1-87 dargestellt. Die grüne Kurve zeigt die Messung beim Nennvolumenstrom, die zugehörige minimale Effizienz ist als grün gestrichelte Linie eingezeichnet. Die blaue Kurve zeigt die Messung beim reduzierten Volumenstrom; die minimale Effizienz ist als blau gestrichelte Linie dargestellt.

Der MPPS verschob sich durch die Reduktion des Volumenstroms von 90 nm auf 84 nm zu kleineren Partikeldurchmessern. Die minimale Effizienz $E_{95\%,\min}$ änderte sich hingegen praktisch nicht

(99,989 % gegenüber 99,988 %). Der Einfluss der Volumenstromreduktion auf die Klassifizierung war damit vernachlässigbar.

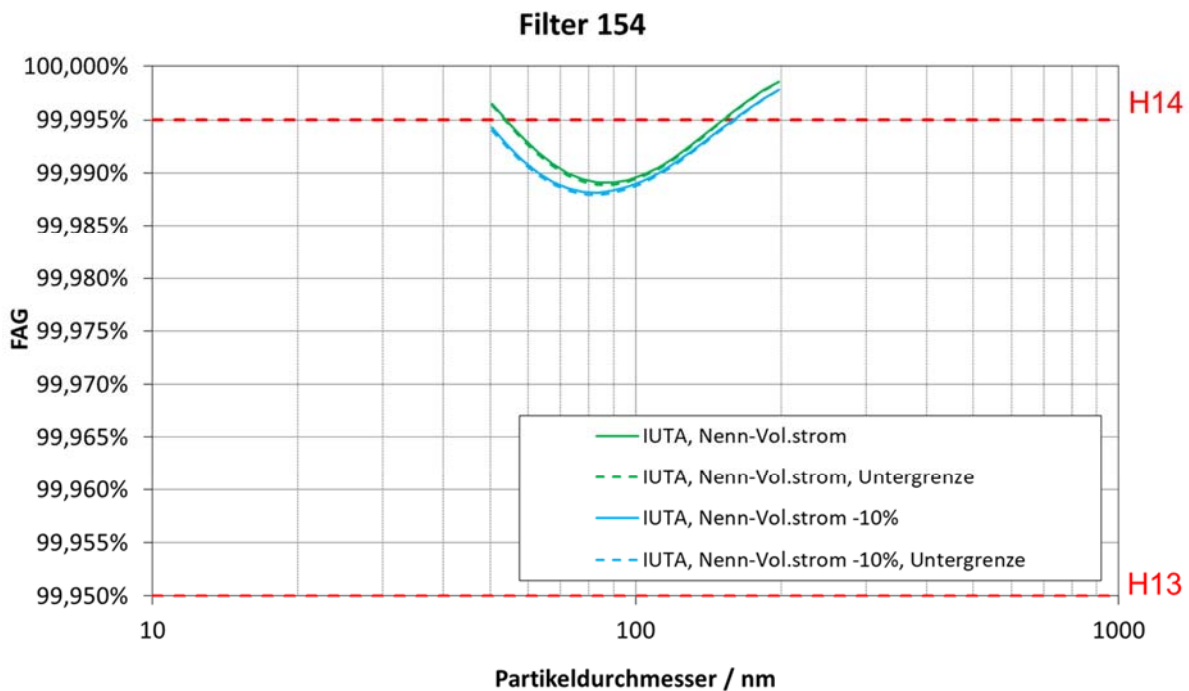


Abbildung 1-87: Einfluss des Volumenstroms auf die gemessene Effizienz am IUTA

1.5.5.5 Ergebnisse der weiteren Labore

Die übrigen Labore führten die Messungen mit sehr unterschiedlichen Prüfständen und Messgeräten durch. Eine Auswahl der Ergebnisse ist nachfolgend zusammengefasst.

Labor A (SMPS, Messungen mit und ohne Vorabscheider)

Labor A verwendete ein TSI SMPS-System (Mod. 3082, DMA 3081, CPC 3772) in Kombination mit einem Aerosolgenerator Topas ATM 230. Die Messungen wurden jeweils ohne und mit einem Vorabscheider für größere DEHS-Partikel durchgeführt.

Der Einsatz des Vorabscheiders führte zu einem deutlich geringeren Druckverlustanstieg während der Messung. Bei Filter 141 mit Vorabscheider stieg der Druck um 9 Pa an, während bei Filter 142 ohne Vorabscheider ein Anstieg von 19 Pa beobachtet wurde (jeweils vor der IPA-Konditionierung). In den nachfolgenden Diagrammen sind die Messungen am neuen Filterelement in grün und die Messungen am IPA-konditionierten Filter in blau dargestellt.

Die Effizienzabnahme nach der IPA-Dampfkonditionierung war mit Vorabscheider stärker ausgeprägt. Ohne Vorabscheider sank die Effizienz lediglich von 99,9858 % auf 99,9847 % (Abbildung 1-88), während sie mit Vorabscheider von 99,9864 % auf 99,9741 % zurückging (Abbildung 1-89). In beiden Fällen blieb die Filterklasse H13 erhalten.

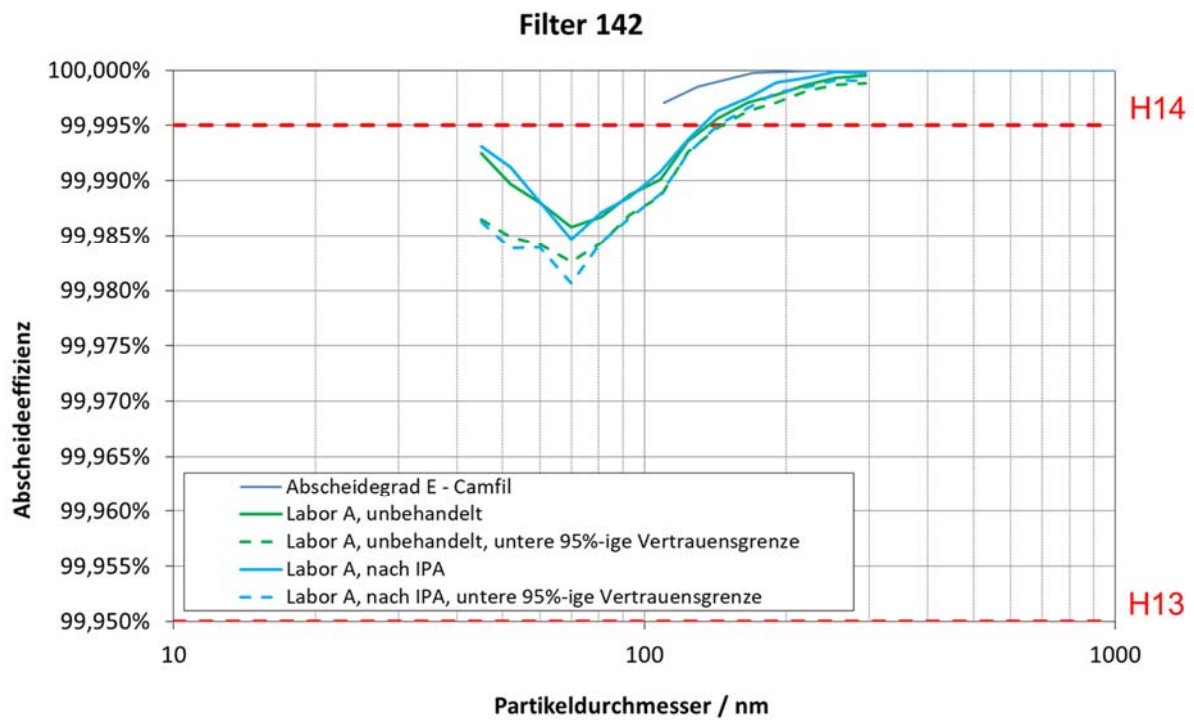


Abbildung 1-88: Effizienz des Filters 142 (Labor A) bei 1.200 m³/h ohne Vorabscheider

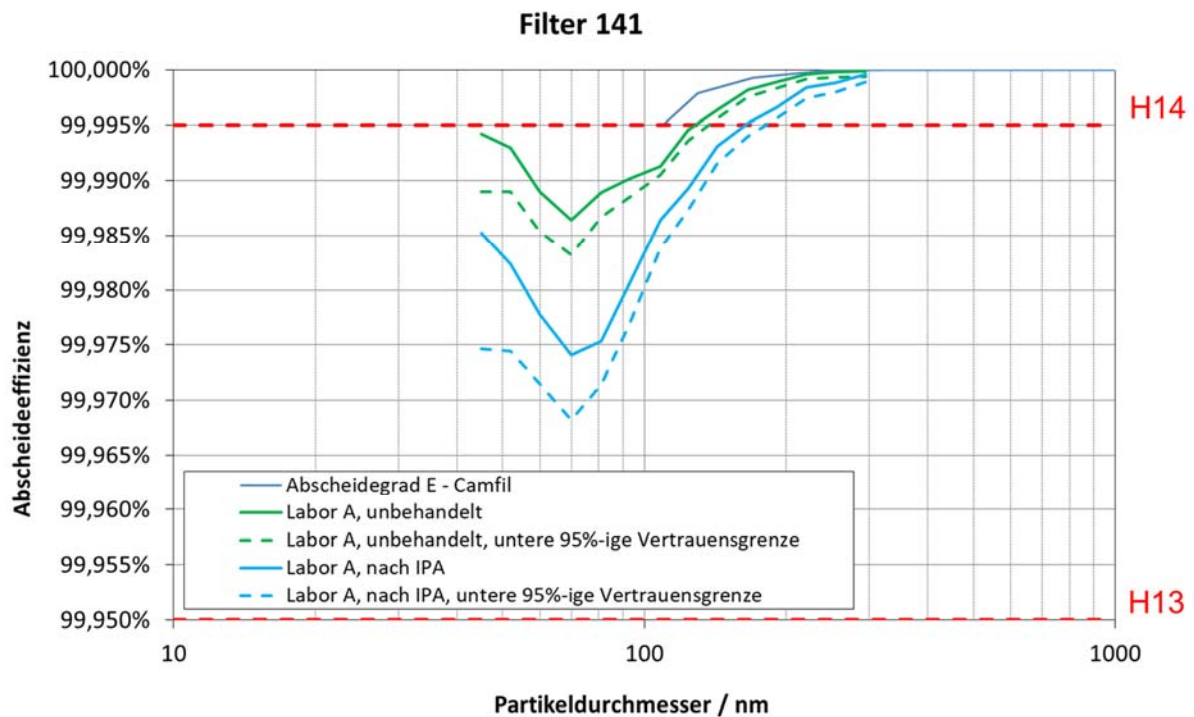


Abbildung 1-89: Effizienz des Filters 141 (Labor A) bei 1.200 m³/h mit Vorabscheider

Labor D (SMPS, nur abströmseitig mit Impaktor)

Labor D nutzte ein TSI SMPS-System (Mod. 3080, DMA 3081, Röntgenquelle 3087, CPC 3772) in Kombination mit einem Aerosolgenerator Topas ATM 230 und einem nachgeschaltetem Impaktor. Die Probenahme erfolgte ausschließlich abströmseitig. Im Diagramm ist die Messung am neuen Filterelement in grün dargestellt, die Messung am IPA-konditionierten Filter in blau; die durchgezogene Linie zeigt jeweils den gemessenen Abscheidegrad E , während die gestrichelte Linie die minimale Effizienz $E_{95\%,\min}$ markiert.

Bei diesem Labor zeigte sich der Effekt der IPA-Konditionierung besonders deutlich. Der Abscheidegrad sank von 99,991 % im unbehandelten Zustand (Klasse H13) auf 99,674 % nach der IPA-Dampfbehandlung, was einer Einstufung in E12 entspricht (Abbildung 1-90). Parallel dazu stieg die Filtermasse um etwa 16 g. Der Druckverlust erhöhte sich nach der Konditionierung von 100 Pa (unbehandelt) auf 171 Pa nach Messung am konditionierten Filter.

Die in Tabelle 11 dargestellten Werte verdeutlichen den ausgeprägten Einfluss der DEHS-Beladung sowie der IPA-Konditionierung auf das Filterelement. Bereits während der ersten SMPS-Messung kam es aufgrund unzureichender Zählereignisse im Reingas zu einer verlängerten Messdauer, wodurch der Filter zusätzlich mit DEHS beaufschlagt wurde. Dies führte zu einem deutlichen Anstieg des Druckverlusts von ursprünglich 100 Pa auf 122 Pa.

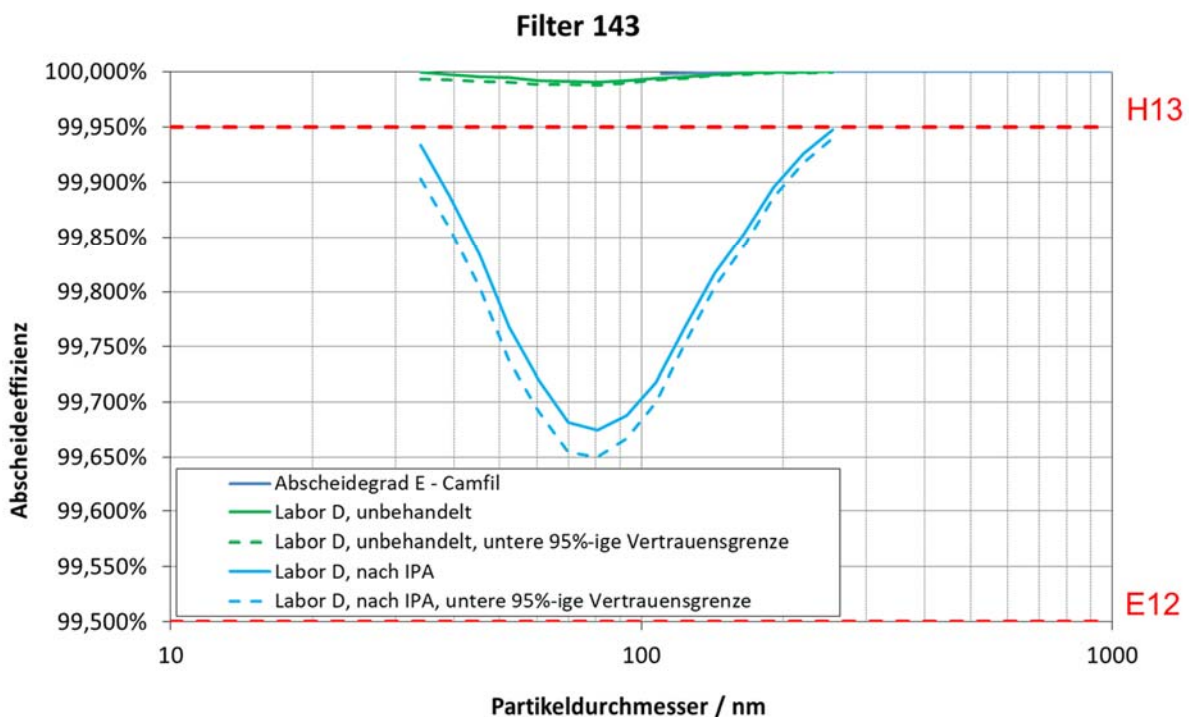


Abbildung 1-90: Effizienz des Filters 143 (Labor D) bei 1.200 m³/h mit Vorabscheider

Vor der Wiederholungsmessung am Folgetag hatte sich der Druckverlust leicht auf 110 Pa reduziert, was auf eine partielle Verdunstung von DEHS zurückzuführen ist. Nach Abschluss der erneuten

SMPS-Messung lag der Druckverlust bei 123 Pa, begleitet von einer moderaten Massenzunahme von ursprünglich 3545,2 g auf 3552,7 g.

Die anschließende IPA-Dampf-Konditionierung führte zu einer deutlichen Entladung des elektrostatischen Mediums. Durch das IPA stieg die Masse auf 3599,8 g an, der Druckverlust betrug, vier Tage später gemessen, 147 Pa. Die abschließende SMPS-Messung am behandelten Filter führte zu einem weiteren Anstieg auf 171 Pa sowie einer finalen Masse von 3561,0 g.

Diese Werte bestätigen, dass Labor D eine besonders starke Veränderung des Filterverhaltens beobachtete, sowohl hinsichtlich der mechanischen Belastung durch DEHS als auch der Effizienzreduktion infolge der IPA-Entladung.

Tabelle 11: Massenzunahme und Druckverlust am Filter 143 bei der Klassifizierung (Labor D)

Kommentar	Filtermasse	Druckverlust
Filter unbehandelt	3545,2 g	100 Pa
nach SMPS Messung ohne ausreichende Zählereignisse im Reingas		122 Pa
vor SMPS Messung am Folgetag		110 Pa
nach SMPS Messung am Folgetag	3552,7 g	123 Pa
nach IPA-Dampf Konditionierung	3599,8 g	
vor Messung (4 Tage später)	3558,7 g	147 Pa
nach SMPS Messung am behandelten Filter	3561,0 g	171 Pa

Labor E (Scanprüfstand, Lighthouse Remote 1100)

Labor E arbeitete mit einem Filterscanner AFS 150 und einem Partikelsensor Lighthouse Remote 1100 bei einem Nennvolumenstrom von 1.214 m³/h und einem Verdünnungsfaktor von 1:10.000 auf der Anströmseite. Die gemessene minimale Effizienz $E_{95\%,\min}$ lag mit 99,99908 % im unbehandelten Zustand bzw. 99,99909 % nach der IPA-Konditionierung jeweils bei 0,2 µm und führte in beiden Fällen zur Klassifizierung H14.

Die IPA-Konditionierung hatte bei diesem Labor praktisch keinen Einfluss auf die gemessene Effizienz. Dies ist jedoch darauf zurückzuführen, dass die ausgewertete Partikelgröße am unteren Rand des OPC-Messbereichs lag und damit weit oberhalb des tatsächlichen MPPS des Mediums.

Die für Labor E relevanten Messwerte sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Ergebniszusammenstellung der Klassifizierung für Labor E

	unbehandelt	nach IPA
Druckverlust	91 Pa	92 Pa
Abscheidegrad E	99,99909 %	99,99912 %
minimaler Abscheidegrad $E_{95\%,\min}$	99,99908 %	99,99909 %
Filterklasse	H14	H14
Partikelgröße im „Abscheidegradminimum“	0,2 µm	0,2 µm

Labor G (acht Tests mit zwei Prüfständen und zwei OPC)

Labor G führte insgesamt acht Einzelprüfungen an zwei Prüfständen (AFS 150 und ALF 114) mit zwei unterschiedlichen optischen Partikelzählern, dem Lighthouse LH 1100 mit einer Erfassungsgrenze von 0,1 µm sowie dem LAP 340/L mit einer Erfassungsgrenze von 0,2 µm (Tabelle 13).

Die Ergebnisse zeigen über alle Messreihen hinweg einen stetigen Druckverlustanstieg infolge der DEHS-Beladung. Nach der IPA-Konditionierung wurde ein deutlicher zusätzlicher Druckverlustanstieg beobachtet, exemplarisch stieg der Druckverlust in Test 5 von 113 Pa auf 189 Pa.

Der Einfluss der IPA-Konditionierung auf die Effizienz hängt bei Labor G stark von der verwendeten Messmethode ab. Auffällig ist, dass die am ALF 114 gemessenen Filter systematisch schlechter klassifiziert wurden (ca. 99,994 %) als die am AFS 150 gemessenen (ca. 99,9994 %). Ursache hierfür ist die unzureichende Dichtheit der Standard-Filteraufnahme des ALF 114 für HEPA-Messungen, die Leckagekonzentration beträgt etwa 0,4 Partikel/cm³. Am AFS 150 zeigte sich vor der Konditionierung eine sehr gute Übereinstimmung zwischen integrierter Scanmessung und Haubenmessung. Am ALF 114 hingegen ergab sich kein Effizienzunterschied zwischen den beiden eingesetzten OPC-Systemen LAP 340/L (0,2 µm) und LH 1100 (0,1 µm).

Die vollständigen Messwerte zu Druckverlust, Effizienz und Filterklasse sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 13: Durchgeführte Prüfungen (Labor G)

Test	Prüfstand	Methode	OPC	Durchläufe
1	AFS 150	Scan integriert	LH 1100	4
Nacht				
2	AFS 150	Haube	LH 1100	3
3	ALF 114		LAP 340/L	7
Nacht				
4	ALF 114		LH 1100	6
Konditionierung				
5	ALF 114		LH 1100	2
6	ALF 114		LAP 340/L	2
7	AFS 150	Haube	LH 1100	2
8	AFS 150	Scan integriert	LH 1100	4

Tabelle 14: Zusammenstellung der Messergebnisse (Labor G)

Test	Prüfstand	Methode	OPC	Durchläufe	dp (Pa)		E (%)	Klasse
1	AFS 150	Scan integriert	LH 1100	4	89	94	99,99941	H14
Nacht								
2	AFS 150	Haube	LH 1100	3	99	108	99,99940	H14
3	ALF 114		LAP 340/L	7	103	123	99,99484	H13
Nacht								
4	ALF 114		LH 1100	6	113	114	99,99413	H13
Konditionierung								
5	ALF 114		LH 1100	2	189	191	99,99242	H13
6	ALF 114		LAP 340/L	2	205	221	99,99403	H13
7	AFS 150	Haube	LH 1100	2	217	217	99,98789	H13
8	AFS 150	Scan integriert	LH 1100	4	206	204	99,99645	H14*

* Leckageverdacht

Labor H (Laseraerosolspektrometer PMS LAS-X II)

Labor H verwendete an einem ALF-114-Prüfstand das Laseraerosolspektrometer PMS LAS-X II in Kombination mit einem Aerosolgenerator ATM 230. Die Probe der Rohluft wurde mit einem Verdünnungsfaktor von 994 entnommen (unverdünntes DEHS). Die Probenahmeleitung hatte eine Länge von etwa 3 m bei einem Durchmesser von 6,4 mm.

Für den unbehandelten Filter wurde eine Effizienz von 99,99752 % bei einer Partikelgröße im „Abscheidegradminimum“ von 0,122 µm ermittelt, was der Filterklasse H14 entspricht.

In Abbildung 1-91 sind die Messergebnisse für den Filter 149 dargestellt. Die blaue Kurve zeigt die vom Hersteller (Camfil) gemessene Effizienz, während die grüne Kurve die Messung von Labor H am unbehandelten Filter wiedergibt. Beide Kurven verlaufen im Bereich oberhalb von 200 nm nahezu deckungsgleich und liegen für den kleinsten gemessenen Partikeldurchmesser deutlich oberhalb der Klassengrenze für H14.

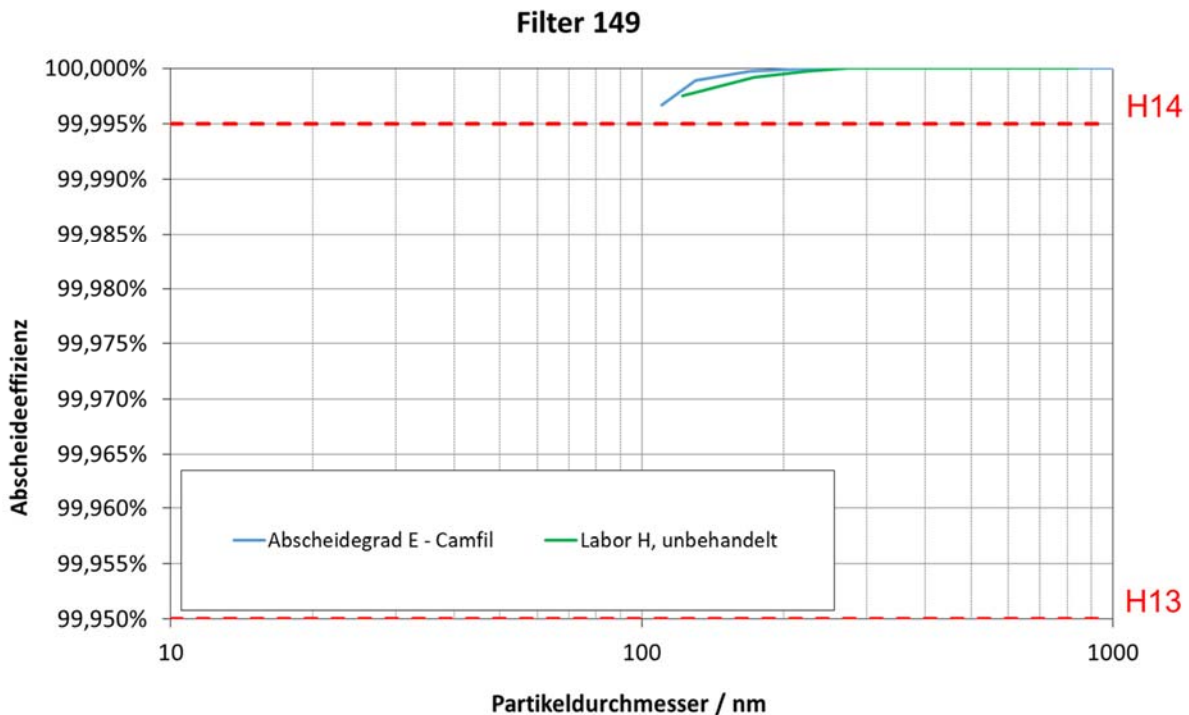


Abbildung 1-91: Effizienz des Filters 149 (Labor H) bei 1.200 m³/h

1.5.5.6 Diskussion Rundversuch 2

Der zweite Rundversuch an PET/ePTFE-Filterelementen bestätigt die aus dem ersten Rundversuch abgeleiteten Erkenntnisse und zeigt zusätzlich Besonderheiten auf, die speziell für Filter mit Membran relevant sind. Der MPPS solcher Filter liegt deutlich unterhalb von 0,1 µm und damit außerhalb des Messbereichs üblicher optischer Partikelzähler. Ohne einen aus Medienmessungen ermittelten Korrelationsfaktor nach DIN EN ISO 29463-5, Anhang B, sind OPC-Messungen an diesen Filtern daher nicht direkt mit SMPS-Messungen vergleichbar.

Darüber hinaus zeigte sich, dass die Standard-Filteraufnahme von RLT-Filterprüfkanälen für Messungen an HEPA-Filtern häufig nicht ausreichend dicht ist. Dies wurde insbesondere bei Labor G deutlich, wo eine Leckagekonzentration von etwa 0,4 Partikel/cm³ zu einer systematisch schlechteren Klassifizierung führte. Ein weiterer zentraler Befund betrifft den Einsatz eines Vorabscheiders: Die Entfernung großer DEHS-Partikel aus dem Aufgabeaerosol reduziert den Druckverlustanstieg während der Messung erheblich und verringert bei SMPS-Messungen zusätzlich den Anteil mehrfach geladener Partikel.

Eine Verdünnung von DEHS mit IPA kann bei Filtern mit Membran zu einer veränderten Filterklasse führen. Die Verwendung von IPA zur Konditionierung ist bei Membranfiltern daher kritisch zu bewerten, da eine mögliche Schädigung der Membran nicht ausgeschlossen werden kann. Die bei einigen

Laboren nach der Konditionierung beobachtete dauerhafte Massezunahme und der deutliche Druckverlustanstieg deuten darauf hin, dass sich IPA im zuvor abgeschiedenen DEHS löst und nur langsam wieder verdunstet. Ein Durchspülen mit sauberer Luft nach der Konditionierung wird daher empfohlen.

1.6 Arbeitspaket 6: Organisation und Auswertung eines Rundversuches zur Evaluierung der Vorgehensweisen nach DIN EN ISO 29463-3 (Uni + IUTA)

Die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket wurden federführend von der FE 1 (Universität Duisburg-Essen) durchgeführt. Die inhaltliche Darstellung der durchgeführten Rundversuche an den Filtermedien findet sich in den Abschnitten 1.5.1, 1.5.2 und 1.5.4.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die in DIN EN ISO 29463-3 beschriebenen Vorgehensweisen hinsichtlich ihrer praktischen Umsetzbarkeit, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Prüfständen und Messmethoden untersucht. Dabei standen insbesondere die Abhängigkeit der Messergebnisse von der Messmethode (SMPS vs. OPC), der Einfluss der Prüfstands- und Probenahmebedingungen sowie die Auswirkungen von DEHS-Beladung und Konditionierungsverfahren im Fokus. Erste übergeordnete Erkenntnisse zeigen, dass sowohl Prüfstandsparameter (z. B. Dichtheit der Filteraufnahme, Probenahmeleitung) als auch die Aerosolcharakteristik (z. B. Mehrfachladung, Partikelgrößenverteilung) einen messbaren Einfluss auf die ermittelten Effizienzen und Druckverluste haben.

Diese Beobachtungen bilden die Grundlage für die im weiteren Projektverlauf durchgeführten vertiefenden Untersuchungen an Filterelementen sowie für die später im Gesamtfazit zusammenzuführenden Empfehlungen zur Standardisierung und Optimierung der Messverfahren.

1.7 Arbeitspaket 7: Organisation und Auswertung eines Rundversuches zur Evaluierung der Vorgehensweisen nach DIN EN ISO 29463-4 und -5 (Uni + IUTA)

Dieses Arbeitspaket umfasst die Rundversuche an konfektionierten Filterelementen. Beide Rundversuche wurden federführend von der FE 2 (IUTA) organisiert und koordiniert. Eine ausführliche Darstellung der Prüflinge, Messaufbauten, Ergebnisse und Parametervariationen findet sich in den Abschnitten 1.5.3 und 1.5.5.

Das Scan-Verfahren nach DIN EN ISO 29463-4 ist für die Leckprüfung normativ vorgesehen, für die Abscheidegradprüfung nach DIN EN ISO 29463-5 ist ein Scan nicht erforderlich. Dementsprechend setzen die teilnehmenden Labore Scan-Verfahren nur dort ein, wo Leckprüfungen vorgesehen waren. In den Laboren E und G des zweiten Rundversuchs kamen Scan-Verfahren (AFS 150, ALF 114;

integrierter Scan oder Haubenmessung) zum Einsatz, zusätzlich wurden dort umfangreiche Vergleichsmessungen mit unterschiedlichen optischen Partikelzählern (Lighthouse Remote 1100, LAP 340/L) durchgeführt (siehe Abschnitt 1.5.5.5).

Die Ergebnisse zeigen, dass Wahl des Messverfahrens, Prüfstands- und Probenahmebedingungen sowie die eingesetzten OPC-Systeme einen messbaren Einfluss auf die Klassifizierung der Filterelemente haben. Diese Erkenntnisse fließen in die weiteren Analysen und in das Gesamtfazit ein.

1.8 Arbeitspaket 8: Entladung von Filtermedien und gesamter konfektionierter Filter: Vergleichbarkeit der Abscheidegrade (Uni + IUTA)

In DIN EN ISO 29463-5, Anhang C, ist ein Verfahren zur Verifizierung beschrieben, ob eine Abscheidegradverbesserung durch elektrostatische Aufladung der Filterfasern vorliegt. Die Prüfung erfolgt sowohl an Medienproben als auch an konfektionierten Filtern, die einer Isopropanol-Dampf-Atmosphäre ausgesetzt werden.

1.8.1 Entladung an Filtermedien

Die Entladungsversuche an planen Filtermedien (Glasfaser H14 und zwei vollsynthetische Medien mit ePTFE-Membran) wurden an der FE 1 (Uni DuE) durchgeführt, die Ergebnisse sind in den Abschnitten 1.5.2 und 1.5.4 dargestellt. Das GlasfasermEDIUM zeigte nur eine minimale Beeinträchtigung durch die Entladung, bei den vollsynthetischen Medien führte die IPA-Konditionierung zu einer deutlichen Verschlechterung des Fraktionsabscheidegrades.

1.8.2 Entladung der konfektionierten Filterelemente

Zur Entladung der konfektionierten Filterelemente wurde am IUTA das Konditionierungskabinett TDC 584 (Topas) eingesetzt. Die Konditionierung erfolgte in Anlehnung an die standardisierte Isopropanol-Konditionierung nach DIN EN ISO 29463-5, Anhang C. Für die PET/ePTFE-Filter des zweiten Rundversuchs ergaben sich stark unterschiedliche Befunde zwischen den Laboren (A, D, E, G), was auf Prüfstands- und Probenahmeunterschiede sowie auf mögliche IPA-Rückstände in abgetrennten DEHS-Filmen zurückzuführen ist. Ein definiertes Nachspülen mit sauberer Luft oder eine ausreichend lange Ausdampfphase nach der Konditionierung ist daher in zukünftigen Prüfungsanweisungen zu verankern.

1.9 Arbeitspaket 9: Einfluss des Aerosol-Ladungszustandes auf die Filterklassifizierung (Uni)

Im Rahmen dieses Arbeitspakets untersucht die FE 1 (Universität Duisburg-Essen) den Einfluss des Ladungszustandes des Prüfaerosols auf die Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades und die

resultierende Filterklassifizierung nach DIN EN ISO 29463. Da insbesondere bei SMPS-Messungen die elektrische Neutralisation des Aerosols eine zentrale Voraussetzung für reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse darstellt, wird in diesem Arbeitspaket analysiert, in welchem Umfang geladene oder unzureichend neutralisierte Partikel zu Verschiebungen des MPPS oder zu systematischen Abweichungen im Abscheidegrad führen können. Die Arbeiten umfassen sowohl experimentelle Untersuchungen mit definiert geladenen und neutralisierten Aerosolen als auch eine Bewertung der Relevanz für die praktische Prüfstandsauslegung. Eine detaillierte Ausarbeitung der Ergebnisse erfolgt nach Abschluss der laufenden Untersuchungen durch die Universität.

Fazit

Die durchgeführten Rundversuche zur Vergleichbarkeit der Prüfverfahren nach DIN EN 1822-1 und DIN EN ISO 29463 liefern ein konsistentes Bild: Messmethode, Prüfstandsauslegung und Probenahmeparameter beeinflussen die ermittelten Effizienz- und Druckverlustwerte in einem Maße, das für verlässliche Klassifizierungen systematisch berücksichtigt werden muss. Messunsicherheiten und Prüfstandsundichtigkeiten tragen erheblich zur Streuung zwischen Laboren bei und können ohne gezielte Gegenmaßnahmen zu Fehleinstufungen führen.

Filtermedien

Für planare Medien ist eine gute Übereinstimmung zwischen SMPS- und OPC-Messungen erreichbar, sofern die Partikelbeaufschlagung während der Messung gering bleibt. Wesentliche Einflussgrößen sind Anströmgeschwindigkeit, Vorabscheider, Aufbau der Probenahme sowie der Verdünnungsgrad des Prüfaerosols; diese Parameter sind in den aktuellen ISO-Vorgaben nicht ausreichend präzisiert. Polydisperse OPC-Messungen erfordern stark verdünntes DEHS, um Materialveränderungen durch Überbeladung zu vermeiden. Der aerodynamische Klassierer (AAC) stellt ein geeignetes quasi-monodisperses Prüfaerosol bereit, ist jedoch mit erhöhtem Aufwand verbunden. Alternative Testpartikel liefern vergleichbare Ergebnisse, sind aber für Routineprüfungen weniger praktikabel.

Konfektionierte Filterelemente

Auch bei konfektionierten Elementen ist eine gute Übereinstimmung erreichbar, wenn die Partikelbeaufschlagung kontrolliert wird. DEHS-Beladung führt zu einem stetigen Druckverlustanstieg; ein Vorabscheider reduziert diesen Effekt deutlich und verbessert die Reproduzierbarkeit. Standard-Filteraufnahmen in RLT-Prüfkanälen sind häufig nicht dicht genug für Messungen an HEPA-Filtern; für Prüfungen nach DIN EN ISO 29463-5 ist eine besondere Abdichtung der Filteraufnahme erforderlich. Bei ePTFE-Membranen liegt der MPPS typischerweise deutlich unter $0,1\text{ }\mu\text{m}$; OPC-Messungen sind ohne experimentell ermittelte Korrelationsfaktoren nach DIN EN ISO 29463-5, Anhang B, nicht mit SMPS-Messungen vergleichbar. IPA-Konditionierung kann bei Membranfiltern zu dauerhafter Massezunahme, erhöhtem Druckverlust und in Einzelfällen zu einer Änderung der Filterklasse nicht

allein aufgrund der elektrostatischen Entladung führen; die Verwendung von IPA ist daher kritisch zu bewerten.

Technische und methodische Schlussfolgerungen

Für belastbare Klassifizierungen sind wiederholte Messungen, eine systematische Unsicherheitsabschätzung und standardisierte Prüfprotokolle unabdingbar. SMPS-Messungen sollten bevorzugt werden, wenn der MPPS im Sub-0,1- μm -Bereich liegt; alternativ sind experimentell bestimmte OPC-zu-SMPS-Korrelationsfaktoren zu dokumentieren und anzuwenden. Prüfstände sind vor Messserien auf Dichtheit zu prüfen und gegebenenfalls nachzurüsten. Probenahmeleitungen, Vorabscheider-Einsatz und Verdünnungsfaktor bei der Rohgasprobenahme sowie Verdünnung der Aerosolsubstanz sind verbindlich zu standardisieren und in Prüfberichten vollständig zu dokumentieren. Nach einer IPA-Konditionierung ist ein definiertes Nachspülen mit sauberer Luft bzw. eine ausreichend lange Ausdampfphase vorzusehen.

Empfehlungen für Normung und Praxis

Normative Präzisierungen sollten umfassen: verbindliche Prüfstandsdichtheitstests, standardisierte Probenahmeleitungen, dokumentierte Verwendung von Vorabscheidern, definierte Nachspül- und WarteprozEDUREN nach IPA-Konditionierung sowie verpflichtende Unsicherheitsbilanzen in Prüfberichten. Für Membranmedien sind spezifische Prüfprotokolle zu entwickeln, die MPPS-Ermittlung mittels SMPS oder validierte Korrekturfaktoren vorsehen. Langzeit- und Alterungstests nach IPA-Behandlung sind durchzuführen, um mögliche Membranschädigungen auszuschließen.

Offene Punkte und nächste Schritte

Offen bleiben Fragen zur Langzeitwirkung von IPA auf verschiedene Membrantypen, zur Quantifizierung von Prüfstandseffekten über mehrere Labore hinweg und zur statistischen Trennung systematischer von zufälligen Einflüssen. Empfohlen werden gezielte Folgeversuche zur Bestimmung OPC-SMPS-Korrelationsfaktoren, ringversuchsübergreifende Dichtheitsprüfungen der Prüfstände sowie die Entwicklung einer standardisierten Protokollvorlage für künftige Rundversuche.

2 Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)**

Übersicht in Personenmonaten (PM):

Forschungseinrichtung	Ansätze	bewilligte PM	geleistete PM	Differenz PM
FE 1 (UDE)	A.1	25,25	25,25	0
FE 2 (IUTA)	A.1	16,8	16,7996	- 0,0004

Forschungseinrichtung 1

Die Durchführung der beschriebenen Untersuchungen erfolgte im Berichtszeitraum durch wissenschaftlich-technisches Personal (HPA A) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes) im Umfang von insgesamt 25,25 PM, und damit genau wie geplant.

Jedoch musste aufgrund zeitlicher Verzögerungen bei der Neueinstellung des Personals eine kostenneutrale Verlängerung beantragt werden, diese wurde vom Projektträger DLR genehmigt.

Forschungseinrichtung 2

Die Durchführung der beschriebenen Untersuchungen erfolgte im Berichtszeitraum durch wissenschaftlich-technisches Personal (HPA A) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes) im Umfang von insgesamt 16,7996 PM. Auch in FE2 erfolgte der Personaleinsatz somit exakt wie geplant.

- Ausgaben für Gerätebeschaffung (Einzelansatz B des Finanzierungsplans):**

Wurden von keiner FE beantragt.

- Ausgaben für Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans):**

Wurden ebenfalls von keiner FE beantragt.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Ausgaben waren für die Durchführung der geleisteten Arbeiten notwendig und angemessen. Die durchgeführten Arbeiten stellen die Umsetzung der im Forschungsantrag vorgesehenen Arbeitsschritte dar und waren für die Erreichung des Forschungsziels wichtig. Die geleisteten Arbeiten waren zur Bearbeitung der genannten Arbeitspakete erforderlich.

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Hauptziel des Projektes war die systematische Überprüfung der Vergleichbarkeit der in DIN EN 1822-1 sowie DIN EN ISO 29463 zugelassenen Prüfverfahren für plane Filtermedien und konfektionierte Filterelemente der Gruppen E, H und U. Die Datengrundlage bilden zwei Rundversuche an planen Filtermedien (Glasfaser und PET mit ePTFE-Membran) sowie zwei Rundversuche an konfektionierten Filterelementen, an denen jeweils sieben Laboratorien teilnahmen.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen deutlich, dass die gegenwärtig in den Normen zugelassenen Vorgehensweisen zu unterschiedlichen Klassifizierungen führen können, obwohl die Prüflinge nominell identisch sind. Die wesentlichen Einflussgrößen lassen sich den Parametern Prüfaerosol-Handhabung (rein oder verdünnt), Messgerät (SMPS vs. OPC), Probenahme (Anzahl und Position der Messstellen, Leitungslängen), Dichtigkeit der Filteraufnahme sowie dem Konditionierungsverfahren zuordnen. Diese Faktoren bestimmen maßgeblich die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Messergebnisse.

Es konnte gezeigt werden, dass bei geeigneter Wahl der Messparameter und einer qualifizierten Prüfstandsauslegung, insbesondere hinsichtlich Dichtheit, eine gute Übereinstimmung zwischen mono- und polydispersen Messverfahren erreichbar ist. Für Filter mit ePTFE-Membran ist jedoch der in DIN EN ISO 29463-5, Anhang B beschriebene Korrelationsansatz zwingend erforderlich, da der tatsächliche MPPS unterhalb des Messbereichs handelsüblicher OPC liegt und ohne Korrektur systematische Fehlklassifizierungen auftreten.

Das zweite Hauptziel des Projektes, die Bewertung alternativer Testaerosole und Klassiererkonzepte, wurde durch Messungen mit PSL-Partikeln (Uni DuE) sowie durch die Prüfung des Aerodynamic Aerosol Classifiers adressiert. Beide Ansätze liefern technisch vergleichbare Ergebnisse, sind jedoch gegenüber dem etablierten DEHS/SMPS-Verfahren mit deutlich höherem apparativem und zeitlichem Aufwand verbunden. Für Routineprüfungen, insbesondere im Umfeld kleiner und mittlerer Unternehmen, bleibt daher die DEHS/SMPS-basierte Vorgehensweise die praktikabelste und wirtschaftlichste Option.

Für die in der Branche tätigen KMU sowie die beteiligten Prüflaboratorien ergeben sich aus dem Projekt mehrere konkrete Nutzenaspekte. Die Ergebnisse liefern belastbare Empfehlungen zur Gestaltung von Messaufbauten und zur Handhabung des Prüfaerosols, mit denen die Reproduzierbarkeit von Abscheidegradmessungen im HEPA-Bereich deutlich verbessert werden kann. Darüber hinaus entsteht eine verlässliche Datenbasis, anhand derer KMU die Vergleichbarkeit eigener Prüfergebnisse mit denen externer Laboratorien und Kunden bewerten können. Die identifizierten

Präzisierungsbedarfe in DIN EN 1822-1 und DIN EN ISO 29463 bieten zudem wertvolle Impulse für die nationale und internationale Normungsarbeit. Schließlich liefern die Ergebnisse zur Anwendbarkeit des Korrelationsverfahrens nach ISO 29463-5, Anhang B, wichtige Hinweise für zukünftige Typprüfungen von Membranfiltern, die insbesondere für KMU-Hersteller von Bedeutung sind.

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Der Wissenstransfer in die gewerbliche Wirtschaft erfolgte während der gesamten Projektlaufzeit kontinuierlich und in enger Abstimmung mit den im projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Unternehmen. Durch die aktive Beteiligung von insgesamt sieben Prüflaboratorien und mehreren Filterherstellern wurden die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse unmittelbar in bestehende Prüfprozesse, interne Qualitätsrichtlinien und Entwicklungsaktivitäten der beteiligten KMU eingebracht.

Zentrale Elemente des Wissenstransfers waren die regelmäßigen PA-Sitzungen, in denen Zwischenergebnisse vorgestellt, Messprobleme diskutiert und Rückmeldungen aus der industriellen Praxis unmittelbar in die weitere Projektplanung integriert wurden. Die beteiligten Unternehmen erhielten frühzeitig Einblick in die Auswirkungen unterschiedlicher Messmethoden, Prüfaerosole und Prüfstandsparameter auf die Klassifizierung von Filtermedien und Filterelementen. Dadurch konnten sie ihre eigenen Prüfaufbauten bereits während der Projektlaufzeit anpassen und optimieren.

Darüber hinaus wurden die Ergebnisse der Rundversuche und Parametervariationen in mehreren Fachvorträgen (u. a. ProcessNet, FILTEC, IUTA-Filtrationstag) vorgestellt und damit einem breiteren Kreis von KMU aus der Filtrations- und Messtechnikbranche zugänglich gemacht. Die Forschungseinrichtungen standen den Unternehmen zudem für bilaterale Rückfragen, Messvergleiche und technische Diskussionen zur Verfügung, wodurch ein direkter Wissenstransfer in laufende Entwicklungs- und Qualitätssicherungsprozesse ermöglicht wurde.

Insgesamt führte das Vorhaben zu einer deutlichen Sensibilisierung der beteiligten KMU für die Einflussgrößen der normativen Prüfverfahren nach DIN EN 1822-1 und DIN EN ISO 29463. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen bereits während der Projektlaufzeit in die Optimierung von Prüfständen, die Anpassung interner Messprotokolle sowie in die Vorbereitung zukünftiger Normungsbeiträge ein und stärken damit unmittelbar die Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Unternehmen.

6 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

6.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen (vom Projektstart bis zum Projektende)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeit
Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses (PbA)	Wissenstransfer zu den beteiligten Unternehmen, Diskussion technischer Fragestellungen, Rückkopplung aus der industriellen Praxis	online / IUTA online / IUTA online / IUTA online / IUTA online / IUTA	13.06.2023 19.03.2024 11.11.2024 25.03.2025 20.11.2025
Vorstellung von Zwischenergebnissen auf relevanten Tagungen (Vortrag / Poster)	Wissenstransfer zu interessierten Personen und Unternehmen außerhalb des PbA	Chillventa Fachforen 2024, Nürnberg	09.10.2024
Lehrveranstaltungen an der Universität Duisburg-Essen: „Aerosolprozesstechnik“, Prof. Dr.-Ing. F. Schmidt “Air pollution control”; Dr.-Ing. S. Haep „Umweltmesstechnik“, Prof Dr.-Ing. C. Asbach	Übernahme der Ergebnisse in die akademische/universitäre Lehre	Universität Duisburg-Essen	SS 2024/2025 WS 2024/25 SS 2024/2025
Beratung interessierter Unternehmen (vor Ort oder online)	Direkter Wissenstransfer in die Wirtschaft	online / Präsenz	fortlaufend
Veröffentlichung von Projektergebnissen auf den Webseiten der Forschungseinrichtungen	Wissenstransfer zu interessierten Personen und Unternehmen	online	fortlaufend

6.2 Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeit
Veröffentlichung des Abschlussberichtes auf den Webseiten der Mitgliedsvereinigungen	Wissenstransfer zu interessierten Personen und Unternehmen	online	nach Abschluss des Vorhabens
Veröffentlichung der Ergebnisse in Fachzeitschriften	Verbreitung der Ergebnisse in Wissenschaft und Industrie	Print / online	nach Abschluss des Vorhabens

Lehrveranstaltungen an der Universität Duisburg-Essen: • “Air pollution control”; Dr.-Ing. S. Haep • „Umweltmesstechnik“, Prof Dr.-Ing. C. Asbach	Übernahme der Ergebnisse in die akademische/universitäre Lehre	Universität Duisburg-Essen	fortlaufend
Einbringung der Ergebnisse in technische Regelwerke und Normen	Transfer in die nationale und internationale Normungsarbeit; Unterstützung der Gremienarbeit		fortlaufend
Beratung interessierter Unternehmen	Unterstützung bei der praktischen Umsetzung der Projektergebnisse	nach Anfrage	ohne Zeitbegrenzung
Veröffentlichung von Projektergebnissen auf den Webseiten der Forschungseinrichtungen	Kontinuierlicher Wissenstransfer	online	fortlaufend

Einschätzung zur Realisierbarkeit der Transfermaßnahmen:

Die während der Laufzeit geplanten Maßnahmen konnten im Verlauf des Vorhabens weitgehend realisiert werden.

Auch die Realisierbarkeit der Maßnahmen nach Projektende wird aufgrund der Erfahrungen aus diesem sowie vielen weiteren IGF-Vorhaben der beteiligten Forschungseinrichtungen als hoch eingeschätzt.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Mittelwert Druckverlust von H14- Filtermedien aus 3 unterschiedlichen Chargen	11
Abbildung 1-2: Wiederholungsmessungen an 3 Proben unterschiedlicher Chargen	12
Abbildung 1-3: Vergleich alte DMD, neue DMD und externes Institut (Material 2g)	13
Abbildung 1-4: Vergleich alte DMD, neue DMD und externes Institut (Material 2f)	13
Abbildung 1-5: Vergleich alte DMD, neue DMD und externes Institut (Material 13)	14
Abbildung 1-6: Versuchsaufbau / Skizze aus der ISO-29463-3	17
Abbildung 1-7: Versuchsaufbau an der FE1	18
Abbildung 1-8: Scan eines vorhandenen E10-Filtermediums	19
Abbildung 1-9: Scan eines vorhandenen H14-Filtermediums	20
Abbildung 1-10: Partikelanzahlkonzentration im Rohgas (links) und Reingas (rechts) bei der H14- Filtermediummessung	20
Abbildung 1-11: Partikelanzahl im Reingas bei der H14-Filtermediummessung	21
Abbildung 1-12: angepasster Versuchsaufbau an der FE1 für die Rohgasmessung	21
Abbildung 1-13: gemessenes Verdünnungsverhältnis bei der Rohgasmessung	22
Abbildung 1-14: Scan eines E12-Filtermediums mit und ohne Verdünnung bei der Rohgasmessung	22
Abbildung 1-15: Scan eines H14-Glasfasermediums mit Verdünnung bei der Rohgasmessung	23
Abbildung 1-16: Scan eines zweiten H14- Glasfasermediums mit Verdünnung bei der Rohgasmessung	23
Abbildung 1-17: Vergleich Auswertung mit und ohne Korrektur der Rohdaten	24
Abbildung 1-18: Versuchsaufbau / Skizze aus der ISO-29463-3	25
Abbildung 1-19: Ergebnisse Druckverlust bei polydispenser Messweise mit reinem und mit IPA verdünntem DEHS (BA-Arbeit T. Bange)	26
Abbildung 1-20: Ergebnisse Fraktionsabscheidegrad bei polydispenser Messweise mit reinem und mit IPA verdünntem DEHS (BA-Arbeit T. Bange)	27
Abbildung 1-21: Vergleich Partikelanzahlkonzentration von reinem IPA und mit in IPA dispergierten Latexpartikeln (513nm)	28
Abbildung 1-22: Vergleich Partikelanzahlkonzentration von reinem IPA und mit in IPA dispergierten Latexpartikeln (200nm)	28
Abbildung 1-23: Vergleich Penetrationsmessungen mit DEHS und in IPA dispergierten Latexpartikeln (200nm und 513nm)	29
Abbildung 1-24: Filterprüfstand und Konditionierungskabinett an der FE2	30
Abbildung 1-25: Aerosolgenerator PLG 2010 (Palas) (Bildquelle: www.palas.de) und erzeugte Partikelanzahlgrößenverteilung	30
Abbildung 1-26: SMPS-System TSI (3080/3081 + CPC 3776) (Bildquelle: www.tsi.com)	31
Abbildung 1-27: SMPS-System Palas (DEMC 3000 + UF CPC 50) (Bildquelle: www.palas.de)	31
Abbildung 1-28: Abscheidegrade: IUTA mit TSI SMPS-System gemessen, TROX mit Laseraerosolspektrometer gemessen	33
Abbildung 1-29: Abscheidegrade: IUTA mit Palas SMPS-System gemessen, TROX mit Laseraerosolspektrometer gemessen	33
Abbildung 1-30: Mit dem Laseraerosolspektrometer LAS-X II gemessene Abscheidegrade (TROX und IUTA)	34
Abbildung 1-31: Anzahlverteilungsdichte bei Hintergrundmessung am IUTA-Prüfkanal	35

Abbildung 1-32: Anzahlverteilungsdichte bei DEHS-Beaufschlagung am IUTA-Prüfkanal	36
Abbildung 1-33: Wiederholmessungen des Druckverlustes	37
Abbildung 1-34: Wiederholmessungen der Penetration (Materialschwankung)	38
Abbildung 1-35: Wiederholmessungen der Penetration (Reproduzierbarkeit)	38
Abbildung 1-36: Penetrationsmessungen bei verschiedenen DEHS-Konzentrationen	39
Abbildung 1-37: Messprotokoll FE1	41
Abbildung 1-38: Vergleich der Druckverlustmessung	41
Abbildung 1-39: Vergleich der Penetrationsmessungen	42
Abbildung 1-40: Vergleich Scan- und Einzelpunktmessung	44
Abbildung 1-41: Vergleich der Penetration bei Variation der Probenahmeleitung	45
Abbildung 1-42: Vergleich der Penetration bei Variation der Anströmgeschwindigkeit	46
Abbildung 1-43: Vergleich Partikelkonzentration mit zwei unterschiedlichen CPCs	47
Abbildung 1-44: Probenahme Reingasseite ($v = 2\text{cm/s}$)	48
Abbildung 1-45: Probenahme Reingasseite ($v = \text{geändert}$)	48
Abbildung 1-46: Probenahme Rohgasseite ($v = 2\text{cm/s}$)	49
Abbildung 1-47: Probenahme Rohgasseite ($v = \text{geändert}$)	49
Abbildung 1-48: Probenahme Rohgasseite mit Filter ($v = \text{geändert}$)	50
Abbildung 1-49: Probenahme Mittelwerte Vergleich	50
Abbildung 1-50: Messungen mit reinem und verdünntem DEHS (SMPS-Messung)	52
Abbildung 1-51: Messungen mit reinem und verdünntem DEHS (SMPS-Messung und LAS-Messung)	52
Abbildung 1-52: LAS-Messung mit reinem DEHS in den Laborvergleich eingefügt	53
Abbildung 1-53: Vergleich der Ergebnisse verschiedener Labore mit polydispersen Messungen mit optischem Partikelzähler	54
Abbildung 1-54: Messung verschiedener Muster mit und ohne multiple charge correction	55
Abbildung 1-55: DMA-Klassierung und Messung mit optischem Partikelzähler	56
Abbildung 1-56: DMA-Klassierung (Partikelgröße 140nm) und Messung mit optischem Partikelzähler	56
Abbildung 1-57: DMA-Klassierung des Primäraerosols mit berechneten Ladungen	57
Abbildung 1-58: DMA-Klassierung der Partikelgröße 105nm im Vergleich mit berechneten Ladungen	57
Abbildung 1-59: DMA-Klassierung der Partikelgröße 105nm ohne eingeschalteter multiple charge correction	58
Abbildung 1-60: DMA-Klassierung der Partikelgröße 105nm mit eingeschalteter multiple charge correction	58
Abbildung 1-61: schematischer Aufbau der Konditionierungskammer (links) und die an der Uni DUE verwendete kleine Konditionierungskammer der Firma TOPAS (TDC 585)	59
Abbildung 1-62: Penetrationsmessungen mit und ohne Entladung	61
Abbildung 1-63: Mini Pleat Filterplatte (Glasfasermaterial)	62
Abbildung 1-64: Druckverlust über dem Volumenstrom (TROX und Rundversuchsteilnehmer)	64
Abbildung 1-65: Druckverlust der Filterplatten bei $1.190\text{ m}^3/\text{h}$ (TROX und Labore)	64
Abbildung 1-66: Druckverlust der Filterplatten bei $1.190\text{ m}^3/\text{h}$ (TROX und IUTA)	65
Abbildung 1-67: Druckdifferenzmessung am TROX-Lochblech zur Validierung des Volumenstrommessung (IUTA)	66
Abbildung 1-68: Fraktionsabscheidegrade im ersten Rundversuch Labor A	67
Abbildung 1-69: Fraktionsabscheidegrade im ersten Rundversuch Labor B	68

Abbildung 1-70: Fraktionsabscheidegrade im ersten Rundversuch Labor C.....	68
Abbildung 1-71: Fraktionsabscheidegrade im ersten Rundversuch Labor D	69
Abbildung 1-72: Einfluss der Schlauchlänge (75 cm vs. 235 cm) auf die gemessene Effizienz am IUTA	70
Abbildung 1-73: Einfluss der DEHS-Verdünnung (DEHS pur vs. 10 % DEHS in IPA) auf die gemessene Effizienz am IUTA	71
Abbildung 1-74: Vergleich der Fraktionsabscheidegradkurven (Filter 79156, 79157, 79166), aufgenommen mit demselben LAS-X II bei TROX und am IUTA.....	72
Abbildung 1-75: Druckverlustmessung aller Proben des synthetischen Materials.....	74
Abbildung 1-76: Penetration teilsynthetisches Material	75
Abbildung 1-77: Penetration teilsynthetisches Medium vor und nach Entladung	75
Abbildung 1-78: Vergleich SMPS und LAS: Teilsynthetisches Medium mit verschiedenen verdünntem DEHS..	76
Abbildung 1-79: Vergleich Retention: Teilsynthetisches Material vor und nach Entladung.....	77
Abbildung 1-80: Vergleich SMPS und LAS: Zweites synthetisches Material mit verschiedenen DEHS- Verdünnungen	77
Abbildung 1-81: Retention LAS: Zweites synthetisches Medium vor und nach Entladung	78
Abbildung 1-82: Filterplatten (PET-Medium mit ePTFE-Membran)	79
Abbildung 1-83: Druckverlust und Effizienz der PET/ePTFE-Filterplatten (Herstellerprüfung Camfil) bei 1.200 m ³ /h	79
Abbildung 1-84: Druckverlustkurven des Filters 157 (Camfil und IUTA).....	81
Abbildung 1-85: Effizienz des Filters 157 (IUTA) bei 1.200 m ³ /h.....	82
Abbildung 1-86: Einfluss der DEHS-Verdünnung (DEHS pur vs. 10 % DEHS in IPA) auf die gemessene Effizienz am IUTA	83
Abbildung 1-87: Einfluss des Volumenstroms auf die gemessene Effizienz am IUTA.....	84
Abbildung 1-88: Effizienz des Filters 142 (Labor A) bei 1.200 m ³ /h ohne Vorabscheider	85
Abbildung 1-89: Effizienz des Filters 141 (Labor A) bei 1.200 m ³ /h mit Vorabscheider	85
Abbildung 1-90: Effizienz des Filters 143 (Labor D) bei 1.200 m ³ /h mit Vorabscheider	86
Abbildung 1-91: Effizienz des Filters 149 (Labor H) bei 1.200 m ³ /h.....	90

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ziele und Ergebnisse des Forschungsvorhabens	6
Tabelle 2: Vergleich alte und neue Druckmessdose.....	10
Tabelle 3: Druckverlustmessung an H14- Filtermedien aus 3 unterschiedlichen Chargen.....	11
Tabelle 4: Druckverlust an H14-Filtermedien /Wiederholungsmessungen)	12
Tabelle 5: Angaben zum Messaufbau / zur Messung der einzelnen Labore.....	40
Tabelle 6: Kenndaten der Mini-Pleat-Filterplatten (Rundversuch 1, Glasfaser)	62
Tabelle 7: Ergebniszusammenstellung Rundversuch 1 (Filterelemente, Glasfaser H13); Nennvolumenstrom 1.190 m ³ /h	69
Tabelle 8: Variation von Messsystem, Schlauchlänge und DEHS-Verdünnung am IUTA, Nennvolumenstrom 1.190 m ³ /h	71
Tabelle 9: Kenndaten der PET/ePTFE-Filterplatten (Rundversuch 2, synthetisch)	80
Tabelle 10: IUTA-Ergebnisse, Rundversuch 2 (PET/ePTFE), SMPS Palas	82
Tabelle 11: Massenzunahme und Druckverlust am Filter 143 bei der Klassifizierung (Labor D)	87
Tabelle 12: Ergebniszusammenstellung der Klassifizierung für Labor E	87
Tabelle 13: Durchgeführte Prüfungen (Labor G)	88
Tabelle 14: Zusammenstellung der Messergebnisse (Labor G).....	89

9 Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 16890-1:2017-08 Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Teil 1: Technische Bestimmungen, Anforderungen und Effizienzklassifizierungssystem, basierend auf dem Feinstaubabscheidegrad (ePM) (ISO 16890-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16890-1:2016, Berlin: Beuth Verlag.
- [2] DIN EN ISO 16890-2:2023-12 Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Teil 2: Ermittlung des Fraktionsabscheidegrades und des Durchflusswiderstandes (ISO 16890-2:2022); Deutsche Fassung EN ISO 16890-2:2022, Berlin: Beuth Verlag.
- [3] DIN EN ISO 16890-3:2017-08 Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Teil 3: Ermittlung des gravimetrischen Wirkungsgrades sowie des Durchflusswiderstandes im Vergleich zu der aufgenommenen Masse von Prüfstaub (ISO 16890-3:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16890-3:2016, Berlin: Beuth Verlag.
- [4] DIN EN ISO 16890-4:2023-12 Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Teil 4: Konditionierungsverfahren für die Ermittlung des Fraktionsabscheidegradminimums (ISO 16890-4:2022); Deutsche Fassung EN ISO 16890-4:2022, Berlin: Beuth Verlag.
- [5] DIN EN 1822-1:2019-10 Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA) - Teil 1: Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung; Deutsche Fassung EN 1822-1:2019, Berlin: Beuth Verlag.
- [6] DIN EN 1822-2:2011-01, Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA) - Teil 2: Aerosolerzeugung, Messgeräte, Partikelzählstatistik; Deutsche Fassung EN 1822-2:2009, Berlin: Beuth Verlag. doi: 10.31030/1714869.
- [7] DIN EN 1822-3:2011-01, Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA) - Teil 3: Prüfung des planen Filtermediums; Deutsche Fassung EN 1822-3:2009, Berlin: Beuth Verlag. doi: 10.31030/1714870.
- [8] DIN EN 1822-4:2011-01, Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA) - Teil 4: Leckprüfung des Filterelementes (Scan-Verfahren); Deutsche Fassung EN 1822-4:2009, Berlin: Beuth Verlag. doi: 10.31030/1714871.
- [9] DIN EN 1822-5:2011-01, Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA) - Teil 5: Abscheidegradprüfung des Filterelementes; Deutsche Fassung EN 1822-5:2009, Berlin: Beuth Verlag. doi: 10.31030/1714867.
- [10] DIN EN ISO 29463-2:2019-05, Schwebstofffilter und Filtermedien zur Abscheidung von Partikeln aus der Luft - Teil 2: Aerosolerzeugung, Messgeräte und Partikelzählstatistik (ISO_29463-2:2011); Deutsche Fassung EN ISO 29463-2:2018, Berlin: Beuth Verlag. doi: 10.31030/3001337.
- [11] DIN EN ISO 29463-3:2019-05, Schwebstofffilter und Filtermedien zur Abscheidung von Partikeln aus der Luft - Teil 3: Prüfung des planen Filtermediums (ISO 29463-3:2011); Deutsche Fassung EN ISO 29463-3:2018, Berlin: Beuth Verlag. doi: 10.31030/3001340.
- [12] DIN EN ISO 29463-4:2019-05, Schwebstofffilter und Filtermedien zur Abscheidung von Partikeln aus der Luft - Teil 4: Prüfverfahren zur Ermittlung der Leckage des Filterelementes - Scan-Verfahren (ISO 29463-4:2011); Deutsche Fassung EN ISO 29463-4:2018, Berlin: Beuth Verlag. doi: 10.31030/3001334.
- [13] DIN EN ISO 29463-5:2019-05, Schwebstofffilter und Filtermedien zur Abscheidung von Partikeln aus der Luft - Teil 5: Prüfverfahren für Filterelemente (ISO_29463-5:2011); Deutsche Fassung EN ISO 29463-5:2018, Berlin: Beuth Verlag. doi: 10.31030/3001344.
- [14] DIN EN ISO 29463-5:2021-07 - Entwurf, Schwebstofffilter und Filtermedien zur Abscheidung von Partikeln aus der Luft - Teil 5: Prüfverfahren für Filterelemente (ISO/DIS 29463-5:2021); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 29463-5:2021, Berlin: Beuth Verlag. doi: 10.31030/3251031.