

AUSFÜHRLICHE ERKLÄRUNG ZU GENAUIGKEIT, PRÄZISION, KALIBRIERUNG UND RÜCKFÜHRBARKEIT VON DUSTLIGHT

EINZELN KALIBRIERT, UNABHÄNGIG VALIDIERT

Jede Sensoreinheit zur Feinstaubmessung in Dustlight wird einzeln kalibriert und einzeln gegen Referenzmessgeräte geprüft. Dafür dient ein definiertes KCl-Prüfaerosol. Die Kalibrierkette ist auf anerkannte nationale Messnormale rückführbar, unter anderem auf die Normale von NPL, PTB und NIST. Materialspezifische Kalibrierungen validieren wir zusätzlich in einem unabhängigen, nach ISO/IEC 17025 akkreditierten Labor. Dort kommen ein Grimm-Referenzspektrometer, eine gravimetrische Referenzprobenahme und international genormte Prüfstäube zum Einsatz.

Für die Spezifikation und die Messung von Feinstaubsensoren gibt es keinen einheitlichen Standard. Anwender können die Leistungsangaben verschiedener Hersteller deshalb nur schwer einordnen und vergleichen. Dieses Dokument legt Kalibrierung und Spezifikation von Dustlight nachvollziehbar offen: wie Dustlight misst, wie die Algorithmen entwickelt und validiert werden, wie jede Sensoreinheit kalibriert wird, wie die gerätespezifische Kalibrierung für alveolengängigen Staub zustande kommt und was die Aussage zur Rückführbarkeit umfasst — und was nicht.

Hinweis zur Terminologie. Weil ein einheitlicher Standard fehlt, unterscheidet dieses Dokument konsequent zwischen *Präzision* — der Übereinstimmung zwischen Geräten und zwischen Wiederholmessungen — und *Richtigkeit* — der Übereinstimmung mit einem Referenzverfahren. Genauigkeit ist der Oberbegriff für beides. Gilt eine Angabe nur für eine der beiden Größen, ist das jeweils vermerkt.

INHALT

1	Wie die Sensoren von Dustlight messen	2
2	Validierung auf zwei Wegen	3
3	Algorithmenentwicklung und wissenschaftliche Referenzvalidierung	4
4	Kalibrierung und Prüfung der Sensoreinheiten	7
5	Kalibrierung von Dustlight für alveolengängigen Staub	10
6	Kalibrierkette und Rückführbarkeit	11
7	Langzeitstabilität	12
8	Empfehlungen zu Kalibrierung, Prüfung und Funktionskontrolle vor Ort	13
9	Zusammenfassung: einzeln kalibriert, unabhängig validiert	15

1 WIE DIE SENSOREN VON DUSTLIGHT MESSEN

Die Sensortechnik von Dustlight beruht auf optischer Partikelzählung (OPC) mit Laserstreulicht. Die kompakte Bauform ermöglichen eine kleine, leistungsfähige Laserdiode und eine Photodiode, die das rückgestreute Licht erfasst. Die Laserdiode sendet Licht durch die angesaugte Luft. Partikel in der Luft streuen einen Teil dieses Lichts. Die Photodiode erfasst das Streulicht und wandelt es in elektrische Signale um. Ein Lüfter im Gerät hält den Luftstrom konstant. Dustlight misst deshalb immer die tatsächliche Staubkonzentration der Umgebung und reagiert innerhalb von Sekunden auf Veränderungen (siehe Abbildung 1).

Das erfasste Signal wird in Echtzeit in eine Massenkonzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ umgerechnet. Die Partikelzählung funktioniert bei allen Herstellern ähnlich. Der Algorithmus für die Umrechnung in die Massenkonzentration unterscheidet Dustlight jedoch wesentlich von anderen Geräten. Die optischen Eigenschaften der Partikel – etwa Brechungsindex und Form – sowie ihr Material beeinflussen die berechnete Masse deutlich. Die indirekte optische Messung weicht daher immer von direkten gravimetrischen Verfahren ab.

Trotz dieser Einschränkung halten wir optische Partikelzähler heute für die geeignete Technik zur kommerziellen Staubbemessung. Sie sind praxistauglich und technisch weit entwickelt. Damit Sie die Leistung unserer Sensortechnik einordnen können, braucht es Spezifikationen, die sich mit genormten Verfahren überprüfen lassen. Dieses Dokument beschreibt diese Verfahren.

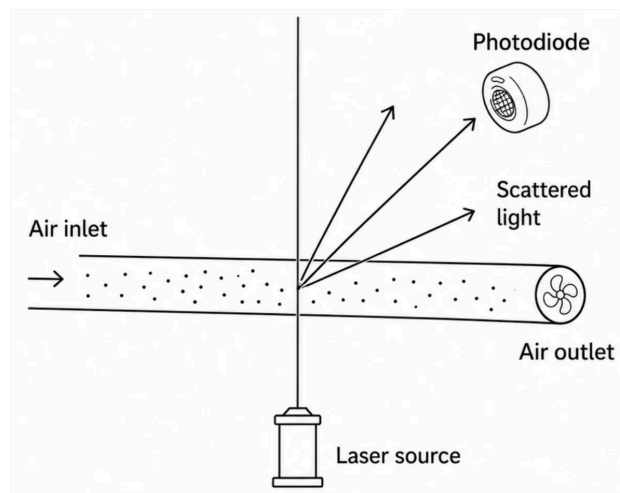


Abbildung 1: Messprinzip von Dustlight. Ein optisches Messverfahren mit Laser- und Photodiodentechnik erlaubt die Echtzeitmessung der Partikelkonzentration in der Luft. Ein Schutz- und Wartungskonzept sichert verlässliche Ergebnisse auch in staubiger Umgebung.

2 VALIDIERUNG AUF ZWEI WEGEN

Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Dustlight sichern wir über ein zweigleisiges Validierungskonzept. Es trennt zwei Aufgaben klar voneinander:

WEG 01

Algorithmenentwicklung und wissenschaftliche Referenzvalidierung
in einem unabhängigen, akkreditierten Institut.

WEG 02

Kalibrierung und Prüfung jeder einzelnen Sensoreinheit in der Produktion.

So verbinden wir hohe Praxisnähe mit einer reproduzierbaren, rückführbaren Leistung auf Basis international anerkannter Referenzverfahren.

Die Kalibrierung selbst erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird jede Sensoreinheit einzeln gegen Referenzmessgeräte kalibriert und geprüft. Anschließend erhält das fertig montierte Dustlight seine gerätespezifische Kalibrierung für alveolengängigen Staub. Sie stammt aus der Algorithmenarbeit, die Kapitel 3 beschreibt.

3 ALGORITHMENENTWICKLUNG UND WISSENSCHAFTLICHE REFERENZVALIDIERUNG

3.1 Externes Institut und Akkreditierung

Die Messalgorithmen von Dustlight werden in den Laboratorien des Instituts für Gefahrstoff-Forschung (IGF) an der Ruhr-Universität Bochum entwickelt und laufend weiterentwickelt. Das IGF ist ein Institut der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI). Seine Laboratorien zählen zu den führenden Einrichtungen für die Messung von Stäuben am Arbeitsplatz in Deutschland.

Die gravimetrischen Referenzwerte für Entwicklung und Validierung bestimmt das Labor nach seinen DAkkS-akkreditierten Prüfverfahren gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 (Akkreditierungsnummer D-PL-14436-01-00).

3.2 Prüfinfrastruktur

Die Messungen für Entwicklung und Validierung erfolgen am Staubkanal-Prüfstand des IGF. Er besteht aus:

- einer kontrollierten Aerosolerzeugung
- einem definierten Staubkanal
- einer Sedimentationskammer
- einem einstellbaren Luftstrom mit variabler Lüfterdrehzahl

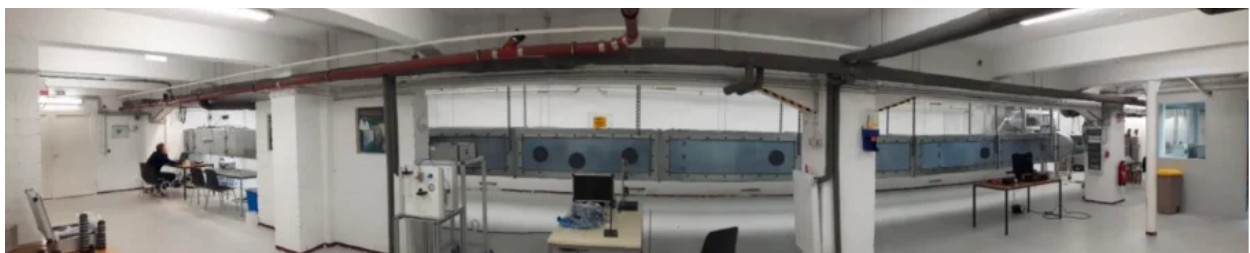


Abbildung 2: Der Staubkanal-Prüfstand des IGF.

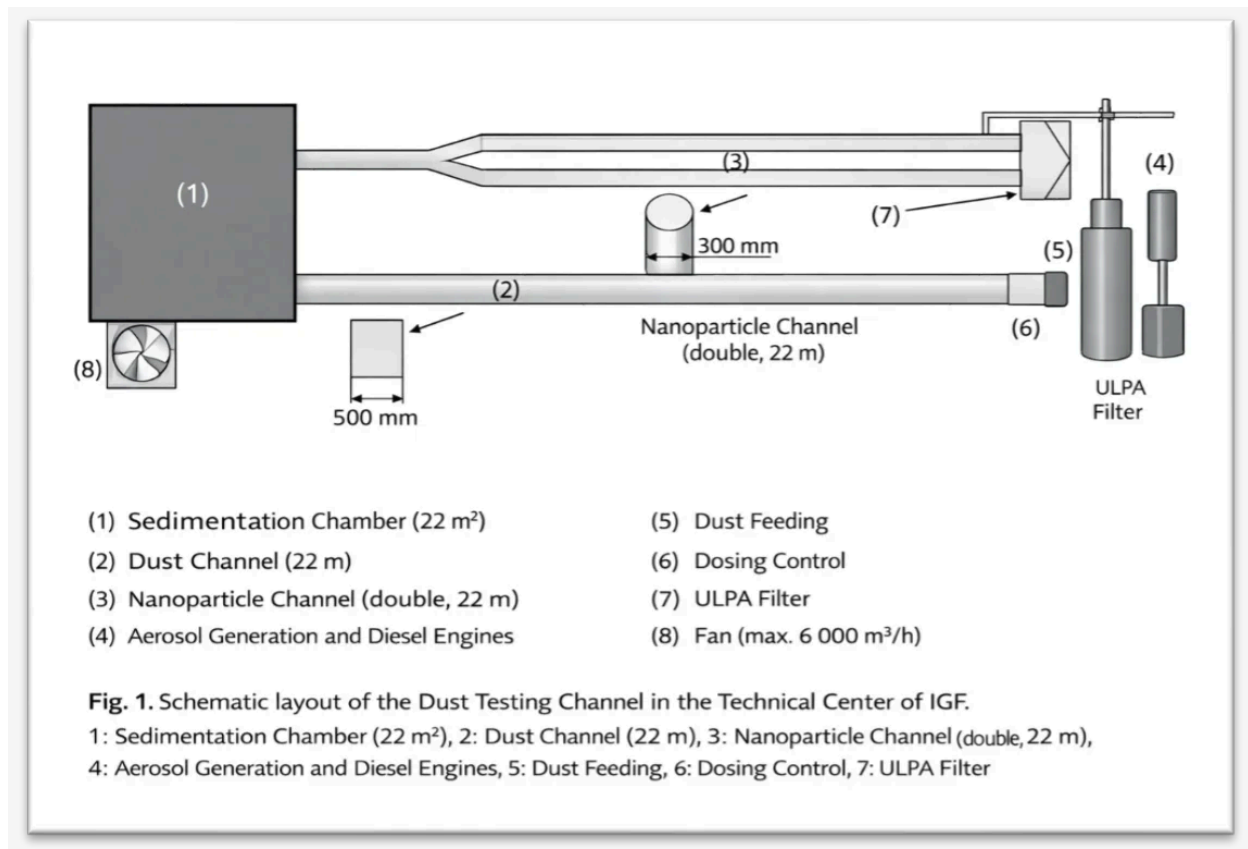


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Staubkanals. Quelle: J. Pelzer, C. Monz: Erfahrungsaustausch und Ringversuch zur Messtechnik für ultrafeine Partikel. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 75 (2015), Nr. 9, September.

3.3 Referenzmessgeräte

Die Referenzmessungen erfolgen mit einem Aerosolspektrometer Grimm Modell 11-D (Dust Recorder) und mit einer gravimetrischen Referenzprobenahme über kalibrierte Probenahmepumpen (GSA Messgeräte). Dieser Aufbau erlaubt den direkten Vergleich zwischen optisch bestimmten Größen- und Anzahlverteilungen und massebezogenen gravimetrischen Referenzwerten.

Das Grimm-Gerät berechnet Massenkonzentrationen aus der gemessenen Größenverteilung sowie aus angenommenen Werten für Partikeldichte und Formfaktor. Bei Validierung und Referenzmessungen liefert es Massenkonzentrationen für TSP (gesamter luftgetragener Staub), PM₁₀, PM₄, PM_{2,5} und PM₁, jeweils in µg/m³. Zusätzlich leitet es die arbeitsschutzrelevanten Fraktionen einatembare Staub und alveolengängiger Staub ab, ebenfalls in µg/m³. Diese Größen bilden die Referenzbasis für die Abstimmung und die Validierung der Dustlight-Algorithmen.

Das Grimm Modell 11-D arbeitet als optischer Partikelzähler und nutzt Streulicht unter 90° mit einer Laserdiode bei 660 nm. Die wesentlichen Kenndaten des bei der Validierung eingesetzten Geräts:

KENNGRÖSSE	WERT
Messprinzip	optische Streulichtmessung (Einzelpartikelerfassung)
Partikelgrößenbereich	0,25 – 35 µm
Anzahl der Größenkanäle	31 Partikelgrößenklassen
Volumenstrom der Probenahme	1,2 l/min
Zeitauflösung	ab 6 s
Wiederholpräzision	± 3 %
integrierter gravimetrischer Referenzfilter	PTFE-Filter, 47 mm

Tabelle 1: Kenndaten des Aerosolspektrometers Grimm Modell 11-D, wie es bei der Validierung eingesetzt wurde.

3.4 Aerosolarten und Konzentrationsbereiche der Algorithmenentwicklung

Damit die Algorithmen unter realen Bedingungen robust arbeiten, nutzt die Entwicklung bewusst ein breites Spektrum industrieller Staubaerosole:

- verschiedene Holzstäube
- Schweißrauche
- Dieselpartikel
- amorphe Kieselsäure (pyrogen, gefällt und weitere)
- Eskal-Stäube
- mehrere Körnungen des Arizona-Prüfstaubs
- und, besonders wichtig, Mischungen verschiedener Staubarten

So treffen die Algorithmen auf Partikel mit sehr unterschiedlichen Größenverteilungen, Formen, optischen Eigenschaften und Dichten. In den vergangenen Jahren haben wir eine große Zahl solcher Versuche durchgeführt. Jeder Versuch dauerte eine bis zwei Stunden, üblicherweise bei Konzentrationen von 125 µg/m³, 625 µg/m³, 1.250 µg/m³, 2.500 µg/m³ und 5.000 µg/m³ und bei einer Luftgeschwindigkeit von 2 m/s.

3.5 Prüfstaub für reproduzierbare Nachweise: Arizona Test Dust A1

Für wiederholbare Nachweise und für Kontrollen der Langzeitkonsistenz dient Arizona Test Dust A1 ultrafine. Dieser Prüfstaub ist in ISO 12103-1 definiert. Er ist international genormt und als Referenzmaterial für die Vergleichbarkeit zwischen Laboratorien weit verbreitet. Sein Quarzanteil von etwa 69–77 % macht ihn zudem für Arbeitsplätze mit Quarzexposition unmittelbar relevant.

PARTIKELGRÖSSE (µm)	KUMULIERTER VOLUMENANTEIL [%]
22,00	100
11,00	95,5 – 97,5
5,50	65,0 – 69,0
2,75	23,0 – 27,0
1,38	7,0 – 10,0
0,97	3,0 – 5,0

Tabelle 2: Partikelgrößenverteilung von Arizona A1 ultrafine: kumulierter Volumenanteil nach ISO 12103-1, wie in den Nachweisversuchen verwendet.

Arizona A1 gibt die volle Komplexität von Staubaerosolen am Arbeitsplatz nicht wieder. Das halten wir ausdrücklich fest. Ein einzelner, klar definierter Prüfstaub ist jedoch die Voraussetzung für reproduzierbare, vergleichbare und rückführbare Ergebnisse. Wir haben Arizona A1 gewählt, weil er durch eine internationale Norm definiert ist, in Ringversuchen weit verbreitet ist und stabil sowie gut charakterisiert vorliegt.

4 KALIBRIERUNG UND PRÜFUNG DER SENSOREINHEITEN

Zusätzlich zur Laborvalidierung am IGF durchläuft jede einzelne Sensoreinheit in der Produktion eine Kalibrierung und eine Prüfung. Dieser Ablauf erfolgt chargenweise und nutzt:

- ein kontrolliertes Prüfaerosol (etwa 3 % vernebelte KCl-Lösung)
- ein TSI DustTrak DRX 8533 (Ambient Mode) als Referenzgerät
- einen TSI Optical Particle Sizer Modell 3330

Alle Sensoreinheiten einer Produktionscharge werden gleichzeitig und unter identischen Bedingungen geprüft. Dazu dient eine abfallende Aerosolkonzentration. Für die Auswertung zählen Messwerte erst, sobald das Aerosol in der Prüfkammer homogen und stabil ist. Die Konzentration wird anschließend über mindestens 150 s zeitlich gemittelt. Das filtert das statistische Rauschen der Einzelmessung heraus. Der so gemittelte Wert der Massenkonzentration ($\bar{M}\bar{C}_p$) ist die Grundlage für beide folgenden Auswertungen.

Nach der Kalibrierung wird jede Sensoreinheit gegen die Spezifikation geprüft und entsprechend sortiert. Einheiten außerhalb der Spezifikation setzen wir in Dustlight nicht ein.

Das Referenzgerät selbst wird regelmäßig gewartet, justiert und kalibriert. Das ist wesentlich: Referenzgeräte desselben Modells können durch unterschiedliche Konfiguration, durch Alterung, durch hohe Staubbelastung oder durch unregelmäßige Wartung auseinanderlaufen. Ein Referenzgerät außerhalb seiner eigenen Spezifikation überträgt seinen Fehler auf jede Einheit, die dagegen kalibriert wird.

4.1 Richtigkeit: Abweichung von der Referenz

Eine Sensoreinheit besteht die Prüfung, wenn ihre Messabweichung gegenüber den Referenzmessgeräten innerhalb der folgenden Grenzen der Dustlight-Spezifikation liegt:

FRAKTION	KONZENTRATIONSBEREICH	ZULÄSSIGE ABWEICHUNG
PM1 und PM2,5	0 – 100 µg/m ³	± 5 µg/m ³ und ± 5 %
PM1 und PM2,5	100 – 5.000 µg/m ³	± 10 %
alveolengängiger Staub und PM10	0 – 100 µg/m ³	± 25 µg/m ³
alveolengängiger Staub und PM10	100 – 5.000 µg/m ³	± 25 %

Tabelle 3: Zulässige Abweichung einer einzelnen Sensoreinheit von den Referenzmessgeräten.

Die weitere Toleranz der gröberen Fraktionen folgt aus der Physik der optischen Erfassung: Große Partikel tragen überproportional zur Masse bei. Kleine Abweichungen beim Zählen und beim Einordnen einer vergleichsweise geringen Partikelzahl wirken sich auf die berechnete Massenkonzentration deshalb viel stärker aus als in den feinen Fraktionen.

Diese Grenzen gelten für das oben beschriebene Prüfaerosol. Abweichungen im Feld hängen zusätzlich von den optischen Eigenschaften, von der Form und von der Dichte des tatsächlich vorhandenen Staubs ab. Genau deshalb umfasst die Algorithmenvvalidierung nach Kapitel 3 ein breites Spektrum realer Industriestäube.

4.2 Präzision: Exemplarstreuung (Device-to-Device, D2D)

Neben der Abweichung von der Referenz bewerten wir die Übereinstimmung der Sensoreinheiten untereinander. Die Exemplarstreuung beschreibt die Abweichung einer einzelnen Einheit vom Mittelwert aller Einheiten einer Produktionscharge. Ihre Ursachen sind physikalisch: die Homogenität des Aerosols, die Umgebungsbedingungen sowie die Stabilität des Referenzgeräts und der Sensoren selbst.

Alle Einheiten einer Charge werden gleichzeitig in derselben Kammer gemessen. Ihre zeitlich gemittelten Werte lassen sich deshalb direkt vergleichen. Die Abweichungen bewerten wir gemeinsam, also als Verteilung um den Chargenmittelwert und nicht als einzelnes Bestehen oder Nichtbestehen. Maßgeblich ist die Breite dieser Verteilung: Die maximale Spannweite muss in das Spezifikationsband passen. Nur dann geben wir eine Charge frei.

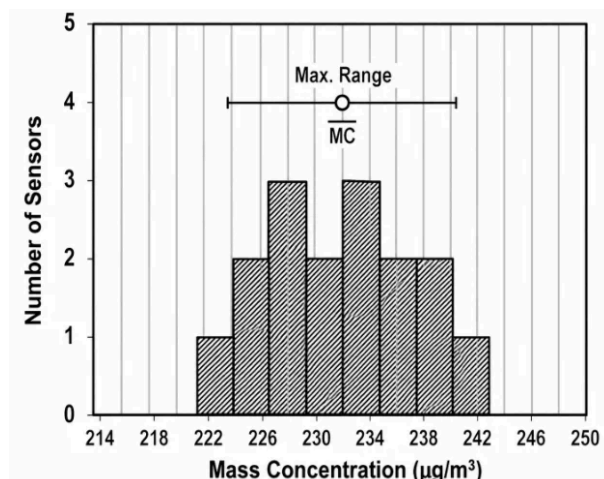


Abbildung 4: Verteilung der Sensorabweichung um den Chargenmittelwert. Die maximale Spannweite muss in das Spezifikationsband passen.

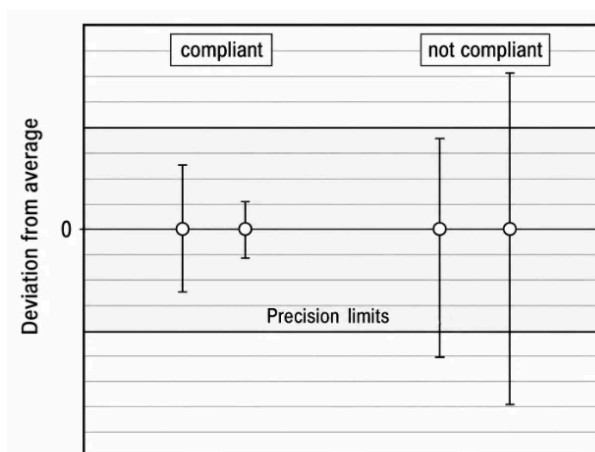


Abbildung 5: Beispiele für Chargenverteilungen, die das Spezifikationsband einhalten (links), und für solche, die es verlassen (rechts). Die offenen Punkte sind Mittelwerte. Die Fehlerbalken zeigen die maximale Spannweite und müssen innerhalb der Grenzen bleiben.

Diese Größe entscheidet darüber, ob zwei Dustlight-Geräte im selben Staub nebeneinander denselben Wert anzeigen. In der Praxis fällt das zuerst auf.

Hinweis zur Vergleichbarkeit. Der quantitative Vergleich von Sensorwerten mit verschiedenen hochwertigen Referenzgeräten ist grundsätzlich anspruchsvoll. Referenzgeräte unterschiedlicher Hersteller können erheblich voneinander abweichen, wenn sie nicht durchgängig nach ihrer Spezifikation justiert, kalibriert und gewartet werden.

5 KALIBRIERUNG VON DUSTLIGHT FÜR ALVEOLENGÄNGIGEN STAUB

Im Arbeitsschutz zählt vor allem eine Staubfraktion, und diese zeigt Dustlight an: der alveolengängige Staub. Diese Partikel sind klein genug, um bis in die feinsten Verzweigungen der Lunge, die Alveolen, vorzudringen und dort zu wirken.

Alveolengängiger Staub ist keine scharfe Trenngrenze, sondern eine Größenverteilung: Je größer ein Partikel, desto geringer ist seine Wahrscheinlichkeit, die Alveolen zu erreichen. DIN EN 481 legt diese Abscheidewahrscheinlichkeit als Konvention fest. Dustlight bildet sie im Algorithmus nach. Der angezeigte Wert entspricht damit so genau wie möglich dem Anteil des luftgetragenen Staubs, der die Lunge tatsächlich erreichen kann.

Sind die einzelnen Sensoreinheiten kalibriert, erhält das montierte Dustlight seine gerätespezifische Kalibrierung für alveolengängigen Staub. In der Konfiguration *Allgemeine Stäube* beruht sie auf einer definierten Staubb Mischung. Für die spezifischen Konfigurationen – etwa Schweißrauche oder Holzstäube – leiten wir sie aus Vergleichsmessungen an diesen Materialien ab. Die Datengrundlage stammt aus den vielen Versuchsstunden in den Laboratorien des IGF nach Kapitel 3. Über mehrere Iterationen haben wir die Messalgorithmen daran geschärft.

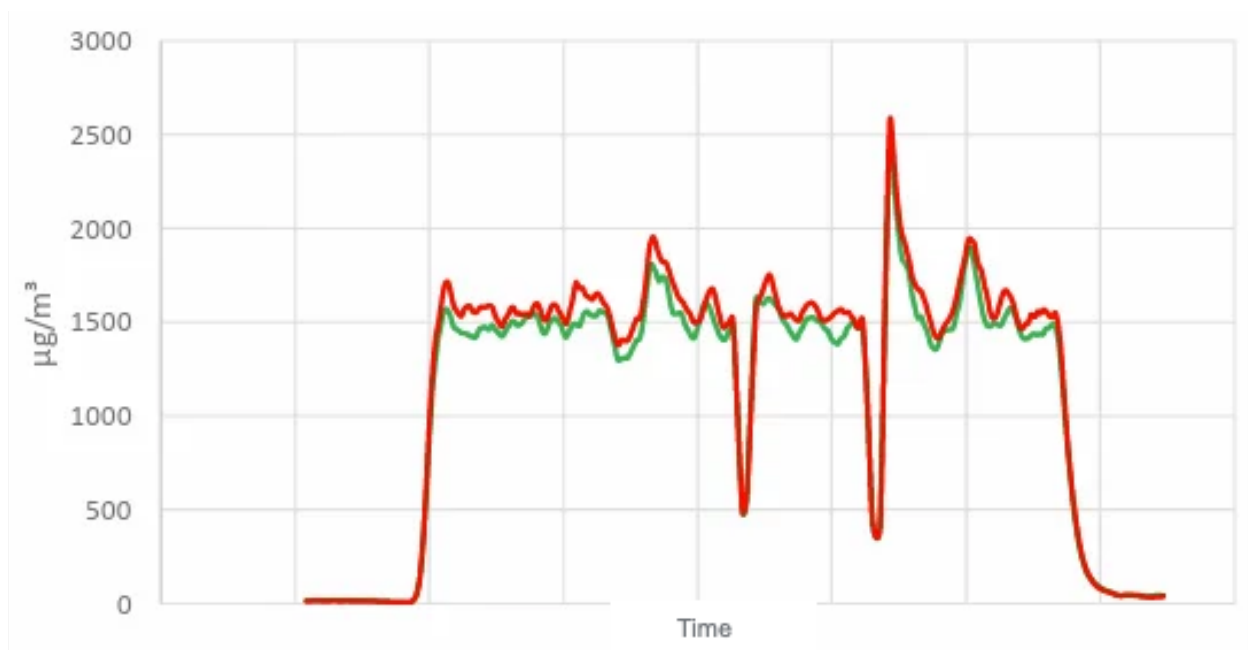


Abbildung 6: Alveolengängiger Staub, gemessen mit Dustlight (rot) und mit dem Referenzspektrometer Grimm Modell 11-D (grün). Grundlage ist die Kalibrier-Staubb Mischung in der Konfiguration für Mischstäube.

Weitere Informationen zu Staub und zu Arbeitsplatzgrenzwerten finden Sie im Dustlight-Blog. Die ausführlichen Messspezifikationen enthält das Datenblatt.

6 KALIBRIERKETTE UND RÜCKFÜHRBARKEIT

6.1 Kalibrierung der Sensoreinheit

Die in Dustlight verbauten Sensoreinheiten zur Feinstaubmessung werden bei der Sensirion AG, Laubisrütistrasse 50, CH-8712 Stäfa, Schweiz, gefertigt und kalibriert. Die Kalibrierbescheinigung umfasst alle in Dustlight eingesetzten Typen von Sensoreinheiten, auch die Variante mit integrierter Temperatur- und Feuchtemessung.

Jede Sensoreinheit wird auf die Spezifikationen des zugehörigen Datenblatts kalibriert und nach der Kalibrierung einzeln geprüft. Als Maßstab dienen dabei nicht die nationalen Messnormale selbst, sondern sogenannte TransfERNormale: besonders stabile Messgeräte, die den Wert der übergeordneten Referenz in die Produktion tragen. Diese TransfERNormale werden nach einem festen Plan in regelmäßigen Abständen erneut gegen ihre übergeordnete Referenz kalibriert. So bleibt der Bezug zur Referenz über die Zeit erhalten. Die Kalibrierung dieser übergeordneten Referenz erfolgt in einem nach ISO 9001:2015 registrierten Kalibriersystem. Die Dustlight-spezifischen Kalibrierpunkte setzen wir mit dem Referenzaufbau nach Kapitel 4.

6.2 Rückführbarkeit der Kalibrierkette

Die Kalibrierkette hinter den Sensoreinheiten ist auf anerkannte nationale Messnormale rückführbar. Die beteiligte Akkreditierungsstelle ist Vollmitglied der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC). Nach dem Mutual Recognition Arrangement (MRA) der ILAC erkennen alle Unterzeichner die Kalibrierscheine jener Stellen an, die eine Unterzeichnerorganisation akkreditiert hat.

Damit sind die Messungen auf anerkannte nationale Normale rückführbar und auf Einheiten, die am National Physical Laboratory (NPL) oder an anderen anerkannten nationalen Metrologieinstituten wie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) oder dem National Institute of Standards and Technology (NIST) dargestellt werden.

6.3 Was Rückführbarkeit bedeutet

Rückführbarkeit bedeutet: Die in der Kalibrierung genutzten Referenzen lassen sich über eine ununterbrochene Kette dokumentierter Vergleiche mit nationalen Messnormalen verbinden. Erst dadurch lässt sich eine Messung mit Dustlight auf eine international vereinbarte Basis beziehen und nicht nur auf eine herstellerinterne Skala. Zwei Punkte benennen wir präzise, weil der Begriff in diesem Markt unscharf verwendet wird.

Rückführbarkeit beschreibt die Kalibrierkette, nicht ein akkreditiertes Gerätezertifikat. Die Aussage oben betrifft die Kette hinter den Referenznormalen der Kalibrierung. Sie besagt nicht, dass ein einzelnes Dustlight einen akkreditierten Kalibrierschein nach ISO/IEC 17025 trägt.

In der Aerosolmesstechnik verläuft die Rückführbarkeit über die zugrunde liegenden physikalischen Größen. Masse, Volumenstrom, Partikelgröße und Umgebungsbedingungen sind rückführbar, ebenso die gravimetrische Bestimmung der abgeschiedenen Masse. Für die Massenkonzentration von Staub in der Luft als solche gibt es kein primäres nationales Normal. Das liegt in der Messaufgabe selbst begründet und gilt für jedes optische Staubbmessgerät am Markt. Das zweigleisige Konzept dieses Dokuments ist unsere Antwort darauf: auf der einen Seite eine rückführbare Kalibrierkette, auf der anderen die Validierung gegen gravimetrische Referenzverfahren über ein breites Spektrum realer Industriestäube.

Der Prüfstaub Arizona A1 dient entsprechend als genormtes Prüfmedium und sichert Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit zwischen Messungen und zwischen Laboratorien. Er ist selbst kein zertifiziertes Referenzmaterial mit einem rückführbaren Wert der Massenkonzentration.

7 LANGZEITSTABILITÄT

Die Langzeitstabilität, auch Langzeitdrift, beschreibt Veränderungen der Sensorleistung über längere Zeiträume. Wir weisen sie über mehrere Tests zur beschleunigten Alterung an Stichproben von Sensoren nach. Alle Sensoren einer Stichprobe müssen bestehen.

HTOL Betriebslebensdauer bei erhöhter Temperatur

Ein thermischer Alterungstest. Die Sensoren arbeiten über einen festgelegten Zeitraum bei erhöhter Temperatur, zum Beispiel 1.000 Stunden bei 60 °C. Das simuliert eine deutlich längere Nutzungsdauer unter typischen Betriebsbedingungen bei 25 °C. Die Prüfdauer unter beschleunigter Alterung wird nach JESD22-A108F berechnet.

THB Nutzungsdauer bei erhöhter Temperatur und Feuchte

Ein Alterungstest zu Temperatur und Feuchte. Die Sensoren arbeiten über einen festgelegten Zeitraum bei erhöhter Temperatur und Feuchte, zum Beispiel 860 Stunden bei 60 °C und 90 % relativer Luftfeuchte. Die Prüfdauer wird nach JESD22-A101D berechnet.

TC

Temperaturwechsel

Ein thermomechanischer Alterungstest. Die Sensoren durchlaufen wiederholt Zyklen zwischen niedriger und hoher Temperatur, zum Beispiel 380 Zyklen zwischen -40 °C und $+60\text{ °C}$ mit jeweils 30 Minuten. Das simuliert die typische zyklische Temperaturbelastung im Betrieb. Die simulierte Temperaturdifferenz wird nach JESD22-A104E berechnet.

RD

Staubbeständigkeit

Ein Alterungstest zu Umgebungseinflüssen. Die Sensoren werden einer hohen Partikelkonzentration ausgesetzt, um die Staubbelastung über ihre Nutzungsdauer zu simulieren. Die Prüfbedingungen entsprechen einer PM-Konzentration von etwa $45\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ über 10 Jahre.

Ein Belastungstest gilt als bestanden, wenn alle Sensoren der Stichprobe nach der beschleunigten Alterung die Spezifikation zur Langzeitdrift aus dem Datenblatt einhalten. Die Prüfdauer legen wir über geeignete Extrapolationsmodelle so fest, dass sie einer simulierten Nutzungsdauer von 10 Jahren entspricht.

PARAMETER	WERT
Langzeitdrift nach Datenblatt	1,25 % pro Jahr
simulierte Prüfdauer	10 Jahre
zulässige Grenze der Richtigkeit nach dem Belastungstest	$\pm 12,5\text{ %}$

Tabelle 4: Spezifikation der Langzeitdrift und zulässige Grenze der Richtigkeit nach beschleunigter Alterung.

Diese Tests stellen sicher, dass die in Dustlight verbauten Sensoren über ihre gesamte Nutzungsdauer verlässlich arbeiten, auch unter anspruchsvollen Bedingungen. Zwischen den vorgesehenen Wartungsintervallen ist kein weiterer Eingriff und keine Nachkalibrierung erforderlich.

8 **EMPFEHLUNGEN ZU KALIBRIERUNG, PRÜFUNG UND FUNKTIONSKONTROLLE VOR ORT**

Die folgenden Hinweise beschreiben die empfohlene Praxis für Kalibrierung, Prüfung und Funktionskontrollen vor Ort. Sie sichern eine verlässliche Messleistung über lange Zeit.

Funktionskontrolle vor Ort. Mit einem Prüfspray können Sie prüfen, ob der Sensor anspricht. Verwenden Sie ausschließlich rückstandsfreie Aerosol-Prüfsprays. Sprays mit Öl- oder Lösemittelanteilen können den optischen Pfad verschmutzen. Eine Funktionskontrolle bestätigt allein das Ansprechen des Sensors. Sie prüft nicht die Messrichtigkeit und ersetzt keine Kalibrierung.

Empfohlenes Kalibrierintervall. Wir empfehlen eine jährliche Kalibrierung mit Wartung. Je nach Kritikalität der Anwendung und je nach geltenden Vorgaben kann ein anderes Intervall angemessen sein.

9 ZUSAMMENFASSUNG: EINZELN KALIBRIERT, UNABHÄNGIG VALIDIERT

Das Genauigkeitskonzept von Dustlight ruht auf folgenden Säulen:

-
- 01 **Einzelkalibrierung.** Jede Sensoreinheit zur Feinstaubmessung wird in der Produktion einzeln kalibriert und nach der Kalibrierung einzeln geprüft.
 - 02 **Rückführbare Kalibrierkette.** Die Kalibrierkette ist auf anerkannte nationale Messnormale rückführbar, unter anderem auf die Normale von NPL, PTB und NIST.
 - 03 **Chargenprüfung.** Die Sensoreinheiten prüfen wir chargenweise gegen Referenzmessgeräte, unter identischen, kontrollierten Bedingungen und mit einem definierten KCl-Aerosol.
 - 04 **Anwendungsspezifische Kalibrierung.** Jedes Gerät erhält eine Kalibrierung für alveolengängigen Staub, die zu seiner Konfiguration passt. Der angezeigte Wert gibt damit die Staubfraktion wieder, die für die Belastung am Arbeitsplatz maßgeblich ist.
 - 05 **Unabhängige Validierung.** Messalgorithmen und materialspezifische Kalibrierungen entwickeln und validieren wir in den akkreditierten Laboratorien des IGF, mit optischen und gravimetrischen Referenzverfahren und mit international genormten Prüfstäuben nach ISO 12103-1.
-

Zusammen ergeben diese Säulen eine transparente, technisch belastbare und international vertretbare Grundlage für unsere Angaben zur Genauigkeit. Die Aerosolabhängigkeit, die jeder optischen Staubbmessung eigen ist, benennen wir dabei offen.