

## Abschlußbericht

### **Bestimmung des Aerosolpenetrationsfaktors APF**

Projekt-Nr.: 190 535

Laufzeit: 01.12.2002 – 30.08.2003

Auftraggeber: Fachausschuss Metall und  
Oberflächenbehandlung

Finanzielle  
Unterstützung: Hauptverband der gewerblichen  
Berufsgenossenschaften

Durchführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik  
und Automatisierung  
Nobelstrasse 12, 70569 Stuttgart

Projektverantwortlich: Dr.-Ing. Joachim Domnick

Stuttgart, 22.10.2003

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Problemstellung</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Zielstellung des Vorhabens</b> .....	<b>5</b>
2.1	Ziele .....	5
2.2	Berufsgenossenschaftliche Relevanz .....	5
2.3	Methodik .....	6
<b>3</b>	<b>Stand der Erkenntnisse bei Antragstellung</b> .....	<b>7</b>
3.1	Relevante Anwendungen .....	7
3.2	Verfahren und Anordnung zur Bestimmung der Tropfengrößenverteilung .....	8
<b>4</b>	<b>Versuchstechnische Einrichtungen</b> .....	<b>10</b>
4.1	Versuchsstand .....	10
4.2	Messeinrichtung .....	11
<b>5</b>	<b>Durchgeführte Messungen</b> .....	<b>13</b>
5.1	Ausgewählte Anwendungen .....	13
5.2	Grundlegende Untersuchungen zur Auswertung .....	17
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>21</b>
6.1	Pneumatische Applikation .....	21
6.1.1.	Einfluss des Düsendurchmessers .....	21
6.1.2	Flachstrahl/Rundstrahl .....	23
6.1.3	Variation des Messortes .....	24
6.1.4	Untersuchung verschiedener HVLP-Zerstäuber .....	26
6.1.5	Einfluss des Füllstandes .....	27
6.1.6	Ergebnisse im Standardzustand - HVLP .....	27
6.1.7	Ergebnisse im Standardzustand - Hochdruckzerstäuber .....	29
6.1.8	Industriekleber K1 .....	31
6.2	Airless - Applikation .....	32
6.2.1	Decklacke für Korrosionsschutzaufbauten .....	32
6.2.2	Einkomponenten-Kleber .....	33
6.3	AirMix - Applikation .....	35
6.3.1	Zweikomponenten-Kleber .....	35
6.3.2	Decklack für Schienenfahrzeuge .....	36
6.4	Bestimmung der Viskosität .....	38
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse</b> .....	<b>43</b>
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen</b> .....	<b>45</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>47</b>

## 1 Problemstellung

In der neuen TRGS 430 „Isocyanate – Exposition und Überwachung“, die im März 2002 im Bundesarbeitsblatt veröffentlicht wurde, wird eine umfassende Beurteilung der gesamten Isocyanatexposition am Arbeitsplatz verlangt. Die bisher übliche Reduzierung auf die ausschließliche Erfassung der Exposition an monomeren Diisocyanaten ermöglicht keine eindeutige Aussage im Hinblick auf das Erkrankungsrisiko der Arbeitnehmer an Arbeitsplätzen mit Isocyanatexposition. Die Ermittlung der Isocyanat-Gesamtexposition nach TRGS 430 erfolgt mit einem pragmatischen Ansatz auf der Basis des Bewertungsverfahrens für Stoffgemische nach TRGS 403.

$$I_{\text{Isoc}} = I_{\text{Polymere}} + I_{\text{Monomere}} = \frac{C_{\text{Polymere}} \times \text{APF}}{\text{EBW}} + \frac{C_{\text{Monomere}}}{\text{MAK}}$$

Isocyanate sind sehr stark reaktiv. Schon unmittelbar nach Zusammenführen der Isocyanate im Härter mit dem Polyol im Lack beginnt die Polymerisationsreaktion. Wirkungen auf den menschlichen Körper haben nur die freien, d. h. noch reaktionsfähigen NCO-Gruppen an der Außenfläche des Moleküls. Je größer das Molekül ist, um so geringer ist bezogen dessen Größe die gesundheitliche Wirkung. Dieser Effekt wird in der Bestimmung der Isocyanat-Gesamtexposition berücksichtigt durch den Aerosolpenetrationsfaktor (APF).

Er wird bestimmt aus dem Verhältnis der thorakalen Fraktion zur einatembaren Fraktion bei der vorgesehenen Applikation. Damit ist er abhängig vom verwendeten Produkt und dem Applikationsverfahren. Zu dessen einheitlicher Ableitung sind in der TRGS 430 Leitlinien aufgeführt.

Anteil thorakaler zu einatembarer Fraktion	Aerosolpenetrationsfaktor
größer 10 %	1
zwischen 1 % und 10 %	0.4
kleiner als 1 %	0.2

Tab. 1: In TRGS 430 festgelegte Aerosolpenetrationsfaktoren

Fehlt eine Angabe im Sicherheitsdatenblatt oder in der Literatur und hat auch der Anwender keine eigenen Ermittlungen durchgeführt, ist im Sinne einer worst-case-Abschätzung der Aerosolpenetrationsfaktor mit 1 anzusetzen.

Bei der Beratung der TRGS 430 im Ausschuss für Gefahrstoffe durchgeführte Beispielrechnungen zeigen, dass ohne Berücksichtigung des Aerosolpenetrationsfaktors gerade bei den im Interesse des Arbeitsschutzes forcierten nebelarme Spritzverfahren eine deutliche, Überbewertung der tatsächlichen Isocyanat-Gesamtexposition erfolgt. Die damit verbundenen Rechtsfolgen für die Betriebe, wie die Beantragung von Ausnahmegenehmigungen für die Nutzung von Spritzkabinen bei der zuständigen Arbeitsschutzbehörde, können erhebliche Auswirkungen auf die Nutzung der Arbeitsplätze haben.

Im Berufsgenossenschaftlichen Messsystem Gefahrstoffe (BGMG) gibt es kein Routineverfahren zur Bestimmung der thorakalen Fraktion. Die Betriebe können daher den Aerosolpenetrationsfaktor auch mit Unterstützung der messtechnischen Dienste der Berufsgenossenschaften nicht selbst bestimmen.

Die Ermittlung des Aerosolpenetrationsfaktors für die jeweilige Spritzapplikation des Lackes oder Klebstoffes erfordert die Ermittlung und Auswertung der Größenverteilung des Aerosols im Spritzstrahl. Dies erfordert den Einsatz aufwändiger optischer Messverfahren oder Partikelzähler, die nicht zur Palette der Arbeitsplatzmessverfahren zählen. Gerade KMU sind nicht in der Lage, die mit der Ermittlung der Aerosolpenetrationsfaktoren für ihre verschiedenen Spritzapplikationsplätze beim Lackieren und Kleben verbundenen Kosten zu tragen.

Die Lackhersteller können den Aerosolpenetrationsfaktor nicht allgemeinverbindlich für das jeweils vertriebene Lacksystem ermitteln, da die Tröpfchengröße nicht nur vom Lacksystem sondern im Wesentlichen vom Applikationsverfahren bestimmt wird. Dieses wird aber vom Anwender gewählt, ohne dass der Hersteller darauf einen direkten Einfluss nehmen kann.

Damit gerade den nebelarmen Applikationsverfahren auch in den KMU zu einer weiteren Verbreitung im Interesse des Arbeitsschutzes für die Beschäftigten verholfen wird, hat der Fachausschuss Metall und Oberflächenbehandlung angeregt, für im handwerklichen Bereich typische Spritzapplikationsverfahren von isocyanathaltigen Lacken und Klebstoffen den Aerosolpenetrationsfaktor im Rahmen eines Forschungsvorhabens zu ermitteln. Die Ergebnisse stehen dann nach Veröffentlichung allen Anwendern herstellerunabhängig zur Verfügung und können in die BG-Regeln und BG-Informationen zu Lackier- und Klebarbeitsplätzen aufgenommen werden.

## 2 Zielstellung des Vorhabens

### 2.1 Ziele

Das vorliegende Projekt befasst sich primär mit der Messung der bei Spritzverfahren wie der Lackierung oder der Kleberapplikation entstehenden Primäraerosole aus dem Applikationssystem. Es geht folglich um die Bestimmung der Eigenschaften des Spritzstrahles in bezug auf dessen Tropfengrößenverteilung. Folgende Ziele werden angestrebt:

- I. Verwendung eines möglichst einfachen, nachvollziehbaren Versuchsaufbaus
- II. Objektives Messverfahren ohne Bevorzugung oder Benachteiligung spezieller Applikationstechniken
- III. Berücksichtigung vorhandener Normen zur Messung und Klassifizierung einatembarer Spritznebel
- IV. Verwendung der für die betrachtete Applikationstechnik typischen Materialien, mit Beschränkung auf isocyanathaltige Lacke (1K und 2K), Kleber und Korrosionsschutzlacke
- V. Definition von anwendungstypischen Materialklassen für die verschiedenen Anwendungen
- VI. Nachvollziehbare Versuchsergebnisse

Nach Abschluss des Projektes steht eine Matrix mit Aerosolpenetrationsfaktoren für relevante Applikationsverfahren zur Verfügung. Darüber hinaus entsteht eine Anweisung, mit welcher Messtechnik und mit welcher Anordnung der Aerosolpenetrationsfaktor zu bestimmen ist. Der letzte Punkt ist insbesondere aufgrund der Wechselwirkung zwischen dem Messverfahren und dem Ergebnis wichtig, die bei der Tropfengrößenmessung nie ganz ausgeschlossen werden kann.

### 2.2 Berufsgenossenschaftliche Relevanz

Die Spritzapplikation von isocyanathaltigen Lacken, Klebstoffen und Unterbodenschutz wird im wesentlichen in kleinen und mittleren Handwerksbetrieben vorgenommen, die Mitglieder in den gewerblichen Berufsgenossenschaften insbesondere in den Gewerbezweigen Metall, Bau und Holz sind. Diesen Betrieben ist es aufgrund fehlender Untersuchungsmöglichkeiten zur Teilchengrößenverteilung im Spritzstrahl nicht möglich, den Aerosolpenetrationsfaktor selbst zu bestimmen. Sie wären auf die in der TRGS 430 vorgeschriebene worst-case-Abschätzung angewiesen, sofern sie nicht auf veröffentlichte Aerosolpenetrationsfaktoren für die in der Spritzapplikation bedeutenden isocyanathaltigen Arbeitsstoffe und Applikationsverfahren zurückgreifen können. Die im Rahmen des vorliegenden Projektes auf Initiative des

berufsgenossenschaftlichen Fachausschusses Metall und Oberflächenbehandlung für ausgewählte, häufig angewendete Applikationsverfahren ermittelten Aerosolpenetrationsfaktoren werden es allen Mitgliedsunternehmen der Berufsgenossenschaften erlauben, die Vorteile einer genaueren Ermittlung der Isocyanat-Gesamtexposition in der Gefährdungsbeurteilung nach dem Gefahrstoffrecht zu nutzen.

Das vorliegende Projekt wurde vom Fachausschuss Metall und Oberflächenbehandlung des Hauptverbands angeregt, der aufgrund der beim Fraunhofer-IPA vorhandenen fachlichen und technischen Voraussetzungen und bereits durchgeführter Untersuchungen sowie fehlender Untersuchungsmöglichkeiten beim Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitssicherheit den ersten Kontakt aufnahm. Die weitere Durchführung der Arbeiten erfolgte unter Beteiligung des Fachausschusses Metall und Oberflächenbehandlung, der durch Experten der Rohstoff-, Lack- und Klebstoffhersteller unterstützt wurde. Durch diesen Kreis wurde auch eine Vorauswahl bezüglich typischer Applikationssysteme und Materialien getroffen. Die ständige Begleitung der Arbeiten und, falls erforderlich, korrigierende Eingriffe in den Projektablauf stellten die berufsgenossenschaftliche Relevanz der Ergebnisse sicher.

### **2.3 Methodik**

Aufgrund der erfolgten Abstimmungen mit den Berufsgenossenschaften und verschiedenen Materialherstellern sowie der vorhandenen eigenen Erfahrungen wurde folgendes Vorgehen geplant und durchgeführt:

1. Zusammenstellung der vorhandenen Erfahrungen bezüglich der verschiedenen Applikationsverfahren im Hinblick auf die technischen Randbedingungen und die jeweils verwendeten Materialien mit dem Ziel einer Reduktion der Variantenvielfalt
2. Realisierung des Versuchsaufbaus einschließlich der erforderlichen Messtechnik
3. Durchführung von Screening-Untersuchungen mit verschiedenen Applikationsverfahren
4. Durchführung einer Sensibilitätsanalyse (Einfluss der Messposition, Messgerätesparameter etc.)
5. Analyse der Untersuchungen zur Definition von Applikations-Typklassen einschließlich der erforderlichen rheologischen Untersuchungen der Materialien
6. Bestimmung des Aerosolpenetrationsfaktors aus den gemessenen Tröpfchengrößenverteilungen für die ermittelten Applikations-Typklassen gemäß den Leitlinien in der TRGS 430
7. Niederschrift der Ergebnisse mit detaillierten Beschreibungen des Aufbaus, der Versuchsdurchführung und der notwendigen Dokumentation der Ergebnisse

### 3 Stand der Erkenntnisse bei Antragstellung

#### 3.1 Relevante Anwendungen

Bei einer Reihe von Spritzverfahren entstehen isocyanathaltige, einatembare Aerosole. Dazu gehört neben der Applikation von Lacken auch das Aufbringen von Kleber- und Unterbodenschutzmaterialien, in denen Spritz- und Sprühsysteme zum Einsatz kommen. Da das Potential der dabei eingesetzten Techniken (Airless, AirMix, Druckluftzerstäuber etc.) zur Erzeugung eines einatembaren Tropfengrößenanteils sehr unterschiedlich ist, war eine möglichst umfassende Überprüfung erforderlich, da praktisch alle technischen Zerstäuber relativ breite Tropfengrößenverteilungen erzeugen, die sich meist bis in den Bereich unterhalb 10 µm Tropfendurchmesser erstrecken. Dies gilt auch für Anwendungen, in denen zur Erzielung eines hohen Auftragswirkungsgrades (Anteil des Materials, der das Objekt erreicht) bewusst eine sehr grobe Zerstäubung eingestellt wird. Dem gegenüber stehen Systeme, die zur Sicherstellung der gewünschten Schichteigenschaften, z.B. dem Verlauf einer Lackschicht, gezielt feintropfig appliziert werden.

Bereits in einigen früheren Arbeiten wurde auf den Zusammenhang zwischen der Zerstäubungsqualität, dem Auftragswirkungsgrad und den Eigenschaften der aufgetragenen Schicht hingewiesen (z.B. in [1]). Insofern kann die Zerstäubung nicht isoliert von den spezifischen Anforderungen der Applikation betrachtet werden. Trotzdem hat gerade die in den vergangenen Jahren geführte Diskussion um die Formulierung von gesetzlichen Grenzwerten für den Auftragswirkungsgrad und die parallele Entwicklung effizienter Spritzsysteme wie des HVLP- (high volume – low pressure) Luftzerstäubers neue grundsätzliche Untersuchungen bezüglich der erzeugten Tropfengrößenverteilungen erforderlich gemacht [2]. Ein wichtiges Ergebnis dieser Arbeiten stellt die Erkenntnis dar, dass bei den meisten Zerstäubern mit Hilfe der eingestellten Applikationsparameter, z.B. dem Druck beim Airless-Zerstäuber oder dem Zerstäuberluftvolumenstrom beim Luftzerstäuber, ein sehr weiter Bereich der Zerstäubungsfeinheit eingestellt werden kann. Ein zweiter wichtiger Einfluss ist durch die Materialeigenschaften gegeben, insbesondere durch Viskosität und Oberflächenspannung, die nachhaltig auf die entstehende Tropfengrößenverteilungen einwirken.

In der Konsequenz aus diesen Untersuchungen lag im vorliegenden Projekt der Schwerpunkt auf typischen Anwendungen, d.h. Kombinationen von Applikationssystemen und Materialien. Die Durchführung einer generellen Betrachtung zu den Abhängigkeiten des APF für verschiedene Zerstäuber und verschiedene Anwendungen würde den vorgegebenen Rahmen weit sprengen.

### 3.2 Verfahren und Anordnung zur Bestimmung der Tropfengrößenverteilung

Zur Bestimmung der bei der Zerstäubung entstehenden Tropfengrößenverteilungen existiert eine Vielzahl von Messverfahren, die sich jedoch hinsichtlich Anwendbarkeit und Aussagekraft der Ergebnisse sehr stark unterscheiden können [3]. Als hauptsächliche Merkmale können genannt werden:

Messprinzip:	optisch, elektrisch, Ultraschall etc.
Anwendbarkeit:	In-situ oder durch Probenahme, Maximale Konzentration, Tropfenmaterial und –zusammensetzung (Suspension etc.)
Räumliche Auflösung:	Größe und Geometrie des Messvolumens, d.h. punktuell oder integrierend
Messgenauigkeit:	Absolute Genauigkeit und Reproduzierbarkeit
Praktischer Einsatz:	Robustheit, Messzeit

Wie oben dargestellt, müssen die Messungen bei praxisrelevanten Bedingungen durchgeführt werden. Aus diesem Grund kommen lediglich Messverfahren in Frage, die mit den eingesetzten Original-Prozessmaterialien kompatibel sind und eine ausreichend kurze Messzeit bieten. Insofern bietet sich die Fraunhofer-Beugungsspektrometrie an, die folgende Vorteile hat:

- Durch das röhrenförmige Messvolumen erfolgt bereits bei der Messung eine räumliche Integration durch den Spritzstrahl hindurch.
- Durch die Größe des Messvolumens liefert bereits eine einzelne Messung im ms-Bereich eine ausreichend stabile Statistik bezüglich der Tropfengrößenverteilung
- Aufgrund der Verwendung von gebeugtem Licht ist das Ergebnis weitestgehend unabhängig von den inneren Eigenschaften der Tropfen (Festkörperverteilung, Emulsionscharakter etc.)

Mit diesem Verfahren gibt es in den hier relevanten Anwendungen bereits umfangreiche positive Erfahrungen [4].

Mit dem projektbegleitenden Arbeitskreis wurden verschiedene mögliche Messanordnungen diskutiert. Dabei war zu berücksichtigen, dass die Definition des Aerosolpenetrationsfaktors gemäß TRGS 430 auf der Tröpfchengrößenverteilung basiert, die das Applikationsverfahren erzeugt. Die Art des Werkstücks darf dabei das Ergebnis nicht beeinflussen. Die Tröpfchengrößenverteilung muss daher direkt im Spritzstrahl und nicht im Operspray erfol-



gen, da die Overspraybildung bei auftragenden Spritzverfahren von der Geometrie des Werkstückes abhängt.

Bedingt durch die stark variierenden Eigenschaften der Spritzstrahlen in bezug auf Tropfenzkonzentration, Geschwindigkeit der Tropfen bzw. der Luft etc. kommen für diese Aufgabenstellung probenehmende Systeme nicht in Frage. Ohne gezielte isokinetische Entnahme, die jedoch genaue *a priori* Informationen über die lokalen Spritzstrahlcharakteristika erfordern, entsteht bei der Probenahme ein hoher, nicht reproduzierbarer Fehler. Letztendlich kommen nur optische, in-situ arbeitende Messverfahren in Frage. Hierbei scheiden die sogenannten Einzelpartikelzähler, die auf einer Amplitudenmessung basieren, aus, da diese für eine genaue Messung für jedes Fluid neu kalibriert werden müssten. Interferometrische Systeme wie z.B. das sogenannte Phasen-Doppler-Anemometer sind aufgrund der optischen Inhomogenitäten in den Tropfen (z.B. Festkörperpartikel) nicht anwendbar.

Letztendlich stellt sich die grundlegende Messanordnung wie in Abb. 1 anhand eines Beugungsspektrometers skizziert dar. Das Messsystem sitzt direkt im Spritzstrahl, wobei der Messabstand (Abstand zur Düse) in etwa dem Arbeitsabstand in der Applikation entsprechen sollte.

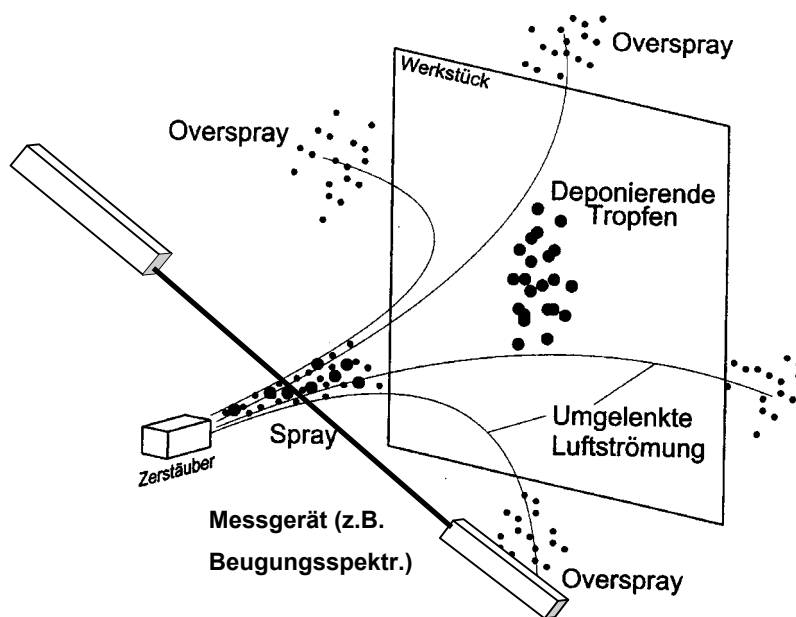


Abb. 1: Grundlegende Anordnung der Messapparatur

## 4 Versuchstechnische Einrichtungen

### 4.1 *Versuchsstand*

Zur Durchführung der Untersuchungen wurde in der Lackiertechnik des IPA ein Versuchsstand aufgebaut, der die gesamte Projektlaufzeit zur Verfügung stand. Dabei kam ein halbhoher Spritzstand zum Einsatz, der mit wasserbefluteten Wänden und einer Nassauswaschung unterhalb des Bodens ausgestattet ist. Die Bodenfläche des Spritzstandes beträgt ca. 3 m x 4 m. Mit Hilfe einer regelbaren Zu- und Abluftanlage konnten sowohl die Lufttemperatur (ca. 22° C) als auch die Luftgeschwindigkeit (ca. 0.5 m/s Sinkluft) eingestellt und konstant gehalten werden. Dabei ist anzumerken, dass aufgrund des hohen Eigenimpulses der Tropfen im üblichen Arbeitsabstand zwischen 200 mm (HVLP) und 500 mm (AirMix-Kleber) die Luftströmung in der Kabine praktisch keine Rolle spielt.



Abb. 2: Spritzstand mit Traversierung, Messgerät sowie Steuerungs- und Messrechner

Die Spritzorgane selbst wurden an einer mittig im Spritzstand befindlichen rechnergesteuerten Traversierung angebracht, welche eine Positionierung des Spritzorgans mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  mm ermöglichte. Davor befindet sich auf einer festen Unterlage in Richtung der wasserbefluteten Kabinenwand das Messgerät, wodurch reproduzierbar beliebige Messpositionen im Spritzstrahl angefahren werden konnten.

In einigen Versuchen, insbesondere bei der Anwendung von Klebermaterialien, wurde die Nassauswaschung abgeschaltet und mit trockenen Filtermatten gearbeitet, um eine unkon-

trollierte, gegebenenfalls zum Aufschäumen neigende Vermischung stark unterschiedlicher Materialien im Sammelbecken zu vermeiden. Auf die Ergebnisse hat dies jedoch keinen Einfluss.

#### **4.2 Messeinrichtung**

Wie oben dargestellt, kam aus Gründen der technischen Machbarkeit, z.B. im Hinblick auf die sehr verschiedenen Materialien, in erster Linie die Fraunhofer-Beugungsspektrometrie für die Messungen in Betracht. Die grundsätzlichen Eigenschaften dieses Messverfahrens lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Messung des Partikeldurchmessers aufgrund des entstehenden Beugungsmusters in Vorwärtsstreurichtung
- Ergebnisse nahezu unabhängig von der Zusammensetzung (Festkörper, Flüssigkeitsanteil etc.) des Fluids
- Langes, röhrenförmiges Messvolumen mit einem Durchmesser von ca. 10 mm führt automatisch zu integralen Ergebnissen
- In Richtung kleinerer Tropfen zunehmendes Auflösungsvermögen (bzw. schmalere Größenklassen)
- Konzentrationsgewichtete Tropfenverteilung (gemessen werden alle Tropfen, die sich zu einem Zeitpunkt T im Messvolumen befinden)
- Keine Fehlmessungen durch Tropfen oberhalb des Messbereiches (zu große Tropfen)

Konkret wurde hier ein sogenanntes SPRAYTEC Laser-Beugungsspektrometer der Fa. MALVERN Instr. eingesetzt, welches den Stand der Technik repräsentiert. Die spezifischen Eigenschaften des verwendeten Gerätes sind:

- Messvolumendurchmesser: 9 mm
- Empfangslinsenbrennweite: 200 mm
- Minimale Messzeit: 0.2 s

Mit diesen Daten ergibt sich ein maximal messbarer Tropfendurchmesser von 400  $\mu\text{m}$ , wobei laut Angabe des Herstellers der Volumenmedianwert der Tropfengrößenverteilung zwischen 5 und 250  $\mu\text{m}$  liegen sollte. Dies war bei allen durchgeführten Messungen der Fall.

Wie in Abb. 3 dargestellt, besteht das Messgerät aus einer optischen Bank, auf der Sender und Empfänger in direkter in-line Anordnung angebracht sind. Es ergibt sich somit ein genügend großer Raum zwischen Sender und Empfänger, in dem sich das Spray ungehindert entfalten kann. Um Verschmutzungen zu vermeiden, wurden die Komponenten in Kunststoff-

oder Aluminiumfolie eingekleidet. Bei Flachstrahlen wurde die Anordnung so gewählt, dass das Messvolumen parallel zur kurzen Halbachse zu liegen kam. Mit anderen Worten: Es wurde stets entlang der kurzen Achse des Flachstrahles integriert, was auch deshalb Sinn macht, weil man in dieser Richtung keine starken örtlichen Abweichungen in der Tropfengrößenverteilung erwartet.

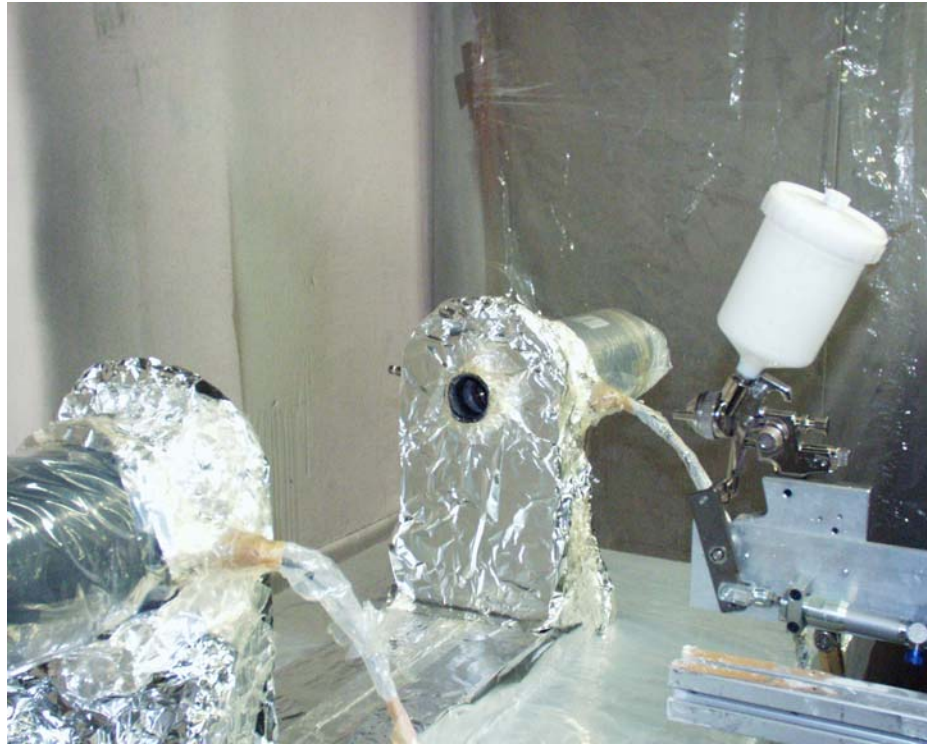


Abb. 3: SPRAYTEC Messgerät im Abstand von 300 mm vor einer HVLP-Handpistole

Aufnahme und Auswertung der Daten geschehen mit Hilfe der zugehörigen Software RT-Sizer für Windows. Dabei kommt ein numerisches Auswerteverfahren ohne *a priori* Annahme einer bestimmten Form der Verteilung zum Einsatz. Mit diesem Programm können die Daten dann in einer Form exportiert werden, die eine Weiterverarbeitung mit MS-EXCEL ermöglichte. Die Ausgabe geschieht in Form einer anzahl- und einer volumenbezogenen Größenverteilung.

Über alles wird im normalen Tropfenkonzentrationsbereich vom Hersteller eine Genauigkeit des Messgerätes von  $\pm 2\%$  des aktuellen Volumenmedianwertes  $D_{v,50}$  angegeben. Dieser Wert dürfte typisch sein für die Fraunhofer-Beugungsspektrometrie.

## 5 Durchgeführte Messungen

### 5.1 Ausgewählte Anwendungen

In den nachfolgenden Tabellen 2 - 4 sind die ausgewählten typischen Anwendungen, in denen Isocyanathaltige Materialien von Hand verspritzt werden, zusammengefasst. Als Anwendung wird dabei die Kombination von Material und Applikationstechnik verstanden. Es handelt sich dabei um die im Laufe des Projektes endgültig festgelegte Liste. Die Materialien wurden überwiegend durch die am Projekt beteiligten Firmen, d.h. DuPont und Henkel zur Verfügung gestellt, lediglich bei den Holzlacken wurde auf 2 gängige Produkte der Fa. Votterler zurückgegriffen. Folgende Anwendungsbereiche decken die Lacke ab:

L1,L2:	2-K Decklacke für Holz und holzartige Oberflächen
L3-L5:	2-K Klarlacke für Anwendungen mit hohen Qualitätsanforderungen, z.B. Automobilreparatur
L6,L7:	pigmentierte 2-K Autoreparaturlacke
L8:	2-K Decklack, z.B. für den Schienenfahrzeugbereich
L9-L11:	2-K Decklacke für Korrosionsschutzaufbauten
K1:	2-K Kleber, z.B. für die Fahrzeugindustrie
K2,K3:	2-K Kleber, universelle Anwendungen
K4,K5:	1-K Kleber, z.B. für Verbundelemente

Die Materialien wurden entsprechend den vorhandenen Datenblättern vorbereitet und 2-K Materialien gemischt. Die Verarbeitung erfolgte unmittelbar nach Präparation des Materials. Lediglich im Falle des 2-K Klebers kam eine 2-K Anlage mit integriertem statischen Mischer zum Einsatz.

Wie aus den Tabellen ersichtlich, wurden fallweise verschiedene Applikationsparameter wie Düsendurchmesser, Spritzdruck oder Materialtemperatur verändert. Auf die Auswirkungen wird in den entsprechenden Ergebniskapiteln eingegangen.

		Material													
Anwendung	Zerstäuber	HDI				HDI + TDI	HDI				MDI				
		Autoreparaturlack lösemittelhaltig			Autoreparaturlack wässrig	Holzlack 2 K	Korrosionsschutzlack niedrigviskos				Klebstoff Niedrigviskos		Klebstoff Hochviskos		Industrieklebstoff niedrigviskos
		2K-Klarlack	Pigmentierter Lack schwarz	Pigmentierter Lack weiß	Klarlack		PU-Decklack weiß	PU-Decklack weiß	PU-Decklack	PU-Decklack	1 K 500-2000 mPas	2 K 500-2000 mPas	1 K 10000 mPas	2 K 10000 mPas	2 K < 500 mPas
Festkörper	48%/60% HS	50/55%	50/55%			70/75%	85/90%	70/75% mit Eisenglimmer 10 µm		lösemittelfrei	lösemittelfrei	lösemittelfrei	lösemittelfrei	lösemittelhaltig	
Kennz.	L3/L5	L7	L6	L4	L1/L2	L9	L10	L11	L8	K5	K2	K3	K4	K1	
Lackierung	Druckluft	✓	✓	✓	X	✓ (2)			(✓)						
	HVLP	✓	✓	✓	X	✓ (2)									
	Airmix								✓						
	Airless						✓	✓	✓	(✓)					
Klebstoffe	Druckluft													✓	
	Airmix										✓		✓		
	Airless									✓		✓			
					(2) – 2 Materialien				(✓) nur zum Vergleich, kein Standard						

**Tab. 2:** Betrachtete Zerstäubungsverfahren und Materialien (Übersicht)

Material	Bezeichnung	Lösemittel	Festkörper (Gewichts-%)	Viskosität <sup>1)</sup>	Dichte	Applikation
Votteler Holzlack Puridur Rapido	L1	organisch	40%	15-20 s (DIN 4)	1,0	HD/HVLP <sup>2)</sup>
Votteler Holzlack Puridur Mehrschichtlack	L2	organisch	22%	20-25 s (DIN 4)	0.95	HD/HVLP <sup>2)</sup>
DuPont Standocryl 2K-HS Klarlack	L3	organisch	62%	22 s (DIN 4)	1.0	HD/HVLP <sup>2)</sup>
DuPont Permahyd Klarlack 8200	L4	wässrig	50%	23-27 s (DIN 4)	1.04	HD/HVLP <sup>2)</sup>
DuPont Standocryl 2K-Kristall Klarlack	L5	organisch	48%	16 - 18 s (DIN 4)	0.99	HD/HVLP <sup>2)</sup>
DuPont 2K Mischlack weiss	L6	organisch	ca. 50%	17 s (DIN 4)	0.98-1.33	HD/HVLP <sup>2)</sup>
DuPont 2K Mischlack schwarz	L7	organisch	ca. 50%	17 s (DIN 4)	0.98-1.33	HD/HVLP <sup>2)</sup>
DuPont PUR Decklack RAL 7000	L8	organisch	61 – 69 %	ca. 20 s (DIN 4)	1.1 –1.3	diverse
DuPont Industrie Kleber 7536	K1	organisch	19%	550-700 mPas (165 1/s)	0.96	HD <sup>3)</sup>
Henkel Kleber 8115/5400	K2	organisch	40 - 60 %	ca. 1200 mPas	1.45	AirMix
Henkel Kleber 8112-22/5400	K3	organisch	40 - 60 %	ca. 8500 mPas	1.65	AirMix
DuPont Permacor 2330	L9	organisch	67%	ca. 800 mPas	1.4	Airless
DuPont Permacor 2230/VHS	L10	organisch	82%	ca. 1500 mPas	1.4	Airless
DuPont Permacor 2330/EG	L11	organisch	69%	ca. 700 mPas	1.5	Airless
Henkel Kleber UR 7211	K4	organisch	40 - 60 %	ca. 8500 mPas	1.15	Airless
Henkel Kleber UR 7388	K5	organisch	40 - 60 %	ca. 4000 mPas	1.12	Airless

<sup>1)</sup> Herstellerangaben

<sup>2)</sup> Fließbecher

<sup>3)</sup> Druckbehälter

Tab. 3: Betrachtete Zerstäubungsverfahren und Materialien (Materialdetails und Applikation)



Material	Geräte	Düse	Applikationsparameter	Messabstand	Strahlform
L1	SATA, DeVilbiss, IWATA	HVLP: 1.5, 1.6 mm; HD 1.6 mm	HVLP: 2 bar (vor Pistole) Hochdruck: 4 oder 5 bar (vor Pistole)	50 - 250 mm	rund/flach
L2	SATA	HVLP: 1.5, 1.6 mm; HD 1.6 mm		50 - 250 mm	rund/flach
L3	SATA	HVLP: 1.5, 1.6 mm; HD 1.6 mm		150 - 250 mm	flach
L4	SATA	HVLP: 1.3 mm; HD 1.6 mm		200 mm	flach
L5	SATA	HVLP: 1.5, 1.6 mm; HD 1.6 mm		150 - 250 mm	flach
L6	SATA	1.5 (HVLP) / 1.3, 1.4, 1.6 (HD)		100 - 250 mm	flach
L7	SATA	1.5 (HVLP) / 1.6 (RP)		100 - 250 mm	flach
L8	Wagner Airless/AirMix, SATA	311 (Airless/Airmix), 1,3 (HD)	AirMix: Material 100 bar, Luft 4,5,6 bar, Hochdruck: 5 bar Luft	300 mm	flach
K1	SATA	1.6, 2.0, 2.5 (HD)	Material: 3 bar Luft: 5 bar	150 - 250 mm	flach
K2	Unipre	3.7, 4.7	25 - 45 °C, Druck nieder /hoch,	400 mm	rund/flach
K3	Unipre	4.7	25 - 45 °C	400 mm	flach
L9	Wagner	515, 517, 521	260, 330 bar	300 mm	flach
L10	Wagner	515, 517, 521		300 mm	flach
L11	Wagner	515, 517, 521		300 mm	flach
K4	Wagner	421	150 bar	300 mm	flach
K5	Wagner	421		300 mm	flach

Tab. 4: Betrachtete Zerstäubungsverfahren und Materialien (Details zu den Geräten und Applikationsparametern)



## 5.2 Grundlegende Untersuchungen zur Auswertung

In DIN EN 481 sind sogenannte Konventionen über die einatembare, thorakale und alveolengängige Fraktion an der gesamten Partikel- oder Tropfengrößenverteilungen festgelegt. Es handelt sich dabei um den jeweiligen größenbezogenen prozentualen Anteil, der die entsprechende Wirkung verursacht. Die festgelegten Konventionen sind in Abb. 4 dargestellt.

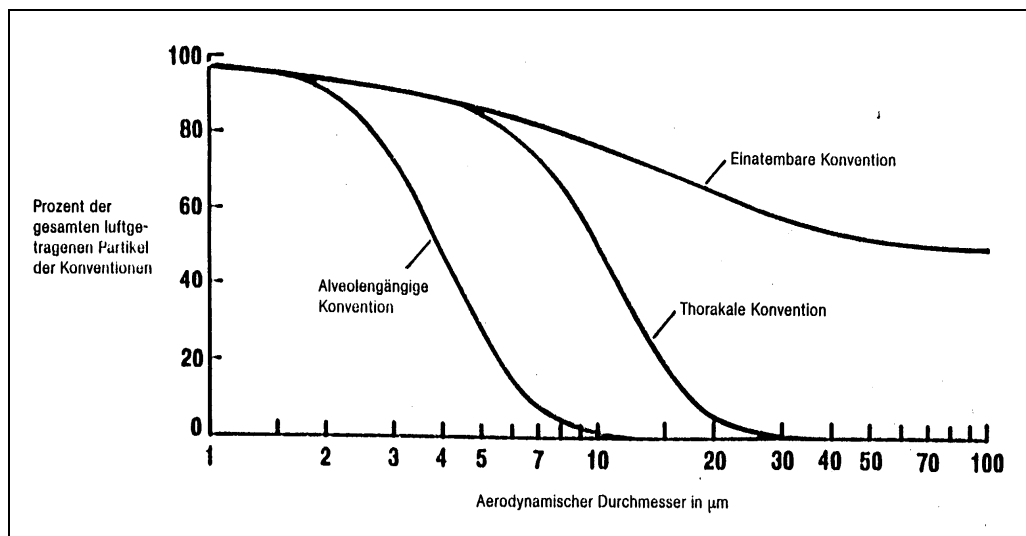


Abb. 4: Nach DIN EN 481 festgelegte Konventionen

Die Konventionen beziehen sich dabei auf die massenbezogene Partikelgrößenverteilung. Weiterhin ist der sogenannte aerodynamische, auf eine Dichte von 1 kg/cm<sup>3</sup> normierte Durchmesser zu verwenden. Für abweichende Dichten, wie sie hier teilweise vorliegen, ist eine Umrechnung vorzunehmen, wobei berücksichtigt wird, dass Partikel mit höherer Dichte eine höhere Sinkgeschwindigkeit besitzen. Es gilt:

$$D_{aero} = D \cdot \sqrt{\rho}$$

Darin ist D der wirkliche (gemessene) Durchmesser und  $\rho$  die Dichte des Fluids.

Zur Berechnung des APF-Faktors als Verhältnis der thorakalen zur einatembaren Fraktion einer bestimmten Applikation sind daher die folgenden Schritte durchzuführen:

1. Messung der gemessenen Tropfengrößenverteilung
2. Darstellung als volumenbezogene Größenverteilung
3. Gegebenfalls Umrechnung und Korrektur auf den aerodynamischen Durchmesser
4. Gewichtung (Faltung) der gemessenen Verteilung mit der thorakalen Konvention
5. Gewichtung (Faltung) der gemessenen Verteilung mit der einatembaren Konvention
6. Berechnung des jeweiligen Integralwerts (Summenanteil) unter den Kurven
7. Bestimmung des Verhältnisses zwischen thorakalen und einatembaren Integralwert

Das Ergebnis dieses Vorgehens ist exemplarisch in Abb. 5 anhand einer Messung mit einer HVLP Pistole unter Verwendung von Autoreparaturlack graphisch dargestellt.

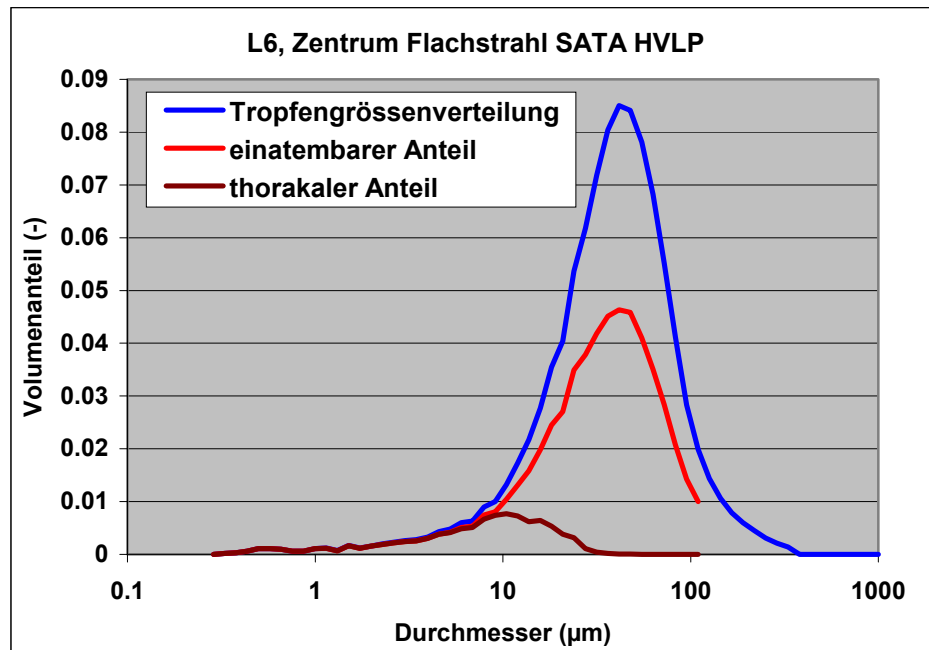


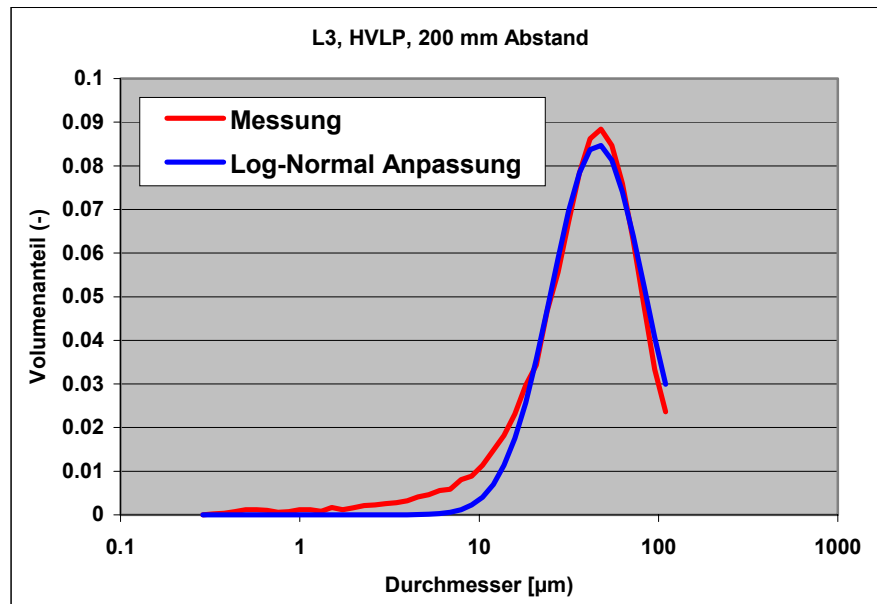
Abb. 5: Resultierender absoluter Volumenanteil der thorakalen bzw. einatembaren Fraktion

In diesem Beispiel ergibt sich ein thorakaler Anteil an der gemessenen Verteilung bis 100 µm von 10 % und ein einatembarer Anteil an der gemessenen Verteilung bis 100 µm von 57 %. Somit beträgt das Verhältnis zwischen thorakalem und einatembarem Anteil

$$\frac{\text{thorakal}}{\text{einatembar}} = \frac{10\%}{57\%} = 0.17 \text{ (bzw. 17\%)}$$

Infolge der Verhältnissbildung spielt es dabei keine Rolle, wie sich die Größenverteilung oberhalb 100 µm weiter gestaltet.

Die obigen Ergebnisse wurden durch eine direkte, zahlenmäßigen Verknüpfung der gemessenen Verteilung mit den tabellarischen Konventionswerten erhalten. Infolge der verschiedenen Auflösungen bzw. Klassenbreiten musste dabei interpoliert werden. Eine elegantere Methode der Berechnung wird in DIN EN 481 für den Fall vorgeschlagen, dass die gemessenen Größenverteilungen einer Log-Normal-Verteilung gehorchen. Hierbei könnte eine empirische Gleichung verwendet werden. Auf diese Art der Berechnung konnte nicht zurückgegriffen werden, da die Messungen nur unbefriedigend durch Log-Normal-Verteilungen repräsentiert werden können. Dies ist wiederum beispielhaft in Abb. 6 anhand der Messung mit einer HVLP-Pistole unter Verwendung eines Klarlackes dargestellt.



**Abb. 6:** Anwendung einer der log-normalen Anpassung

Bei bester Anpassungsgüte ergibt sich eine deutliche Unterbewertung des Feinanteils unterhalb 20 µm. Daraus resultieren signifikant andere Werte für den thorakalen resp. den einatembaren Anteil. In diesem Fall hätte sich eine andere Einstufung gemäss TRGS 430 ergeben.

	<b>Messung</b>	<b>Anpassung</b>
thorakal	9 %	3 %
einatembar	56 %	49 %
Verhältnis	0.16 (16 %)	0.06 (6 %)

**Tab. 5:** Einfluss der Log-Normal-Anpassung auf die Kennwerte einer Verteilung

Um trotzdem den rechnerischen Aufwand insbesondere in den Fällen zu minimieren, in denen die Berechnung des aerodynamischen Durchmessers eine zusätzliche Verschiebung der Tropfengrößenklassen ergab, wurden die Konventionen gemäss DIN EN 481 durch sogenannte Sigmoidal-Funktionen angepasst, wodurch eine funktionale Form der Kurven bereitgestellt und für die Berechnungen verwendet werden konnte. Die resultierenden Kurven sind in Abb. 7 graphisch dargestellt. Da der Vergleich einer rein zahlenmäßigen Verknüpfung von Größenverteilung und Konvention sowie der Verwendung der genannten Sigmoidal-Funktionen keinen signifikanten Unterschied ergab, wurden beide Methode wahlweise verwendet.

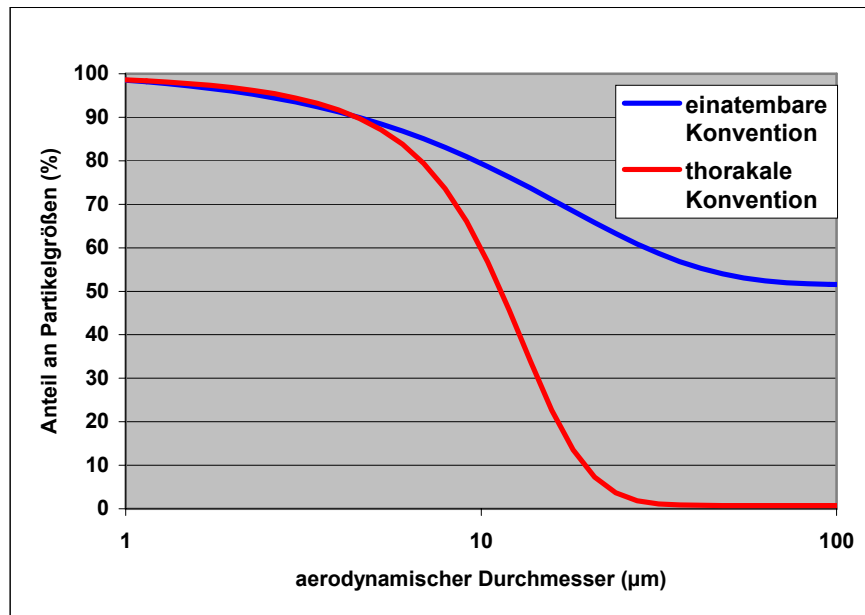


Abb. 7: Repräsentation von einatembarer und thorakaler Konvention durch Sigmoidal-Funktionen

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Pneumatische Applikation

In der Anwendung von Autoreparaturlacken sowie Holzlacken werden vorzugsweise HVLP- (high-volume low pressure) Zerstäuber eingesetzt, fallweise zur Erzielung besonders hoher Oberflächenqualitäten auch konventionelle Hochdruckzerstäuber. HVLP-Zerstäuber werden auch als nebelarm bezeichnet, was darauf hindeutet, dass man bei der Entwicklung des Verfahrens insbesondere auf die Reduktion des Feinanteiles, der in der Hauptsache für die Übersprayentstehung verantwortlich ist, abzielte. Konstruktiv unterscheiden sich HVLP- und Hochdruckbohrungen lediglich durch die Dimensionen der luftseitigen Bohrungen, die bei der HVLP deutlich größer sind. Zusätzlich werden HVLP-Pistolen mit einem Düseninnendruck von max. 0.7 bar betrieben. Dadurch wird am Austritt des Spritzstrahls aus der Düse nur Unterschallgeschwindigkeit erreicht.

Zum Einsatz kamen verschiedene HVLP- und Hochdruckpistolen (jeweils Handpistolen), wobei 2 Geräte der Fa. SATA (SATA NR 95 HVLP und SATA RP Digital 2) den Standard darstellten. Bei den Pistolen wurde jeweils die Materialschraube voll aufgedreht.

#### 6.1.1. Einfluss des Düsendurchmessers

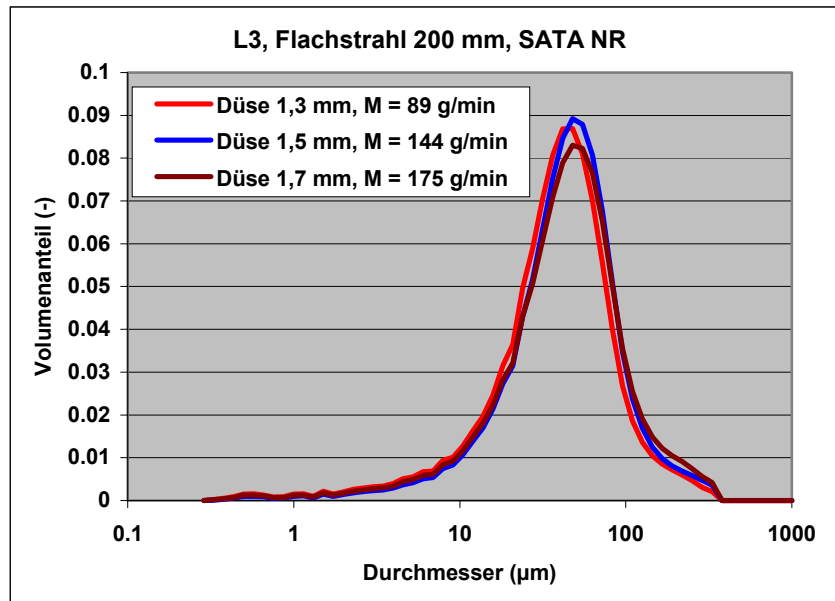
Der Düsendurchmesser stellt bei einer Fließbecher-Spritzpistole das wichtigste Element zur Anpassung an das zu verarbeitende Material dar. Je nach Viskosität werden von den Materialherstellern für HVLP- resp. Hochdruckpistolen bestimmte Düsendurchmesser vorgeschlagen.

Material	HVLP-Düse	Hochdruck-Düse
L1		1.5 – 1.8 mm
L2		1.5 – 1.8 mm
L3	1.4 – 1.6 mm	1.4 mm
L4	1.3 – 1.4 mm	1.3 mm
L5	1.3 – 1.5 mm	1.3 – 1.4 mm
L6	1.3 – 1.4 mm	1.3 – 1.4 mm
L7	1.3 – 1.4 mm	1.3 – 1.4 mm

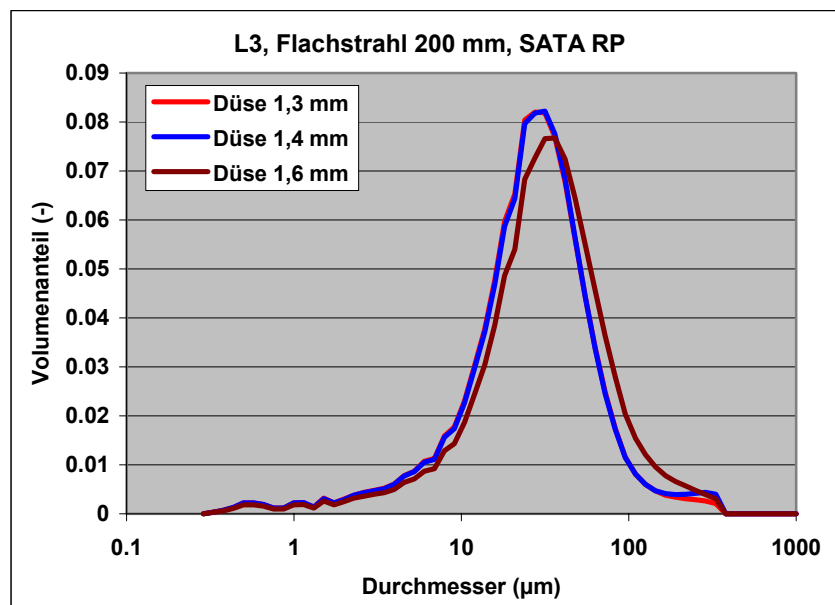
Tab. 6: Vom Materialhersteller empfohlene Düsendurchmesser

Mit Hilfe des DuPont HS-Klarlackes wurde sowohl für den HVLP- als auch den Hochdruckzerstäuber mittels vergleichender Messungen der Einfluss des Düsendurchmessers bestimmt. Hierbei ergaben sich sowohl für den HVLP- wie auch den Hochdruckzerstäuber nur geringe, vernachlässigbare Unterschiede zwischen den gemessenen Tropfengrößenverteilungen.

lungen. Dies ist überraschend, zumal Messungen ergaben, dass die Materialmenge im Falle der HVLP bei Übergang von einer 1.3 mm Düse auf eine 1.7 mm Düse (Flächenverhältnis 1:1.7) sich praktisch verdoppeln. Zu berücksichtigen ist dabei natürlich die Gesamtauslegung der Pistole, da Düsendurchmesser und Luftkappe stets miteinander gewechselt werden müssen. Dieses Ergebnis gilt natürlich nur dann, wenn man in etwa innerhalb des für das Material angegebenen Düsendurchmessers bleibt.



**Abb. 8:** Einfluss des Düsendurchmessers auf die Tropfengrößenverteilung – SATA NR95 HVLP



**Abb. 9:** Einfluss des Düsendurchmessers auf die Tropfengrößenverteilung – SATA RP - Hochdruckzerstäuber

### 6.1.2 Flachstrahl/Rundstrahl

Üblicherweise werden sowohl HVLP- als auch Hochdruckpistolen in Flachstrahleinstellung verwendet. Bei dieser Einstellung ergeben sich bei flächigen Teilen die üblichen, lackausflussabhängigen Arbeitsgeschwindigkeiten. In der Praxis stellt der Rundstrahl, obwohl vom Prinzip her für geometrisch begrenzte Werkstückgeometrien geeignet, eher die Ausnahme dar. Der Vergleich sei an dieser Stelle der Vollständigkeit halber trotzdem erwähnt.

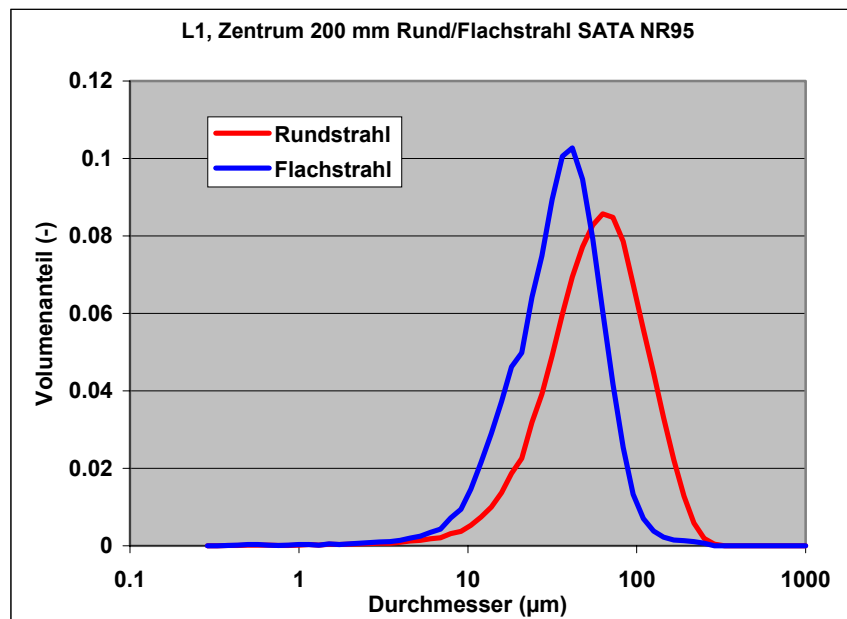


Abb. 10: Vergleich Rund-/Flachstrahl – SATA NR 95 HVLP

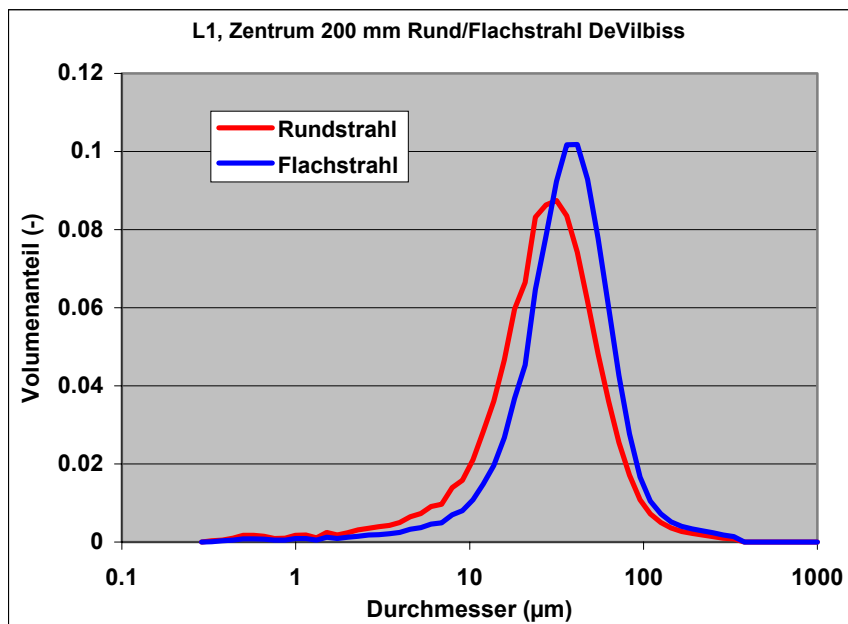


Abb. 11: Vergleich Rund-/Flachstrahl – DeVilbiss Gravity Pro HVLP

Hierbei ergeben sich für die verschiedenen Zerstäuber unterschiedliche Tendenzen, was durch Abb. 10 und 11 anhand der SATA NR95 und DeVilbiss Gravity Pro-HVLP Zerstäuber verdeutlicht werden kann. Bei im "Normalzustand" (Flachstrahl, 200 mm) nahezu identischen Tropfengrößenverteilungen (siehe auch Kap. 7.1.4) stellt sich bei Rundstrahleinstellung für den SATA-Zerstäuber eine gröbere, für den DeVilbiss-Zerstäuber eine feinere Zerstäubung ein. Die resultierenden Kennwerte der Verteilungen sind in Tab. 7 aufgelistet.

Zerstäuber	SATA		DeVilbiss	
	rund	flach	rund	flach
thorakal	4 %	8 %	15 %	8 %
einatembar	49 %	59 %	62 %	58 %
Verhältnis	0.08 (8 %)	0.14 (14 %)	0.25 (25 %)	0.14 (14%)

Tab. 7: Einfluss der Strahlgeometrie auf die relevanten Kennwerte der Verteilung

### 6.1.3 Variation des Messortes

HVLP-Pistolen werden üblicherweise mit einem Arbeitsabstand von ca. 150 –200 mm betrieben, Hochdruckpistolen mit 200 - 250 mm. Zur endgültigen Festlegung des Messortes wurden daher Messungen unter Variation des axialen Abstandes zwischen Messvolumen und Pistole durchgeführt. In Abb. 12 ist exemplarisch das Ergebnis für den Fall des Holzlackes unter Verwendung einer DeVilbiss HVLP-Pistole dargestellt. Mit Ausnahme des geringsten untersuchten Abstandes von 50 mm können die Verteilungen im Rahmen der Messgenauigkeit (siehe hierzu Kap. 7) als identisch betrachtet werden. Der Unterschied zwischen 50 und 150 mm wird gemäss Tab. 8 insbesondere im thorakalen Anteil, d.h. im Bereich unterhalb 20 µm deutlich. Für diesen Effekt, der im übrigen auch bei der Hochdruckpistole beobachtet wird, ist vermutlich die örtliche Zunahme der Konzentration der kleinen Tropfen verantwortlich, die der Luftströmung sehr gut folgen können und daher schneller abgebremst werden als die größeren Tropfen.

Abstand	50 mm	150 mm
thorakal	16 %	9 %
einatembar	62 %	59 %
Verhältnis	0.25 (25 %)	0.15 (15 %)

Tab. 8: Einfluss der Messposition auf die relevanten Kennwerte der Verteilung

Für die weiteren Untersuchungen wurde sowohl für die HVLP- als auch die Hochdruckapplikation ein Messabstand von 200 mm als Standard gewählt.



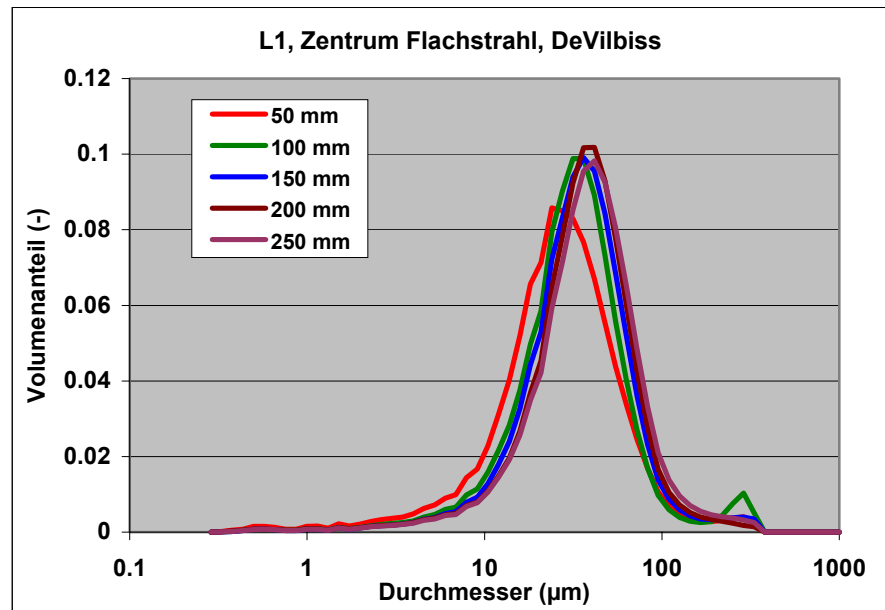


Abb. 12: In unterschiedlichen axialen Abständen gemessene Tropfengrößenverteilungen

In ähnlicher Weise wurde der Einfluss der radialen Messposition verifiziert. Hierzu wurde bei einem axialen Abstand von 150 mm insgesamt 10 radiale Messpositionen angefahren. Abb. 13 zeigt für diesen Fall sehr ähnliche Tropfengrößeverteilungen. Die Ursache für den nochmaligen Anstieg der Tropfenhäufigkeit oberhalb 100  $\mu\text{m}$  (siehe auch z.B. Abb. 18) konnte nicht endgültig geklärt werden. Dieser Effekt, der bereits in früheren Messungen beobachtet werden konnte, bleibt jedoch aufgrund der Lage oberhalb 100  $\mu\text{m}$  ohne Einfluss auf die APF-relevanten Ergebnisse.

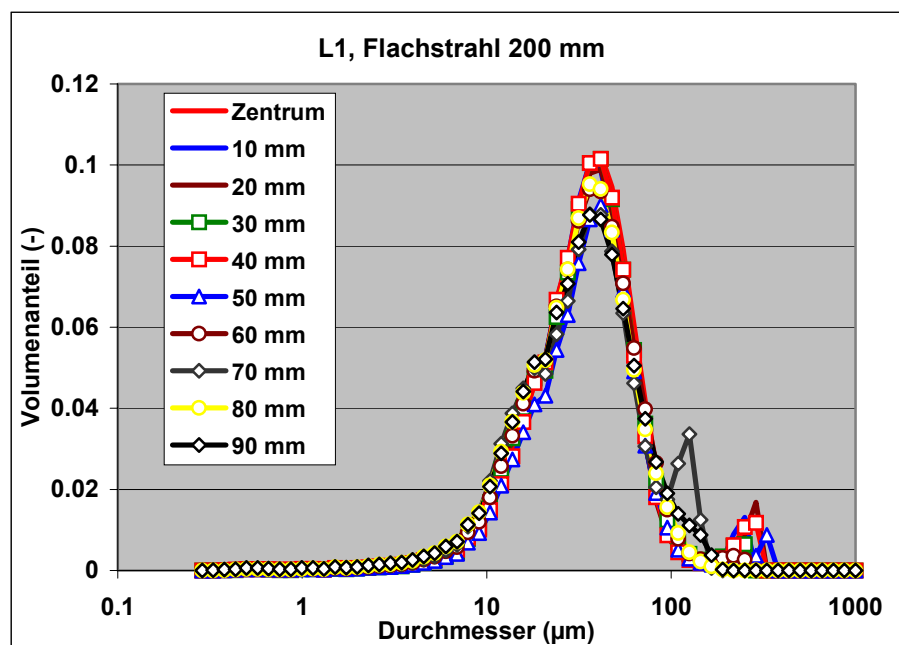


Abb. 13: In unterschiedlichen radialen Positionen gemessene Tropfengrößenverteilungen

Die resultierenden, für den APF entscheidenden Verhältnisse zwischen der thorakalen und der einatembaren Tropfengrößenfraktion variiert in den oben dargestellten Messungen lediglich zwischen 15 % und 19 %. Daher spricht nichts dagegen, Messungen im Spritzstrahlzentrum als charakteristisch für den ganzen Spritzkegel zu betrachten, zumal die Tropfenkonzentration bei radialen Abständen über 50 mm abnimmt. Ein spezielles Integrationsverfahren zur Berechnung einer gewichteten mittleren Verteilung bzw. einer Gesamtverteilung ist nicht notwendig.

#### 6.1.4 Untersuchung verschiedener HVLP-Zerstäuber

Weiterhin galt es zu überprüfen, inwiefern sich die verschiedenen, auf dem Markt befindlichen HVLP-Zerstäuber in ihrem Zerstäubungsverhalten unterscheiden. Dieser Test wurde ebenfalls mit dem Holzlack L1 durchgeführt, dürfte aus physikalischer Sicht aber auch für alle anderen Materialien gelten. Wie Abb. 14 verdeutlicht, variieren die in einem Abstand von 200 mm im Zentrum gemessenen Tropfengrößenverteilungen kaum. Die resultierenden Kennwerte der Verteilungen, die sich innerhalb der Messgenauigkeit (siehe Kap. 7) bewegen, sind in Tab. 9 zusammengefasst.

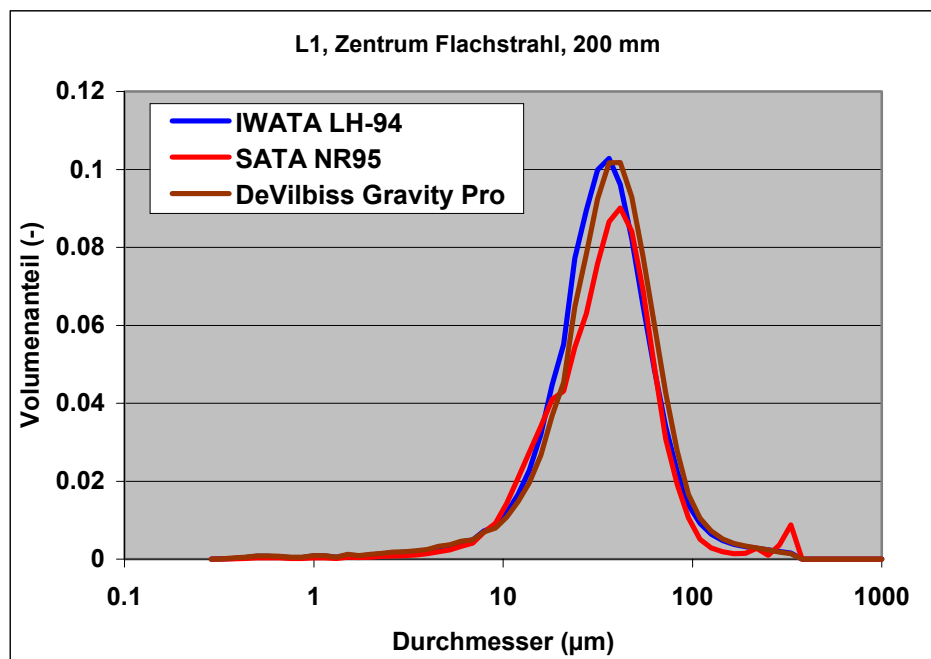


Abb. 14: Vergleich von HVLP-Pistolen verschiedener Hersteller

Zerstäuber	IWATA	SATA	DeVilbiss
thorakal	9 %	8 %	8 %
einatembar	59 %	59 %	58 %
Verhältnis	0.15 (15 %)	0.14 (14 %)	0.14 (14%)

Tab. 9: Einfluss des HVLP-Zerstäubers auf die relevanten Kennwerte der Verteilung

### 6.1.5 Einfluss des Füllstandes

Schließlich wurde mittels HVLP-Zerstäuber der Einfluss des Fluidniveaus im Fließbecher verifiziert. Die bei minimaler und maximaler Füllung des Fließbeckers erhaltenen Tropfengrößenverteilungen sind in Abb. 15 gegenübergestellt. Der Unterschied bewegt sich hier innerhalb der Messgenauigkeit, d.h. es können durchaus Messungen mit verschiedenen Füllständen miteinander verglichen werden.

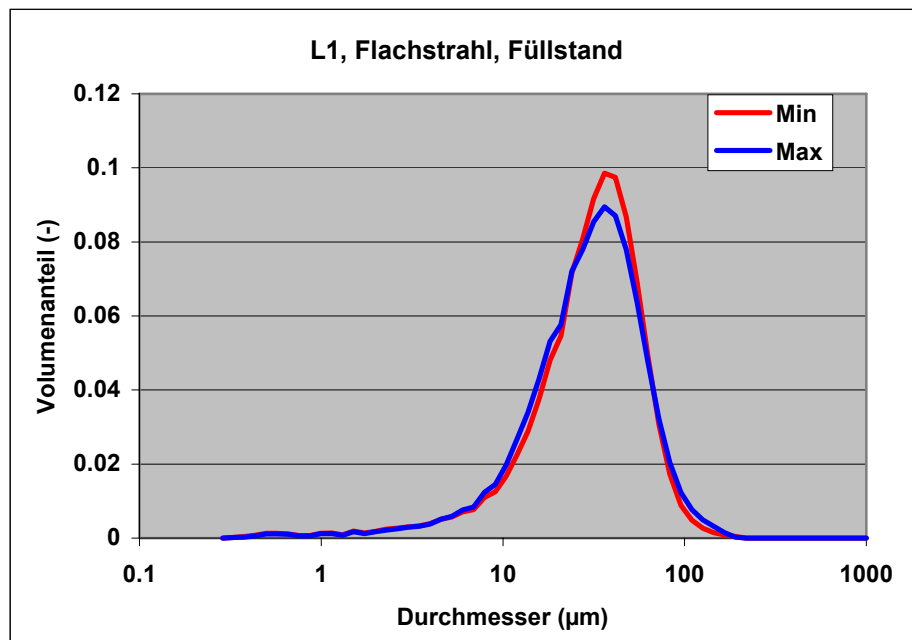


Abb. 15: Einfluss des Füllstandes im Fließbecher auf die Tropfengrößenverteilung

### 6.1.6 Ergebnisse im Standardzustand - HVLP

Basierend auf den Ergebnissen der oben dargestellten Untersuchungen wurde für den Vergleich der verschiedenen Materialien sowie für die relevante Geräteeinstufung gemäss TRGS 430 ein Messabstand von 200 mm bei Flachstrahleinstellung gewählt. Der Pistolen-eingangsdruk wurde jeweils so eingestellt, dass der HVLP-konforme Düseninnendruck von 0.7 bar erreicht wird. Bei SATA HVLP-Zerstäubern sind dies z.B. 2 bar. Die nachfolgenden Tabellen und Diagramme zeigen in komprimierter Form die Ergebnisse für alle Lacke, die mit HVLP-Pistolen verspritzt wurden.

Material	L3	L4	L5	L6	L7
thorakal	9 %	5 %	8 %	10 %	10 %
einatembar	55 %	56 %	53 %	55 %	55 %
Verhältnis	0.16 (16 %)	0.08 (8 %)	0.16 (16 %)	0.18 (18 %)	0.18 (18%)

Tab. 10: APF - relevante Kenndaten - L3-L7, HVLP - Zerstäuber

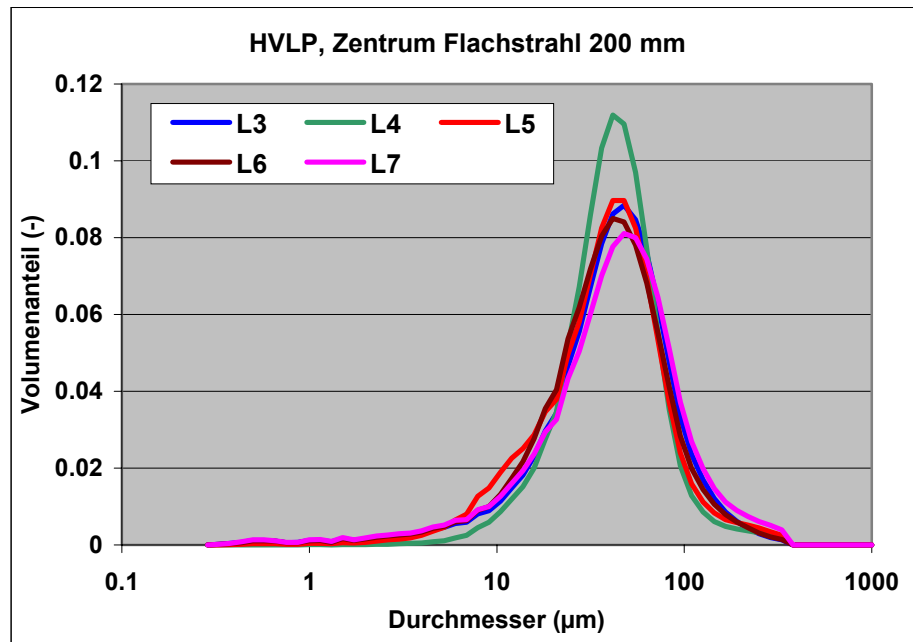


Abb. 16: Gemessene Tropfengrößenverteilungen L3-L7, HVLP - Zerstäuber

Material	L1	L2
thorakal	8 %	8 %
einatembar	59 %	51 %
Verhältnis	0.14 (14 %)	0.16 (16 %)

Tab. 11: APF - relevante Kenndaten - L1,L2, HVLP - Zerstäuber

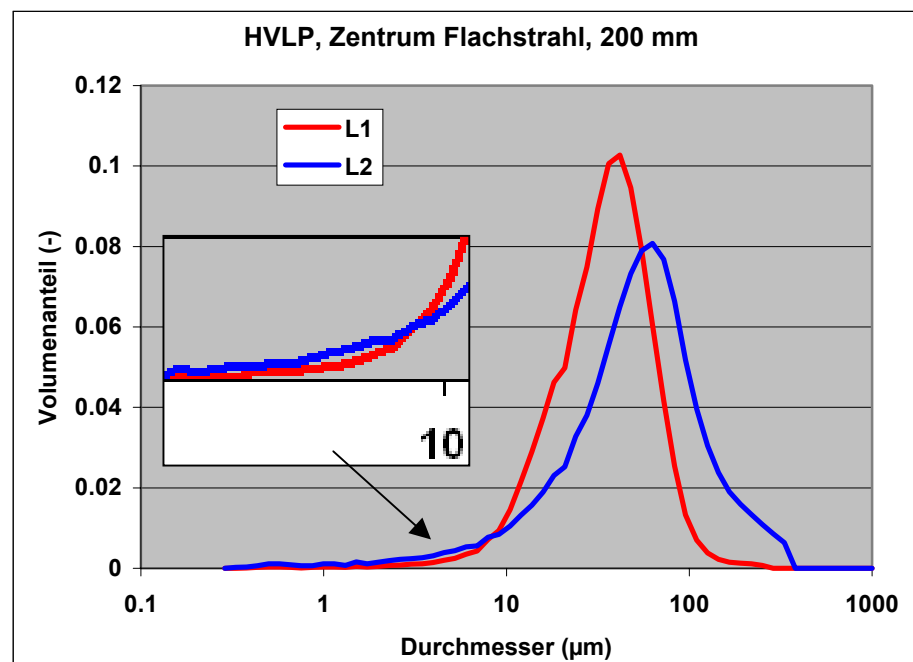


Abb. 17: Gemessene Tropfengrößenverteilungen – L1,L2, HVLP - Zerstäuber

Das Verhältnis thorakal/einatembar liegt in allen Fällen im Bereich um die 15 %. Wie zuvor dargestellt, ändert daran auch die Verwendung anderer Düsen nichts, solange man nicht allzu sehr vom Hersteller angegebenen Bereich abweicht.

Das Ergebnis für den Holzlack L2 weicht in bezug auf die Tropfengrößenverteilungen von den anderen Lacken ab, allerdings wird bei genauerer Ansicht deutlich, das im direkten Vergleich mit dem Einschichtlack ein erhöhter Feinanteil besteht, der die Vorteile der an sich größeren Zerstäubung wieder relativiert.

### 6.1.7 Ergebnisse im Standardzustand – Hochdruckzerstäuber

Die Messungen mit Hochdruckzerstäuber wurden ebenfalls an einem Abstand von 200 mm durchgeführt. Der Standard-Zerstäubungsdruck betrug 4 bar, wobei die Materialschraube voll geöffnet wurde.

Material	L3	L4	L5	L6	L7
thorakal	17 %	18 %	15 %	23 %	17 %
einatembar	62 %	66 %	58 %	65 %	62 %
Verhältnis	0.27 (27 %)	0.27 (27 %)	0.26 (26 %)	0.33 (33 %)	0.27 (27 %)

Tab. 12: APF - relevante Kenndaten - L3-L7 - Hochdruckzerstäuber

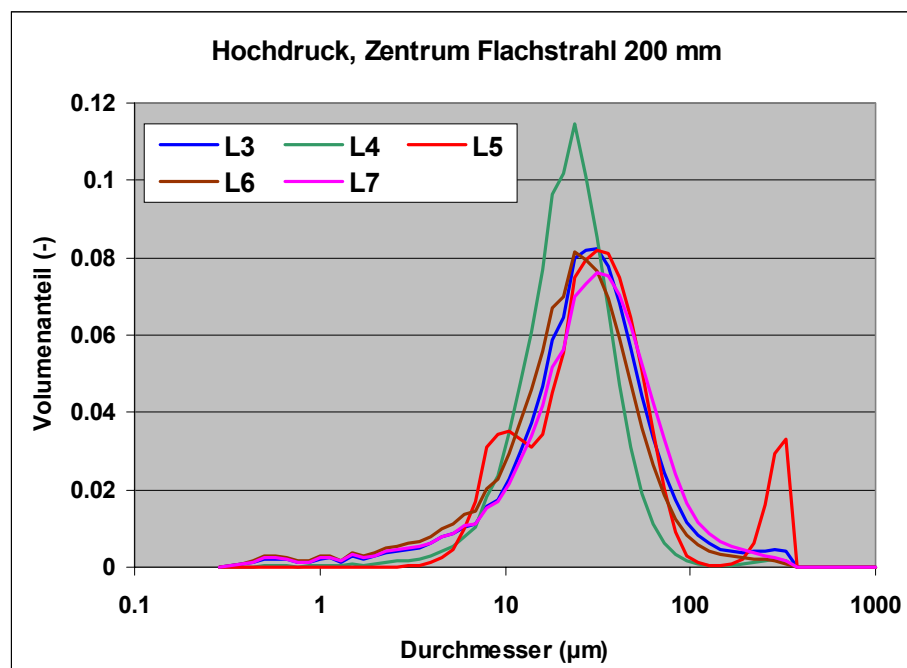


Abb. 18: Gemessene Tropfengrößenverteilungen – L3-L7, Hochdruckzerstäuber

Material	L1	L2
thorakal	15 %	10 %
einatembar	61 %	56 %
Verhältnis	0.24 (24 %)	0.18 (18 %)

Tab. 13: APF - relevante Kenndaten - L1, L2, Hochdruckzerstäuber

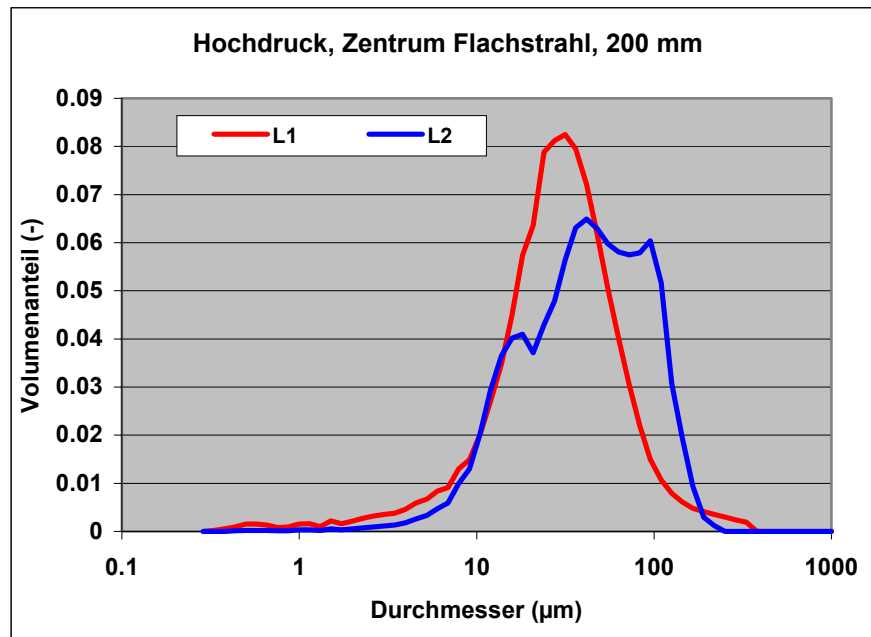


Abb. 19: Gemessene Tropfengrößenverteilungen – L1, L2, Hochdruckzerstäuber

Die gemessenen Verhältnisse zwischen thorakaler und einatembarer Tropfengrößenfraktion bewegen sich bei der Hochdruckzerstäubung im Falle der Autoreparaturlacke im Bereich von 30 % und sind daher in etwa doppelt so groß wie HVLP-Zerstäuber. Der Unterschied wird insbesondere bei der thorakalen Fraktion, d.h. Tropfengrößen unterhalb ca. 20 µm deutlich, während der einatembare Anteil mit ca. 60 % in etwa konstant bleibt. Die Bewertung der HVLP-Zerstäuber als im Vergleich zur Hochdruckzerstäubung nebelärmer ist daher gerechtfertigt. Auch in den vorliegenden Messungen ergab sich rein subjektiv eine sichtbare Reduktion des Feinanteils.

Bei den Holzlacken ist der Unterschied zwischen HVLP- und Hochdruckzerstäuber wesentlich geringer. Allerdings ist hier der relativ große Düsendurchmesser des Hochdruckzerstäubers von 1.7 mm zu berücksichtigen, der gemäss Datenblatt für diese Materialien empfohlen wird.

### 6.1.8 Industriekleber - K1

Der Zweikomponentenkleber K1 wird gemäss Datenblatt mit einem Hochdruckzerstäuber mit einem Zerstäubungsdruck von 4-7 bar und einem Materialdruck von 2 – 4 bar appliziert. Die Materialzufuhr muss somit mittels Druckbehälter realisiert werden. Der empfohlene Düsendurchmesser liegt zwischen 1.5 bis 2.5 mm. Getestet wurden Düsendurchmesser von 1.6, 2.0 und 2.5 mm bei einem Zerstäuberdruck von 5 bar und einem Materialdruck von 3 bar. Die Ergebnisse sind in Tab. 14 und Abb. 20 zusammengefasst. Für die 2.5 mm Düse konnten keine Resultate erhalten werden, da in diesem Fall die Tropfenkonzentration für eine stabile Tropfengrößenberechnung zu niedrig war.

Düse	1.6 mm	2.0 mm
thorakal	0.16 %	0.07 %
einatembar	14.0 %	13.6 %
Verhältnis	0.011 (1.1 %)	0.005 (0.5 %)

Tab. 14: APF – relevante Kenndaten - K1, Hochdruckzerstäuber

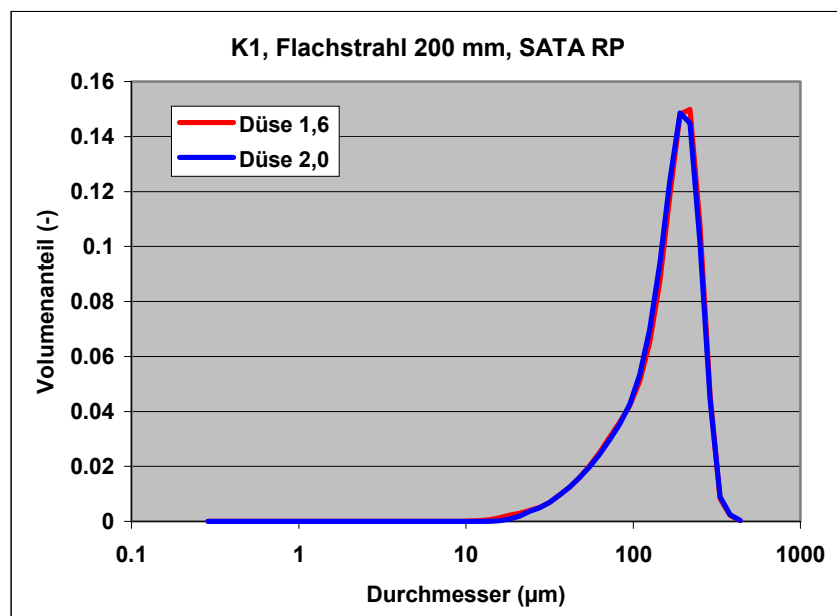


Abb. 20: Gemessene Tropfengrößenverteilungen – Kleber K1, Hochdruckzerstäuber

Es ergeben sich relativ enge Tropfengrößenverteilungen mit einem extrem geringen Feinanteil unterhalb 10 µm. Damit liegt das Verhältnis thorakal/einatembar im Bereich um die 1 %. Letztendlich entscheidet hier die genaue Einstellung des Zerstäubers (Zerstäubungs-/Materialdruck) über die endgültige Einstufung dieser Applikation. Der Unterschied zu den Lacken liegt zum einen in den Applikationsparametern (größere Düsen, wesentlich höhere Ausflussraten), zum anderen aber auch in den Materialeigenschaften.

## 6.2 Airless - Applikation

### 6.2.1 Decklacke für Korrosionsschutzaufbauten – L9/L10/L11

Korrosionsschutzdecklacke stellen eine eher höherwertige Anwendung für Airless-Zerstäuber dar, da hier teilweise auch eine ansprechende Optik sichergestellt werden muss. Getestet wurden hier 3 Lacke für die Innen- und Außenbeschichtung, darunter ein Material mit Eisenglimmer. Verwendet wurde eine von der Fa. DuPont zur Verfügung gestellte Airless-Maschine mit verschiedenen Düsendurchmessern zwischen 0.38 und 0.58 mm und Drücken von 260 bzw. 330 bar. Die Messungen wurden bei einem Düsenabstand von 300 mm durchgeführt.

Die erhaltenen Ergebnisse bei 260 bar sind in der Tab. 15 bzw. der Abb. 21 miteinander verglichen. Es kam jeweils die Standarddüse (0.43 mm bei 2330, 2330/EG und 2230) zum Einsatz

Material	L9	L10	L11
thorakal	0.9 %	1.1 %	2.3 %
einatembar	41 %	46 %	34 %
Verhältnis	0.02 (2 %)	0.02 (2 %)	0.07 (7 %)

Tab. 15: APF – relevante Kenndaten - Korrosionsschutzmaterialien, Airless

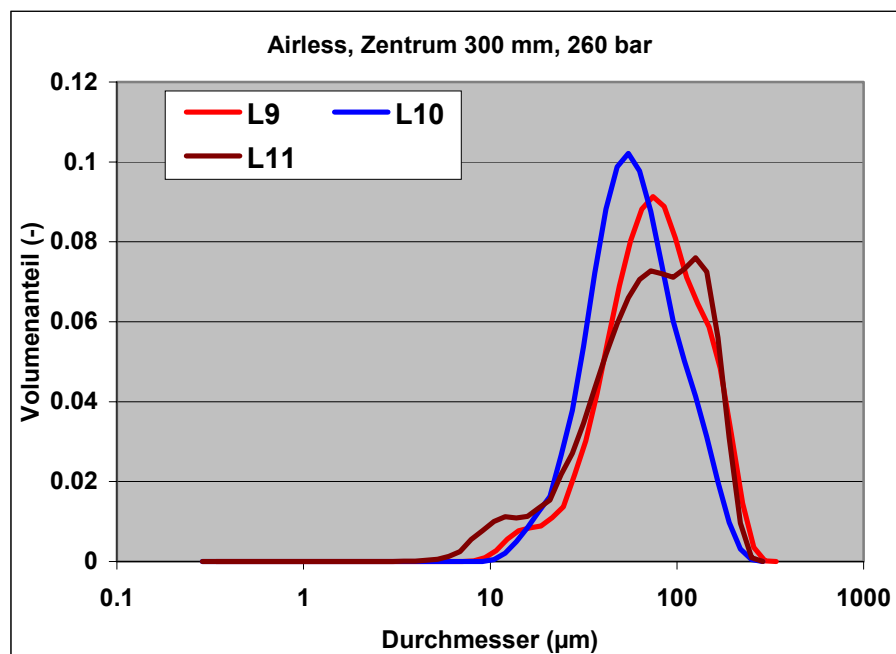


Abb. 21: Gemessene Tropfengrößenverteilungen – Korrosionsschutzdecklacke, Airless



Es zeigt sich, dass die Zugabe von Eisenglimmer zu einer feineren Zerstäubung führt, vermutlich durch die Festkörperpartikel, die für den bei der Airless-Zerstäubung auftretenden Filmzerfall eine Oberflächenfehlstelle darstellen, was den Zerfall beschleunigt.

Diese Resultate werden auch durch die Messungen bei 330 bar und anderen Düsendurchmessern bestätigt. Exemplarisch sind hier für das Material L10 die verschiedenen Düsendurchmesser bei 260 bar Druck miteinander verglichen. In keinem Fall wird bei Variation der Applikationsbedingungen die Grenze von 1 % unter- bzw. überschritten. In diesem Fall sind die Materialeigenschaften für eine mögliche Einstufung des Applikationssystems entscheidend.

Düse	0.38 mm	0.43 mm	0.48 mm
thorakal	1.3 %	1.1 %	0.9 %
einatembar	49 %	46 %	44 %
Verhältnis	0.03 (3 %)	0.02 (2 %)	0.02 (2 %)

Tab. 16: APF – relevante Kenndaten - L10, Airless

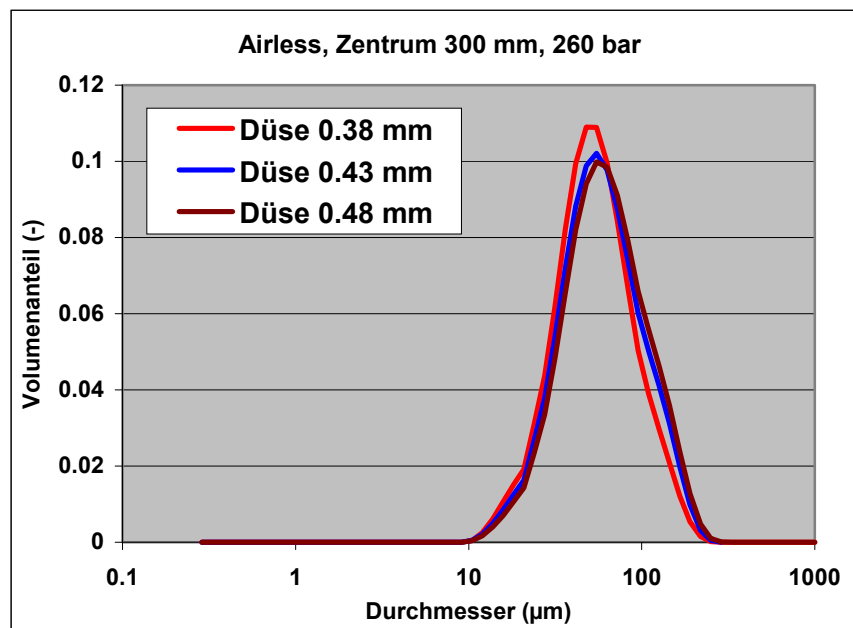


Abb. 22: Gemessene Tropfengrößenverteilungen – L10, Airless

### 6.2.2 Einkomponenten-Kleber – K4/K5

Es handelt sich um Klebermaterialien, die sowohl gespachtelt als auch gespritzt werden können. Laut Hersteller ist das Verspritzen recht kritisch, da bei Airless-Zerstäubern in Verbindung mit den empfohlenen 150 - 180 bar Materialdrücken ein voll geöffneter Strahlwinkel

nur sehr schwer zu erreichen ist. Zulässig ist eine Aceton-Zugabe bis zu ca. 0.5 % zur Verbesserung der Zerstäubung.

In der durchgeführten Anwendung wurde eine 0.53 mm Düse bei 150 bar Druck verwendet, wobei eine ca. 0.5 % Aceton-Zugabe erfolgte. Auch in diesem Fall waren noch deutliche Spritzkegel-Randstreifen (durch die Oberflächenspannung verursachte Verdickungen am Rand des zerfallenden Filmes, der zu relativ großen Tropfen führt) erkennbar. Die Ergebnisse sind in Tab. 17 resp. Abb. 23 zusammengefasst.

Material	K4	K5
thorakal	0.6 %	0.6 %
einatembar	13 %	14 %
Verhältnis	0.04 (4 %)	0.04 (4 %)

Tab. 17: APF – relevante Kenndaten - Einkomponentenkleber, Airless

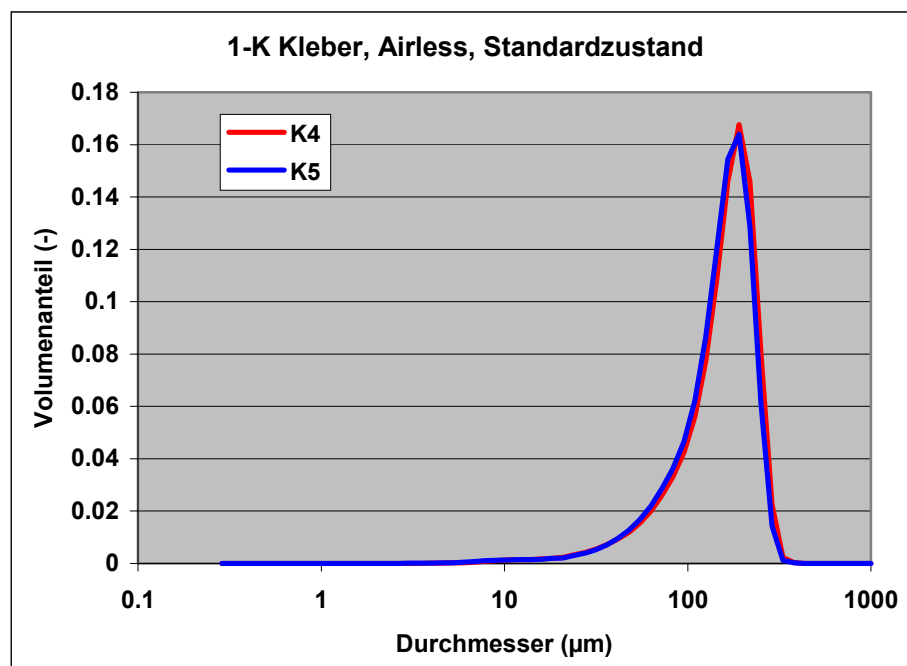


Abb. 23: Gemessene Tropfengrößenverteilungen – Einkomponentenkleber, Airless

Obwohl sich die Viskositäten etwa um den Faktor 2 unterscheiden, ist lediglich ansatzweise zu erkennen, dass das höherviskose Material K4 gröber zerstäubt. Bezüglich der Kennwerte bewegen sich beide Materialien im Bereich der Messgenauigkeit.

## 6.3 AirMix - Applikation

### 6.3.1 Zweikomponenten-Kleber – K2/K3

Getestet wurden 2 Klebermaterialien, die sich in ihrer nominellen Viskosität etwa um den Faktor 7 unterscheiden. Es handelt sich um die PU-Systeme K2 (nom. 1200 mPas) und K3 (nom. 8500 mPas).

Zur Anwendung kam ein AirMix-System der Fa. UNIPRE, wobei mittels Zahnradpumpe eine volumenstromgeregelte Dosierung erfolgte. Verwendet wurden Düsen des Typs 4,7 (Standard) und 3,7, jeweils mit den zugehörigen Luftringdüsen 470G und 370G. Es erfolgte zudem eine Variation der Temperatur zwischen 25 und 45° C.

Für den Standardzustand (Düse 4,7 mit Ringdüse 470G bei 45° C) sind in Tab. 18 bzw. Abb. 24 die Ergebnisse der beiden Materialien miteinander verglichen. Obwohl die nominellen Viskositäten sehr unterschiedlich sind, werden nahezu identische Tropfengrößenverteilungen einschließlich der hier relevanten Kenndaten erhalten.

Material	K2	K3
thorakal	0.43 %	0.25 %
einatembar	24 %	24 %
Verhältnis	0.02 (2 %)	0.01 (1 %)

Tab. 18: APF – relevante Kenndaten - Zweikomponentenkleber, AirMix

Auch bei dieser Anwendung zeigt sich, dass Parametervariationen keinen „großen“ Einfluss auf die Eigenschaften der Tropfengrößenverteilung besitzen. Zur Verdeutlichung sind in Tab. 19 resp. Abb. 25 für das Material K2 Messungen mit kleinerer Düse, niedrigerer Temperatur sowie mit geringer Ringluft miteinander verglichen. An dieser Stelle sollte angemerkt werden, dass sich der Begriff „großer“ Einfluss auf die gesamte Applikationsskala bezieht. Isoliert betrachtet kann in dieser Anwendung das Verhältnis thorakal/einatembar durchaus auf die Hälfte reduziert werden.

Material	Standard	25° C	Düse 3,7	geringe Luft
thorakal	0.43 %	0.34 %	0.26 %	0.28 %
einatembar	24 %	22 %	23 %	18 %
Verhältnis	0.02 (2 %)	0.02 (2 %)	0.01 (1 %)	0.02 (2 %)

Tab. 19: APF – relevante Kenndaten - Zweikomponentenkleber K2, AirMix

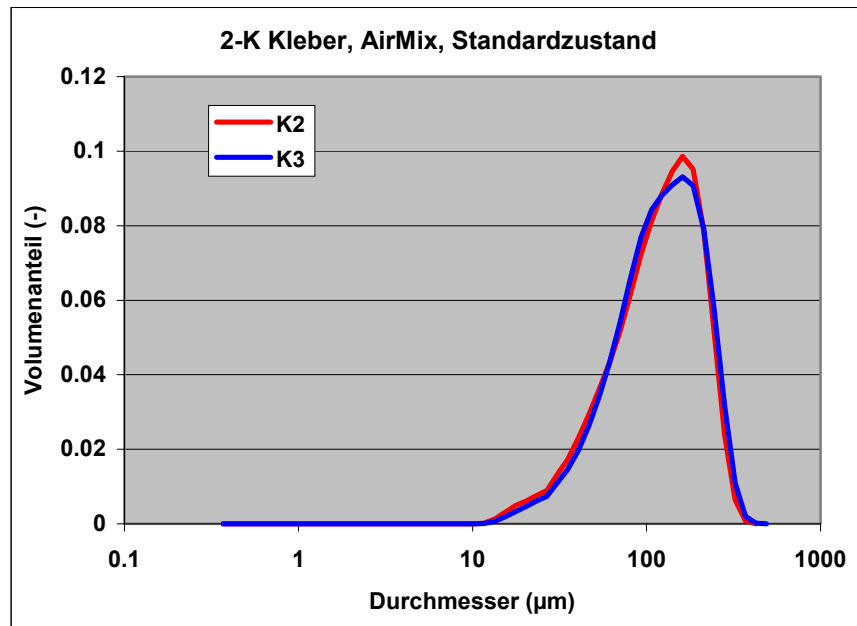


Abb. 24: Gemessene Tropfengrößenverteilungen – Zweikomponentenkleber, AirMix

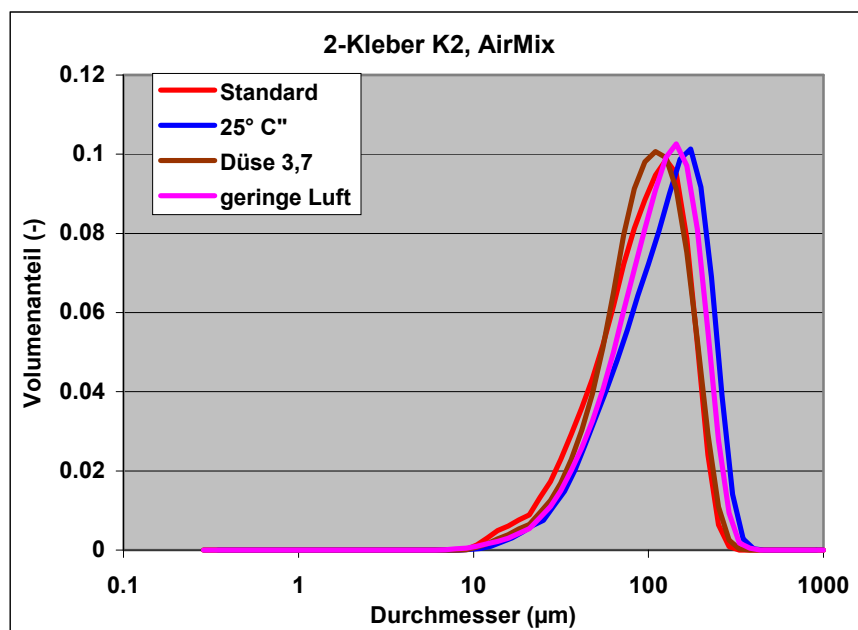


Abb. 25: Gemessene Tropfengrößenverteilungen – Zweikomponentenkleber K2, AirMix

### 6.3.2 Decklack für Schienenfahrzeuge – L8

Es handelt sich um einen Decklack, wie er typischerweise im Schienen- und Nutzfahrzeugbereich eingesetzt wird. Laut vorliegendem Datenblatt ist dieses Material sowohl mit Airless, AirMix und Hochdruckzerstäuber applizierbar. Standardapplikation, die es hier vor allem zu prüfen gilt, ist die Verarbeitung mit AirMix.

Aufgrund des angegebenen breiten Verarbeitungsfensters wurden bei diesem Material Air-Mix, Airless und Hochdruckpistole miteinander verglichen. AirMix- und Airless-Applikation erfolgten mit einer Düse mit 0.26 mm Durchmesser und 100 bar Materialdruck. Die eingestellten AirMix-Luftdrücke betragen 4, 5 und 6 bar. Zum Vergleich wurde weiterhin eine SA-TA RP Hochdruckpistole mit 1,3 mm Düse und 5 bar Zerstäubungsdruck eingesetzt. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Abb. 26 bzw. Tab. 20 miteinander verglichen.

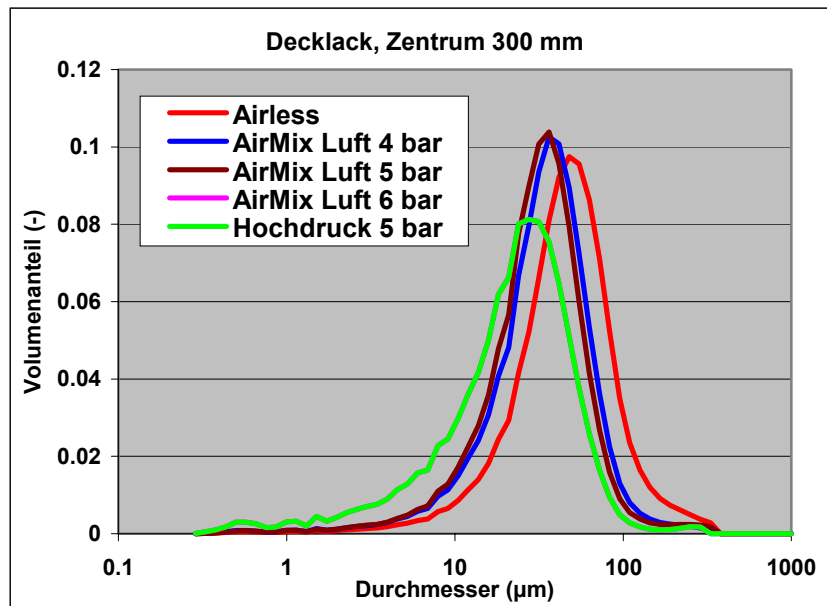


Abb. 26: Gemessene Tropfengrößenverteilungen – Decklack für Schienenfahrzeuge

Gerät	AirMix 4 bar	AirMix 5 bar	AirMix 6 bar	Airless	Hochdruck
thorakal	10 %	11 %	11 %	7 %	23 %
einatembar	60 %	60 %	60 %	56 %	66 %
Verhältnis	0.17 (17 %)	0.18 (18 %)	0.18 (18 %)	0.13 (13 %)	0.35 (35 %)

Tab. 20: APF – relevante Kenndaten - Decklack für Schienenfahrzeuge

Verglichen mit allen anderen Airless- und AirMix-Anwendungen wird hier ein sehr großes Verhältnis thorakal/einatembar bestimmt. Offensichtlich ist dieses Material als Decklack in seinen Eigenschaften so eingestellt, dass es eine feine Zerstäubung und damit eine gute Optik liefert. In diesem Fall sind es die speziellen Materialeigenschaften, welche für die Einstufung der Applikation gemäss TRGS 430 entscheidend sind.

## 6.4 Bestimmung der Viskosität

Mit Hilfe eines Physika-Rotationsviskosimeters wurde das Fließverhalten der Materialien im Bereich von Scherraten zwischen ca. 1 und 1500 1/s. Zur Anwendung kam eine Kegel-Platte Anordnung mit 50 mm Durchmesser und 2° Kegelwinkel.

Nachfolgend sind jeweils die Viskositätskurven der Materialien mit ähnlicher Anwendung miteinander verglichen.

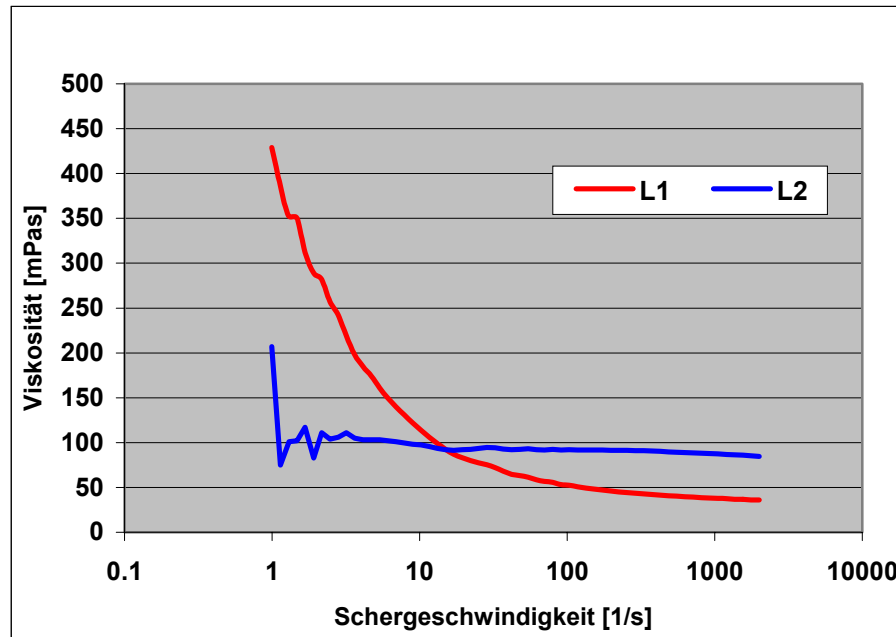


Abb. 27: Gemessene Viskositätskurven – Holzlacke

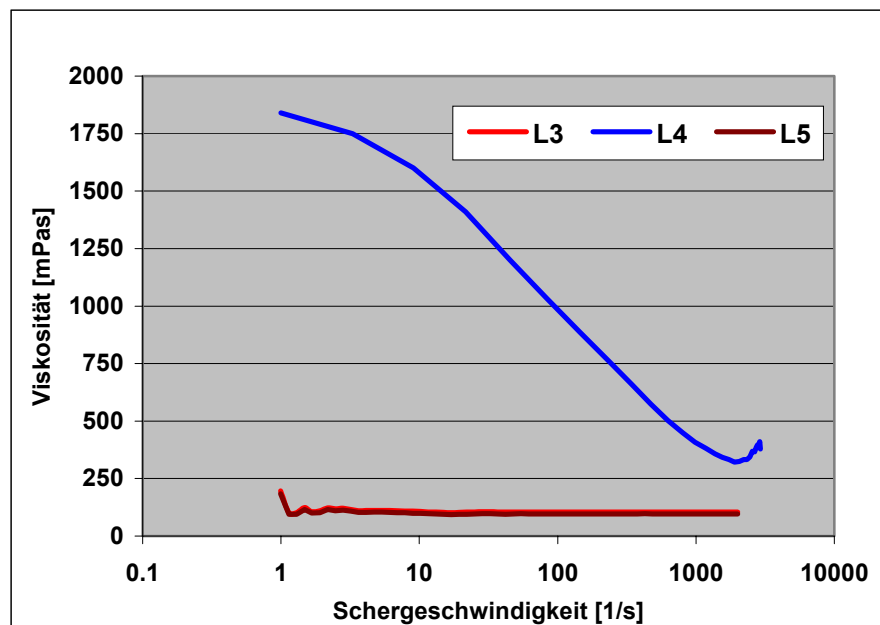


Abb. 28: Gemessene Viskositätskurven – Klarlacke

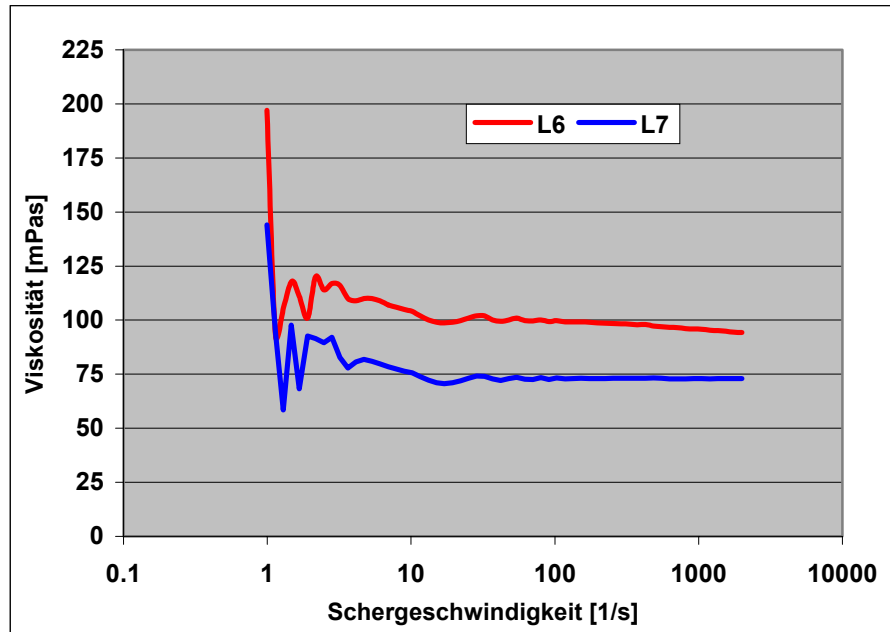


Abb. 29: Gemessene Viskositätskurven – pigmentierte Lacke

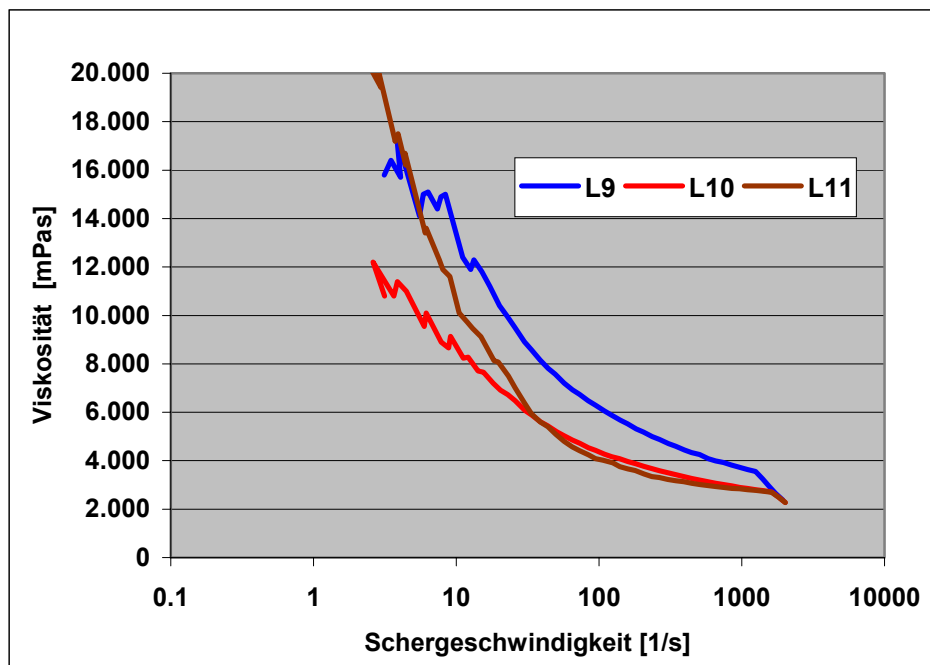


Abb. 30: Gemessene Viskositätskurven – Korrosionsschutzdecklack

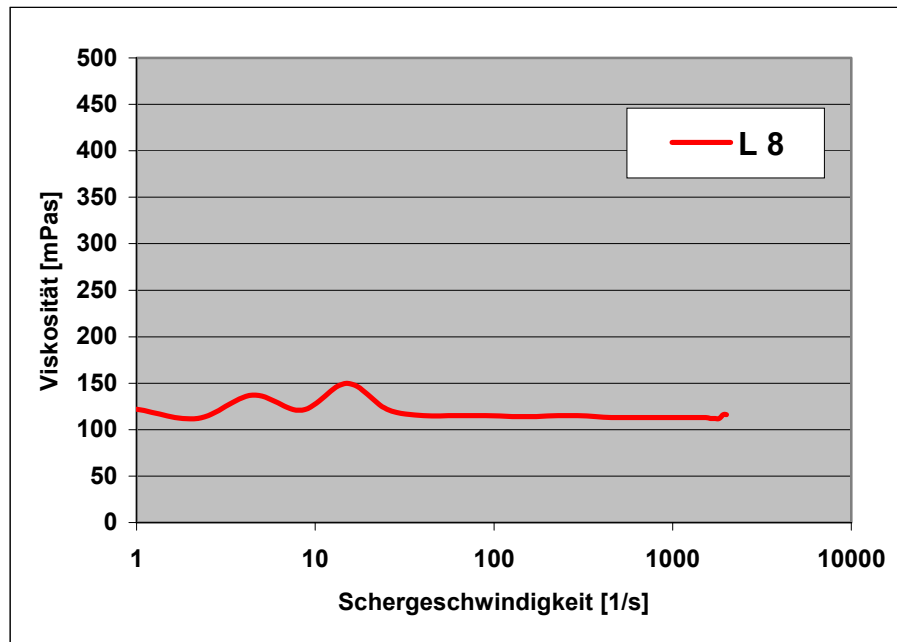


Abb. 31: Gemessene Viskositätskurve – Decklack für Schienenfahrzeuge

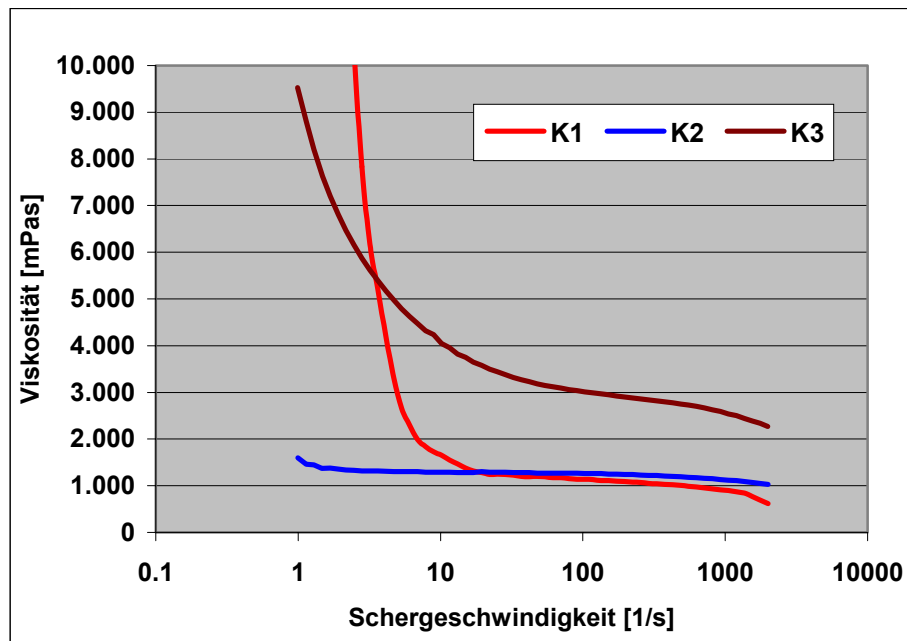


Abb. 32 Gemessene Viskositätskurven – 2 K Kleber

Teilweise konnte aufgrund der komplexen Rheologie der Materialien nicht der komplette Bereich vermessen werden. So kam es bei der Messung der 1-K Klebermaterialien (siehe Abb. 33) bei höheren Scherraten zur Entleerung des Messspaltes und damit zu Fehlmessungen.



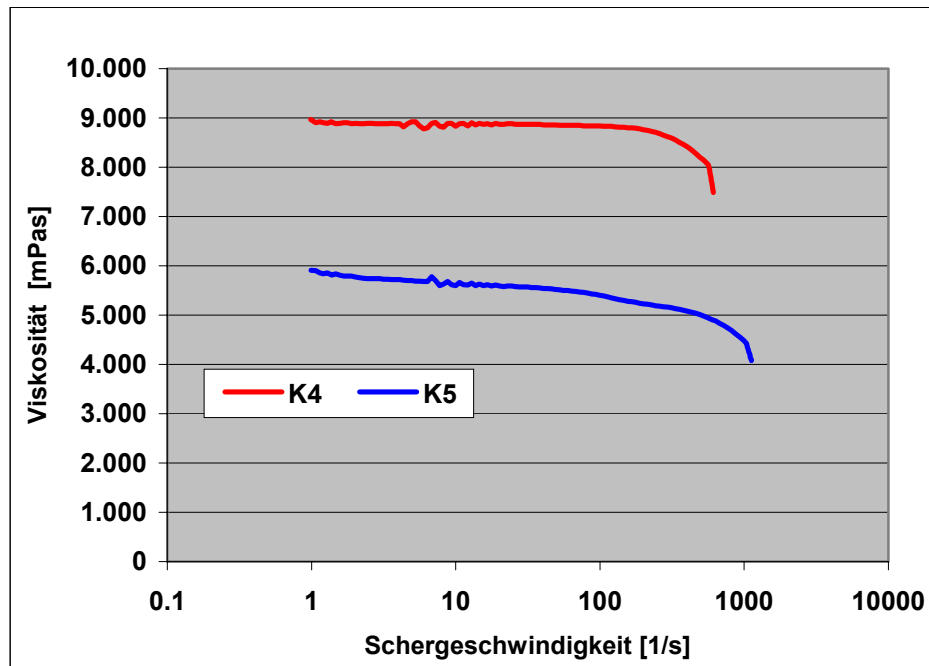


Abb. 33 Gemessene Viskositätskurven – 1 K Kleber

Mit Tab. 21 wurde versucht, die Materialien weitergehend zu charakterisieren. Die zur Angabe der Viskosität ausgewählte Scherrate von 1000 1/s kann ist zufällig gewählt, da viele Materialien ausgeprägte Strukturviskosität (Abnahme der Viskosität mit Erhöhung der Scherrate) aufweisen.

Material	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Viskosität (mPas)	37	87	105	400	96	95
Charakter	Strukturvis./thixotrop	Newtonsche	Newtonsche	Strukturvis./thixotrop	Newtonsche	Newtonsche

Material	L7	L8	L9	L10	L11	K1
Viskosität (mPas)	73	113	3200	2700	2730	900
Charakter	Newtonsche	Newtonsche	Strukturvis./thixotrop	Strukturvis./thixotrop.	Strukturvis./thixotrop	Strukturvis./thixotrop.

Material	K2	K3	K4	K5
Viskosität (mPas)	1120	2800	ca. 7000	ca. 4200
Charakter	Newtonsche	Strukturvis./thixotrop	Newtonsche	Newtonsche

Tab. 21: Vergleich der verschiedenen Materialien hinsichtlich Fließverhalten

Grundsätzlich zeigt sich sehr wohl eine Korrelation zwischen der gemessenen Viskosität und dem Zerstäubungsverhalten bzw. dem Verhältnis thorakal/einatembar. Materialien, die hohe

optische Qualitäten zu erfüllen haben, sind eher niedrigviskos eingestellt und produzieren bei der Applikation im Schnitt einen höheren thorakalen Anteil an der Tropfengrößenverteilung. Insofern sind die Materialeigenschaften von der späteren Anwendung vorgegeben. Auf der anderen Seite reichen die im Rahmen des vorliegenden Projektes durchführbaren rheologische Untersuchungen bei weitem nicht aus, um endgültige Rückschlüsse auf die zerstäubungsrelevanten Materialeigenschaften zuzulassen. Insbesondere konnte keine Unterscheidung zwischen Strukturviskosität und Thixotropie vorgenommen werden. Aus laufenden Untersuchungen mit Automobil-Serienlacken ist jedoch bekannt, dass neben der Scherviskosität weitere Parameter wie die Thixotropie (zeitliche Abhängigkeit des Fließverhaltens) und das viskoelastische Verhalten in Betracht gezogen müssen. Teilweise ist noch ungeklärt, wie diese Parameter reproduzierbar gemessen werden können. Beim Vergleich mit den Herstellerangaben ist zu berücksichtigen, dass diese Werte teilweise auf anderen Verfahren und Messungen bei anderen Scherraten beruhen. Die Angaben können lediglich als grober Richtwert verstanden werden.

## 7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Bestimmung der Anwendungen gemäss TRGS 430 erfolgt auf der Basis des gemessenen Verhältnisses zwischen thorakaler und einatembarer Tropfengrößenfraktion. Hierzu werden gemessene Tropfengrößenverteilungen mit den entsprechenden Konventionen gemäss DIN EN 481 mathematisch gefaltet. Dies erfolgte in der Regel „Punkt für Punkt“ durch Verknüpfung und Interpolation der entsprechenden Größenklassen, lediglich testhalber wurden auch die entwickelten Anpassungsfunktionen an die Konventionen verwendet.

Eine reproduzierbare Ermittlung des Aerosolpenetrationsfaktors kann nur direkt im Spritzstrahl erfolgen, da ansonsten eine Reihe von zusätzlichen Randbedingungen und Einschränkungen zu berücksichtigen wären, welche eine notwendige Verallgemeinerung der Ergebnisse sehr schwierig gestalten:

1. Jedes Applikationsverfahren weist einen physikalischen, durch Tropfengröße und Spritzstrahldynamik bedingten maximalen Auftragswirkungsgrad auf. Bei Beschichtung einer ebenen Platte beträgt dieser z.B. bei HVLP-Pistolen ca. 75 %, bei Hochdruckpistolen ca. 65 % und bei Airless ca. 95 %. Je höher der Auftragswirkungsgrad, desto niedriger die absolute Menge an vagabundierenden, meist sehr feinen Tropfen.
2. Der Auftragswirkungsgrad und damit der entstehende Spritznebel sind weiterhin von der Geometrie des Werkstückes abhängig. Kleine Teile verursachen hohen, sogenannten geometrischen Overspray und damit eine höhere Belastung des Werkers.
3. Die Eigenschaften der Tropfengrößenverteilungen des Oversprays außerhalb des Spritzstrahls sind sehr stark orts- und zeitabhängig. Dabei spielen z.B. Spritzrichtung sowie Ort und Leistung der Absaugung eine große Rolle. Diese Randbedingungen wie auch die Geometrie des Werkstückes müssten vor dem Test festgelegt werden.
4. Außerhalb des Spritzstrahles kommt es sehr schnell zu einer Reduktion der Tropfenkonzentration. Um statistisch repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wären daher längere Messzeiten notwendig, was sich bei Applikationsverfahren mit hoher Ausflussmenge problematisch gestaltet.

Der Untersuchung von HVLP- und Hochdruckzerstäubern wurde relativ breiter Raum gewährt, da diese Applikationsverfahren sehr vielfältig und teilweise auch alternativ eingesetzt werden. Jedes Applikationsverfahren wurde hinsichtlich der Ortsabhängigkeit der Tropfengrößenverteilung überprüft. Dabei ergaben sich nur geringe Unterschiede, z.B. eine Zunahme sehr großer Tropfen im Randbereich pneumatisch erzeugter Spritzkegel (HVLP und



## 8 Schlussfolgerungen

In Abb. 34 sind die bei jeweiliger Standardeinstellung gemessenen Verhältnisse zwischen thorakaler und einatembarer Tropfengrößenfraktion zusammengefasst. Legt man die gemäss TRGS 430 vorgegebene Einstufung zugrunde, so erhielten alle pneumatischen Applikationen, unabhängig ob HVLP oder Hochdruck, den Aerosolpenetrationsfaktor 1. Eine Ausnahme stellt die Kleberapplikation mit Hochdruckpistole dar, die extrem geringe Feinanteile im Spritzstrahl aufweist und der ein Aerosolpenetrationsfaktor von 0,1 zugeordnet werden kann. Technologisch betrachtet stellt diese Applikation durch die großen Düsendurchmesser und die hohen Materialmengen einen Sonderfall dar.

Allen Anwendungen ist gemeinsam, dass die globale Einstufung durch Veränderung der Applikationsparameter nicht nachhaltig verbessert werden kann. Wesentlich wichtiger sind die Materialeigenschaften, wie man z.B. am getesteten PUR-Decklack oder am Industriekleber erkennt. Es erscheint daher nicht möglich zu sein, einer bestimmten Applikationstechnik einen globalen Gerätekenwert zuzuordnen. Vielmehr sind die spezifischen Materialeigenschaften ebenfalls zu berücksichtigen.

Die bei einer HVLP sichtbare Reduktion des Feinanteils im Spritzstrahl, verbunden mit einer Erhöhung des Auftragswirkungsgrades, kommt in den gemäss TRGS 430 vorgegeben Grenzen nicht zum Ausdruck. Sieht man von einer Ausnahme ab (Votteler Holzlack Puridur Mehrschicht), so stellt eine Grenze von 20 % für das Verhältnis thorakal/einatembare eine Möglichkeit dar, diese beiden Zerstäubertypen besser voneinander abzugrenzen. Vergleicht man die beiden Applikationsverfahren miteinander, so stellt man interessanterweise fest, dass sich der einatembare Anteil an den Gesamtverteilungen bis 100 µm praktisch nicht unterscheidet.

Sowohl die untersuchten Airless- wie die AirMix-Anwendungen erhalten gemäss den Ergebnissen einen Aerosolpenetrationsfaktor von 0.4 und damit bei Einführung der oben vorgeschlagenen Revision der Einteilung im gleichen Bereich wie HVLP-Zerstäuber. Da die Werte jedoch in der Regel nahe an der unteren Grenze (1 % thorakal/einatembare) des relevanten Bereiches liegen, sollte konsequenterweise diese Grenze ebenfalls nach oben verschoben werden. Vorgeschlagen wird hier ein Wert von 5 %, so dass Airless und AirMix-Anwendungen gegenüber HVLP-Zerstäuber abgegrenzt werden können.

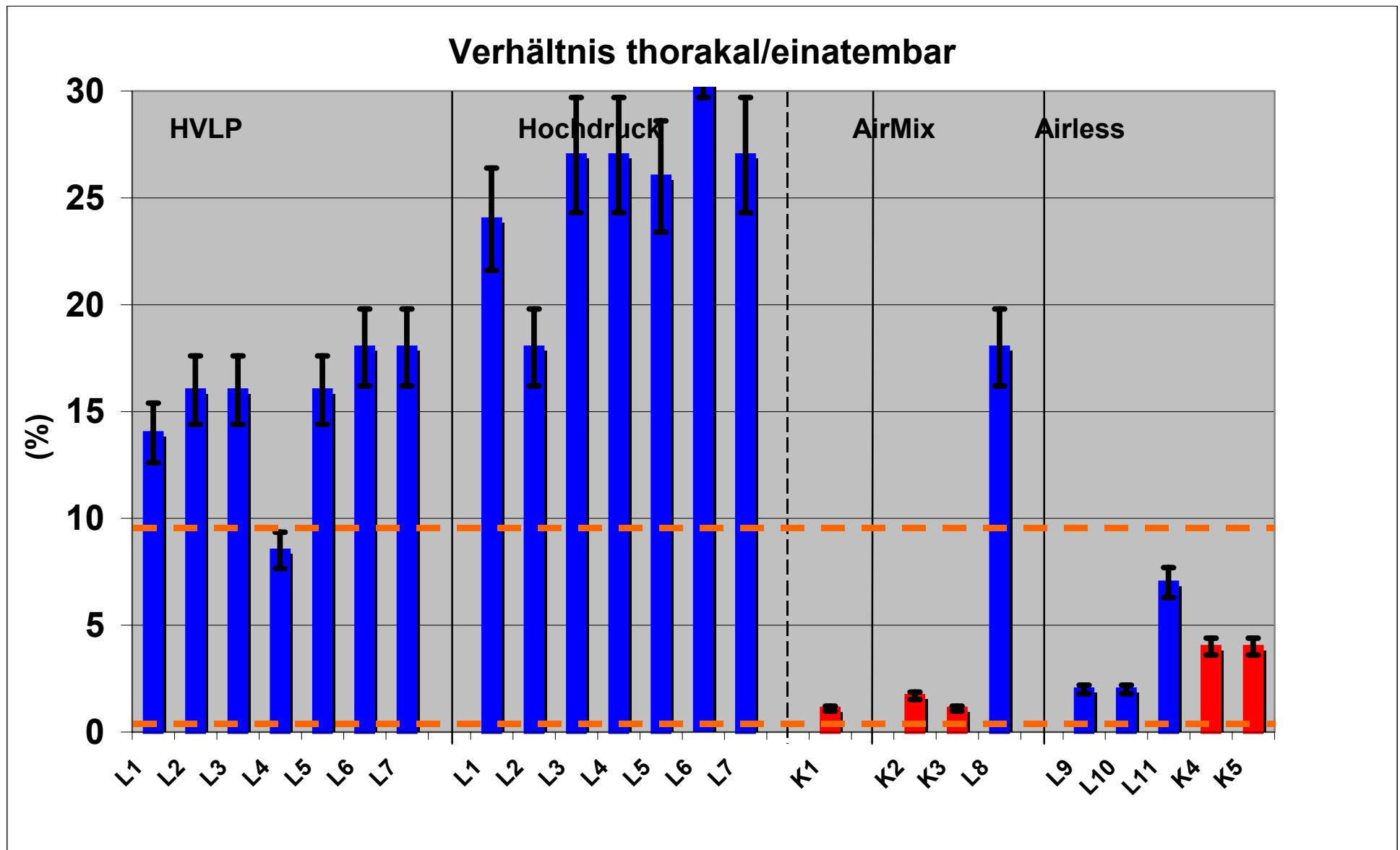


Abb. 34 Gemessenes Verhältnis thorakal/einatembar bei jeweiligem Standardzustand

Mit den bisher in der TRGS 430 festgelegten Grenzen für den Aerosolpenetrationsfaktor kann die von der Projektgruppe Isocyanate beabsichtigte Förderung der nebelarmen Spritzverfahren nicht erreicht werden. Die Diskussion im Projektbegleitkreis hat gezeigt, dass bei der Festlegung der Grenzen für den Aerosolpenetrationsfaktor in der TRGS 430 von einer Log-Normal-Verteilung der durch die Spritzverfahren erzeugten Aerosolverteilungen ausgegangen wurde. Tatsächlich haben sich bei den Untersuchungen von der Log-Normal-Funktion abweichende Verteilungen ergeben. Diese realen Verteilungen führen zu einer Unterbewertung des Feinanteils im Spritzstrahl, wie in Abb. 6 in Abschnitt 5.2 verdeutlicht. Im dargestellten Fall reduziert sich das gemessene Verhältnis thorakal/einatembare von 16 % auf 6 % bei Anwendung der Log-Normal-Anpassungsfunktion. Mit der vorgeschlagenen Anpassung der Grenzen für den Aerosolpenetrationsfaktor gemäss Tab. 23 wird die Intention der TRGS 430 auf die tatsächliche betriebliche Anwendungsmöglichkeit umgesetzt.

<b>Aerosolpenetrationsfaktor</b>	<b>Anteil thorakal/einatembare (TRGS 430 03/2002)</b>	<b>Anteil thorakal/einatembare (Änderungsvorschlag)</b>
1	größer 10 %	größer 20 %
0.4	zwischen 1 % und 10 %	zwischen 5 % und 20 %
0.2	kleiner als 1 %	kleiner als 5 %

Tab. 23: Vorgeschlagene Modifikationen zur Berechnung des Aerosolpenetrationsfaktors

## Literatur

- [1] J. Domnick, M. Sommerfeld, A. Lindenthal, M. Rüger: Oversprayarme Spritzlackiertechnik, Metalloberfläche 50 (12), 1996 und 51 (1), 1997
- [2] J. Domnick, P. Svejda: Auftragswirkungsgrad von Lackzerstäubern, Metalloberfläche 52 (3), 1998
- [3] C. Tropea: Strömungsmesstechnik in der industriellen Forschung, Kurzlehrgang Technische Universität Darmstadt, Oktober 1999
- [4] J. Domnick, T. Steigleder: Sprühstrahlcharakterisierung mit optischen Messverfahren, In Jahrbuch der Lackiertechnik 2000, Hrsg. D. Ondratschek, Vincentz-Verlag, Hannover