



TU Clausthal

Charakterisierung der Zähleffizienz von Kondensationspartikelzählern

Auftraggeber: Grimm Aerosol Technik GmbH & Co. KG

**Auftragnehmer: Dipl.-Ing. Stephan Rennecke
Prof. Dr. rer. nat. A. Weber
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik
TU Clausthal**

Clausthal, Juni 2010

Vormerkungen

In diesem Bericht werden die Ergebnisse von Laborstudien vorgestellt, die im Auftrag der Grimm Aerosol Technik GmbH & Co. KG, Ainring, in Zeitraum März bis Juni 2010 am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der TU Clausthal durchgeführt wurden.

Für die Messungen und den Bericht verantwortlich sind Dipl.-Ing. S. Rennecke und Prof. Dr. rer. nat. A. Weber vom Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der TU Clausthal, 38678 Clausthal-Zellerfeld.

Clausthal, den 21. 06. 2010

Dipl.-Ing. S. Rennecke

Prof. Dr. rer. nat. A. Weber

1 Einleitung und Zielsetzung

Im vorliegenden Bericht werden Kondensationspartikelzähler (CPCs) der Firma Grimm Aerosol Technik hinsichtlich ihrer Zähleffizienz untersucht. Getestet wurden die Modelle 5.414 und 5.416 in ihren unterschiedlichen Betriebsmodi. Um einen möglichen Einfluss des Partikelmaterials bzw. der Partikelmorphologie in den Messungen zu berücksichtigen, wurden Partikel aus Kochsalz (NaCl), Silber (Ag) und Wolfram – Oxid (WO_x) in verschiedenen Morphologien (Einzelpartikel, Agglomerate und Aggregate) verwendet. Die Untersuchungen wurden soweit möglich im Einklang mit der kommenden Norm ISO 27891 durchgeführt.

2 Experimentelles

2.1 Allgemeiner Versuchsaufbau

Der allgemeine Versuchsaufbau zur Bestimmung der Zähleffizienz ist in Abb. 2.1 dargestellt. Je nach verwendetem Partikelmaterial wurden verschiedene Generatoren verwendet, welche im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert werden. Das generierte Aerosol wird in einem bipolaren Auflader (Modell 3077, TSI) neutralisiert und anschließend in einem Differentiellen – Mobilitätsanalysator (M-DMA, Vienna type, Grimm) klassiert. Der DMA wird bei einer Flussrate des Hüllstroms von 20 lpm betrieben. Das monodisperse Aerosol wird anschließend durch einen „Flowsplitter“ (Palas) auf die einzelnen Messgeräte verteilt. Die Zähleffizienz wurde für die CPC – Modelle 5.403, 5.414 und 5.416 simultan gemessen. Als Referenz diente das FCE (5.705, Grimm), welches bei 1 lpm betrieben wurde. Hierdurch ergibt sich ein Gesamtvolumenstrom von 1,9 lpm und folglich eine Trennschärfe ("sharpness") von ca. 10. Während der Bestimmung der Zähleffizienz für das Modell 5.414 mit erhöhtem Aerosolvolumenstrom, wurde das CPC 5.416 parallel betrieben um den Gesamtvolumenstrom konstant zu halten und die Vergleichbarkeit der einzelnen Messreihen zu gewährleisten.

Um die Partikelverluste, besonders im Größenbereich kleiner 10 nm, zu minimieren wurden die Schlauchverbindungen möglichst kurz gehalten und bestanden aus leitfähigem Tygon. Damit die Verweilzeit des Aerosols und somit die Verluste für alle Gerä-

te konstant sind, wurden die Schlauchverbindungen zwischen dem Flowsplitter und den Messgeräten in ihrer Länge der jeweiligen Flussrate angepasst.

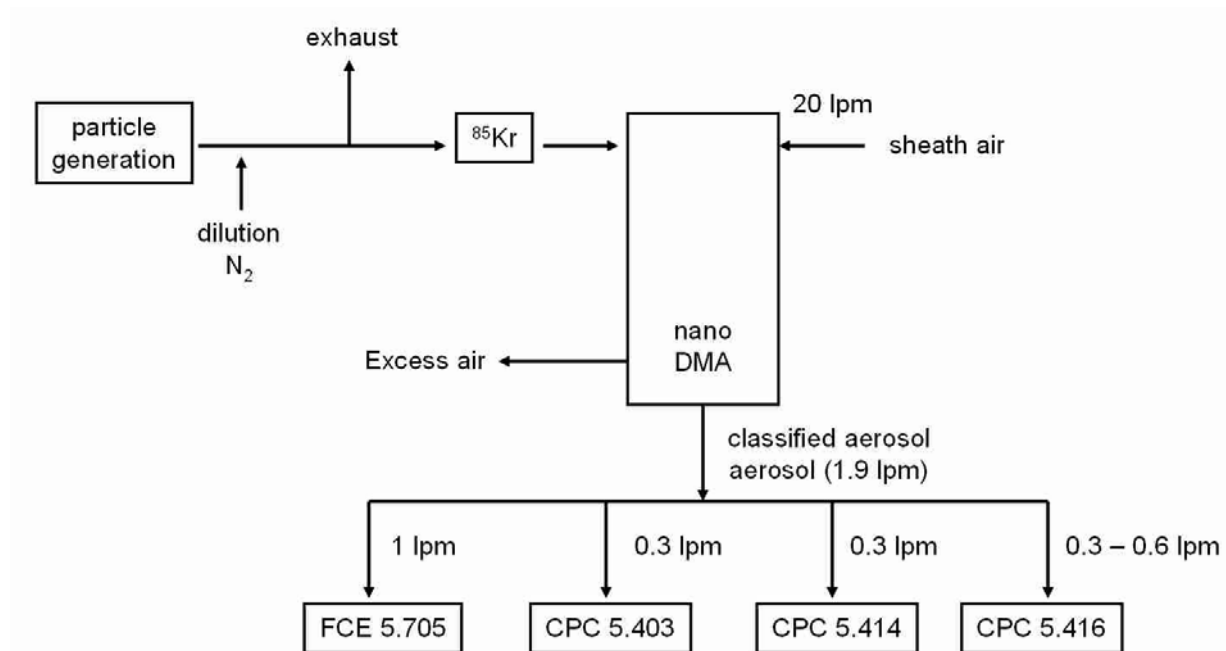


Abb. 2.1: Allgemeiner Versuchsaufbau

Die verwendeten CPC Modelle verwenden für Anzahl - Konzentrationen bis ca. 10^4 # / cm^3 den Einzelpartikel – Zählmodus in der Streulichteinheit, während bei höheren Konzentrationen ein photometrischer Modus verwendet wird. Da dieser Modus in der neuen Modellgeneration zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht implementiert war, wurden alle Messungen im genaueren Einzelpartikel – Zählmodus durchgeführt. Der verwendete Versuchsaufbau ermöglicht die Messung bis zu Partikelgrößen von 2 nm als untere Grenze. Da die Zähleffizienz bei Partikelgrößen größer ca. 15 nm den Wert 1 erreicht, wurden die Messungen bis 30 nm als obere Grenze durchgeführt. Bei der Wahl der Zwischenschritte wurde einer späteren logarithmischen Auftragung Rechnung getragen.

Um auftretende Schwankungen der Partikelkonzentration auszugleichen wurden die Messergebnisse über 4 min aufgezeichnet und gemittelt. Die Nullpunktverschiebung des FCEs wurde bei der Auswertung berücksichtigt. Bei der Verwendung von Stickstoff als Trägergas liegt diese bei ca. 0,1 fA, bei Druckluft bei ca. 0,4 fA. Der Nullpunkt des FCEs und der CPCs wurde regelmäßig durch einen Nulltestfilter überprüft.

2.2 Partikelherstellung

2.2.1 Ofengenerator

Die Partikelherstellung im Ofen wird, wie in Abb. 2.1 dargestellt, durch das Verdampfen von reinem Bulk – Material in einem Rohrofen erreicht. Das Material wird in einem Quarzglas – Schiffchen vorgelegt und in einem Quarzglasrohr positioniert. Durch das Erhitzen in einem Rohrofen entsteht ein Material - Dampf, welcher von einem kontinuierlichen Trägergasstrom (Stickstoff) wegtransportiert wird. Am Ausgang des Ofens setzt aufgrund einer schnellen Abkühlung dann die Partikelbildung ein. Da die Bildung feinsten Partikeln bereits bei Temperaturen oberhalb von 500 °C (NaCl) bzw. 900°C (Ag) einsetzt, das Rohrmaterial aber erst ab Temperaturen von ca. 1200 °C erweicht und bei den verwendeten Betriebstemperaturen einen vernachlässigten Dampfdruck hat, ist die Herstellung reiner Aerosole aus dem Vorlagematerial möglich.

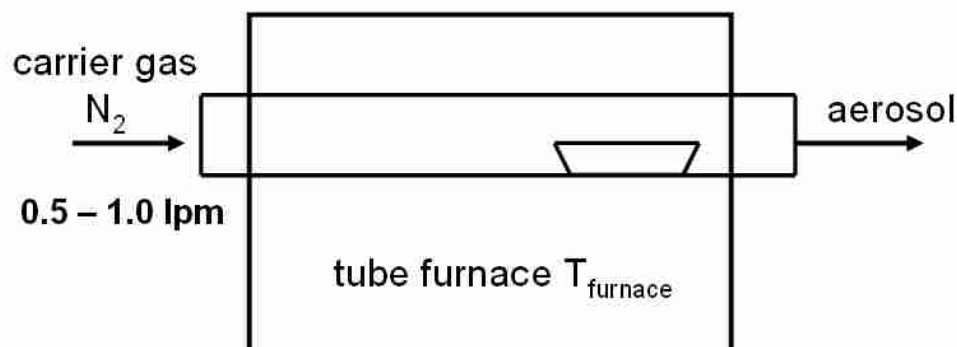


Abb. 2.2: Schematischer Aufbau des Ofengenerators

Im Ofengenerator können die Lage der Partikelgrößenverteilung (PGV) und die Anzahlkonzentration nahezu unabhängig voneinander eingestellt werden. Wie in Abb. 2.3 dargestellt, kann die Lage der PGV mit steigender Ofentemperatur zu größeren Partikeln hin verschoben werden, wobei Form und Breite der Verteilung erhalten bleiben. Die Anzahlkonzentration der Partikel wird über den Trägergasvolumenstrom gesteuert, welcher durch die Anströmgeschwindigkeit des Quarzglasschiffchens im Wesentlichen den Stofftransport bestimmt.

Wie in Abb. 2.3 und 2.4 gezeigt, kann der anvisierte Größenbereich von 2 bis 30 nm im Falle von Kochsalz im Temperaturbereich von 510 bis 590 °C, im Falle von Silber bei Temperaturen von 970 bis 1200 °C abgedeckt werden.

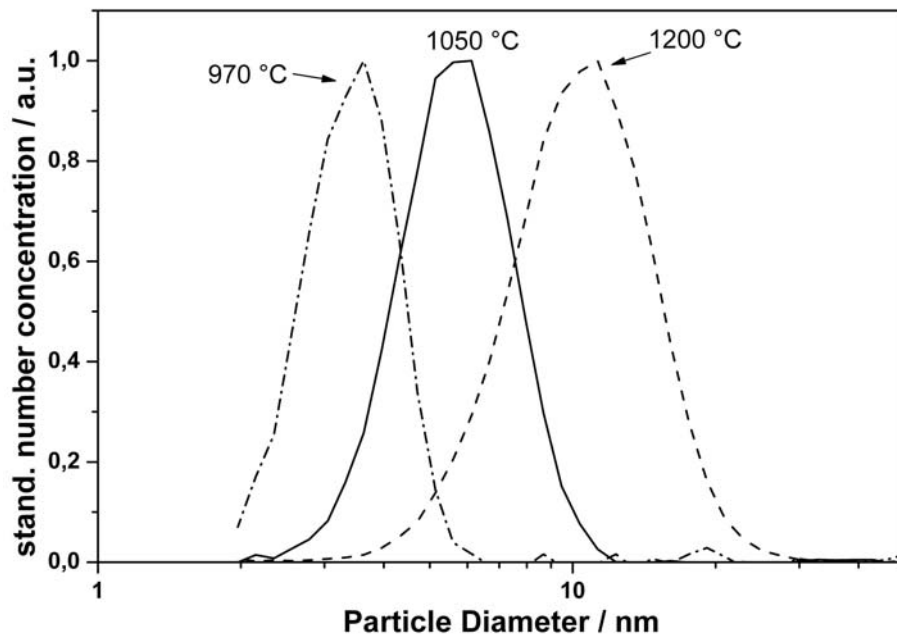


Abb. 2.3: Normierte Partikel – Größen – Verteilung für Ag – Aerosol aus dem Ofengenerator bei drei verschiedenen Temperaturen

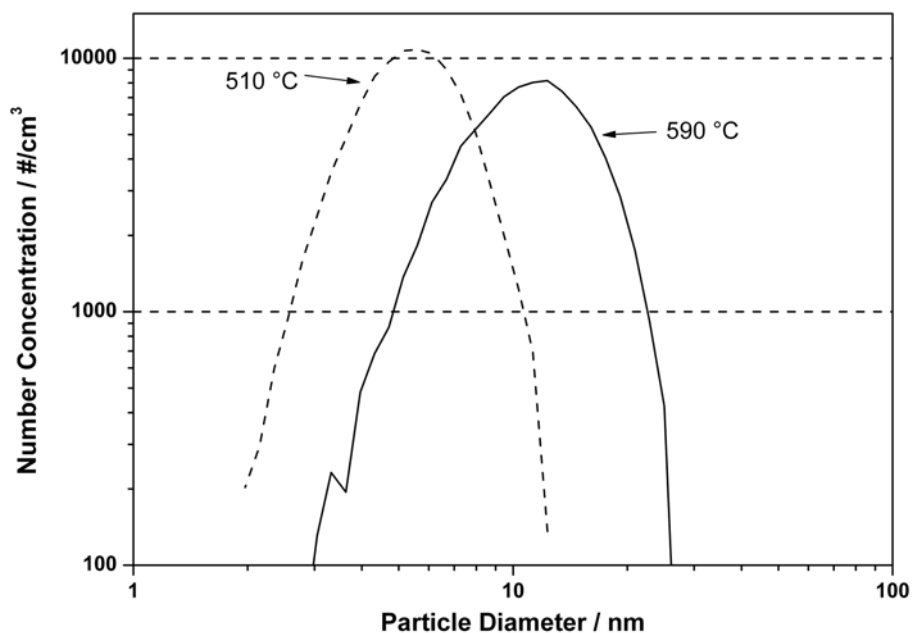


Abb. 2.4: Partikel – Größen – Verteilung für NaCl – Aerosol aus dem Ofengenerator bei zwei verschiedenen Temperaturen

Die mittels des Ofengenerators hergestellten Ag – und NaCl – Partikel liegen, wie in Abb. 2.5 und 2.6 dargestellt, als sphärische Monopartikel vor. Die Übersichten zeigen keine agglomerierten Partikel. Im Falle der NaCl – Partikel zeigen die TEM – Aufnahmen eine ungewöhnliche Veränderung der Partikel. Möglicherweise werden die Partikel durch die Einwirkung der Luftfeuchtigkeit beim Transfer der Probe in das TEM oder direkt durch den Elektronenstrahl verändert, wodurch die Partikelgröße zunimmt. Eine Überprüfung der mobilitätsbasierten Partikelgrößenverteilung mittels TEM-Analyse wird hierdurch für NaCl-Partikeln unmöglich. Für die Ag-Partikel konnte die mobilitätsbasierte PGV durch TEM-Aufnahmen hervorragend bestätigt werden.

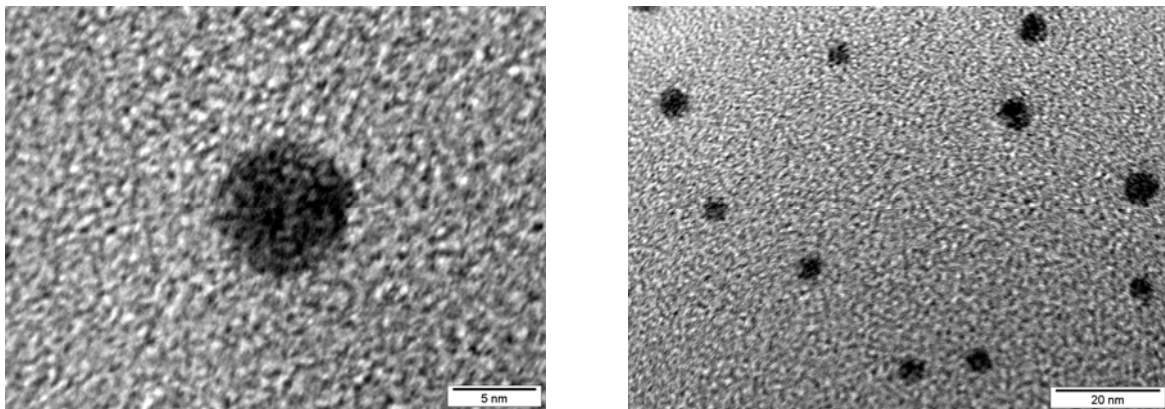


Abb. 2.5: Silber-Nanopartikel aus Ofengenerator – Einzelpartikel (links) und Partikelkollektiv (rechts)

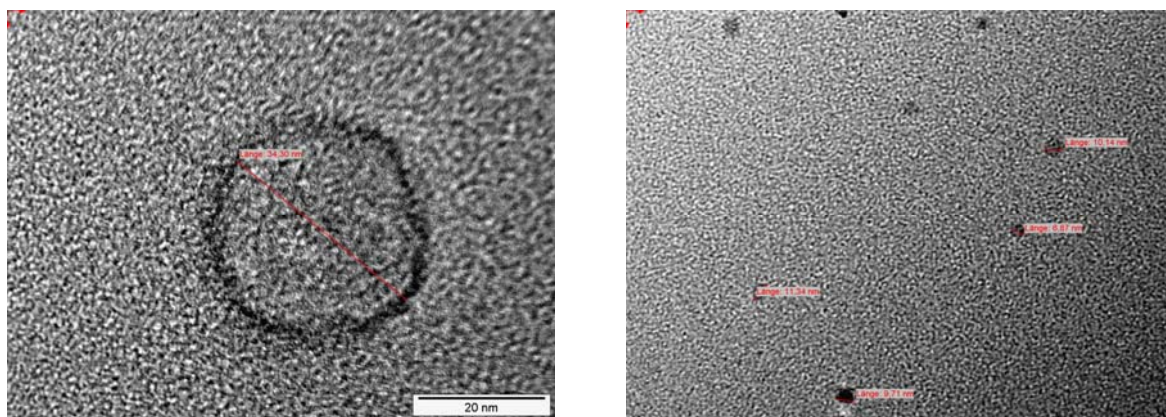


Abb. 2.6: NaCl – Nanopartikel aus Evaporationsverfahren - Einzelpartikel (links) und Partikelkollektiv (rechts)

2.2.2 Funkengenerator

Die Partikelherstellung im Funkengenerator beruht analog zum Ofengenerator auf der Verdampfung von Bulk – Material, wobei die notwendige Temperatur wie in Abb. 2.7 angedeutet durch diskontinuierliche Entladungen (sparks) zwischen zwei Elektroden erreicht wird. Der dabei entstehende Materialdampf wird von einem kontinuierlichen Trägergasstrom abtransportiert und dabei abgekühlt, wodurch die Partikelbildung einsetzt. Die Anzahlkonzentration der Primärpartikel im entstehenden Aerosol liegt deutlich über 10^8 cm^{-3} , weshalb sich überwiegend Agglomerate bilden (mit Konzentrationen von $10^6 - 10^7 \text{ cm}^{-3}$). Die Agglomerate werden in einem nachgeschalteten Sinterofen partiell zu Aggregaten versintert.

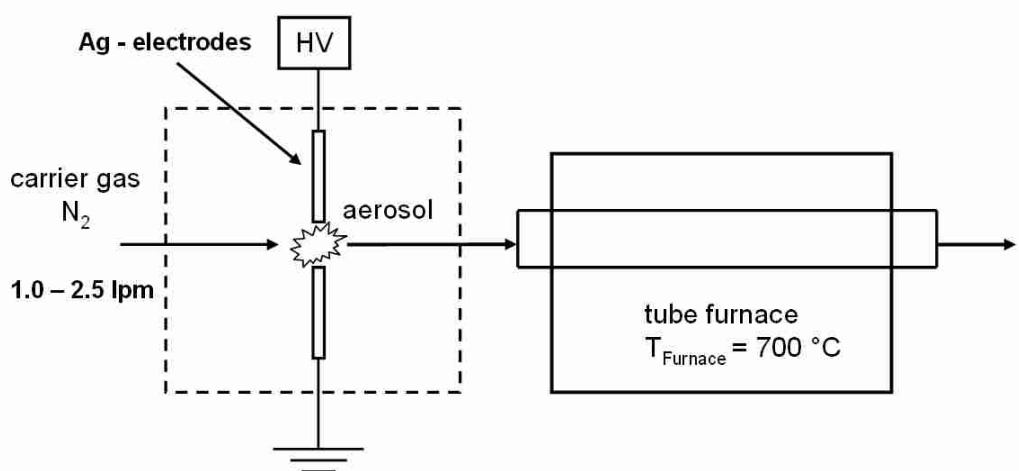


Abb. 2.7: Schematischer Aufbau des Funkengenerators

Wie in Abb. 2.7 dargestellt, ist die entstehende PGV verglichen zum Ofengenerator relativ breit. Aufgrund der hohen Anzahlkonzentration in der Phase der Partikelbildung und der resultierenden schnellen Agglomeration ist die Konzentration an kleinen Partikeln im Bereich weniger Nanometer sehr gering, weshalb Messungen nur bis ca. 4 nm möglich sind.

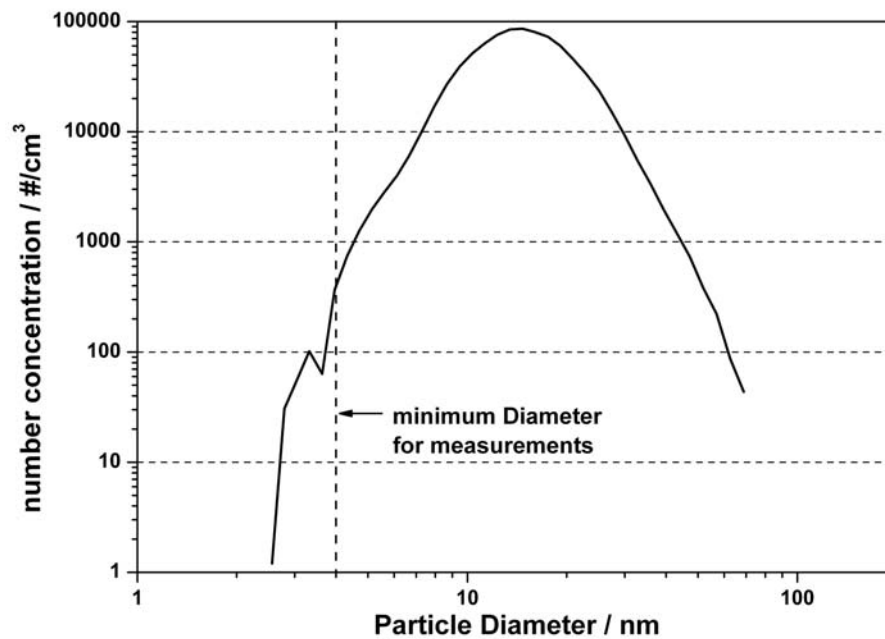


Abb. 2.7: Partikel – Größen – Verteilung des Silber – Aerosols aus dem Funkengenerator

Aus den in Abb. 2.8 gezeigten TEM Aufnahmen ist ersichtlich, dass sowohl sphärische Einzelpartikel, insbesondere im Bereich sehr kleiner Partikel, als auch kettenförmige Aggregate nach dem Sinterprozess nebeneinander im Aerosol vorliegen.

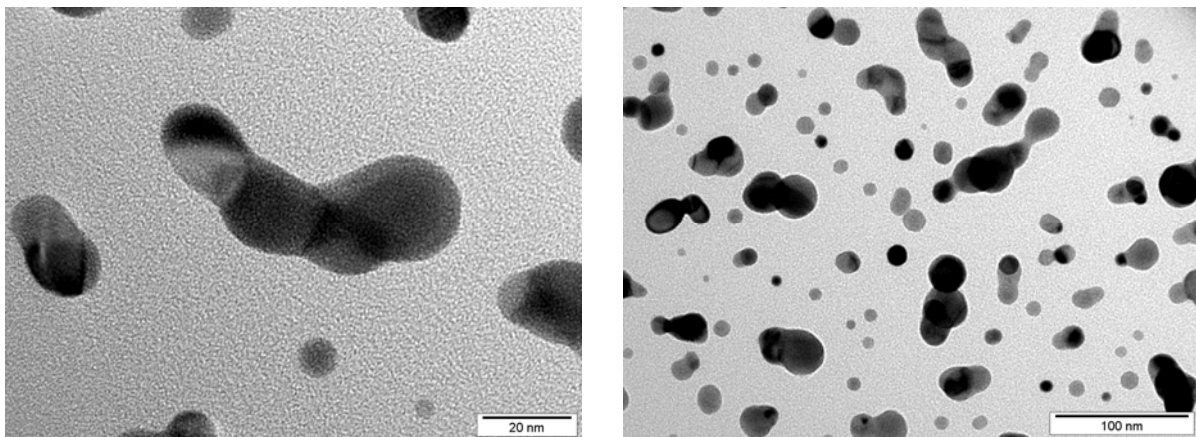


Abb. 2.8: Ag – Nanopartikel aus Funkengenerator - Einzelpartikel (links) und Partikelkollektiv (rechts)

2.2.3 WO_x - Generator

Wolfram – Oxid (WO_x) Partikel wurden mit einem kommerziellen Generator (Grimm, 7.860) hergestellt, weshalb auf die Einzelheiten der Partikelherstellung nicht weiter eingegangen wird. Die verwendeten Einstellungen können Tabelle 2.1 entnommen werden.

Tab. 2.1: Betriebseinstellungen des WO_x - Generators

Heater Voltage [V]	WO _x – Air [L/h]	Carrier Air [L/h]	Diluting Air [L/h]
7,4	16	120	0 - 200

Das Ausgangsaerosol des WO_x – Generators besteht vollständig aus Partikeln kleiner 10 nm (Abb. 2.9). Durch ein nachgeschaltetes Koagulationsgefäß konnte ein Partikelwachstum bis auf 40 nm erreicht und der angestrebte Messbereich abgedeckt werden.

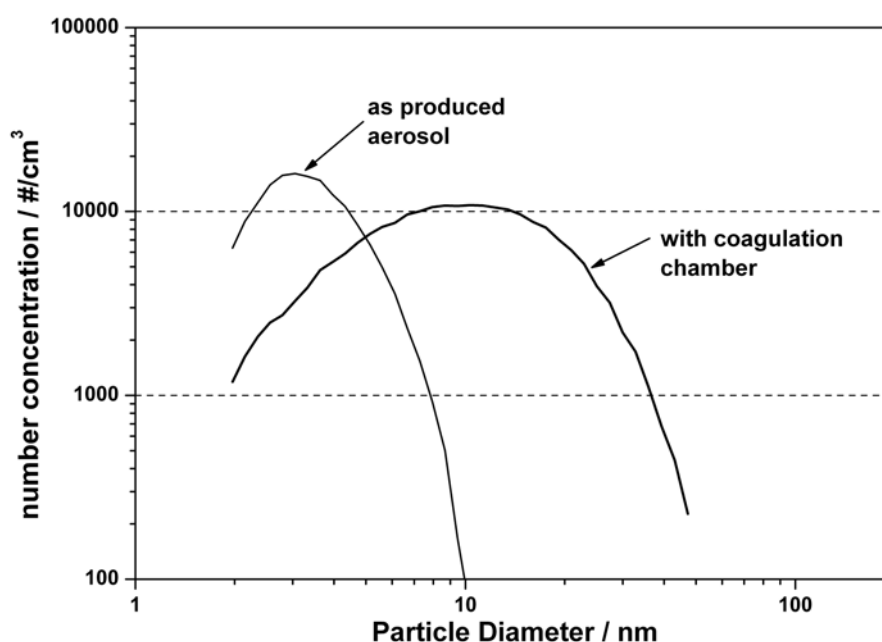


Abb. 2.9: Partikel – Größen – Verteilung der WO_x – Nanopartikel

Zur Aufklärung der Partikelmorphologie wurden Proben mittels TEM untersucht. Wie in Abb. 2.10 ersichtlich, konnten aus noch unbekanntem Gründen keine gelungenen

Aufnahmen der gesammelten Proben gemacht werden. Es wird daher im Folgenden vermutet, dass im WO_x - Generator Agglomerate aus sehr kleinen Primärpartikeln mit kleiner fraktaler Dimension, d.h. relativ offener Struktur ($D_f < 2$) entstehen, welche sich aerodynamisch transparent verhalten.

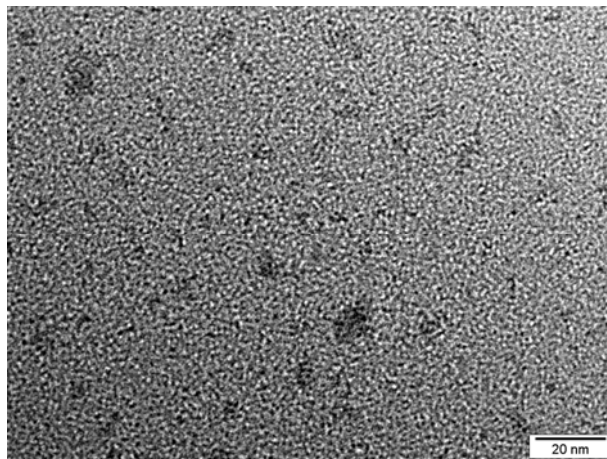


Abb. 2.10: WO_x – Nanopartikel aus Grimm 7.860 Generator

2.3 Vergleich mit Literaturwerten

Um das Funktionieren des verwendeten Versuchsaufbaus zu verifizieren, wurden Zähleffizienz - Messungen an NaCl – Aerosol für das CPC 5.403 durchgeführt und mit Messungen von Heim et al. (Aerosol Sci. Technol. 38, 3-14 (2004)) verglichen.

Das Ergebnis zeigt eine gute Übereinstimmung. Nur im Bereich großer Partikel beim Erreichen der maximalen Zähleffizienz ergeben sich Abweichungen. Da keine Details der von Heim et al. durchgeführten Korrekturen (FCE – Offset, Volumenströme) vorliegen, bleibt der Grund für die Abweichung unklar. Im interessierenden Bereich des Abfalls der Zähleffizienzkurven ist die Übereinstimmung hingegen hervorragend, auch der d_{50} – Wert stimmt mit 7,3 nm gut mit dem publizierten Wert (7 nm) überein.

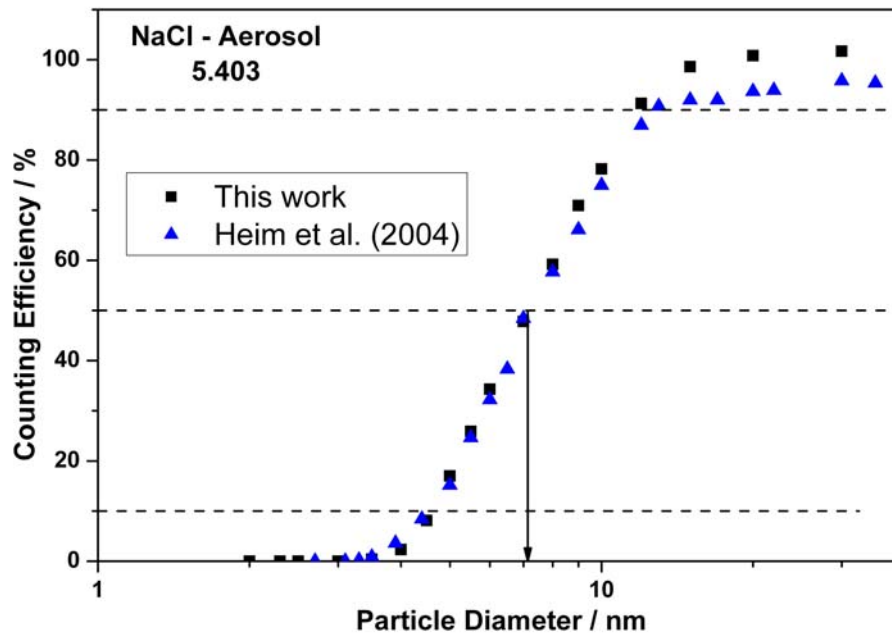


Abb. 2.11: Vergleich der für das CPC 5.403 ermittelten Zähleffizienzkurve für NaCl – Aerosol mit publizierten Daten (Heim et al., Aerosol Sci. Technol. 38, 3-14 (2004))

3 Ergebnisse

3.1 Gegenüberstellung der Gerätegenerationen (0,3 lpm)

3.1.1 NaCl - Aerosol

Der Vergleich der CPCs zeigt eine Verbesserung der Zähleffizienz für die neuen Modelle im Partikelgrößenbereich unterhalb von 10 nm. Der d_{50} – Wert verschiebt sich um ca. 1,9 nm von 7,3 auf 5,4 nm. Während die Zähleffizienz des 5.403 unterhalb von 3,5 nm praktisch auf Null sinkt, weisen die Modelle 5.414 und 5.416 selbst bei 2 nm großen Partikeln noch eine Zähleffizienz von ca. 5 % auf. Die Unterschiede zwischen den Kurven für das 5.414 und 5.416 sind marginal und liegen im Bereich der experimentellen Unsicherheit.

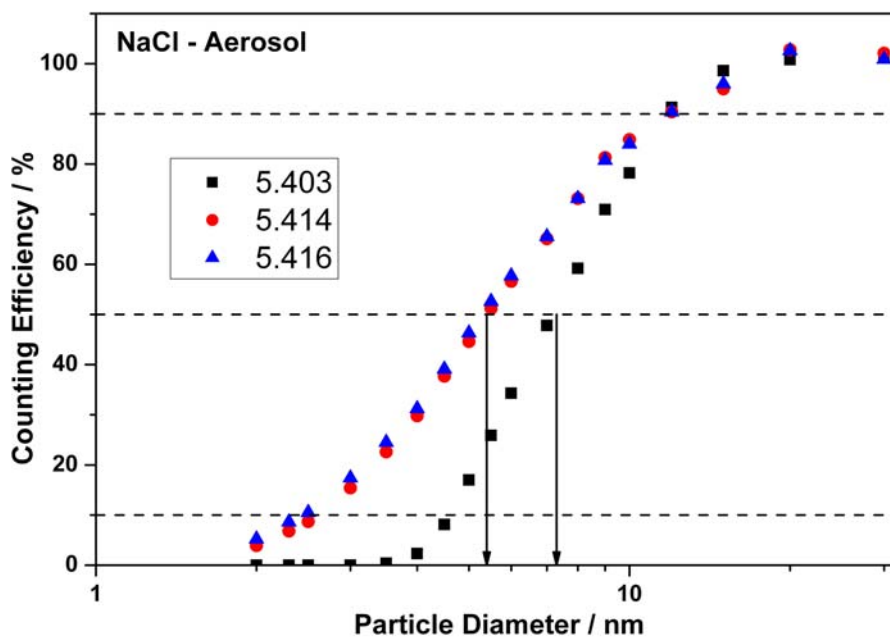


Abb. 3.1: Zähleffizienz für NaCl – Partikel für die unterschiedlichen CPC – Modelle

Tab. 3.1: Kennwerte der Zähleffizienz für NaCl – Partikeln

Modell	d_{10}	d_{50}	d_{90}
5.403	4,6 nm	7,3 nm	12 nm
5.414 / 5.416	2,5 nm	5.4 nm	12 nm

3.1.2 Silber – Partikel (Ofengenerator)

Die Zähleffizienzmessungen an Silber – Partikeln aus dem Ofengenerator zeigen den gleichen Trend wie im Falle der NaCl – Partikeln. Die Zähleffizienzen der neuen Gerätegeneration, liegen deutlich über der des 5.403. Der d_{50} – Wert verschiebt sich von ca. 6,2 nm auf 5,0 nm. Die Zähleffizienz bei 2 nm liegt für die neue Gerätegeneration bei 2,3 %.

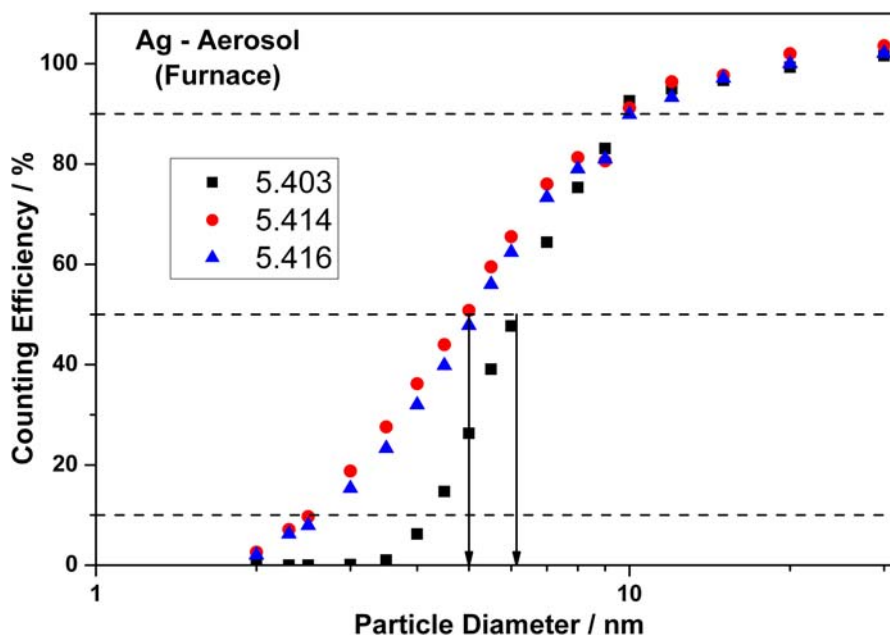


Abb. 3.2: Zähleffizienz für Ag – Partikel (Ofengenerator) für die unterschiedlichen CPC - Modelle

Tab. 3.2: Kennwerte der Zähleffizienz für Ag – Partikeln (Ofengenerator)

Modell	d_{10}	d_{50}	d_{90}
5.403	4,2 nm	6,2 nm	10 nm
5.414 / 5.416	2,6 nm	5,0 nm	10 nm

3.1.3 Silber – Partikel (Funkengenerator)

Die Zähleffizienzmessungen an Silberpartikeln aus dem Funkengenerator zeigen einen signifikanten Unterschied verglichen zu jenen aus dem Ofengenerator. Wie in Abb. 3.5 dargestellt, zeigt der Vergleich der neuen und alten Gerätegeneration keine deutliche Verbesserung der Zähleffizienz. Der d_{50} – Wert verschiebt sich lediglich um 0,4 nm von 4,5 auf 4,1 nm. Da der d_{50} – Wert des CPC 5.403 deutlich unterhalb des Literaturwertes liegt und auch geringer als in den Messungen an sphärischen Ag - Monopartikeln ist, kann vermutet werden, dass die Ag – Partikeln aufgrund ihrer Morphologie die Kondensation des Butanols begünstigen.

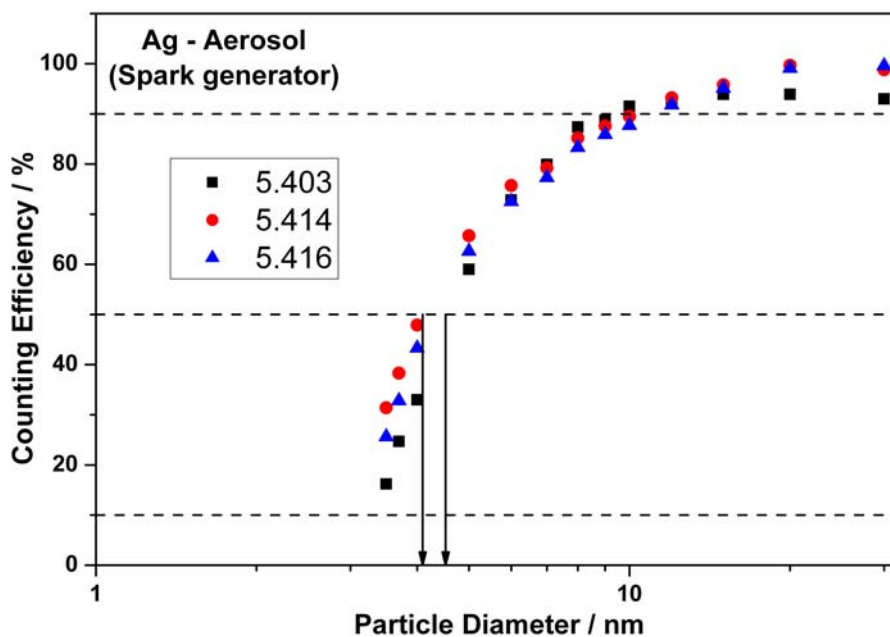


Abb. 3.3: Zähleffizienz für Ag – Partikel aus dem Funkengenerator für die unterschiedlichen CPC – Modelle

Tab. 3.3: Kennwerte der Zähleffizienz für Ag – Partikeln (Funkengenerator)

Modell	d_{10}	d_{50}	d_{90}
5.403	< 3,5 nm	4,5 nm	11 nm
5.414 / 5.416	< 3,5 nm	4,1 nm	11 nm

3.1.4 WO_x – Partikel

Die Zähleffizienzmessungen mit WO_x – Partikeln zeigen erneut unabhängig von der Modellgeneration einen vergleichbaren Verlauf. Zwar liegt der d_{50} – Wert mit ca. 4,0 nm unterhalb der Werte die in den Messungen an Partikeln aus dem Evaporationsverfahren ermittelt wurden, jedoch ist eine erhöhte Zähleffizienz der neuen Modelle erst für Partikelgrößen kleiner 3 nm erkennbar. Da die WO_x – Partikel wie auch die Ag – Partikel aus dem Funkengenerator nicht als sphärische Einzelpartikel vorliegen, scheint auch hier eine dominante Morphologieabhängigkeit der Zähleffizienz vorzuliegen.

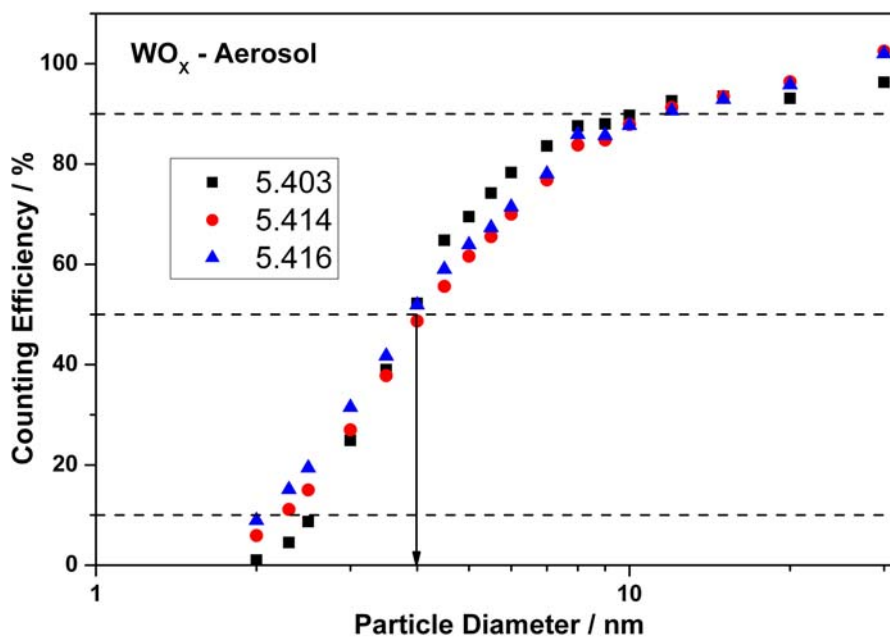


Abb. 3.4: Zähleffizienz für WO_x -Partikel für die unterschiedlichen CPC – Modelle

Tab. 3.4: Kennwerte der Zähleffizienz für WO_x -Partikel

Modell	d_{10}	d_{50}	d_{90}
5.403	2,6 nm	4,0 nm	11,8 nm
5.414 / 5.416	2,2 nm	4,0 nm	11,8 nm

3.2 Gegenüberstellung der Partikelmaterialien

Wie im Vergleich der Gerätegenerationen für die unterschiedlichen Partikelmaterialien bereits angedeutet, scheint die Zähleffizienz durch die Partikelmorphologie beeinflusst zu werden. In Abb. 3.5 sind die Messkurven des CPC 5.403 für die verwendeten Materialien vergleichend gegenüber gestellt. Die Unterschiede sind für die alte Gerätegeneration am stärksten. Die Monopartikeln aus dem Ofengenerator weisen mit d_{50} – Werten von 6,2 nm (Ag) und 7,3 nm (NaCl) die geringsten Zähleffizienzen auf. Bei der Verwendung von Silber-Partikeln aus dem Funkengenerator sinkt der d_{50} – Wert auf 4,5 nm. Die höchsten Zähleffizienzen werden für die WO_x – Partikeln mit einem d_{50} – Wert von 4,0 nm erzielt. Die Zähleffizienz ist demnach Material und Morphologieabhängig. In Abb. 3.6 sind die Zähleffizienzkurven für das CPC 5.414 gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass die Materialabhängigkeit der Zähleffizienz für die

neue Gerätegeneration deutlich reduziert ist. Der d_{50} – Wert variiert lediglich zwischen 4 nm bis 5,4 nm.

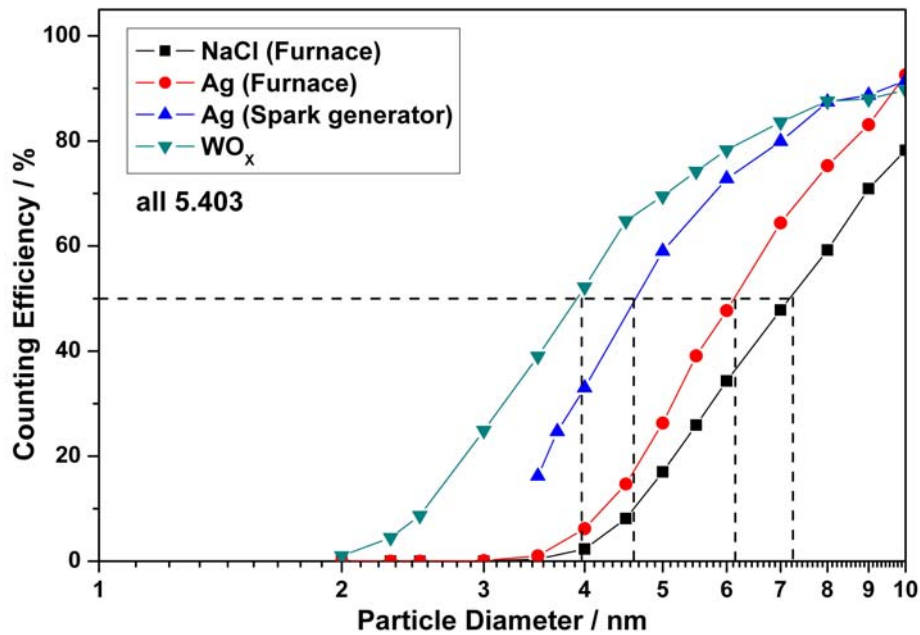


Abb. 3.5: Zähleffizienzkurven des CPC 5.403 für die verwendeten Materialien

Obwohl die neue Modellgeneration also an WO_x – Partikeln die höchsten Zähleffizienzen erzielt, ist die Verbesserung gegenüber der Vorversion an den Monopartikeln aus dem Evaporationsverfahren am signifikantesten.

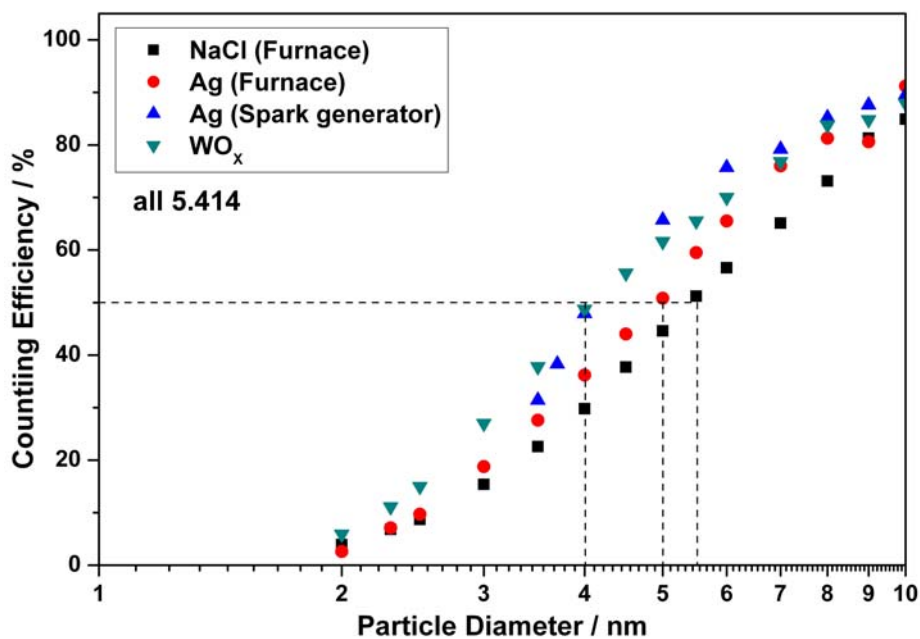


Abb. 3.6: Zähleffizienzkurven des CPC 5.414 für die verwendeten Materialien

3.3 Zähleffizienz des CPC 5.414 bei 0,6 lpm

Die Ergebnisse der Zähleffizienzmessungen mit dem CPC 5.414 bei einem Aerosolvolumenstrom von 0,6 lpm sind in den Abb. 3.7 -3.9 dargestellt. Die vorherigen Messkurven bei 0,3 lpm sind vergleichend gegenüber gestellt. An sphärischen Monopartikeln ist für Partikelgrößen oberhalb von 3,5 nm keine signifikante Abweichung zu erkennen, unterhalb von 3,5 nm fällt die Kurve jedoch stark ab und erreicht bei ca. 2,5 nm den Wert Null, während bei einer Flussrate von 0,3 lpm noch Zähleffizienzen um die 10 % erreicht werden.

Die Zähleffizienzkurven an WO_x – Partikeln zeigen keine Abhängigkeit vom Betriebsmodus. Die Verweilzeit der Partikel in Saturator und Kondensator scheint keinen Einfluss auf die Zähleffizienz zu haben.

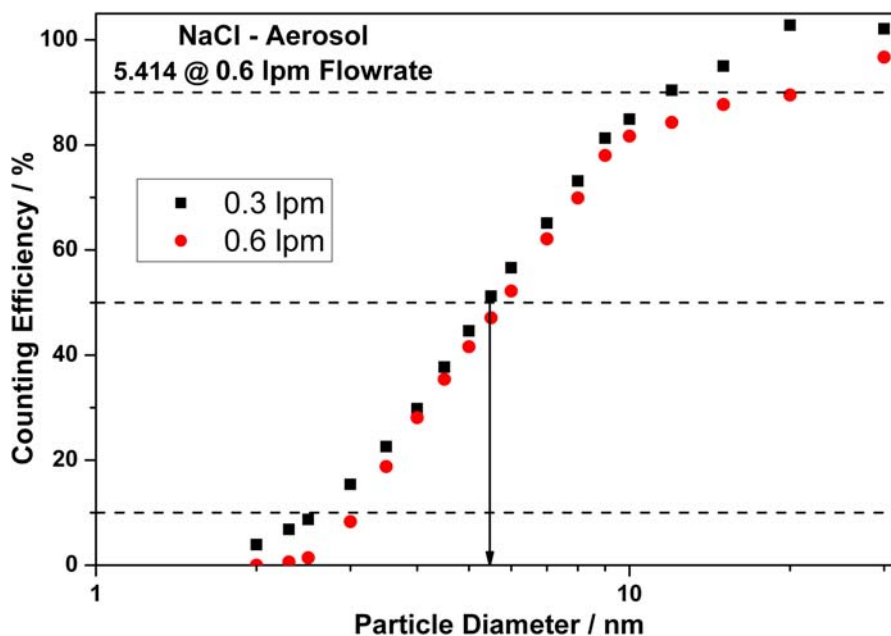


Abb. 3.7: Zähleffizienzkurven für NaCl – Partikel für das CPC 5.414 in seinen beiden Betriebsmodi

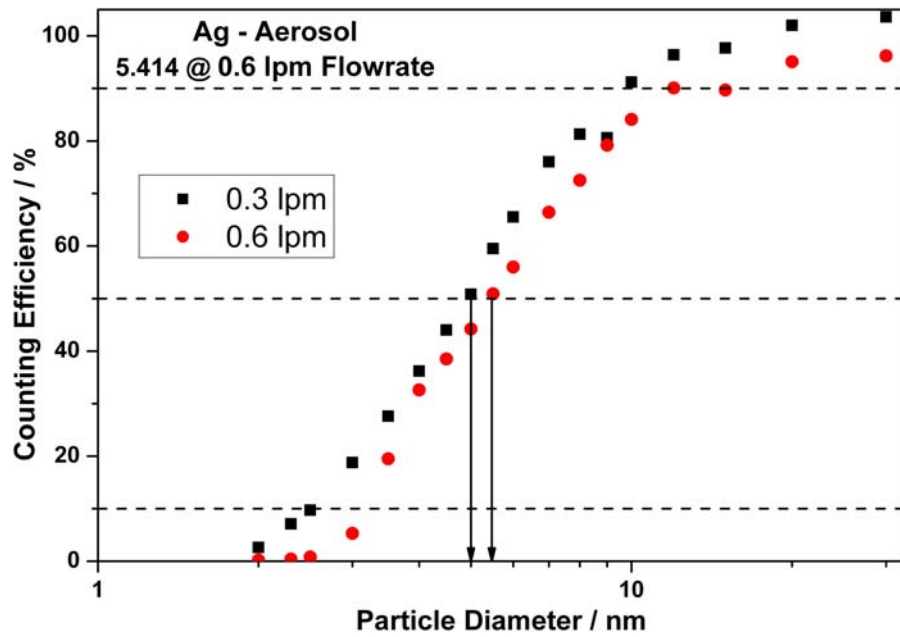


Abb. 3.8: Zähleffizienzkurven für Ag – Partikel (Ofengenerator) für das CPC 5.414 in seinen beiden Betriebsmodi

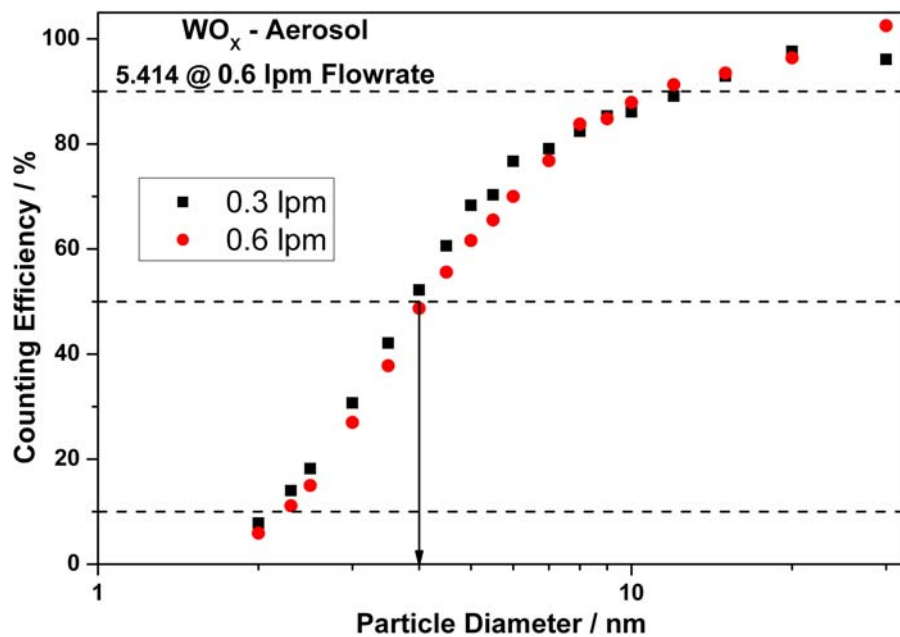


Abb. 3.8: Zähleffizienzkurven für WO_x – Partikel für das CPC 5.414 in seinen beiden Betriebsmodi

4 Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Zähleffizienzen der CPC 5.414 und 5.416 an Partikeln aus Kochsalz, Silber und Wolframoxid in unterschiedlichen Modifikationen im Partikelgrößenbereich zwischen 2 und 30 nm gemessen. Gleichzeitig wurde die Zähleffizienz an der Vorgängergeneration am Beispiel des CPC 5.403 ermittelt und vergleichend gegenübergestellt. Zusätzlich wurde der Einfluss eines erhöhten Aerosolvolumenstroms auf die Zähleffizienz des CPC 5.414 untersucht.

Die neue Modellgeneration weist eine erhöhte Zähleffizienz an sphärischen Monopartikeln aus Kochsalz und Silber auf. Der d_{50} – Wert sinkt im Durchschnitt um 1,5 nm. Hervorzuheben ist die deutlich gesteigerte Zähleffizienz im Bereich sehr kleiner Partikel. Hier sinkt der d_{10} – Wert im Durchschnitt von 4,4 auf 2,5 nm. Die Zähleffizienz ist für die Silber – Partikel leicht höher. Es liegt folglich eine Materialabhängigkeit vor.

Die Zähleffizienz an Agglomeraten / Aggregaten aus Silber bzw. Wolframoxid liegt verglichen zu den sphärischen Monopartikeln deutlich höher, jedoch ist keine signifikante Verbesserung zur alten Modellgeneration erkennbar. Der d_{50} – Wert liegt bei ca. 4 nm. Die Partikeln scheinen aufgrund ihrer Morphologie die Butanolkondensation zu begünstigen.

Die Material- bzw. Morphologieabhängigkeit der Zähleffizienz ist für die neue Modellgeneration deutlich reduziert. Während der d_{50} – Wert für das CPC 5.403 je nach Material um 3,3 nm variiert, schwankt dieser in der neuen Modellgeneration um lediglich 1,4 nm.

Die Zähleffizienz des CPC 5.414 sinkt bei Erhöhung des Aerosolvolumenstroms auf 0,6 lpm im Falle von sphärischen Monopartikeln im Größenbereich kleiner 3,5 nm verglichen zu den Messungen bei 0,3 lpm rapide ab, während sonst kein Einfluss auf die Zähleffizienz beobachtet werden kann. Die Zähleffizienz von Agglomeraten aus Wolfram – Oxid wird vom Betriebsmodus nicht beeinflusst.

5 Anhang

5.1 Rohdaten der Zähleffizienzmessungen an Ag – Aggregaten (Funkengenerator) bei 0,3 lpm

x [nm]	Zähleffizienz [%]		
	5.403	5.414	5.416
3,5	16,2	31,4	25,6
3,7	24,7	38,3	32,8
4	33,0	47,9	43,3
5	59,0	65,7	62,6
6	72,8	75,7	72,5
7	79,9	79,2	77,3
8	87,4	85,2	83,3
9	88,7	87,6	85,9
10	91,5	89,5	87,7
12	92,7	93,2	91,8
15	93,9	95,8	95,1
20	93,9	99,7	99,1
30	93,0	98,8	99,6
40	97,4	102,4	100,4

5.2 Rohdaten der Zähleffizienzmessungen an NaCl – Monopartikeln bei 0,3 lpm

x [nm]	Zähleffizienz [%]		
	5.403	5.414	5.416
2,0	0,0	3,9	5,2
2,3	0,0	6,8	8,6
2,5	0,0	8,7	10,5
3,0	0,0	15,4	17,4
3,5	0,4	22,6	24,5
4,0	2,3	29,8	31,2
4,5	8,1	37,7	39,1
5,0	17,0	44,6	46,3
5,5	25,9	51,2	52,6
6,0	34,3	56,6	57,7
7,0	47,8	65,1	65,5
8,0	59,2	73,1	73,1
9,0	70,9	81,3	80,7
10,0	78,2	84,9	84,0
12,0	91,3	90,4	90,4
15,0	98,6	95,0	96,0
20,0	100,8	102,8	102,6
30,0	101,7	102,1	100,9

5.3 Rohdaten der Zähleffizienzmessungen an Ag – Monopartikeln (Ofengenerator) bei 0,3 lpm

x [nm]	Zähleffizienz [%]		
	5.403	5.414	5.416
2,0	0,0	2,6	2,0
2,3	0,0	7,1	6,2
2,5	0,0	9,7	7,9
3,0	0,1	18,8	15,3
3,5	1,0	27,6	23,3
4,0	6,2	36,2	32,0
4,5	14,7	44,0	39,8
5,0	26,3	50,8	47,8
5,5	39,1	59,5	56,0
6,0	47,7	65,5	62,4
7,0	64,4	76,0	73,3
8,0	75,3	81,3	79,0
9,0	83,1	80,6	81,0
10,0	92,6	91,2	89,9
12,0	95,0	96,4	93,3
15,0	96,7	97,7	97,1
20,0	99,3	102,0	100,0
30,0	101,6	103,6	102,1

5.4 Rohdaten der Zähleffizienzmessungen an WOx – Agglomeraten bei 0,3 lpm

x [nm]	Zähleffizienz [%]		
	5.403	5.414	5.416
2,0	1,0	5,9	8,9
2,3	4,5	11,1	15,1
2,5	8,7	15,0	19,4
3,0	24,9	27,0	31,5
3,5	39,0	37,8	41,7
4,0	52,2	48,7	51,9
4,5	64,8	55,6	59,0
5,0	69,5	61,6	63,9
5,5	74,2	65,5	67,3
6,0	78,3	70,0	71,4
7,0	83,6	76,8	78,0
8,0	87,6	83,8	85,9
9,0	88,0	84,8	85,7
10,0	89,7	87,9	87,7
12,0	92,6	91,3	90,6
15,0	93,5	93,5	92,9
20,0	93,1	96,4	95,8
30,0	96,3	102,5	102,0

5.5 Rohdaten der Zähleffizienzmessungen an WOx – Monopartikeln bei 0,3 lpm

x [nm]	Zähleffizienz [%]		
	5.403	5.414	5.416
2,0	1,0	5,9	8,9
2,3	4,5	11,1	15,1
2,5	8,7	15,0	19,4
3,0	24,9	27,0	31,5
3,5	39,0	37,8	41,7
4,0	52,2	48,7	51,9
4,5	64,8	55,6	59,0
5,0	69,5	61,6	63,9
5,5	74,2	65,5	67,3
6,0	78,3	70,0	71,4
7,0	83,6	76,8	78,0
8,0	87,6	83,8	85,9
9,0	88,0	84,8	85,7
10,0	89,7	87,9	87,7
12,0	92,6	91,3	90,6
15,0	93,5	93,5	92,9
20,0	93,1	96,4	95,8
30,0	96,3	102,5	102,0

5.6 Rohdaten der Zähleffizienzmessungen für das CPC 5.414 bei 0,6 lpm

x [nm]	Zähleffizienz 5.414 [%]		
	NaCl	Ag	WOx
2,0	0,0	0,2	7,8
2,3	0,6	0,4	14,0
2,5	1,4	0,8	18,2
3,0	8,3	5,3	30,7
3,5	18,8	19,5	42,1
4,0	28,1	32,6	52,2
4,5	35,4	38,5	60,6
5,0	41,6	44,2	68,3
5,5	47,1	50,9	70,3
6,0	52,2	56,0	76,7
7,0	62,1	66,4	79,1
8,0	69,9	72,5	82,4
9,0	78,0	79,2	85,3
10,0	81,7	84,1	86,1
12,0	84,3	90,1	89,1
15,0	87,7	89,7	92,9
20,0	89,5	95,1	97,6
30,0	96,7	96,2	96,1