

Charakterisierung von Geräten zur Aerosolherstellung aus Stäuben und Flüssigkeiten nach der neuen VDI 3491 Blatt 1

Characterization of devices for the generation of aerosols from dusts and liquids according to the new VDI guideline 3491 sheet 1

L. Mölter

Palas® GmbH, Greschbachstr. 3b, 76229 Karlsruhe

Pulverdispergierung, Tröpfchenerzeugung, Aerosolcharakterisierung, Leistungskenngrößen
Powder dispersion, droplet generation, aerosol characterization, performance characteristics

1. Einleitung

In vielen Bereichen der Technik werden Test- oder Prüfaerosole aus Tröpfchen, Feststoffen oder Stäuben zur Qualifizierung oder zur Qualitätssicherung von Produkten verwendet.

So werden u. a. Testaerosole zur Qualitätssicherung von Filtern, zum Kalibrieren von Partikelmessgeräten oder für Tracerpartikel zur Strömungsgeschwindigkeit eingesetzt.

2. Tracerpartikel für die Strömungsmessung

Optische Messverfahren wie Laser-Doppler-Anemometer (LDA) oder die Particle Image Velocimetry (PIV) benötigen zur Detektion der Strömungsgeschwindigkeit Partikel in der Strömung. Mit dem LDA wird die Geschwindigkeitsinformation idealerweise von einem Einzelpartikel und mit dem PIV aus dem Partikelkollektiv ermittelt. Bei beiden Verfahren wird angenommen, dass die Partikelgeschwindigkeit gleich der Strömungsgeschwindigkeit ist.

Über die Eignung eines Aerosols als Tracerpartikel zur optischen Strömungsgeschwindigkeitsmessung entscheiden folgende Kriterien:

Lichtstreuung: Die Partikel sollen das Licht gut streuen.
Große Partikel streuen gut Licht.
Kleine Partikel streuen wenig Licht.

Folgevermögen: Die Partikel sollen ohne Schlupf der Strömung folgen.
Kleine Partikel haben gutes Folgevermögen und schlechte Streueigenschaften.
Große Partikel haben ein schlechtes Folgevermögen, aber gute Streueigenschaften.
Detaillierte Angaben zum Folgevermögen und zur Verdampfungszeit sind im Brevier zur Aerosoltechnologie auf den Seiten 9 – 11 beschrieben (siehe [4] Brevier zur Aerosoltechnologie).

3. Messergebnisse zur Charakterisierung des Trockendispergiereis RBG 1000 nach VDI 3491

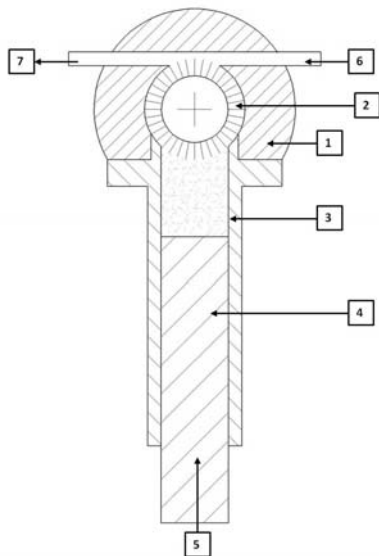
3.1 Palas® Pulverdispergiersystem für sehr geringe und mittlere Massenströme



Der RBG (Abbildung 1) ist der Klassiker unter den Pulverdispergiereis für sehr geringe und mittlere Massenströme. Das Prinzip des RBG Systems wurde Anfang der 70er Jahre des letzten Jahrhunderts im KIT in Karlsruhe erfunden, von Palas® in Lizenz übernommen und zu dem RBG System wesentlich weiterentwickelt. Der RBG ist für verschiedene Anwendungen in der Literatur beschrieben.

Abb. 1: Pulverdispergiereis RBG 1000 D

3.2 Funktion



1	Dispergiereis
2	Bürste
3	Vorratsbehälter
4	Transportkolben
5	Vorschubgeschwindigkeit
6	Dispergiereis
7	Aerosol

Mit Abbildung 2 kann die Funktion des RBG Systems leicht verständlich erklärt werden. Das zu dispergierende Pulver wird nach und nach in den zylindrischen Vorratsbehälter eingefüllt und mit einem Stopfer verdichtet. Das so über die gesamte Füllhöhe gleichmäßig verdichtete Pulver wird mit einem exakt geregelten Vorschub, mittels eines Transportkolbens, gegen die rotierende Bürste im Dispergiereis transportiert. Die dichtgewebte Präzisionsbürste transportiert das zugeführte Pulver in die gegenüberliegende Seite des Feststoffbehälters. Mit dem einstellbaren Volumenstrom des Dispergiereises, z. B. Druckluft welches öl- und staubfrei sein muss, wird die Präzisionsbürste mit hoher Luftgeschwindigkeit tangential gesäubert und das Pulver fein dispergiert. Als Dispergiereis können alle nicht brennbaren Gase, optional auch Stickstoff, verwendet werden. Der Vorschub des RBG Systems kann nur eingeschaltet werden, wenn das Dispergiereis anliegt. Der Volumenstrom des Dispergiereises wird mit Hilfe der Volumenstromkurven mit einem Druckminderer und einem Manometer eingestellt.

Abb. 2: Prinzipbild RBG System

3.3 Impulsbetrieb

Durch den konstruktiven Aufbau des RBG Systems ist ein Impulsbetrieb, Staub kein Staub, auch gegen Überdruck, mit Taktzeiten kleiner einer Minute möglich. Diese Funktion kann manuell über die Bedientasten, Halt/Ab und Vor, oder automatisch mit einer Zeitschaltuhr oder mit einem Rechner eingestellt werden.

3.4 Dosiermechanismus

Das Dosieren, d. h. das Einstellen des gewünschten Massenstromes erfolgt zum einen mit dem exakt geregelten Vorschub des Transportkolbens. Zum anderen können Feststoffbehälter mit verschiedenen Innendurchmessern für den RBG 1000 und den RBG 2000 ausgewählt werden.

Der Massenstrom \dot{m} kann berechnet werden:

$\dot{m} = \text{Innenquerschnitt Vorratsbehälter } (A_i) \cdot \text{Vorschubgeschwindigkeit } (w_s) \cdot \text{Stopfdichte } (\rho_s)$

$$\dot{m} = A_i \times w_s \times \rho_s$$

Da die Vorschubgeschwindigkeit sehr exakt z. B. mit nur 1 mm/h und die Packungsdichte des Pulvers im Vorratsbehälter sehr gleichmäßig eingestellt werden können, können niedrige Massenströme von z. B. 40 mg/h sehr konstant dispergiert werden. Die Massenkonzentration C_m berechnet sich:

$$C_m = \frac{\dot{m}}{\dot{V}}$$

3.5 Dispergiermechanismus

Die von der Präzisionsbürste abgetragene Pulvermenge wird in Abhängigkeit der Dispergiergasgeschwindigkeit, über der Bürste, fein dispergiert. In Abbildung 5 wird eine Partikelgrößenverteilung im Partikelgrößenbereich von < 0,2 bis 20 μm dargestellt. Der notwendige Dispergiervolumenstrom zur optimalen Dispergierung ist abhängig vom eingestellten Massenstrom und vom Pulver selbst. Zur optimalen Dispergierung mit verschiedenen Volumenströmen stehen drei verschiedene Dispergierdeckel (siehe Abbildung 3) zur Verfügung.



Abb. 3: Dispergierdeckel A, B und C

3.6 Gerätekenngößen / Leistungskenngrößen

Zur Dokumentation der Leistungskenngrößen von Aerosolgeneratoren gehört, dass die Betriebsparameter des Aerosolgenerators, die verwendete Aerosolsubstanz, das eingesetzte Messverfahren sowie der Testaufbau eindeutig beschrieben sind. Das eingesetzte Messverfahren sollte das gesamte Partikelgrößenspektrum im gesamten Konzentrationsbereich des erzeugten Aerosols bestimmen können.

Die in der neuen VDI 3491 Blatt 1 geforderten Geräte- oder Leistungskenngrößen zum RBG 1000 sind in Kapitel 4 beispielhaft dargestellt. Die neue VDI 3491 ist im Gründruck erschienen.

4. Geräte- oder Leistungskenngrößen zum RBG 1000

Gerätekenngößen nach der neuen VDI 3491 Blatt 1 für den in Kapitel 3 beschriebenen Aerosolgenerator/Trockendispergierer, das RBG System von Palas®.

4.1 Eingesetzte Messgeräte und Geräteeinstellungen

Aerosolgenerator: RBG 1000, Ser.Nr. 5016
Dispergierdeckel B, 14 mm Feststoffzylinder
Vorschubgeschwindigkeit 20 mm/h
Volumenstrom = 1,5 m³/h (Vordruck 1,5 bar)

Aerosolmessgerät: welas® digital 2000 Ser.Nr. 0307
welas® Sensor 2070 Ser.Nr. 0649
dp = 0,2-10 µm
dp = 0,3-17 µm
dp = 0,6-40 µm
C_{nmax} = 10⁶ cm⁻³

Prüfkanal: Kalibrierprüfstand für Aerosolgeneratoren
Volumenstrom = 80 m³/h
Verdünnungsfaktor = 53



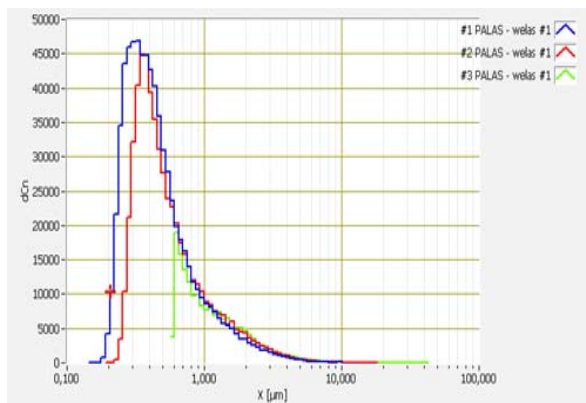
Abb. 4: Testaufbau/Prüfkanal im Labor der Firma Palas® GmbH

Aerosolsubstanz: SAE Ultra Fine (bis 20 μm)
 Annahmen: Brechungsindex 1,59; Dichte 1000 kg/m^3
 Zu beachten: Der welas[®] digital überdeckt das Korngrößenspektrum des zu messenden Staubes.

Wurde der RBG 1000 mit anderen als hier beschriebenen Einstellungen betrieben, so ist dies bei den jeweiligen Bildern dokumentiert.

4.2 Partikelgrößenverteilungen

Aussagekräftig ist nur die gesamte Partikelgrößenverteilung und nicht irgendein mittlerer Durchmesser.



Die drei verschiedenen Messbereiche, oberhalb der jeweiligen unteren Nachweisgrenze des welas[®] digital, liefern sehr ähnliche Kurven.

Abb. 5: Vergleich der Anzahlkonzentrationsverteilung von SAE Ultra Fine mit den drei Messbereichen

Blaue Linie = Messbereich 0,2 - 10 μm
 Rote Linie = Messbereich 0,3 - 17 μm
 Grüne Linie = Messbereich 0,6 - 40 μm

4.3 Massenstrombestimmung

Der Partikelmassenstrom gibt an, wie viel Aerosolsubstanz pro Zeiteinheit vom Aerosolgenerator abgegeben wird. Der Partikelanzahlstrom gibt an, wie viele einzelne Partikel pro Zeiteinheit erzeugt werden. Er wird aus der Partikelanzahlkonzentration berechnet.

Minimaler Massenstrom: Volumenstrom = 1,5 m^3/h (Vordruck = 1,5 bar), Deckel B

Maximaler Massenstrom: Volumenstrom = 3,5 m^3/h (Vordruck = 1,5 bar), Deckel A

Messdauer: 3600 Sekunden für \dot{m}_{min}
 300 Sekunden für \dot{m}_{max}

Vorratsbehälter \varnothing : 7 mm und 28 mm, Vorschubgeschwindigkeit 5 mm/h und 700 mm/h

Aerosolsubstanz: SAE Ultra Fine

Es wird die Gesamtmasse vom Vorratsbehälter inkl. Staub jeweils vor und nach dem Dispergieren bei den o. g. Volumenströmen, Feststoffbehältern und Dispergierdeckeln bestimmt.

$\Delta m_{\text{min}} = 0,2 \text{ g/h}$ mit \varnothing 7 mm; $w_S = 5 \text{ mm/h}$ und Deckel B

$\Delta m_{\text{max}} = 429,6 \text{ g/h}$ mit \varnothing 28 mm; $w_S = 700 \text{ mm/h}$ und Deckel A

4.4 Partikelgrößen- und Partikelkonzentrationsbestimmung bei den eingestellten Massenströmen

Die Partikelanzahlkonzentration gibt an, wie viele Einzelpartikel in einem bestimmten Volumen des Gases vorhanden sind.

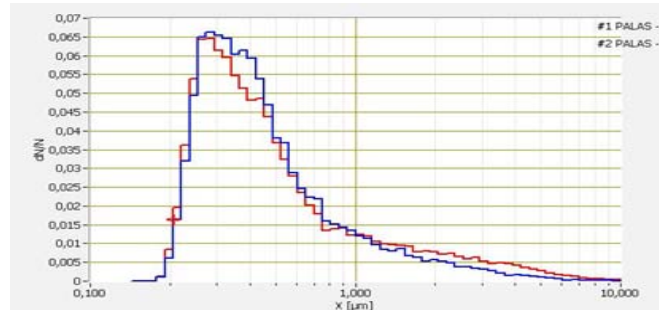


Abb. 6: Vergleich der Partikelgrößenverteilung von SAE Ultra Fine, Messbereich 0,2 – 10 μm
Blaue Linie = Dispergierdeckel B, 5 mm/h Vorschub, Anzahlkonzentration 175.097 P/cm³
Rote Linie = Dispergierdeckel A, 700 mm/h Vorschub, Anzahlkonzentration 56.752.036 P/cm³

4.5 Zeitliche Konstanz

Die zeitliche Konstanz orientiert sich an der Betriebsdauer T_B . Die Anzahl n der einzelnen Messungen, die Abtastrate, hängt von der Aufgabenstellung ab. Sie sollte mit der Abtastrate des LDA- oder PIV-Systems korrelieren.

Betriebsbedingungen

- Dispergierdeckel A, 14 mm Feststoffzylinder
- Vorschubsgeschwindigkeit 20 mm/h
- Generator Γ_{Vordruck} 1,5 bar = Generatorvolumenstrom 3,5 m³/h
- Mischluftzugabe 80 m³/h = Verdünnungsfaktor 23
- Betriebsdauer $T_B = 1200$ Sekunden
- Messdauer pro Zeitintervall (Abtastrate) $T_M = 10$ u. 30 Sekunden
- Messintervalle $n \geq 20$

Aerosolsubstanz

- SAE Ultra Fine (bis 20 μm); Annahmen: Brechungsindex 1,59, Dichte 1000 kg/m³

Randbedingung: $T_M \leq \frac{T_E}{n}$

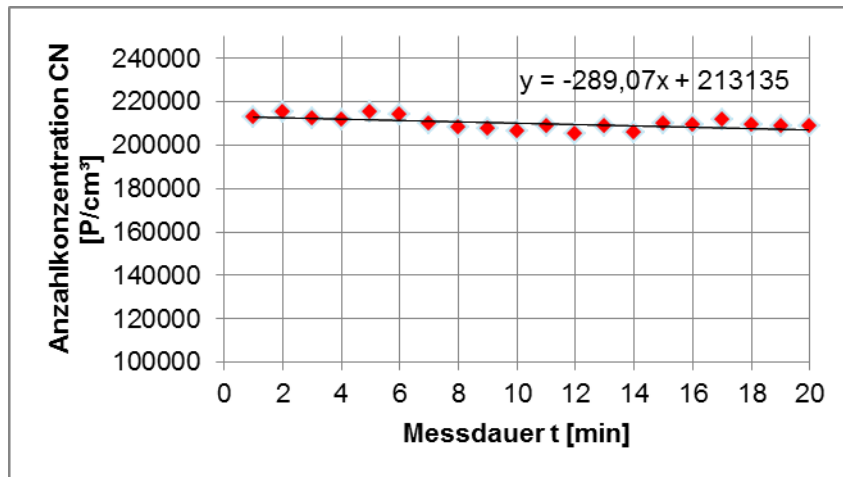


Abb. 7: Zeitliche Konstanz vom RBG 1000; Messbereich: 0,3 – 17 μm
 Steigung $m = -289,07 \text{ cm}^{-3}/\text{min}$ Achsenabschnitt = 213.135 cm^{-3}
 Aufgetragen sind $n = 20$ Konzentrationswerte C_{ni} zu den Zeitpunkten t_i

Die Steigung der Regressionsgeraden beschreibt die Drift der zeitlichen Konstanz, die als relativer Wert D_{rel} wie folgt berechnet wird:

$$D_{rel} = \frac{m \cdot T_B}{b}$$

$$D_{rel} = -2,7 \%$$

Die Regressionsgerade $C_n = m \cdot t + b$ hat in diesem Beispiel $m = -289,07$ und den Achsenabschnitt $b = 213135$

4.6 Streuung

Mit der Streuung wird die Abweichung z. B. der Anzahl von Partikeln um einen Lageparameter beschrieben. Die Streuung wird von der Messzeit T_M und der Abtastrate beeinflusst wie dies in den Abbildungen 8 und 9 dargestellt ist. Als anschauliche Zahl wird die prozentuale Streuung s' ebenfalls in diesen Abbildungen mit aufgenommen.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=0}^n (C_{Ni} - b)^2} \quad \text{Prozentuale Streuung: } s' = \frac{s}{\text{Gesamtmittelwert}} \times 100$$

Wie sich die verschiedenen Messzeiten T_M auf die Streuung s und die prozentuale Streuung s' auswirken, ist in den Abbildungen 8 und 9 gezeigt.

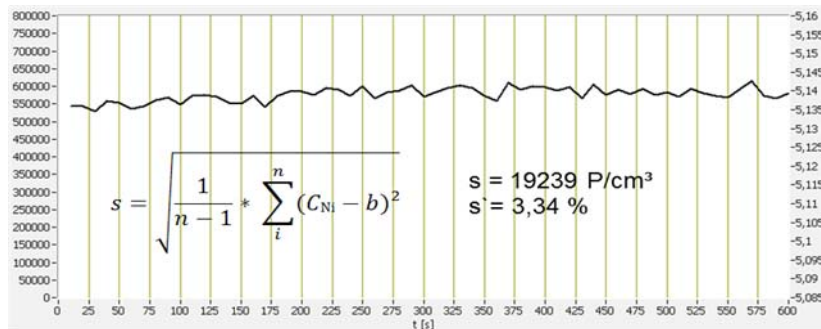


Abb. 8: Zeitliche Konstanz bezogen auf die Anzahlkonzentration vom RBG 1000 bei einer Mittelung von 10 Sekunden.

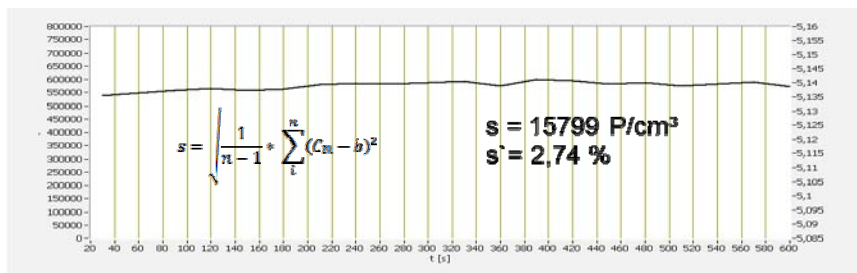


Abb. 9: Zeitliche Konstanz bezogen auf die Anzahlkonzentration vom RBG 1000 bei einer Mittelung von 30 Sekunden.

4.7 Einstellzeiten

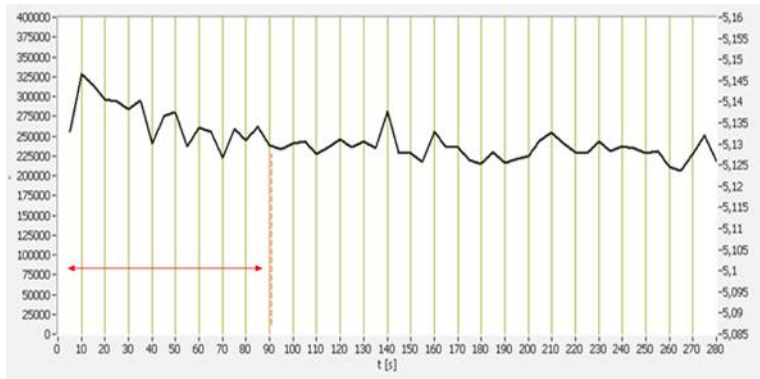
Die Einstellzeit beschreibt wie schnell eine Größe, z. B. die Konzentration nach dem Einschalten oder nach einer sprunghaften Änderung, z. B. des Volumenstromes, am Aerosolgenerator einen konstanten Wert annimmt.

Betriebsbedingungen

- Dispergierdeckel A, 14 mm Feststoffzylinder
- Vorschubgeschwindigkeit 20 mm/h
- Generator_{Vordruck} 1,5 bar = Generatorvolumenstrom 3,5 m³/h
- Mischluftzugabe 80 m³/h = Verdünnungsfaktor 23
- Messdauer 280 Sekunden

Aerosolsubstanz

- SAE Ultra Fine; Annahmen: Brechungsindex 1,59, Dichte 1000 kg/m³



$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_i^n (C_{Ni} - b)^2}$$

Abb. 10: Ermittlung der Einstellzeit vom RBG 1000 mit SAE Fine, Mittelung 5 Sek.

4.8 Wiederholstandardabweichung

Die Wiederholstandardabweichung muss unter Wiederholbedingungen wie z. B. dieselbe Messdurchführung, derselbe Beobachter, derselbe Aerosolgenerator, dieselben Betriebsbedingungen und am selben Ort durchgeführt werden.

Betriebsbedingungen

- Dispergierdeckel B, 14 mm Feststoffzylinder
- Vorschubgeschwindigkeit 20 mm/h
- Generator $\Gamma_{Vordruck}$ 1,5 bar = Generatorvolumenstrom 1,5 m³/h
- Mischluftzugabe 80 m³/h = Verdünnungsfaktor 53
- Messdauer 180 Sekunden

Aerosolsubstanz

- SAE Ultra Fine (bis 20 μ m); Annahmen: Brechungsindex 1,59, Dichte 1000 kg/m³
- Zur Bestimmung der Wiederholstandardabweichung wurde der Vorschub jeweils von 20 mm/h auf null und wieder hoch gestellt.

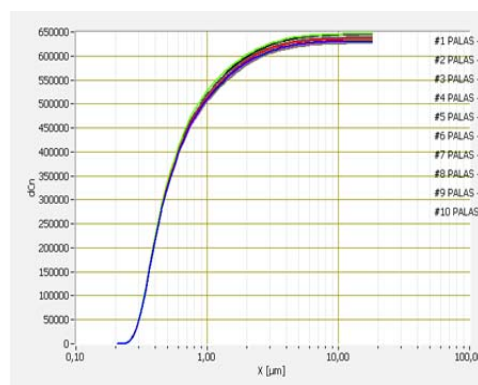


Abb. 11: Wiederholstandardabweichung bezogen auf die Anzahlkonzentration.

Tabelle 1: Maximale Abweichung: 3,03 %

Messung	Anzahlkonzentration [P/cm ³]
1	631080
2	635624
3	646108
4	638964
5	630032
6	632864
7	644911
8	643871
9	626519
10	629864

In der Tabelle 1 sind die Konzentrationen als Zahlenwerte der Wiederholungsmessungen eingetragen. Aus diesen errechnet sich eine Wiederholgenauigkeit von 3,03 %.

4.9 Impulsbetrieb

Durch den konstruktiven Aufbau des RBG Systems ist ein Impulsbetrieb, Staub kein Staub, auch gegen Überdruck, bis kleiner einer Minute möglich. Diese Funktion kann manuell über die Bedientasten, Halt/Ab und Vor, oder automatisch mit einer Zeitschaltuhr oder mit einem Rechner eingestellt werden.

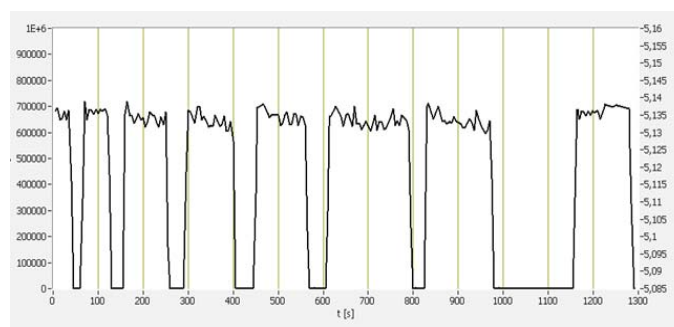


Abb. 12: Start - Halt Funktion (Impulsbetrieb), Mittelung 5 Sekunden. Die Zeiten sind bei den An- und Abstiegsflanken nahezu gleich und betragen ca. 2 Sekunden.

5. Zusammenfassung

Wie gezeigt, sind die in der neuen VDI 3491 Blatt 1 geforderten Leistungskenngrößen zu den Test- oder Prüfaerosolgeneratoren auch für eine zuverlässige Strömungsgeschwindigkeitsmessung mit optischen Strömungsmesstechniken notwendig. Die gleichen Leistungskenngrößen werden auch für Testaerosolgeneratoren zum Erzeugen von Tröpfchen in der neuen VDI 3491 gefordert.

Diese Leistungskenngrößen sollten nach Erscheinen der neuen VDI 3491 von den Geräteherstellern nachgewiesen werden, da sie die entscheidenden Kriterien für den praktischen Einsatz liefern.

Literatur

- [1] Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques, Springer Verlag, (2003), H.-E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke, C. Tropea
- [2] Aerosolerzeugung zum Test von Abscheidern und zur Kalibrierung von Aerosolmessgeräten, Filtrieren & Separieren 6 (2003), L. Mölter, G. Lindenthal
- [3] Aerosol Technology. Properties, Behaviour and Measurement of Airborne Particles, New York, (1998), W.C. Hinds
- [4] Brevier zur Aerosoltechnologie, Palas® GmbH, Karlsruhe, 2. Auflage 2011
- [5] Fluoreszenzmarkierte Tracerpartikel für PIV-Messungen in Mikrokanälen, Gala 2012, L. Mölter, G. Lindenthal, S. Burgmann