

# Verdünnungssysteme für Prüfaerosole: Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten

L. Mölter, M. Schmidt

**Zusammenfassung** Handelsübliche Verdünnungssysteme haben sich in der Praxis zum Verdünnen von Feststoffaerosolen im Partikelgrößenbereich von ca. 2 nm bis 20 µm bewährt. Beim Verdünnen von Tröpfchenaerosolen mit Tropfendurchmessern oberhalb von ca. 3 µm wirken Verdünnungssysteme jedoch häufig als Abscheider. Hochkonzentrierte Tröpfchenaerosole, wie sie etwa bei der Abscheidegradbestimmung von Ölnebelabscheidern (z. B. Kühlschmierstoffaerosole, Druckluftaerosole nach dem Kompressor oder bei Blowby-Nebel im Motor) entstehen, weisen Tröpfchen im Durchmesserbereich bis ca. 8 µm auf, die reproduzierbar verdünnt werden müssen, um die Abscheider zuverlässig bewerten zu können. Die Prinzipien von Verdünnungssystemen und einer aktuellen Neuentwicklung speziell für Tröpfchenaerosole werden vorgestellt.

## Dilution systems for test aerosols: fundamentals and applications

**Summary** Commercially available dilutions systems have proven their abilities to dilute solid aerosols in the particle size range from approx. 2 nm to 20 µm in practice. However, if aerosols with droplet diameters above approx. 3 µm are diluted, dilution systems often act as a separator. Highly concentrated droplet aerosols, such as those arising in the determination of the separation efficiency of oil mist separators (e.g. aerosols, compressed air aerosols after the compressor or with blowby mist in the engine), contain droplets in the diameter range up to approx. 8 µm, which have to be reproducibly diluted to reliably assess the performance of the separators. The working principles of dilution systems and a current new development, specifically for droplet aerosols, are presented.

## 1 Einführung

Aerosole sind Mehrphasensysteme, bei denen die disperse Phase aus festen und/oder flüssigen Partikeln im Größenbereich von ca. 2 nm bis 100 µm und die kontinuierliche Phase aus einem gasförmigen Medium besteht.

Beispiele für natürliche Aerosole sind:

- Salzkristalle aus dem Meer,
- Vulkaneruptionen,
- Wüstenstaub,
- Rauch von Waldbränden,
- Blütenstaub, Pollen, Sporen,
- Viren und Bakterien,
- Nebel.

Beispiele für anthropogene Aerosole sind Emissionen aus

- Hausfeuerungen,
- der Landwirtschaft,
- dem Verkehr, z. B. aus Fahrzeugen, Schiffen und Flugzeugen,
- der Industrie, z. B. aus Verbrennungs-, mechanischen und chemischen Prozessen.

Dipl.-Ing. Leander Mölter,  
Dipl.-Ing. Martin Schmidt,  
Fa. Palas, Karlsruhe.

Aerosole können sowohl die Gesundheit des Menschen als auch die Funktion technischer Produkte negativ beeinflussen. Die Partikelkonzentration kann in Abhängigkeit von der Emissionsquelle bei Partikeln mit einem Durchmesser von kleiner 1 µm bis zu mehr als  $10^{18} \text{ m}^{-3}$  betragen. Um Aerosole zu entfernen, werden Abscheider wie z. B. Filtersysteme eingesetzt. Mit speziellen Filterstufen lassen sich Partikelkonzentrationen z. B. in einem Reinraum von weniger als  $100 \text{ m}^{-3}$  erzielen. Der zu messende Partikelkonzentrationsbereich erstreckt sich somit über 16 Größenordnungen und der zu messende Partikelgrößenbereich über fünf Größenordnungen.

### 1.1 Aerosolverdünnung für Aerosolmessgeräte

Die Qualität von Abscheidern und Filtern wird mit Prüfaerosolen nach verschiedenen Normen und Standards getestet bzw. verglichen. Diese Prüfaerosole werden bevorzugt mit Aerosolgeneratoren hergestellt, die typischerweise Partikelkonzentrationen bis mehr als  $10^{14} \text{ m}^{-3}$  erzeugen können. Gerätekenngößen, die die Leistungsfähigkeit von Prüfaerosolgeneratoren charakterisieren, sind in der Richtlinie VDI 3491 Blatt 1 [1] beschrieben.

Für die messtechnische Charakterisierung von Filtern, Abscheidern und Umweltaerosolen werden zählende Messverfahren, insbesondere Aerosolspektrometer eingesetzt, d. h. die Partikelgröße wird am einzelnen Partikel bestimmt und die Partikelkonzentration wird aus dem gleichzeitig exakt gemessenen Volumenstrom berechnet.

Aerosolspektrometer und andere Messsysteme sind in der Richtlinienreihe VDI 3867 Blatt 1 bis Blatt 6 [2] beschrieben. Mit diesen Messgeräten können, je nach Messgerät, Partikel im Größenbereich von ca. 2 nm bis 100 µm auch in hohen Partikelkonzentrationen, ohne Koinzidenzfehler, gemessen werden. In ISO 21501-1 [3] sind die Anforderungen an Optische Aerosolspektrometer (OAS) wie z. B. die Gerätekenngößen sowie das Kalibrieren dieser Geräte beschrieben. Optische Aerosolspektrometer haben viele Größenklassen, d. h. sie können die Partikelgrößenverteilung hochaufgelöst und zuverlässig charakterisieren. OAS können im Gegensatz zu Optischen Partikelzählern (OPC) in hohen Partikelkonzentrationen, manche OAS sogar bis  $10^{12} \text{ m}^{-3}$  im Zählmodus, messen.

OPCs sind in ISO 21501-4 [4] beschrieben. Sie haben wenige Größenklassen und können nur niedrige Partikelkonzentrationen messen. Sie werden für die Überwachung und Charakterisierung von Reinräumen eingesetzt. Mit verschiedenen Reinraumzählern können Partikelgrößen ab 0,1, 0,2, 0,3 oder 0,5 bis ca. 20 µm in einem Konzentrationsbereich bis ca.  $35 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$  detektiert werden. Diese Partikelzähler werden mit einem hohen Absaugvolumenstrom von bis zu 50 l/min betrieben, um die Messzeiten bei sehr niedrigen Konzentrationen klein zu halten.

Zählende Messverfahren haben den großen Vorteil, dass sie gleichzeitig die Partikelgrößenverteilung und die Partikelkonzentration bestimmen können. Die notwendigen Gerätekenngößen für den Vergleich von zählenden Messver-

Tabelle 1. Verdünnungsfaktor  $K_v$  und Volumenströme.

$K_v$	$\dot{V}_A + \dot{V}_R$ in l/min	$\dot{V}_A$ in l/min
10	2 + 18	2
100	2 + 198	2
1 000	2 + 1 998	2
10 000	2 + 19 998	2
100 000	2 + 199 998	2

fahren, wie das Partikelgrößen-Auflösungsvermögen, das zeitliche Auflösungsvermögen, die Klassifiziergenauigkeit, der untere und obere Zählwirkungsgrad und die Nullzählrate, sind in den o. g. Normen definiert.

Bei allen zählenden Messverfahren ist darauf zu achten, dass im zu analysierenden Messvolumen nur jeweils ein Partikel zur Analyse zur Verfügung steht. Sind zwei oder mehr Partikel gleichzeitig im Messvolumen, so wird von Koinzidenz gesprochen. Die Koinzidenz führt zum Koinzidenzfehler, der aus zwei Fehlern, dem Zählfehler (die Anzahl wird zu niedrig) und dem Größenfehler (der Partikeldurchmesser wird zu groß), besteht.

Um die Koinzidenzfehler möglichst zu vermeiden, muss von jedem eingesetzten Aerosolspektrometer oder Partikelzähler die maximale vom Hersteller zugelassene Anzahlkonzentration ( $C_{n,max}$ ), z. B.  $C_{n,max} = 10^{12} \text{ m}^{-3}$  oder  $C_{n,max} = 35 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ , berücksichtigt werden. Je nach zu messender Aerosolkonzentration  $C_n$  und dem Limit  $C_{n,max}$  muss unter Umständen erheblich verdünnt werden.

Der Anspruch an ein Verdünnungssystem muss sein, dass sich das Aerosol in der Größenverteilung nicht verändert und der Verdünnungsfaktor über den Partikelgrößenbereich (Übertragungsfunktion) bekannt ist. Außerdem muss das Verdünnungssystem langzeitstabil sein und reproduzierbare Ergebnisse liefern können.

### 1.2 Aerosolverdünnung für Aerosolgeneratoren

Prüfaerosole können nach verschiedenen Prinzipien (siehe Richtlinienreihe VDI 3491 [5]) aus Feststoffen, Flüssigkeiten, Suspensionen und Lösungen oder aus Kondensationsverfahren, Verbrennungsprozessen oder chemischen Reaktionen erzeugt werden.

Bei der Erzeugung von Prüfaerosolen, insbesondere in Abhängigkeit von der Verweildauer zwischen der Aerosol-erzeugungsquelle und der Aerosolmessung, muss bei hohen Konzentrationen größer  $10^{15} \text{ m}^{-3}$  verdünnt werden, um Veränderungen des Aerosols durch Koagulation zu vermeiden. Als Koagulation bezeichnet man das Zusammenstoßen und Aneinanderhaften von Partikeln im Aerosol. Bei kleinen Partikeln wird das Zusammenstoßen im Wesentlichen durch die Brownsche Diffusionsbewegung verursacht. Durch die Koagulation werden die Partikel größer, es sinkt die Partikelanzahlkonzentration bei gleichbleibender Massenkonzentration.

Die Zeitdauer, in der sich die Partikelanzahlkonzentration bei der Koagulation um die Hälfte verringert, wird als Halbwertszeit  $t_{1/2}$  bezeichnet. Bei Umgebungsbedingungen mit  $p = 1013 \text{ hPa}$  und  $T = 20 \text{ °C}$  sinkt die Anzahlkonzentration bei  $10^{18} \text{ m}^{-3}$  innerhalb von 2 ms z. B. auf die Hälfte.

## 2 Aerosolverdünnungssysteme

Verdünnungssysteme können zum einen die Aufgabe haben, die Konzentration eines Aerosols für ein ausgewähltes Messgerät messbar zu machen. Zum anderen kann ein Verdünnungssystem dafür sorgen, dass die erzeugte Konzentration eines Prüfaerosols soweit herabgesetzt wird, dass keine Veränderungen durch Koagulation mehr auftreten können.

In der Richtlinie VDI 3491 Blatt 15 [6] sind die am weitesten verbreiteten Verdünnungsprinzipien beschrieben. Je nach Verdünnungsprinzip sind diese Verdünnungssysteme oder Verdünnungsstufen für den Partikelgrößenbereich von ca. 2 nm bis 20  $\mu\text{m}$  in Abhängigkeit von der dispersen Phase des Aerosols, fest oder flüssig, geeignet. So kann z. B. ein System zum Verdünnen von Feststoffaerosolen im Größenbereich bis 20  $\mu\text{m}$  ausreichend gut funktionieren, aber zum Verdünnen von Tröpfchenaerosolen bis 7  $\mu\text{m}$  ein nahezu hundertprozentiger Abscheider sein.

Kommerziell verfügbare Verdünnungssysteme oder Verdünnungsstufen werden mit einem Verdünnungsfaktor zwischen 5 und 300, meist aber von 10 oder 100 geliefert. Mit kaskadierbaren Verdünnungssystemen können Verdünnungsfaktoren bis 100 000 zuverlässig realisiert werden.

Die Prinzipien und die Funktionsweise von Verdünnungssystemen sollten eindeutig beschrieben, die Gerätekenngrößen sollten ermittelt und angegeben werden.

### 2.1 Funktionsweise und Funktionsprinzipien

Die Verdünnungssysteme, die hier beschrieben werden, basieren auf der Richtlinie VDI 3491 Blatt 15 [6]. Um die Partikelkonzentration zuverlässig und reproduzierbar herabzusetzen, wird das zu verdünnende Aerosol mit einem partikelfreien Gas, z. B. Luft, definiert gemischt. Der Verdünnungsfaktor wird als das Verhältnis der Konzentrationen im unverdünnten und verdünnten Aerosol definiert (Gl. (1)).

$$K_v = C_{n,u} / C_{n,v} \quad (1)$$

$K_v$  = Verdünnungsfaktor

$C_{n,u}$  = Anzahlkonzentration des unverdünnten Aerosols

$C_{n,v}$  = Anzahlkonzentration des verdünnten Aerosols

Unterstellt man, dass der Aerosoltransport durch das Verdünnungssystem verlustfrei und die Rein- oder Mischluft partikelfrei sind, kann das Verdünnungsverhältnis auch aus den Volumenströmen ermittelt werden (Gl. (2)).

$$K_v = (\dot{V}_A + \dot{V}_R) / \dot{V}_A \quad (2)$$

$\dot{V}_A$  = der angesaugte Volumenstrom des Aerosols

$\dot{V}_R$  = der Volumenstrom der Reinfluft

Gl. (2) zeigt deutlich, welche Reinfluftvolumenströme zum Verdünnen von nur 2 l/min Aerosolvolumenstrom notwendig sind, um Verdünnungsfaktoren von 10, 100, 1 000, 10 000 oder 100 000 zu erzeugen (Tabelle 1).

Da der Aerosoltransport im Prinzip nie verlustfrei in einer Mischkammer durchgeführt werden kann, ist die Übertragungsfunktion der Verdünnungssysteme zu ermitteln. Das Ziel einer Verdünnung ist meist die größenunabhängige Verdünnung eines hochkonzentrierten Aerosols.

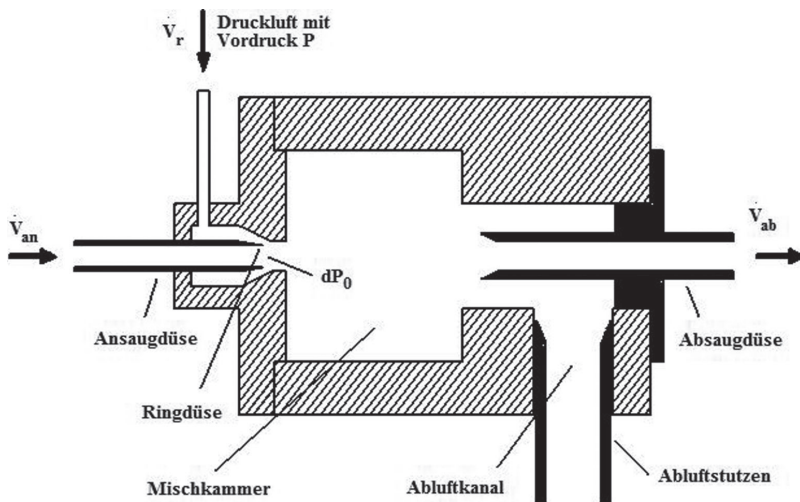


Bild 1. Schnittbild der Palas®-Verdünnungsstufe nach dem Ejektorprinzip.

Die Unterschiede der Verdünnungssysteme basieren unter anderem darauf, wie die Reinluft erzeugt und zugeführt wird. Die Reinluft kann z. B. durch Filtern eines Teilstroms des Aerosols oder durch eine gefilterte separate Verdünnungsluft gewonnen werden. In der Praxis haben sich drei Prinzipien bewährt, die in der Richtlinie VDI 3491 Blatt 15 [6] beschrieben sind.

2.1.1 Externe Reinluftzuführung (Ejektorprinzip)

Die extern erzeugte partikelfreie Verdünnungsluft wird dem Verdünnungssystem über eine Querschnittsverengung (Ringspalt), wo sie einen Unterdruck erzeugt, zugeführt. Durch diesen Unterdruck wird das zu verdünnende Aerosol angesaugt. Das Ejektorprinzip ist in Bild 1 dargestellt. Ein besonderer Vorteil dieser Verdünnungssysteme ist, dass die einzelnen Verdünnungsstufen mit dem Faktor 10 oder 100 kaskadiert werden können. Durch die Kaskadierung können Verdünnungsfaktoren von 10, 100, 1 000, 10 000 und 100 000 einfach, zuverlässig und mit einem geringen Verdünnungsluftverbrauch realisiert werden. So kann z. B. mit der Kaskadierung von vier Ejektorstufen mit einem Verdünnungsfaktor von jeweils  $K_v = 10$  ein Aerosolvolumenstrom von 2 l/min mit nur 72 l/min statt mit 19 998 l/min Verdünnungsluft mit dem Faktor 10 000 verdünnt werden. Durch die austauschbaren Absaugsonden können diese Verdünnungsstufen für Partikelzähler mit Probenahmevolumenströmen im Bereich von 0,05 bis 50 l/min verwendet werden. Diese Verdünnungsstufen können auch druckfest bis 10 bar und beheizt bis 200 °C betrieben werden.

2.1.2 Externe Reinluftzuführung (Zwangsmischung)

Der prinzipielle Aufbau eines Verdünnungssystems mit Zwangsmischung ist in Bild 2 dargestellt. Kernstück ist eine Mischkammer oder Mischstrecke, die sich insbesondere zum Verdünnen von hochkonzentrierten Aerosolen aus Tröpfchen mit einem Durchmesser bis ca. 10 µm bewährt hat.

2.1.3 Interne Reinluftgewinnung (Kapillare)

Bei diesem Prinzip wird die erzeugte partikelfreie Verdünnungsluft aus einem Teilstrom des abgesaugten Aerosols mithilfe eines Filters gewonnen. Der ungefilterte Teilstrom wird durch eine Kapillare geleitet (Bild 3). Der gefilterte

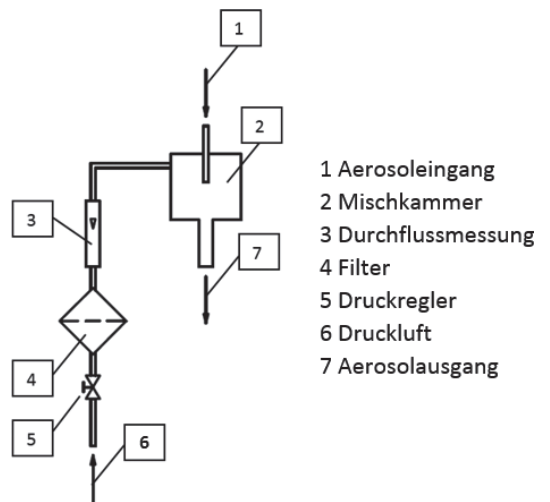


Bild 2. Funktionsprinzip eines Verdünnungssystems mit Zwangsmischung.

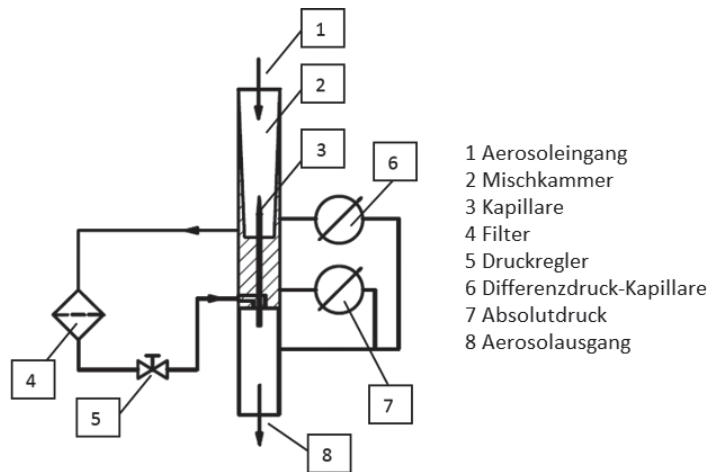


Bild 3. Funktionsprinzip eines Verdünnungssystems mit Kapillare.

Teilstrom wird nach der Kapillare wieder mit dem ungefilterten Teilstrom gemischt. Die Verdünnungsluft ist somit das Trägergas des Aerosols. Der Verdünnungsfaktor ändert sich hierbei mit dem Differenzdruck über dem Filter und durch Ablagerungen in der Kapillare. Daher sollte auch die Kapillare mit einem Differenzdrucksensor überwacht werden.

2.1.4 Neu: Interne Reinluftgewinnung (Zwangsmischung)

Da Tröpfchenaerosole > 4 µm mit den zurzeit bekannten und kommerziell erhältlichen Verdünnungssystemen nicht zuverlässig verdünnt werden können, hat die Fa. Palas® ein neues Verdünnungssystem entwickelt. Als Verdünnungsluft wird bei diesem Prinzip das Trägergas des Aerosols verwendet. Das vom welas® digital Aerosolspektrometer vermessene Aerosol wird gefiltert und diese Reinluft als Verdünnungsluft dem Verdünnungssystem wieder zugeführt. Ein kleiner Teil dieser Reinluft wird als Abluft (siehe Bild 4) entsorgt. Wie in Bild 4 dargestellt, ist das Kernstück dieses Verdünnungssystems auch hier die Mischkammer, in der Tröpfchenaerosole mit einem Durchmesser bis ca. 10 µm zuverlässig und reproduzierbar verdünnt werden können. Die Mischkammer und das Aerosolführungsrohr haben relativ große Durchmesser, insbesondere im Vergleich zu den Verdünnungsprinzipien mit Kapillaren. Eine zweite

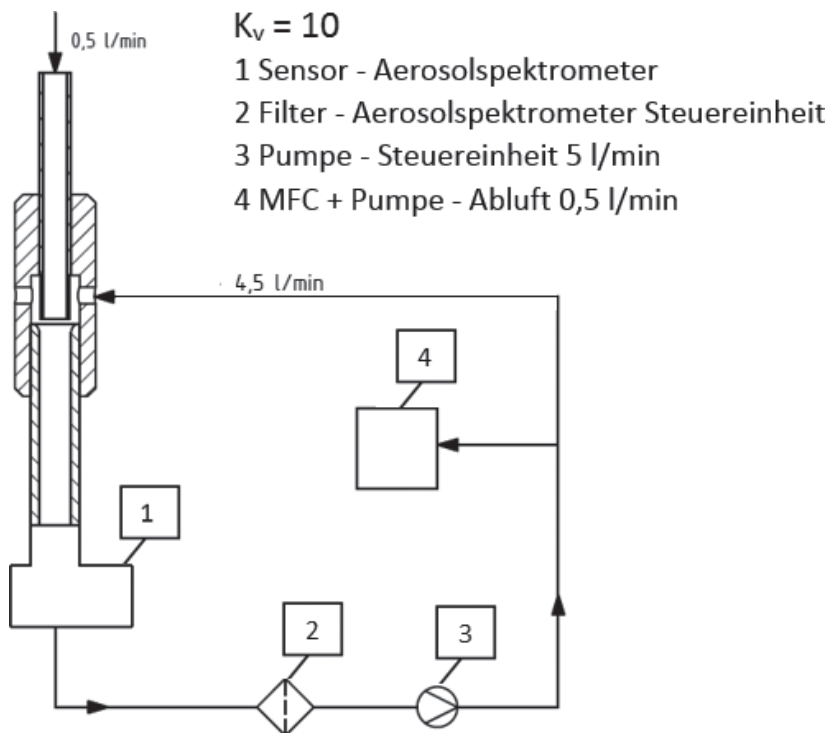


Bild 4. Funktionsprinzip eines Verdünnungssystems (Verdünnungsfaktor = 10) mit Zwangsmischung und interner Reinluftgewinnung.

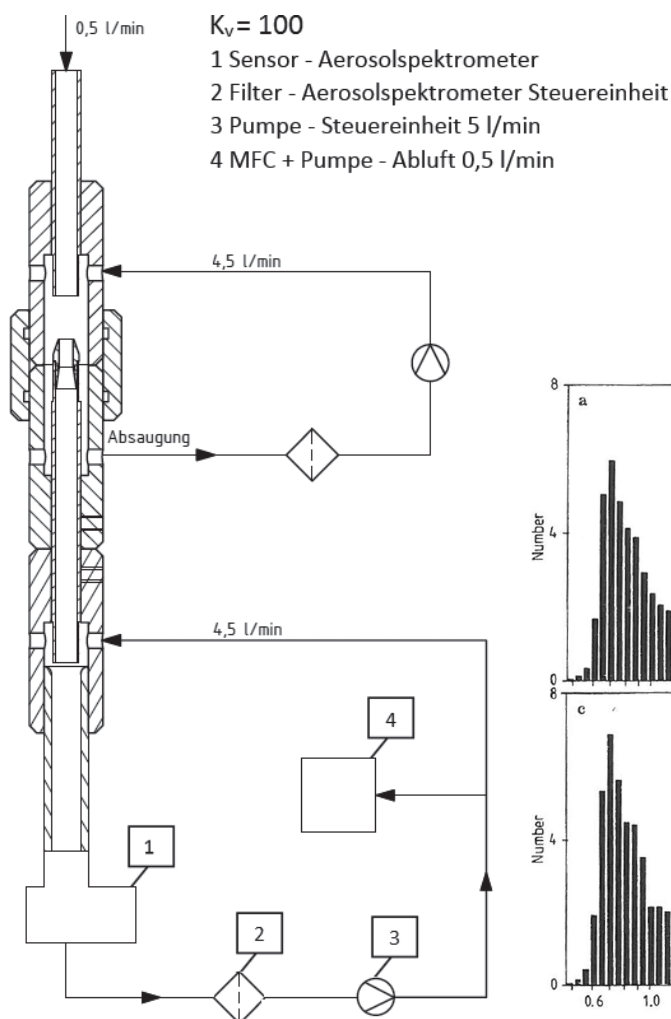


Bild 5. Funktionsprinzip eines Verdünnungssystems (Verdünnungsfaktor = 100) mit Zwangsmischung, interner Reinluftgewinnung und kaskadierter Verdünnungsstufe.

Version dieses neuen Verdünnungsprinzips, mit dem Verdünnungsfaktor 100, ist in Bild 5 dargestellt.

2.2 Verfahrensmerkmale und Gerätekenngößen von Verdünnungssystemen

2.2.1 Verfahrensmerkmale

Die wichtigsten Verfahrensmerkmale eines Verdünnungssystems sind der angesaugte Aerosolvolumenstrom, der notwendige Verdünnungsluftvolumenstrom und das Prinzip, wie dieser erzeugt wird – aus einem zusätzlichen Verdünnungsgas oder aus dem Aerosol selbst. Durch die partikelgrößenabhängigen Verluste und Entmischungsvorgänge in der Mischkammer bzw. in den Kapillaren und abhängig vom Partikelmaterial (Feststoffe oder Tröpfchen) ist der Verdünnungsfaktor meist nur in einem begrenzten Partikelgrößenbereich konstant. Der Verdünnungsfaktor sollte also in Abhängigkeit von der Partikelgrößenverteilung und vom Partikelmaterial ermittelt werden (Bild 6). Der Verdünnungsfaktor sollte möglichst über den gesamten zu messenden Partikelgrößenbereich des zu verdünnenden Aerosols bekannt und konstant sein.

Gl. (1) kann daher mit der Angabe des Partikeldurchmessers erweitert werden:

$$K_v(x) = C_{n,u}(x)/C_{n,v}(x) \tag{3}$$

- $K_v$  = Verdünnungsfaktor
- $C_{n,u}$  = Anzahlkonzentration des unverdünnten Aerosols
- $C_{n,v}$  = Anzahlkonzentration des verdünnten Aerosols
- $x$  = Partikeldurchmesser

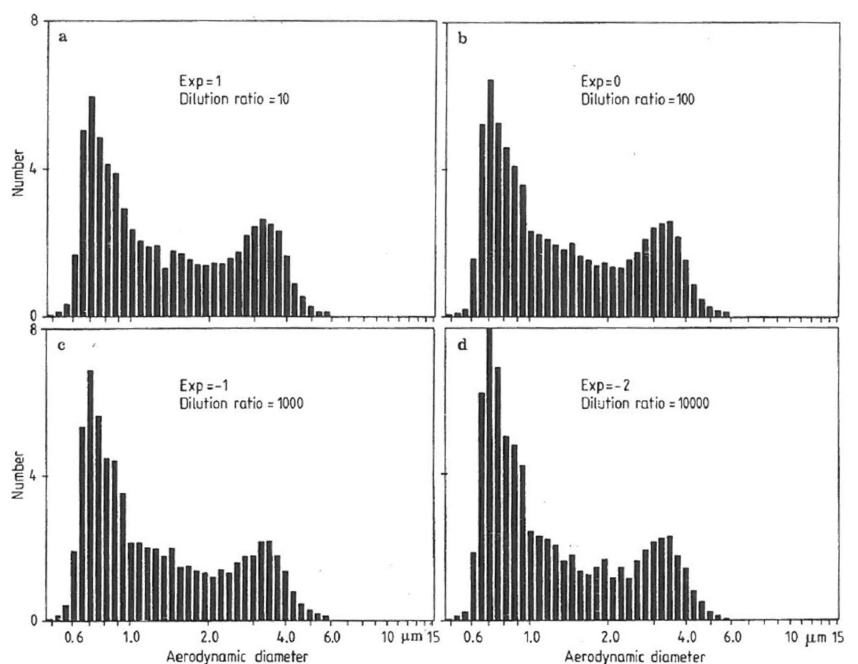


Bild 6. Größenverteilung eines Testaerosols, gemessen mit dem APS nach 10facher (a), 100facher (b), 1 000facher (c) und 10 000facher (d) Verdünnung [7]; Aerosol: Kunststoffpartikel.



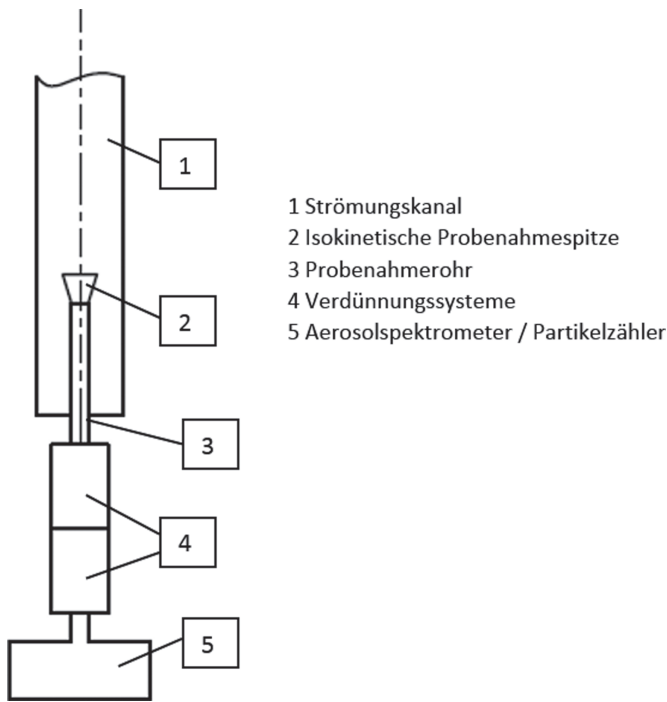


Bild 7. Schematische Darstellung eines Testaufbaus zum Testen von Aerosolmessgeräten und Verdünnungssystemen.

2.2.2 Gerätekenngößen

Für die Beschreibung eines Verdünnungssystems werden folgende Gerätekenngößen benötigt: Verdünnungsfaktor, Partikelgrößenbereich, Partikelmaterial, Gesamtvolumenstrom, Zahl der kaskadierbaren Systeme, Übertragungsfunktion, Temperatur- und Druckbereich des zu verdünnenden Aerosols.

3 Störeinflüsse und Fehlerquellen

Hochkonzentrierte Feststoffaerosole mit besonderen Haftungseigenschaften, wie z. B. Carnauba-Wachs und Ruß, neigen dazu, die Kapillare und Düsen innerhalb kurzer Zeit zu verstopfen. Andere Feststoffe, wie Teststäube aus Arizona-Finedust (A2-Staub), die die Wände der Mischkammer berühren, lösen sich meist wieder ab. Das Verdünnen solcher Feststoffaerosole ist relativ einfach. Tröpfchenaerosole bis 10 µm sind nicht so einfach zu verdünnen, da sich Tropfen, die die Wand berühren, nicht mehr ablösen. Bei längerer Betriebsdauer, z. B. beim Verdünnen eines Feststoffaerosols, können sich abgelagerte Partikel wieder ablösen und den Verdünnungsfaktor erheblich ändern. Aus diesem Grunde sollte die Partikelproduktionsrate eines Verdünnungssystems, insbesondere nach der vorgenannten Anwendung, mit einem am Eingang des Systems vorgeschalteten Absolutfilter bestimmt werden.

4 Funktionstest von Verdünnungssystemen

4.1 Funktionstest mit Feststoffaerosolen und Tröpfchenaerosolen bis 2 µm

Bei einem Funktionstest mit dem Testaufbau (Bild 7) können mehrere Gerätekenngößen, z.B. die Übertragungsfunktion bei der Kaskadierung bezüglich des Gesamtverdünnungsfaktors, (Bild 6 und 8) getestet werden, siehe auch [9 ; 10].

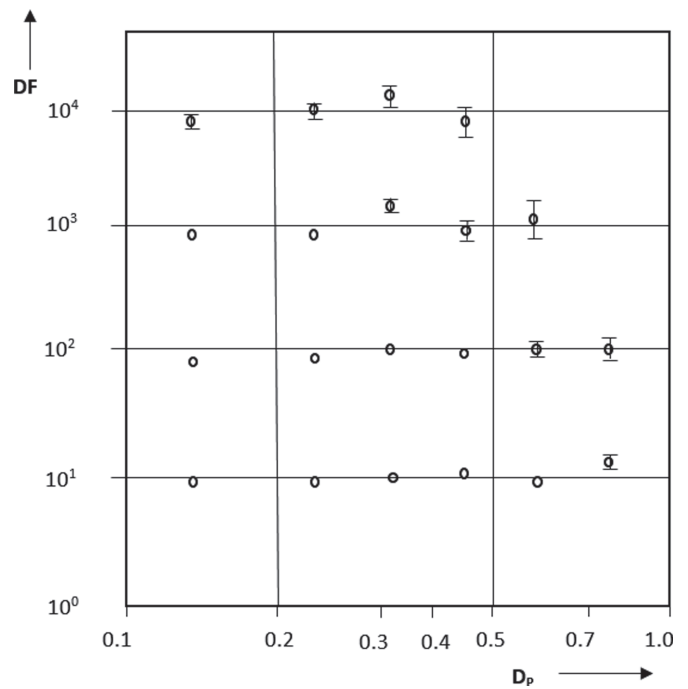


Bild 8. Verdünnungsfaktoren als Funktion der Partikelgröße [8]; Messgeräte: µLPC 101 und CPC 3020; Diethylhexylsebacat-Aerosol; Aerosolgenerator: AGF 2.0 DF: Verdünnungsfaktor, D<sub>p</sub>: Partikeldurchmesser.

4.2 Funktionstest mit Raumluft vor Ort

Mit dem einfachen Testaufbau (Bild 9) kann die Funktion der Verdünnungssysteme mit OPCs auch zuverlässig mit der Raumluft im Labor überprüft werden. Zu beachten ist hierbei, dass bei der Verwendung eines OPC nach ISO 21501-4 [4] die Raumluft unbedingt verdünnt werden muss, da diese Partikelzähler bei der normalen Laborluft schon in Koinzidenz messen können. Zuerst wird die Partikelkonzentration (Tabelle 2: Messung 1) nach Testaufbau (Bild 9, Messung 1) mit einem funktionierenden Verdünnungssystem koinzidenzfrei bestimmt. Danach wird die zu testende Verdünnungsstufe zwischen der Vorverdünnung und den OPC (Bild 9, Messung 2) geschaltet und erneut gemessen. Auf diese Weise kann der Verdünnungsfaktor zuverlässig bestimmt werden. Ermittelt wird die Anzahl über die Größenklassen. Der Verdünnungsfaktor wird allerdings aus der Gesamtzahl aller Partikel bestimmt, da sich die Raumluft während der Messzeit doch geringfügig ändern kann (Tabelle 2). Konnte der zu erwartende Verdünnungsfaktor nicht nachgewiesen werden, so wurde entweder bei der Messung 1 noch immer in Koinzidenz gemessen oder das Verdünnungssystem ist defekt.

Tabelle 2. Zahlenwerte zum Funktionstest (Bild 9).

Partikelklasse in µm	Anzahl	Partikelklasse in µm	Anzahl
0,2	151 648	0,2	15 166
0,3	71 604	0,3	7 290
0,5	4 305	0,5	524
0,7	360	0,7	65
1	82	1	21
2	16	2	3
3	1	3	0
5	0	5	2
Summe	228 016	Summe	23 071

Messung 1

Messung 2

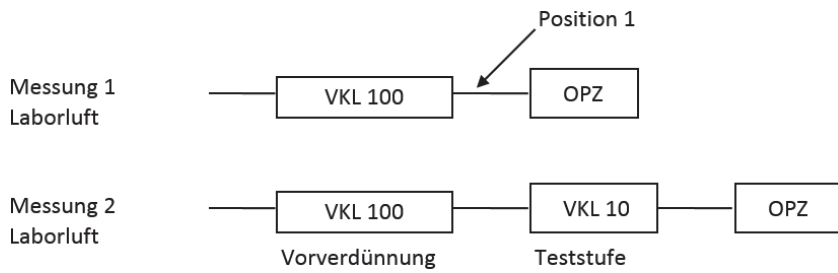


Bild 9. Testaufbau mit den Ejektor-Verdünnungsstufen VKL 10 u. VKL 100 zur Funktionsprüfung eines Verdünnungssystems mit Raumluft.

Tabelle 3. Nachweis Verdünnungssystem mit Mischluft, Verdünnungsfaktor 10, monodisperse Tröpfchen 5 und 7  $\mu\text{m}$ .

Partikeldurchmesser in $\mu\text{m}$	Verdünnungsfaktor $K_v$	Anzahl Rohgas	Anzahl Reingas
5	9,91	64 475	6 505
7	10,59	32 443	3 063

Tabelle 4. Nachweis Verdünnungssystem mit Mischluft Verdünnungsfaktor 100, monodisperse Tröpfchen 5 und 7  $\mu\text{m}$ .

Partikeldurchmesser in $\mu\text{m}$	Verdünnungsfaktor $K_v$	Anzahl Rohgas	Anzahl Reingas
5	100,01	304 322	3 043
7	99,87	236 687	2 370

### 4.3 Funktionstest mit Tröpfchenaerosolen bis 7 $\mu\text{m}$

Diese Übertragungs- oder Verdünnungsfunktionen müssen auch beim Verdünnen von Tröpfchen nachgewiesen werden. Hierzu wird der Testaufbau (Bild 7) und ein Aerosolgenerator nach VDI 3491 Blatt 4 [11] zum Erzeugen von monodispersen Aerosolen (z. B. MAG 3000 von Palas®) verwendet. Die Messergebnisse für den Funktionsnachweis der

neuen Verdünnungssysteme für die Verdünnungsfaktoren 10 und 100 mit dem Verdünnungsprinzip der Zwangsmischung sind in **Tabelle 3** und **4** dargestellt. Als Aerosolspektrometer wurde das System *welas®* digital verwendet. Zur Bestimmung des Verdünnungsfaktors 10 wurde der Sensor *welas®* 2500 mit einer Messzeit von 120 s und einem Mischluftvolumenstrom von 50  $\text{m}^3/\text{h}$  verwendet, zur Bestimmung des Verdünnungsfaktors 100 betrug die Messzeit 180 s, der Mischluftvolumenstrom im Kanal wurde auf

28  $\text{m}^3/\text{h}$  eingestellt und es wurde der Sensor *welas®* 2500 verwendet. Bei beiden *welas®*-Sensoren wurde der Messbereich von 0,3 bis 17  $\mu\text{m}$  eingestellt. In **Tabelle 3** sind die Zahlenwerte der gemessenen Partikel im Roh- und Reingas für 5 und 7  $\mu\text{m}$  mit dem Verdünnungsfaktor 10 und in **Tabelle 4** die gemessenen Partikel im Roh- und Reingas für 5 und 7  $\mu\text{m}$  mit dem Verdünnungsfaktor 100 dargestellt. Die **Bilder 10** und **11** zeigen die Partikelgrößenverteilungen.

### 4.4 Resümee zu den Funktionstests

Es konnte gezeigt werden, dass sich Verdünnungssysteme relativ einfach, eindeutig und zuverlässig charakterisieren lassen. Hierzu gehört die Angabe des Verdünnungsfaktors  $K_v$  für verschiedene Aerosolmaterialien, Partikelgrößen, Temperaturen und Drücke. Nur mit eindeutig charakterisierten Verdünnungssystemen lassen sich zuverlässige und reproduzierbare Messergebnisse erzielen.

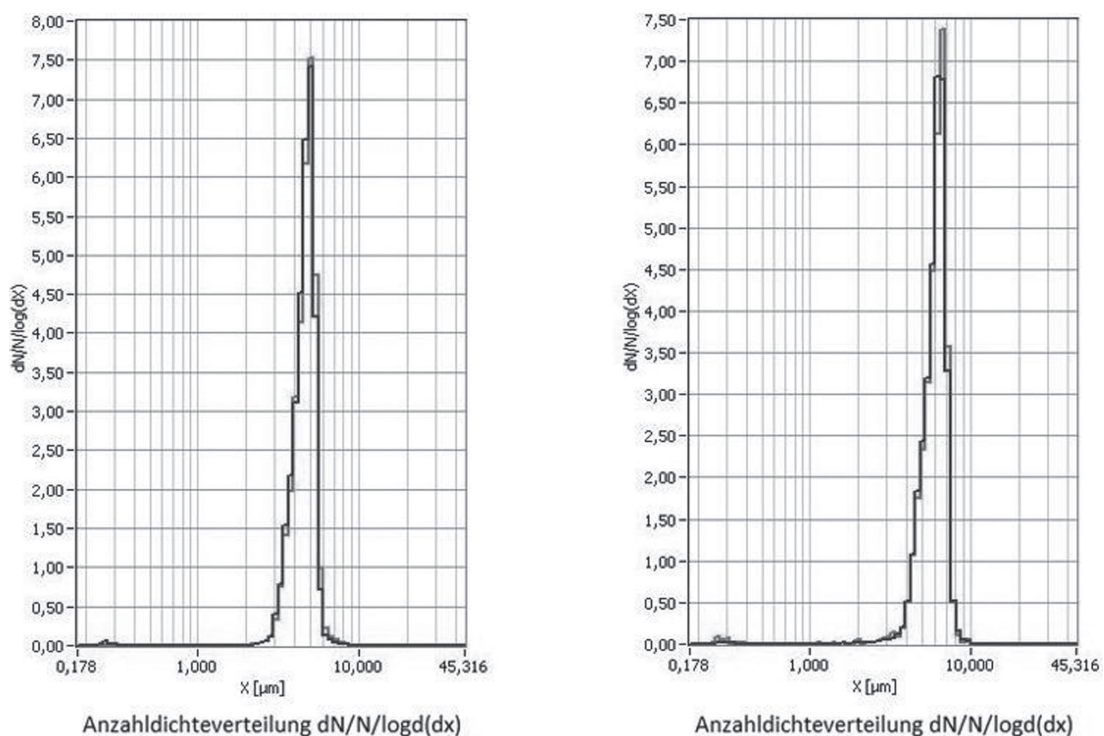


Bild 10. Verdünnungsfaktor 10: Partikelgrößenverteilungen von 5 (links) und 7  $\mu\text{m}$  (rechts).

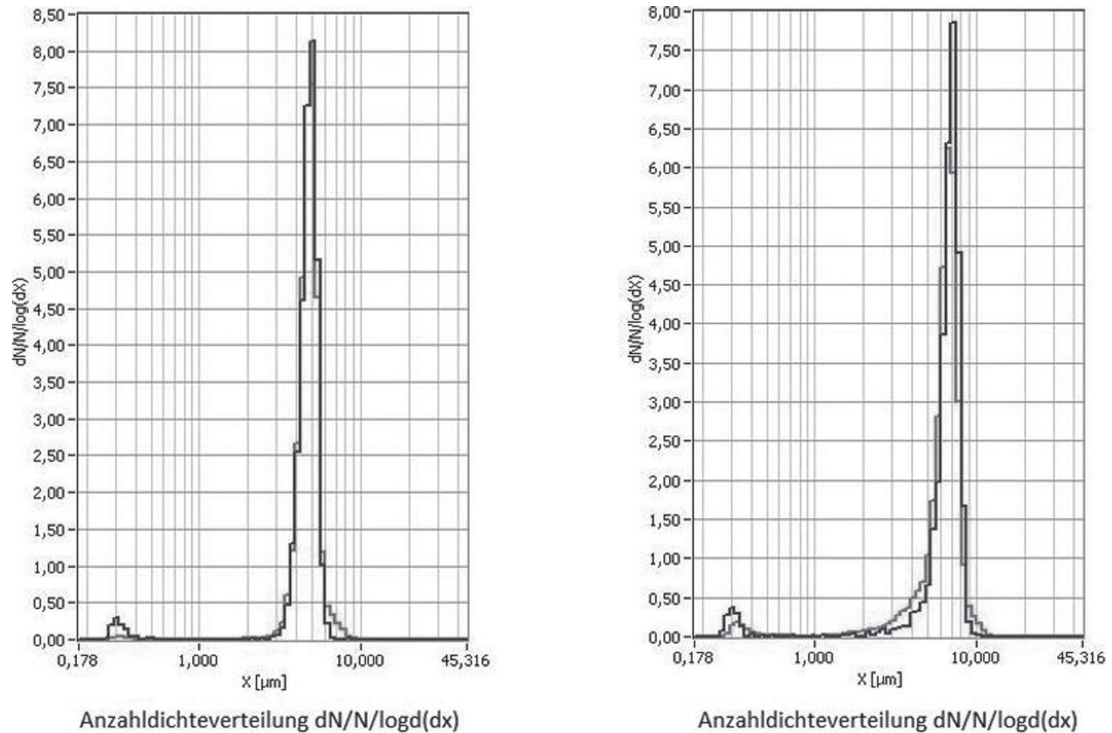


Bild 11. Verdünnungsfaktor 100: Partikelgrößenverteilungen von 5 (links) und 7 µm (rechts).

#### Literatur

- [1] VDI 3491 Blatt 1: Messen von Partikeln – Herstellungsverfahren für Prüfaerosole – Grundlagen und Übersicht. Berlin: Beuth 2016.
- [2] VDI 3867 Blatt 1 bis Blatt 6: Messen von Partikeln in der Außenluft – Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung von Aerosolen – Grundlagen. Berlin: Beuth 2009.
- [3] ISO 21501-1: Determination of particle size distribution – Single particle light interaction methods – Part 1: Light scattering aerosol spectrometer. Berlin: Beuth 2009.
- [4] ISO 21501-4: Determination of particle size distribution – Single particle light interaction methods – Part 4: Light scattering airborne particle counter for clean spaces. Berlin: Beuth 2007.
- [5] VDI 3491: Messen von Partikeln – Herstellungsverfahren für Prüfaerosole. Berlin: Beuth.
- [6] VDI 3491 Blatt 15: Messen von Partikeln – Herstellungsverfahren für Prüfaerosole – Verdünnungssysteme mit kontinuierlichem Durchfluß. Berlin: Beuth 1996.
- [7] Koch, W.; Lödding, H.; Mölter W.; Munzinger F.: Verdünnungssystem für die Messung hochkonzentrierter Aerosole mit optischen Partikelzählern. Staub – Reinhalt. Luft 48 (1988), S. 341-344.
- [8] Helsper, C.; Mölter, W.; Haller, P.: Representative dilution of aerosols by a factor of 10000. J. Aerosol Sci. 21 (1990) Suppl. 1, S. 637-670.
- [9] Blattner, J.: Prüf- und Abnahmetests bei Sicherheitswerkbanken und Laminar-Flow-Boxen. Pharmazeutische Industrie 53, (1991) Nr. 4, S. 397-400.
- [10] Rudolph, A.; Peters, C.: Partikelgrößenermittlung in Aerosolen. Chemische Technik 37 (1991) Nr. 5, S. 182-187.
- [11] VDI 3491 Blatt 4: Messen von Partikeln – Herstellungsverfahren für Prüfaerosole – Kondensationsverfahren. Berlin: Beuth 2016.