

Peter Kwasny GmbH
Abt. Forschung und Entwicklung
Heilbronner Straße 96
74831 Gundelsheim

Entwicklung eines stabilen Dispersions-Lackaerosols auf Wasserbasis für Lacksprühdosen zur signifikanten Lösemittleinsparung

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem Az.: 34768 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Roland Kern & Daniel Fenzl

Januar 2021



Az	34768	Referat	01-21/2	Fördersumme	122.593 €
----	--------------	---------	----------------	-------------	------------------

Antragstitel "Entwicklung eines stabilen Dispersions-Lackaerosols auf Wasserbasis für Lacksprühdosen zur signifikanten Lösemittelleinsparung"

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
1 Jahr und 6 Monate	13.10.2018		

Zwischenberichte	12.08.2019 / 04.02.2020
------------------	-------------------------

Bewilligungsempfänger	Peter Kwasny GmbH Heilbronner Str. 96 74831 Gundelsheim	Tel 0049 (0)6269-95-0 Fax 0049 (0)6269-95-79
		Projektleitung Dr. Roland Kern
		Bearbeiter Daniel Fenzl, Angela Ernst

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

In herkömmlichen Lacksprühdosen kommen organische Lösemittel und Treibgas zum Einsatz, welche sowohl direkt die Gesundheit von Mensch und Tier gefährden als auch zum Treibhauseffekt sowie zur Bildung von bodennahem Ozon beitragen. Zur maximalen Umweltentlastung ist daher eine Minimierung oder gar ein Wegfall der organischen Lösemittel erforderlich.

Die bis dato im Markt verfügbaren wässrigen Aerosole enthalten als Lackbasis meist Alkyd-Bindemittel und auch höhere Anteile an organischen Alkoholen. Neben der langsamen Trocknung zeigen diese Systeme zudem ungenügende Zerstäubungseigenschaften, intensiven Geruch sowie mangelhafte Beschichtungsoberflächen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sollte die Entwicklung von wässrigen und qualitativ hochwertigen Lackaerosolen für den Endverbraucher erfolgen. Hierbei sollten neue ökologische Standards gesetzt werden. Diese beinhalten im Speziellen

- Minimierung des Anteiles organischer Lösemittel (VOC) und Treibmittel
- Erhöhung der Produktsicherheit erkennbar am Wegfall des Flammensymbols auf den Aerosoldosen
- Signifikante Verringerung des Geruchs sowie der Lungengängigkeit der Aerosoltröpfchen
- Beibehaltung der hochwertigen Eigenschaften des bisherigen Produktportfolios zur Erzielung einer breiten Verbraucherakzeptanz

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Entwicklungsprojekt beinhaltet folgende Arbeitsschritte und Methoden:

- Erstellung eines detaillierten Anforderungsprofils mit technischen Spezifikationen unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben
- Untersuchung und Auswahl verschiedener wasserverdünnbarer Bindemittel auf Dispersionsbasis hinsichtlich Aerosolstabilität unter Beachtung des Anforderungsprofils
- Entwicklung geeigneter Lackformulierungen hinsichtlich Aerosolstabilität und Erfüllung des Anforderungsprofils
- Entwicklung von Aerosolformulierungen hinsichtlich Gesundheitsaspekten / Lungengängigkeit

Ergebnisse und Diskussion

Mittels einfacher Modellsysteme aus wässrigen Bindemitteln, Wasser und Treibgas wurden verschiedene aerosolstabile Bindemittel mit geeigneten Eigenschaftsprofilen identifiziert. Die Auswahl fiel auf eine Kombination aus einer schnell trocknenden Polyurethan-Dispersion und einem vernetzenden Alkyd-Bindemittel mit guten Beständigkeitseigenschaften.

Auf Basis dieser Rohstoffkomponenten war es möglich, eine aerosolstabile Lackformulierung mit ausreichender Trocknungsgeschwindigkeit bei gleichzeitig guten Verlaufseigenschaften sowie bei einem stark reduzierten Anteil an Co-Lösemitteln auszuarbeiten. Mittels entsprechender Additivierung konnten die Applikations- und Beschichtungseigenschaften signifikant verbessert werden.

Nach der Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Entzündbarkeit von Aerosolen konnte die Aerosolformulierung derart modifiziert werden, dass das gestellte Anforderungsprofil fast vollständig erfüllt wurde. Hierbei gelang es insbesondere, durch Reduzierung des Anteiles an organischem Lösemittel sowie Menge an eingesetztem Treibgas eine Verringerung des VOC-Gehaltes von größer 65 % zu realisieren. Hiermit konnte sowohl die Nachhaltigkeit der Aerosolprodukte signifikant erhöht werden als auch eine maximale Entlastung der Umwelt erzielt werden.

Mittels intern durchgeführter Messungen sowie durch Verifizierung der Resultate durch die BAM konnte gezeigt werden, dass die neu entwickelten, praktisch geruchsneutralen Aerosolformulierungen als nicht-entzündbar eingestuft werden können. Die Zertifizierung der finalen Formulierung durch die BAM steht noch aus.

Untersuchungen mit Laserbeugung sowie Hochgeschwindigkeitsmikroskopie zeigten, dass mit der Reduzierung des Anteiles an Treibgas in der Aerosolformulierung auch eine Verringerung des lungengängigen Anteiles des Aerosol-Sprühnebels verbunden war. Bedingt durch die Reduktion der ermittelten aveolengängigen Partikel um ca. 75 % kann von einer signifikanten Verringerung der Beeinträchtigung der Gesundheit ausgegangen werden. Eine Weiterentwicklung der Messmethodik ist jedoch erforderlich.

Hinsichtlich der Optimierung der Korrosionsschutzeigenschaften der nicht-entzündlichen Aerosolformulierungen sind jedoch aufgrund der relativ hohen inneren Oberfläche der Korrosionsschutzpigmente und der sich daraus ergebenden Erhöhung der Viskosität speziell im vorliegenden Bereich niedriger Treibgasgehalte umfangreichere Entwicklungsarbeiten zu erwarten.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Als Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse befinden sich Veröffentlichungen in Fachzeitschriften sowie Vortragspräsentationen in Planung.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich aussagen, dass die im Zuge des Projektes ausgearbeiteten Aerosolformulierungen die gestellten Anforderungen fast vollständig erfüllen. Dies gilt in speziellem Maße hinsichtlich der ökologischen Anforderungen in Bezug auf die Minimierung des Anteiles an organischen Lösemitteln und Treibgas. Zudem konnte die Lungengängigkeit der Aerosolpartikel signifikant reduziert werden. Hierbei konnten gleichzeitig die anwendungstechnischen Eigenschaften im Vergleich zu den bislang verfügbaren Wasser-basierten Systemen beibehalten werden. Das gleiche gilt auch in Bezug auf die bisherigen Lösemittel-basierten Aerosolssysteme. Bei den nicht entzündbaren Formulierungen müssen jedoch Abstriche hinsichtlich der Trocknungsgeschwindigkeit, der Zerstäubung sowie der Kratzfestigkeit in Kauf genommen werden.

Zukünftige Entwicklungsarbeiten sind auf folgende Zielsetzungen ausgerichtet:

- Modellierung des Fertigungsprozesses auf eine neu entwickelte Produktionsanlage
- Einsatz automatischer Mischstationen für Pigmentpasten mit entsprechender Farbmatrik
- Optimierung der Korrosionsschutzeigenschaften der nicht-entzündlichen Aerosolformulierungen
- Verhinderung der Lungengängigkeit von wässrigen Aerosolen durch Beeinflussung der Tröpfchengröße durch die Lack- und Aerosolformulierung, inklusive der Weiterentwicklung und Verifizierung der Messtechnik

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis von Bildern und Tabellen	6
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	7
Zusammenfassung	8
1. Einleitung	9
2. Hauptteil	11
2.1 Anforderungsprofil für die Lacksprühdose	11
2.2 Optimierung der Applikations- und Beschichtungseigenschaften Wasser-basierter Aerosolformulierungen	12
2.2.1 Optimierung des bisherigen Entwicklungsstandes	12
2.2.2 Screening geeigneter Bindemittel	12
2.2.3 Optimierungsarbeiten unter Variation der Bindemittel-Basis	15
2.2.4 Vereinfachtes Fertigungskonzept für die wässrigen Aerosollacke	16
2.3 Entwicklung einer nicht-entzündbaren Produktqualität	17
2.3.1 Kriterien für die Einstufung von Aerosolprodukten als nicht-entzündbar	17
2.3.2 Versuchsaufbau und Durchführung des Fasztests	18
2.3.3 Prüfmethodik	19
2.3.4 Ermittlung der maßgebenden Faktoren für die Entzündbarkeit von Aerosolen	19
2.3.5 Effekte der Haupteinflussfaktoren für die Entzündbarkeit auf die Applikationseigenschaften der Aerosole	26
2.3.6 Feinjustierung des Treibgasgehaltes	30
2.3.7 Optimierung des Sprühverhaltens	31
2.3.8 Korrosionsschutzeigenschaften der Aerosolformulierungen	35

2.4	Reduzierung der Lungengängigkeit von Aerosolgemischen	35
2.4.1	Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Aerosolen mittels Laserbeugung	35
2.4.2	Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Aerosolen mittels Hochgeschwindigkeitskamera	40
2.5	Bewertung der Projektergebnisse	42
2.6	Verbreitung der Projektergebnisse	45
3.	Fazit	46
	Literaturverzeichnis	47

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

1	Seite 11	Tabelle 1: Anforderungskriterien für die zu entwickelnde Spraydose
2	Seite 13	Tabelle 2: Grundlegende Beschichtungseigenschaften der untersuchten aerosolstabilen Bindemittel
3	Seite 14	Tabelle 3: Stabilität gegenüber Treibgas sowie Sprüheigenschaften der untersuchten aerosolstabilen Bindemittel
4	Seite 15	Tabelle 4: Eigenschaften und Kennwerte der neuen Aerosolformulierung
5	Seite 18	Abbildung 3: Schematische Darstellung der Testapparatur nach UN-Prüfhandbuch, Abschnitt 31
6	Seite 26	Tabelle 20: Quantitativer Einfluss der einzelnen Haupteinflussfaktoren auf die Werte der Äquivalenzzeit bzw. der Deflagrationsdichte
7	Seite 37	Abbildung 10: Schematische Darstellung der mittels Laserbeugung primär ermittelten Partikelgrößenverteilungen sowie der durchgeführten Korrektur
8	Seite 39	Tabelle 28: Werte der Aussprührate, der Partikelgrößenverteilung sowie der lungengängigen Fraktionen in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern der Aerosolformulierungen
9	Seite 41	Tabelle 29: Vergleich der mit den Messverfahren der Laserbeugung bzw. Bildanalyse erhaltenen Kennwerte der Partikelgrößenverteilungen der Aerosoltröpfchen
10	Seite 42	Diagramm 1: Vergleich der Zusammensetzungen Lösemittel-basierter Aerosole mit den neuen Wasser-basierten Formulierungen
11	Seite 43	Diagramm 2: Vergleich der VOC-Werte Lösemittel-basierter Aerosole mit den neuen Wasser-basierten Formulierungen
12	Seite 43	Tabelle 30: Vergleich der Eigenschaftswerte der neu entwickelten Aerosolformulierungen mit dem Anforderungsprofil
13	Seite 44	Tabelle 31: Vergleich der Eigenschaftswerte der neu entwickelten Aerosolformulierungen mit einem Standard-Lösemittel-Produkt auf NC-Basis

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

DME	Dimethylether
VOC	Volatile Organic Compounds
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
TSD	Trockenschichtdicke einer Beschichtung
µm	Mikrometer
Gew.%	Gewichtsprozent
SG	Spritzgang: Die Beschichtung eines Substrates durch Bewegung des Sprühstrahles von links nach rechts und wieder zurück sowie Applikation dieses Sprühmusters auf dem Substrat von oben nach unten und wieder zurück.
KW	Kennwert, interne Bewertungsskala von 0 (ungeeignet) bis 10 (sehr gut)
Gt	Gitterschnittkennwert nach DIN EN ISO 2409
Ri	Kennwert für den Grad der Rostbildung nach DIN EN ISO 4628-3
hochglzd	hochglänzend
Abfüllverhältnis	Gewichtsverhältnis von Flüssiglack zu Treibgas
nfA	nichtflüchtiger Anteil
PU	Polyurethan
t _{eq}	Äquivalenzzeit (bei Flammtest)
D _{Def}	Deflagrationsdichte (bei Flammtest)
kJ	Kilojoule
MBA	Musterbuchauszug
Aussprührate	Menge an durch den Sprühkopf austretendem Aerosolgemisch pro Zeiteinheit
Sprühkopf 030	Sprühkopf mit höherem Materialdurchsatz
Sprühkopf 010	Sprühkopf mit geringerem Materialdurchsatz
RTP	Restricted Tail Piece, entspricht dem Durchmesser der Bohrung am unteren Ende des Ventilkorbs an der Aufnahme des Steigrohres
RAL	Farbtonregister
D _{v50}	Wert des Partikeldurchmessers einer volumengewichteten Partikelgrößenverteilung, unter welchem 50% der Partikeldurchmesser zu finden sind

Zusammenfassung

In diesem Entwicklungsprojekt sollte ein stabiles Lackaerosol auf Wasserbasis mit signifikanter Lösemittel-Einsparung und Wegfall der Kennzeichnung mit Flammensymbol ausgearbeitet werden.

Hierzu wurden mittels einfacher Modellsysteme aus wässrigen Bindemitteln, Wasser und Treibgas verschiedene aerosolstabile Bindemittel mit geeigneten Eigenschaftsprofilen identifiziert. Die Auswahl fiel auf eine Kombination aus einer schnell trocknenden Polyurethan-Dispersion und einem vernetzenden Alkyd-Bindemittel mit guten Beständigkeitseigenschaften.

Mittels Untersuchungen hinsichtlich der Eignung verschiedener Innenlackierungen bzw. Passivierungsschichten im Dosenkörper bzw. am Ventil konnte eine Kombination von Dosenkomponenten ermittelt werden, welche einen langfristigen Korrosionsschutz des Dosenmantels und damit einen dauerhaften Schutz gegen Leckage der Aerosoldosen gewährleistet.

Auf Basis dieser Rohstoffkomponenten war es möglich, eine aerosolstabile Lackformulierung mit ausreichender Trocknungsgeschwindigkeit bei gleichzeitig guten Verlaufseigenschaften sowie bei einem stark reduzierten Anteil an Co-Lösemitteln auszuarbeiten. Mittels entsprechender Additivierung konnten die Applikations- und Beschichtungseigenschaften signifikant verbessert werden.

Nach der Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Entzündbarkeit von Aerosolen konnte die Aerosolformulierung derart modifiziert werden, dass das gestellte Anforderungsprofil fast vollständig erfüllt wurde.

Hierbei gelang es insbesondere, durch Reduzierung des Anteiles an organischem Lösemittel sowie Menge an eingesetztem Treibgas eine Verringerung des VOC-Gehaltes von größer 65 % zu realisieren. Hiermit konnte sowohl die Nachhaltigkeit der Aerosolprodukte signifikant erhöht werden als auch eine maximale Entlastung der Umwelt erzielt werden.

Mittels intern durchgeführter Messungen sowie durch Verifizierung der Resultate durch die BAM konnte gezeigt werden, dass die neu entwickelten Aerosolformulierungen als nicht-entzündbar eingestuft werden können. Die Zertifizierung der finalen Formulierung durch die BAM steht noch aus.

Untersuchungen mit Laserbeugung sowie Hochgeschwindigkeitsmikroskopie zeigten, dass mit der Reduzierung des Anteiles an Treibgas in der Aerosolformulierung auch eine Verringerung des lungengängigen Anteiles des Aerosol-Sprühnebels verbunden war. Bedingt durch die Reduktion der ermittelten aveolengängigen Partikel um ca. 75 % kann von einer signifikanten Verringerung der Beeinträchtigung der Gesundheit ausgegangen werden. Eine Weiterentwicklung der Messmethodik ist jedoch erforderlich.

Erste Vorversuche unter Verwendung verschiedener Korrosionsschutzpigmente zeigten auf Stahlsubstraten im Salzprühtest vielversprechende Resultate. Hinsichtlich der Optimierung der Korrosionsschutzeigenschaften der nicht-entzündlichen Aerosolformulierungen sind jedoch aufgrund der relativ hohen inneren Oberfläche der Korrosionsschutzpigmente und der sich daraus ergebenden Erhöhung der Viskosität speziell im vorliegenden Bereich niedriger Treibgasgehalte umfangreichere Entwicklungsarbeiten zu erwarten.

1. Einleitung

Die Peter Kwasny GmbH gilt als Qualitäts- und Technologieführer für professionelle Sprühlacksysteme und Aerosoltechnologien. Die produzierten Lacksprays erfüllen in hohem Maße die verschiedensten Anforderungen der internationalen Automobil- und Lackindustrie, des Fachhandels, der verarbeitenden Industrie sowie der Baumärkte.

Herkömmliche Lackspraydosen verwenden organische Löse- und Treibmittel zur Erzeugung des notwendigen Innendrucks von 3,5 bis 4,5 bar und für eine feine Zerstäubung / Aerosolbildung. Als Treibmittel kommen hierbei beispielsweise Propan, n-Butan und Dimethylether zum Einsatz.

Als Lösemittel werden bevorzugt Ketone, Ester, Ether, Aromaten und Aliphaten verwendet. Die oftmals hohen Dampfdrücke dieser leicht flüchtigen organischen Verbindungen, der sogenannten VOCs (engl. Volatile Organic Compounds), haben neben dem lacktechnischen Nutzen auch einen direkten Einfluss auf Mensch und Umwelt. In kleinen Skalen von Zentimetern bis Metern führt direktes Einatmen oder Berühren mit der Haut zur Aufnahme dieser Substanzen in den Körper und Metabolisierung überwiegend in der Leber. Die Substanzen selbst oder deren Metaboliten können zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen (Toxizität). In großen Skalen von Kilometern bis globaler Reichweite werden VOCs in der Luft durch Hydroxyl-Radikale (OH), dem „Waschmittel der Atmosphäre“ und zu einem geringen Teil durch Ozon (O₃) selbst durch Photooxidation entfernt. Zusammen mit Stickoxiden (NO_x) aus anthropogenen (Verkehr, Industrie) und biogenen Emissionen (Blitze, natürliche Waldbrände) führt die Photooxidation von VOCs zur signifikanten Bildung bodennahen Ozons über natürliche Niveaus hinaus (Photo- oder Los-Angeles-Smog, anschließend Feinstaubbildung). Dieser sich potenzierende Effekt führt ebenfalls zu Risiken für Mensch und Umwelt.

Als Treibgasalternative ist das inerte Kohlendioxid (CO₂) langfristig nur eine Lösung, falls es nachhaltig gewonnen wird – mit keiner negativen Klimabilanz im Kontext der globalen Erwärmung.

Zur maximalen Umweltentlastung ist daher eine Minimierung oder gar ein Wegfall organischer Lösemittelprodukte von Vorteil. Dabei haben die Bautenlacke auf wässriger Basis vor jetzt ca. 30 Jahren neue Standards gesetzt und werden überwiegend mit dem Blauen Engel ausgezeichnet. Baumärkte bieten heute mehr als 90% Wasserlacke und Dispersionen an, während im Bereich der Lackaerosole nahezu nur Lösemittel-basierte Produkte zu finden sind.

Würden alle europäischen Sprühlackhersteller (Modellcharakter) diesem Vorbild folgen, könnten sich Einsparungen an organischen Lösemitteln im Bereich von 20.000 Tonnen ergeben.

In Europa gibt es drei bis fünf Hersteller von aerosolstabilen Wasserlacken. Meistens sind die entsprechenden Lacke auf Basis von langsam trocknenden Alkyd-Bindemitteln und in starkem Maße mit Alkoholen als Lösemittel verdünnt.

Die Nachteile der aktuell verfügbaren Wasserlack-Aerosole bestehen in:

- Mangelhafte Zerstäubung (Atomisierung)
- Sehr langsame Trocknung
- Mangelhafte Qualität der Lackoberflächen
- Teilweise hoher Lösemittel-Gehalt (z.B. Alkohole)
- Intensiver Geruch
- Gesundheitsrisiken wie Lungengängigkeit
- Kennzeichnungspflicht mit Flammensymbol

Die Peter Kwasny GmbH hat zwar bereits die ersten stabilen wasserbasierten Aerosolformulierungen unter dem Produkt „Belton Free“ in die Dosen gebracht, jedoch mit den Nachteilen der Brennbarkeit, mangelhafte Haftung auf Metallen, fehlender Korrosionsschutz und noch nicht untersuchter Lungengängigkeit. Zudem sind hier noch Optimierungen hinsichtlich der Zerstäubung sowie der Qualität der Beschichtungsoberflächen erforderlich. Zurzeit existieren daher keine Aerosol-stabilen Lackformulierungen mit geeigneten Sprüheigenschaften, ohne Flammensymbol und mit ausreichendem Korrosionsschutz auf dem Markt.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sollte die Entwicklung von wässrigen und qualitativ hochwertigen Lackaerosolen für den Endverbraucher erfolgen. Hierbei sollten neue ökologische Standards gesetzt werden.

Diese beinhalten im Speziellen

- Minimierung des Anteiles organischer Lösemittel (VOC) und Treibmittel
- Erhöhung der Produktsicherheit erkennbar am Wegfall des Flammensymbols auf den Aerosoldosen
- Signifikante Verringerung des Geruchs sowie der Lungengängigkeit der Aerosoltröpfchen
- Entwicklung innovativer Lösungen hinsichtlich Inhaltsstoffen und Dosenkomponenten sowie Lackformulierungen und Ventil- und Sprühkopfdesign
- Beibehaltung der hochwertigen Eigenschaften des bisherigen Produktportfolios zur Erzielung einer breiten Verbraucherakzeptanz
- Zusätzliche Erhöhung der Nachhaltigkeit mittels des Einsatzes des Treibgases DME aus ökologischer Gewinnung

Der geplante Technologiewechsel soll eine deutliche Umweltentlastung bewirken und hierbei langfristig zum Ersatz des gesamten Portfolios von Lösemittel-haltigen Lacksprays durch wässrige Technologien mit vergleichbaren Spezifikationen führen.

Zur Erreichung der beschriebenen Zielsetzung ist die Entwicklung aerosolstabiler Wasserlacke erforderlich, welche qualitativ vergleichbar mit dem Anspruch der Lösemittel-basierten Aerosoldosen sind und gleichzeitig den zurzeit machbaren höchsten ökologischen Standard erreichen, wobei Gesundheits- und Gefahrenaspekte ebenfalls berücksichtigt werden sollen.

Das Entwicklungsprojekt beinhaltete folgende Arbeitsschritte und Methoden:

- Erstellung eines detaillierten Anforderungsprofils mit technischen Spezifikationen unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben
- Untersuchung und Auswahl verschiedener wasserverdünnter Bindemittel auf Dispersionsbasis hinsichtlich Aerosolstabilität unter Beachtung des Anforderungsprofils
- Ermittlung geeigneter Dosenkomponenten zur Sicherstellung eines langfristigen Korrosionsschutzes des Dosenmantels sowie des Ventils
- Entwicklung geeigneter Lackformulierungen hinsichtlich Aerosolstabilität und Erfüllung des Anforderungsprofils
 - Rezeptentwicklung
 - Aufbau und Inbetriebnahme einer Prüfmethode zur Bestimmung der Entzündbarkeit von Aerosolen
 - Zertifizierung durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
- Entwicklung von Aerosolformulierungen hinsichtlich Gesundheitsaspekten / Lungengängigkeit
 - Anforderungsanalyse für die Aerosolformulierungen
 - Durchführung von Untersuchungen hinsichtlich der Partikelgrößenverteilungen von Aerosolen am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart

2. Hauptteil

2.1 Anforderungsprofil für die Spraydose

Als Anforderungsprofil für ein stabiles Lackaerosol auf Wasserbasis mit signifikanter Lösemittel-Einsparung und Wegfall der Kennzeichnung mit Flammensymbol wurden folgende Kriterien definiert:

Anforderungskriterium	Sollwert
Reduktion Lösemittelgehalt	> 90 %
Reduktion VOC-Gehalt	> 50 %
Reduktion CO ₂ -Emission	> 40 %
Kennzeichnung mit Flammensymbol	nein
Verringerung der Lungengängigkeit	> 70 %
Füllvermögen	≥ 20 µm/SG
Ergiebigkeit bei TSD 50 µm	≥ 0,4 m ² /Dose
Zerstäubung	gut, ≥ KW 7
Geruch	neutral, ≥ KW 8
Deckvermögen (in Abhängigkeit vom Farbton)	1 – 3 SG
Standvermögen (TSD)	≥ 20 µm
Überlackierbarkeit mit sich selbst	≤ 3 Tage
Trocknung (deckende Lackierung)	
Erreichung Trockengrad Tg 1 ¹	≤ 3 h
Erreichung Trockengrad Tg 3 ¹	≤ 12 h
Erreichung Trockengrad Tg 5 ¹	≤ 3 Tage
Lackoberfläche	gut, ≥ KW 7
Glanzgrade	hochglänzend bis matt
Härte / Kratzbeständigkeit	gut, ≥ KW 6
Haftfestigkeit auf Stahl ²	Gt ≤ 1
Chemikalienbeständigkeit gegen Wasser und Haushaltsreiniger	gut, ≥ KW 7
Korrosionsschutz Salzsprühnebeltest ³ über 24 Stunden	Ri ≤ 1
Korrosion von Dosenkomponenten	nein
Einsatz ökologisches Treibgas	ja

Tabelle 1: Anforderungskriterien für die zu entwickelnde Spraydose

Anforderungen an die eingesetzten Bindemittel

- Möglichst geringe Anteile an organischen Lösemitteln sowie sonstigen Gefahrstoffen, speziell von Allergenen
- Ausreichende Stabilität gegenüber Treibgas
- Korrosionsschutzeigenschaften

Anforderungen an die wässrigen Lacksysteme

- Geeignete Zerstäubungseigenschaften im Hinblick auf die Einhaltung der Vorgaben bzgl. der Reduktion des VOC-Gehaltes sowie der Entzündbarkeit von Aerosolen

Anforderungen an die Aerosoldose

- Keine Rostbildung an Dosenmantel, Dosenboden oder Dosendom, speziell im Bereich der Nahtstellen

Anforderungen an das Ventil

- Keine Rostbildung am Ventilteller

2.2 Optimierung der Applikations- und Beschichtungseigenschaften Wasser-basierter Aerosolformulierungen

2.2.1 Optimierung des bisherigen Entwicklungsstandes

Die vor dem Beginn des Projektes ausgearbeitete wässrigen Aerosolformulierungen basierten auf einer Bindemittelkombination aus einer Acrylat-Dispersion und einer PU-Dispersion. Das Abfüllverhältnis des nicht weiter verdünnten Flüssiglackes mit DME als Treibgas lag bei 68 zu 32 Gewichtsanteilen.

Die Aerosolformulierungen wiesen zwar schnelle Trocknungseigenschaften auf, jedoch war eine weitere Optimierung der Applikations- und Beschichtungseigenschaften zur Erzielung eines marktgerechten Systems zwingend erforderlich. Hierbei standen zunächst die Sprüheigenschaften im Vordergrund, da hinsichtlich des Sprühbildes eine nicht ausreichende Zerstäubung unter Bildung größerer Tröpfchen zu beobachten war. Ein weiterer negativer Aspekt bestand im Gehalt an Lösemittel Butylglykol in Höhe von ca. 1,3 Gewichtsprozent bezogen auf den Flüssiglack, für welches eine signifikante Verschärfung der Einstufung als Gefahrstoff bevorstand.

2.2.2 Screening geeigneter Bindemittel

Verschiedene wässrige Bindemittel und Bindemittelklassen wurden in einfachen Modellsystemen hinsichtlich deren Stabilität gegenüber Treibgas bzw. Ethanol sowie deren grundlegenden Beschichtungseigenschaften untersucht. Diese Untersuchungen wurden parallel zu den nachfolgenden Entwicklungsarbeiten weitergeführt.

Die bei den untersuchten Bindemitteln, welche ausreichende Stabilitätseigenschaften gegenüber DME aufwiesen, erhaltenen Resultate sind in den nachfolgenden Tabellen vergleichend dargestellt.

			Rakelaufzug 200 µm			Trocknung		
Bezeichnung	Bindemittelart	Eigenfarbe	auf Glas	auf Stahl	auf Aluminium	Tg 1	Tg 3	Tg 5
Bindemittel 01	Alkyd, aliphatisch PU modifiziert	weiß	glatter Verlauf; klar transparent; Nadelstiche	kein Rost	leichter Gelbstich	1 h	1:45 h	2 h
Bindemittel 02	PU-Dispersion	weiß	Luft einschüsse über komplette Fläche; klar transparent	kein Rost; Kocher	Rissbildung	1:15 h	1:45 h	2:15 h
Bindemittel 03	Acryl-Emulsion	leicht gelb; transparent	Rissbildung häufig; klar transparent	Rost; Rissbildung und Enthaftung	Rissbildung	1 h	2 h	2:25 h
Bindemittel 04	Alkyd-Emulsion, mittelölig	gelb	glatter Verlauf; klar transparent	kein Rost	leichter Gelbstich	1:15 h	1:40 h	> 24 h
Bindemittel 05	Alkyd-Emulsion, kurzölig	gelb	glatter Verlauf; klar transparent; Nadelstiche	vereinzelt Rostpunkte; Gelbstich	Gelbstich	1 h	2 h	> 24 h
Bindemittel 06	Alkyd-Emulsion, mittelölig	gelb	glatter Verlauf; klar transparent	vereinzelt Rostpunkte	leichter Gelbstich	1:20 h	1:40 h	3:20 h
Bindemittel 07	Alkyd, urethan- modifiziert	gelb	glatter Verlauf; klar transparent	kein Rost	glatter Verlauf; klar transparent	0:45 h	1:10 h	3 h

Tabelle 2: Grundlegende Beschichtungseigenschaften der untersuchten aerosolstabilen Bindemittel

	Bindemittel auf 20 % nfA mit Wasser verdünnt			Bindemittel in Lieferform			Bindemittel auf 20 % nfA mit Wasser verdünnt		
Art des Bindemittels	Stabilität gegen unterschiedlichen Anteilen an DME [Gew. %]			Mischungen mit unterschiedlichen Anteilen an DME [Gew. %]			Mischungen mit unterschiedlichen Anteilen an DME [Gew. %]		
	Lagerdauer 1 Woche	Lagerdauer 2 Monate	Lagerdauer 3 Monate	25 %	37,50 %	50 %	25 %	37,50 %	50 %
Bindemittel 01	25% = 5 37,5% = 5 50% = 3	5 5 3	4-5 5 3	gute Zerstäubung; schäumt etwas	größere Zerstäubung; schäumt	gute Zerstäubung; aber Schaum	gute Zerstäubung; läuft	gute Zerstäubung; schäumt; läuft	feine Zerstäubung; schäumt; läuft
Bindemittel 02	25% = 5 37,5% = 5 50% = 3	5 3 2	3-4 3 2	grobe Zerstäubung; schäumt; vereinzelte Stippen	sehr grobe Zerstäubung; trocken; roßer Overspray	Fäden --> unverträglich	gute Zerstäubung; vereinzelte Stippen; läuft	gute Zerstäubung; schäumt; läuft	feine Zerstäubung; Schaum
Bindemittel 03	25% = 5 37,5% = 4 50% = 3	4-5 3 2	3-4 2 1-2	grobe Zerstäubung; schäumt etwas	gute Zerstäubung; schäumt	großer Overspray; sehr trocken	gute Zerstäubung; schäumt; läuft	gute Zerstäubung; schäumt; läuft	feine Zerstäubung; schäumt sehr
Bindemittel 04	25% = 5 37,5% = 5 50% = 4-5	5 4-5 3-4	4-5 4 4	gute Zerstäubung; schäumt	grobe Zerstäubung; Schaum	grobe Zerstäubung; Schaum	grobe Zerstäubung; schäumt; läuft	grobe Zerstäubung; Schaum; läuft	gute Zerstäubung; Schaum; läuft
Bindemittel 05	25% = 4-5 37,5% = 4-5 50% = 4-5	4-5 4-5 3-4	4 4 3	gute Zerstäubung; schäumt	feine Zerstäubung; schäumt; trocken	grobe Zerstäubung; sehr trocken	gute Zerstäubung; schäumt; läuft	grobe Zerstäubung; schäumt; läuft	grobe Zerstäubung; schäumt; läuft
Bindemittel 06	25% = 5 37,5% = 4-5 50% = 4	4-5 4-5 3-4	4 4 3	gute Zerstäubung	gute Zerstäubung; schäumt	gute Zerstäubung; schäumt	gute Zerstäubung; schäumt; läuft	gute Zerstäubung; schäumt; läuft	gute Zerstäubung; Schaum
Bindemittel 07	25% = 4-5 37,5% = 4 50% = 4	3-4 3 3	4 3 3	feine Zerstäubung; (gröber bei Dauersprühen)	gute gleichmäßige Zerstäubung; schäumt etwas	gute gleichmäßige Zerstäubung; etwas viel Overspray; sehr trocken	zerstäubt; läuft	grobe Zerstäubung; läuft	gute Zerstäubung; schäumt

Tabelle 3: Stabilität gegenüber Treibgas sowie Sprüheigenschaften der untersuchten aerosolstabilen Bindemittel, Bewertung der Sprüheigenschaften mit Kennwerten von 5 (gut) bis 1 (ausreichend)

Die durchgeführten Untersuchungen ermöglichten grundsätzliche Aussagen hinsichtlich der zur erwartenden Stabilität bzw. den Stabilitätsbereichen der wässrigen Bindemittel in Aerosolformulierungen. Hierbei konnte eine ganze Reihe an für den Einsatz in wässrigen Aerosolen geeigneten Bindemitteln identifiziert werden.

Für die weiteren Entwicklungsarbeiten wurde eine Kombination aus einem schnelltrocknenden Bindemittel auf PU-Basis und einem vernetzungsfähigen Bindemittel auf Alkyd-Basis mit höheren Beständigkeitseigenschaften ausgewählt.

2.2.3 Optimierungsarbeiten unter Variation der Bindemittel-Basis

Auf Basis dieser Rohstoffkomponenten war es möglich, eine aerosolstabile Lackformulierung mit ausreichender Trocknungsgeschwindigkeit bei gleichzeitig guten Verlaufseigenschaften sowie bei einem stark reduzierten Anteil an Co-Lösemitteln auszuarbeiten. Mittels entsprechender Additivierung konnten die Applikations- und Beschichtungseigenschaften signifikant verbessert werden.

Das Abfüllverhältnis von 68 zu 32 mit DME wurde beibehalten.

Aufgrund von auftretender Korrosion von metallischen Dosenkomponenten wurden für die Entwicklungsarbeiten ausschließlich innenlackierte Dosen eingesetzt. Diese zeigten auch bei Belastungsdauern von mehreren Monaten bei erhöhter Temperatur von 40 °C keinerlei Korrosionserscheinungen.

Die erhaltenen Resultate sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Hierbei stellen die angegebenen Zahlenwerte Mittelwerte über verschiedene Farbtöne dar.

Anforderungskriterium	Entwicklungsstand
Reduktion Lösemittelgehalt [%]	90
Reduktion VOC-Gehalt [%]	53
Reduktion CO ₂ -Emission [%]	53
Kennzeichnung mit Flammensymbol	ja
Füllvermögen TSD /SG [µm]	25 - 30
Zerstäubung	8
Geruch	8
Deckvermögen (in Abhängigkeit vom Farbton)	1 – 3 SG
Standvermögen [µm] (TSD)	35 - 40
Überlackierbarkeit mit sich selbst	≤ 6 h
Trocknung (Glanzgrad hochglzd) (deckende Lackierung)	
Erreichung Trockengrad Tg 1 ¹	1,5 - 2 h
Erreichung Trockengrad Tg 3 ¹	3 - 3,5 h
Erreichung Trockengrad Tg 5 ¹	9 - 24 h
Lackoberfläche	8
Glanzgrade	hochglzd - matt
Härte / Kratzbeständigkeit	3
Haftfestigkeit auf Stahl ²	Gt 0 - 1

Chemikalienbeständigkeit gegen Wasser und Haushaltsreiniger	7
Korrosionsschutz Salzsprühnebeltest ³ über 24 Stunden	Ri 1
Korrosion von Dosenkomponenten	nein
Einsatz ökologisches Treibgas	ja

Tabelle 4: Eigenschaften und Kennwerte der neuen Aerosolformulierung

Eine zusätzlich durchgeführte Prüfung der UV-Beständigkeit ergab nach einer Belastungsdauer von 240 Stunden Farbtonabweichungen von $\Delta E < 1,0$ sowie Änderungen der Glanzgrade von < 4 Glanzeinheiten im Messwinkel 60° .

Bei parallel zu den Entwicklungsarbeiten durchgeführten Lagerstabilitätsprüfungen der Aerosolformulierungen war festgestellt worden, dass an den eingesetzten Ventilen im Laufe der Lagerdauer eine Rostbildung auftrat. Um diese Problematik zu beseitigen, wurden Ventile mit unterschiedlichen Beschichtungsmaterialien auf den Ventiltellern vergleichend geprüft. Hierbei konnten Ventile identifiziert werden, bei welchen keinerlei Rostbildung mehr zu beobachten war.

2.2.4 Vereinfachtes Fertigungskonzept für die wässrigen Aerosollacke

Der Fertigungsprozess für die verschiedenen Farbtöne beruhte zunächst auf der Herstellung eines Grundlackes. In diesen wurden im nächsten Schritt die jeweiligen Pigmente eindispersiert. Anschließend erfolgte die Komplettierung mit den restlichen Additiven sowie der Zugabe von Wasser, wobei letzteres zur Einstellung der Lackviskosität verwendet wurde. Die Anteile am Grundlack variierten hierbei in Abhängigkeit vom jeweiligen Farbton. Diese Vorgehensweise stellte eine Grundauffertigung der einzelnen Chargen dar und war mit einem erhöhten Aufwand durch Rühr- und Mischprozesse verbunden.

Zur Optimierung des Fertigungsprozesses der Flüssiglacke wurde ein neues Fertigungskonzept erstellt, bei welchem der bisherige Grundlack sowie die im Auflackschritt zugesetzten Additive zu einem Stammlack vereinigt wurden. Somit reduziert sich der Fertigungsprozess um einen Arbeitsschritt. Der Stammlack kann für sämtliche Farbtöne sowie für Klarlacke eingesetzt werden. Durch die Erhöhung der Chargengröße von Stammlacken sowie durch die Verkürzung der insgesamt anfallenden Rühr- und Mischzeiten wird eine weitere Reduzierung der Fertigungsdauer ermöglicht.

Bei sämtlichen Stammlacken wurde nach einer Lagerdauer von zwei Wochen eine nahezu konstante Viskosität erzielt; dieses bedeutet, dass die Verarbeitbarkeit über einen längeren Zeitraum gegeben ist.

Mittels Lagerung von Flüssiglacken wie auch von Aerosoldosen verschiedener Farbtöne über einen Zeitraum von mehreren Wochen bei Temperaturen im Bereich von -20°C konnte festgestellt werden, dass sämtliche Produkte als froststabil betrachtet werden können.

2.3 Entwicklung einer nicht-entzündbaren Produktqualität

Nach der erfolgreichen Entwicklung einer hinsichtlich der Applikations- und Beschichtungseigenschaften geeigneten wässrigen Aerosolqualität sollte im nächsten Schritt eine nicht entzündbare Aerosolformulierung ausgearbeitet werden. Die an das Produkt sowie an die einzelnen Rohstoff- und Dosenkomponenten gestellten Anforderungen wurden bereits in Kapitel 2.1 detailliert dargestellt. Neben den ökologischen und Nachhaltigkeitsaspekten sowie der Verbesserung der VOC-Bilanz durch Verringerung der Gehalte an Lösemittel und Treibgasen ist hierbei auch die Erhöhung der Produktsicherheit, erkenntlich an der Kennzeichnung ohne Flammensymbol von besonderer Wichtigkeit.

2.3.1 Kriterien für die Einstufung von Aerosolprodukten als nicht-entzündbar

Für die Einstufung als nicht entzündbar müssen sämtliche der nachfolgend genannten Anforderungen erfüllt werden.

Flammstrahltest:

Das Aerosolgemisch wird über einen Zeitraum von einer Minute in eine offene Flamme gesprüht. Der Aerosolstrahl darf hierbei kein eigenständiges Brennverhalten zeigen.



Abbildung 1: negativer Flammstrahltest bei Lösemittel-basiertem Aerosol

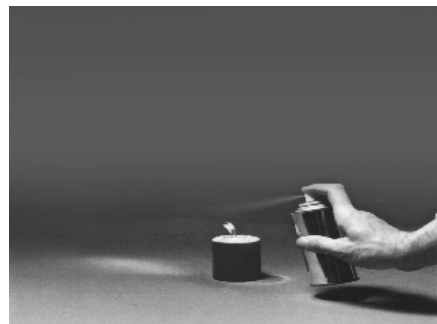


Abbildung 2: positiver Flammstrahltest bei Wasser-basiertem Aerosol

Fasstest:

Die Durchführung des Fasstests (Enclosed Space Ignition Test) erfolgte entsprechend dem UN-Prüfhandbuch, Abschnitt 31 „Classification procedures, test methods and criteria relating to flammable aerosols of class 2“.

Aus den ermittelten Messwerten wurden folgende Kenngrößen berechnet:

Äquivalenzzeit (t_{eq}): Zeitdauer des Sprühens bis zur Bildung eines explosionsfähigen Gemisches bezogen auf 1 m³ Volumen

Deflagrationsdichte (D_{Def}): Mindestmenge des Produktes bezogen auf 1 m³ Volumen, die für ein Entflammen im Fass erforderlich ist

Zum Bestehen der Prüfung muss die Äquivalenzzeit einen Wert von mindestens 300 s/m³ und die Deflagrationsdichte einen Wert von mindestens 300 g/m³ annehmen.

Anteile an entzündbaren Bestandteilen:

Die Aerosolprodukte müssen einen Anteil an entzündbaren Bestandteilen von unter 85 Gewichtsprozent aufweisen.

Verbrennungswärme:

Die Verbrennungswärme des Aerosolgemisches muss unterhalb von 20 kJ/g liegen.

2.3.2 Versuchsaufbau und Durchführung des Fasstests

Der detaillierte Versuchsaufbau sowie die Versuchsdurchführungen sind in den Vorschriften des UN-Prüfhandbuches, Abschnitt 31 dargestellt.

Das Aerosolgemisch wird in ein Fass mit einer Paraffinkerze als Lockflamme eingesprüht und die Zeitdauer bis zur Entzündung ermittelt. Diese äußert sich durch ein Heben des schwenkbaren Deckelbodens, in den meisten Fällen verbunden mit einer sichtbaren Flammenerscheinung. Daneben wird das Gewicht des bis zur Entzündung eingesprühten Aerosolgemisches bestimmt.

Im ersten Schritt wurde eine Messapparatur zur Bestimmung der Entzündbarkeitseigenschaften nach den Vorgaben des UN-Handbuches aufgebaut und in Betrieb genommen.

Die nachfolgende Abbildung stellt die Prüfapparatur schematisch dar.

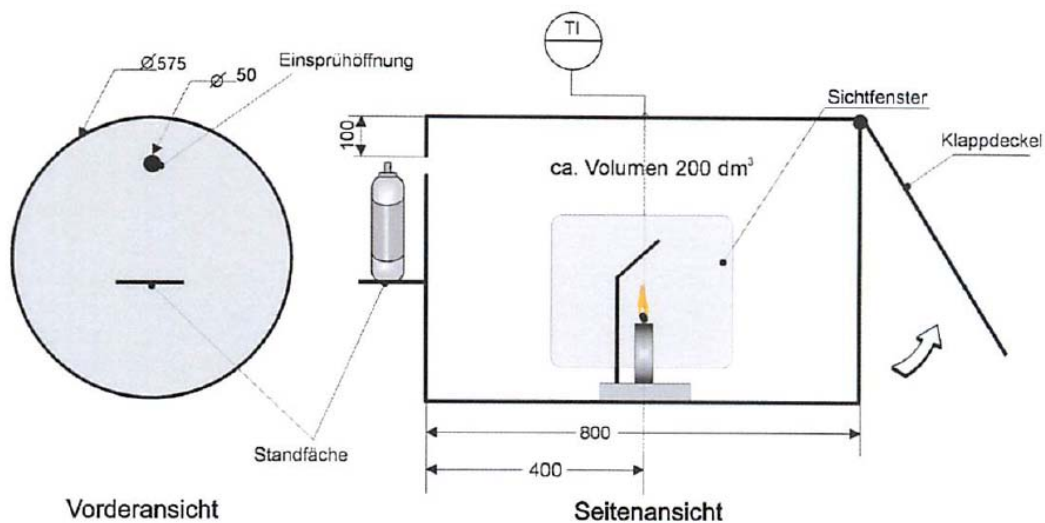


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Testapparatur nach UN-Prüfhandbuch⁴, Abschnitt 31 (nicht maßstabsgerecht)

Der Versuchsaufbau wurde aus Sicherheitsgründen in einem abgetrennten, auf 20 °C klimatisierten Raum installiert. Zur Auslösung des Sprühstrahles wurde eine Vorrichtung erstellt, bei welcher ein Metallstift mittels pneumatischem Antrieb eine Kraft auf den Sprühkopf einer räumlich fixierten Aerosoldose ausübt. Die Steuerung des Auslösemechanismus erfolgte mechanisch von außerhalb des Prüfraumes.

2.3.3 Prüfmethodik

Die Anteile an entzündbaren Bestandteilen liegen bei wässrigen Aerosolen auf Basis der oben dargestellten Flüssiglackrezepturen bei einem Treibgasanteil von maximal 25 Gewichtsprozent bei Werten unter 45 Gewichtsprozent.

Die Verbrennungswärme derartiger Aerosolgemische kann aus der Art und dem Gewichtsanteil der einzelnen Rezepturkomponenten sowie deren Verbrennungswärmen abgeschätzt werden und liegt bei ca. 10 kJ/g.

Bei ersten bereits an Belton Free 2.2 durchgeführten Untersuchungen war der Flammstrahltest durch die wässrigen Aerosole erfüllt worden.

Aus diesen Gründen wurde in den weiteren Entwicklungsarbeiten zunächst nur der Fasstest als kritischer Parameter betrachtet.

2.3.4 Ermittlung der maßgebenden Faktoren für die Entzündbarkeit von Aerosolen

Bei Bestimmungen der Entzündbarkeit an verschiedenen Mustern auf Basis älterer Formulierungen bei der BAM waren die Gehalte an Treibgas sowie an Lösemitteln als entscheidende Faktoren für die Deflagrationsdichte identifiziert worden. Bei Gehalten an DME von maximal 25 Gewichtsprozent konnten die geforderten Werte der Deflagrationsdichte von über 300 g/m³ erfüllt werden. Allerdings ergaben sich uneinheitliche Werte bzgl. der Äquivalenzzeit.

Auf dieser Basis wurde eine systematische Variation möglicher Einflussparameter auf die Kenngrößen der Entzündbarkeit vorgenommen. Hierbei wurde die neu ausgearbeitete Aerosolformulierung im Farbton schwarz hochglänzend als Referenz herangezogen.

Als potentielle Einflussgrößen auf die Entzündbarkeit wurden nachfolgende Parameter identifiziert:

- Anteil an Treibgas
- Anteil an Co-Lösemittel
- Vorhandensein bzw. Durchmesser eines Seitenloches am Ventilkorb
- Art des Sprühkopfes
- Temperatur der Aerosoldose
- Zusatz von Inertgasen
- Wasseranteil im Flüssiglack
- Art des Bindemittels
- Durchflussrate des Ventiles durch Änderung der Verjüngung am Steigrohr (RTP-Wert)
- Zusatz von Radikalfängern
- Zusatz von wasserabspaltenden Stoffen
- Glanzgrad der getrockneten Aerosolbeschichtung
- Farbton der Aerosolbeschichtung

Wiederholbarkeit der Messwerte

Die Mittelwertbildung aus einer Anzahl von drei Messungen an verschiedenen Aerosoldosen war zum Erhalt wiederholbarer Messwerte ausreichend. Dieses traf insbesondere auf die Werte der Deflagrationsdichte zu, bei welcher eine Standardabweichung der Mittelwerte von ca. 20 Einheiten erhalten wurde. Die Werte der Äquivalenzzeiten zeigten jedoch Standardabweichungen der Mittelwerte von ca. 50 Einheiten, auch bei Dosen, welche direkt hintereinander abgefüllt worden waren.

Aufgrund der Wichtigkeit der Aussprühraten wurden deren Werte in den nachfolgenden Untersuchungen ebenfalls vergleichend ermittelt.

Erfreulicherweise konnten die bei der BAM an den älteren Aerosolformulierungen erhaltenen Werte der Äquivalenzzeit bzw. der Deflagrationsdichte mit dem eigenen Versuchsaufbau reproduziert werden.

Bei der als Referenzprodukt eingesetzten neu ausgearbeiteten Aerosolformulierung im Farbton schwarz hochglänzend wurden Werte der Äquivalenzzeit von ca. 230 s/m³ und der Deflagrationsdichte von ca. 210 g/m³ ermittelt. Die neue Aerosolformulierung ist daher entsprechend dem Entwicklungsstand vor Projektbeginn noch als entzündbar einzustufen.

Einfluss der Parameter Anteil an Treibgas, Gehalt an Co-Lösemittel, Vorhandensein bzw. Durchmesser eines Seitenlochs am Ventilkorb sowie Materialdurchsatz des Sprühkopfs

Um die Anforderungen hinsichtlich der Werte der Äquivalenzzeit von mindestens 300 s/m³ sowie der Deflagrationsdichte von mindestens 300 g/m³ zu erfüllen, wurden Untersuchungen unter Variation eines Seitenlochs im Ventilkorb, von Ethanol als Co-Lösemittel in der Aerosolformulierung sowie des Materialdurchsatzes des Sprühkopfes durchgeführt.

Die erhaltenen Werte der Aussprühraten, der Äquivalenzzeiten sowie der Deflagrationsdichten sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Seitenloch im Ventilteller	Aussprührate [g/s]	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
+	0,79	355	267
-	1,09	265	279

Tabelle 5: Einfluss des Vorhandenseins eines Seitenloches im Ventil bei einem Abfüllverhältnis von 75 zu 25, Einsatz des Sprühkopfes 030, mit Ethanol als Co-Lösemittel

Seitenloch im Ventilteller	Aussprührate [g/s]	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
+	0,83	367	303
-	1,17	279	321

Tabelle 6: Einfluss des Vorhandenseins eines Seitenloches im Ventil bei einem Abfüllverhältnis von 75 zu 25, Einsatz des Sprühkopfes 030, ohne Ethanol als Co-Lösemittel

Seitenloch im Ventilteller	Aussprührate [g/s]	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
+	0,56	515	279
-	0,72	420	301

Tabelle 7: Einfluss des Vorhandenseins eines Seitenloches im Ventil bei einem Abfüllverhältnis von 75 zu 25, Einsatz des Sprühkopfes 010, mit Ethanol als Co-Lösemittel

Seitenloch im Ventilteller	Aussprührate [g/s]	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
+	0,52	608	318
-	0,80	431	332

Tabelle 8: Einfluss des Vorhandenseins eines Seitenloches im Ventil bei einem Abfüllverhältnis von 75 zu 25, Einsatz des Sprühkopfes 010, ohne Ethanol als Co-Lösemittel

Seitenloch im Ventilteller	Ethanolgehalt	Aussprührate [g/s]	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
+	+	0,81	495	356
-	-	0,86	509	390

Tabelle 9: Einfluss des Vorhandenseins eines Seitenloches im Ventil bei einem Abfüllverhältnis von 80 zu 20, Einsatz des Sprühkopfes 030

Seitenloch im Ventilteller	Ethanolgehalt	Aussprührate [g/s]	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
+	+	0,44	889	395
-	-	0,56	691	383

Tabelle 10: Einfluss des Vorhandenseins eines Seitenloches im Ventil bei einem Abfüllverhältnis von 80 zu 20, Einsatz des Sprühkopfes 010

Vergleich der Kennwerte bei variablen Abfüllverhältnissen:

Abfüllverhältnis	Aussprührate [g/s]	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
68:32	1,03	230	210
75:25	1,17	279	321
80:20	0,86	509	390

Tabelle 11: Einfluss der Abfüllverhältnisse, Ventil ohne Seitenloch, Einsatz des Sprühkopfes 030, ohne Ethanol als Co-Lösemittel

Aus den durchgeführten Untersuchungen wird ersichtlich, dass speziell die Reduzierung des Treibgasanteils sowie des Gehaltes an Co-Lösemittel einen stark positiven Effekt auf die Deflagrationsdichte ausüben. Während die Verringerung des Treibgasanteils und auch der Wechsel auf den Sprühkopf 010 mit geringerem Materialdurchsatz die Äquivalenzzeit signifikant erhöhen, führt ein Wegfall des Seitenloches im Ventil zu einer deutlichen Reduktion dieser Kenngröße. Die erhaltenen Resultate verdeutlichen, dass zur Erzielung einer nicht entzündbaren Aerosolformulierung zwingend ein Treibgasanteil von maximal 25 Gewichtsprozent erforderlich ist.

Temperatur der Aerosoldose

Die erhaltenen Werte der Aussprühraten, der Äquivalenzzeiten sowie der Deflagrationsdichten in Abhängigkeit von der Temperatur der Aerosoldosen sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Temperatur [°C]	Aussprührate [g/s]	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
20	0,79	355	267
30	1,04	252	263

Tabelle 12: Einfluss der Temperatur der Aerosoldose bei einem Abfüllverhältnis von 75 zu 25, Einsatz des Sprühkopfes 030, mit Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil mit Seitenloch

Die mit steigender Temperatur verbundene Erhöhung des Dosendrucks sowie die Verringerung der Viskosität des Aerosolgemisches bedingen eine signifikante Zunahme der Aussprührate und damit verbunden zu einer starken Reduzierung der Äquivalenzzeit. Die erhaltenen Werte verdeutlichen die Notwendigkeit der Versuchsdurchführung in klimatisierter Umgebung.

Zusatz von Inertgasen

Die erhaltenen Werte der Aussprühraten, der Äquivalenzzeiten sowie der Deflagrationsdichten in Abhängigkeit von der Zusatzmenge verschiedener Inertgase sind in der nachfolgenden Abbildung veranschaulicht.

Inertgas	Dosendruck bei 20 °C [bar]	Aussprührate [g/s]	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
--	5,2	0,74	580	427
0,2 g N ₂	7,0	0,85	510	434
0,5 g N ₂	8,2	1,01	413	417
0,2 g Ar	5,8	0,63	626	396
0,5 g Ar	6,6	0,73	617	451
0,2 g CO ₂	--	0,59	580	341

Tabelle 13: Einfluss der Zugabe von Inertgasen bei einem Abfüllverhältnis von 80 zu 20, Einsatz des Sprühkopfes 030, ohne Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil ohne Seitenloch

Die Zugabe geringer Mengen an Stickstoff in die Aerosoldose hatten keinen Einfluss auf die Werte der Deflagrationsdichte, jedoch wurde eine Erhöhung der Aussprührate bzw. eine Reduktion der Äquivalenzzeit beobachtet. Im Gegensatz hierzu zeigte die Zugabe von Argon keinerlei Effekte auf die Deflagrationsdichte bzw. die Äquivalenzzeit. Die Zugabe von 0,5 g Kohlendioxid führte zur sofortigen Koagulation der Aerosolformulierung, bei geringerer Zugabe war eine Verringerung der Deflagrationsdichte zu beobachten. Nach einer Lagerdauer von mehreren Tagen traten jedoch auch hier Koagulationserscheinungen auf.

Erhöhung des Wasseranteils durch Verdünnung des Flüssiglackes

Die erhaltenen Werte der Aussprühraten, der Äquivalenzzeiten sowie der Deflagrationsdichten in Abhängigkeit von der Verdünnung des Flüssiglackes mit Wasser sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Verdünnungsmenge Wasser [Gew.%]	Aussprührate [g/s]	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
--	0,52	608	318
10	0,56	557	307
20	0,55	629	338
30	0,56	589	320

Tabelle 14: Einfluss des Wasseranteils im Flüssiglack bei einem Abfüllverhältnis von 75 zu 25, Einsatz des Sprühkopfes 010, ohne Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil mit Seitenloch

Die Verdünnung des Flüssiglackes in dem betrachteten Konzentrationsbereich führte zu keinen signifikanten Änderungen der Äquivalenzzeit bzw. der Deflagrationsdichte. Die gleichen Befunde wurden bei noch stärkerer Verdünnung des Flüssiglackes erhalten. Allerdings verschlechterten sich die Sprüheigenschaften mit steigender Verdünnungsmenge signifikant.

Art des Bindemittels

Die erhaltenen Werte der Äquivalenzzeiten sowie der Deflagrationsdichten in Abhängigkeit von der Art des Bindemittels sind in den nachfolgenden Abbildungen veranschaulicht.

Art des Bindemittels	Aussprührate [g/s]	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
Alkyd / PU 50:50 n. Gew. %	0,80	409	322
PU	0,74	402	302
Alkyd	0,76	446	326

Tabelle 15: Einfluss der Art des Bindemittels bei einem Abfüllverhältnis von 75 zu 25, Einsatz des Sprühkopfes 010, ohne Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil ohne Seitenloch

Der Einsatz von reinem Alkyd-Bindemittel führt zu einer geringen Erhöhung der Deflagrationsdichte.

Zusatz von Radikalfängern

Da Verbrennungsreaktionen mit Sauerstoff über radikalische Zwischenstufen ablaufen, wurde überprüft, ob mit freien Radikalen reagierende, also potentiell Zwischenprodukte der Verbrennungsreaktion abfangende Stoffe die Werte der Äquivalenzzeiten bzw. der Deflagrationsdichten beeinflussen.

Zusatz Radikalfänger	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
--	409	322
Radikalfänger 1 Gew.% auf Lack	523	344

Tabelle 16: Einfluss von Radikalfängern bei einem Abfüllverhältnis von 75 zu 25, Einsatz des Sprühkopfes 010, ohne Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil ohne Seitenloch

Der Zusatz eines Radikalfängers führte tendenziell zu einer Erhöhung der Äquivalenzzeit sowie der Deflagrationsdichte. Aufgrund der höheren Kosten für diese Rohstoffe wurde deren weiterer Einsatz jedoch zurückgestellt.

Zusatz von Stoffen, welche bei höheren Temperaturen Wasser abspalten

Die Zufuhr von weiterem Wasser in die Reaktionszone der Verbrennungsreaktion könnte deren zeitlichen Verlauf und damit die Werte der Äquivalenzzeit bzw. der Deflagrationsdichte ebenfalls beeinflussen. Daher wurden auch zu dieser Thematik entsprechende Versuche durchgeführt.

Zusatz Wasser-Abspalter	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
--	367	303
Lichtschutzmittel 1 Gew.% auf Lack	322	299

Tabelle 17: Einfluss von wasserabspaltenden Stoffen bei einem Abfüllverhältnis von 75 zu 25, Einsatz des Sprühkopfes 030, ohne Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil ohne Seitenloch

Die Zugabe eines bei höheren Temperaturen Wasser abspaltenden Siliziumdioxid-basierten Additivs zeigte keinen Einfluss auf die Werte der Äquivalenzzeit bzw. der Deflagrationsdichte.

Glanzgrad der getrockneten Aerosolbeschichtung

Die erhaltenen Werte der Äquivalenzzeiten sowie der Deflagrationsdichten in Abhängigkeit vom Glanzgrad der getrockneten Aerosolbeschichtung sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Glanzgrad	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
hochglänzend	223	205
seidenglänzend	226	208
matt	203	195

Tabelle 18: Einfluss des Glanzgrades der getrockneten Aerosolbeschichtung bei einem Abfüllverhältnis von 68 zu 32, Einsatz des Sprühkopfes 030, mit Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil mit Seitenloch

Der Glanzgrad der Beschichtungen, eingestellt durch Mattierungsmittel übt keinen Einfluss auf die Werte der Äquivalenzzeit bzw. der Deflagrationsdichte aus.

Farbton der Aerosolbeschichtung

Die erhaltenen Werte der Äquivalenzzeiten sowie der Deflagrationsdichten in Abhängigkeit vom Farbton der Aerosolbeschichtung sind der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen.

Farbton der Aerosolbeschichtung	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
RAL 9005 hochglänzend	409	322
RAL 1021 hochglänzend	433	323

Tabelle 19: Einfluss des Farbtons der Aerosolbeschichtung bei einem Abfüllverhältnis von 75 zu 25, Einsatz des Sprühkopfes 010, ohne Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil ohne Seitenloch

Der Farbton der Beschichtungen besitzt ebenfalls keinen Einfluss auf die Äquivalenzzeit bzw. Deflagrationsdichte.

Zusammenfassend konnten folgende Haupteinflussfaktoren auf die Entzündbarkeit von Aerosolen identifiziert werden:

- Anteil an Treibgas
- Anteil an Co-Lösemittel
- Art des Sprühkopfes
- Vorhandensein bzw. Durchmesser eines Seitenloches am Ventilkorb

Der qualitative Einfluss der einzelnen Parameter auf die Werte der Äquivalenzzeit bzw. der Deflagrationsdichte ist in der nachfolgenden Tabelle zusammenfassend dargestellt.

Einflussfaktor und Wertebereich	Effekt auf Werte der Äquivalenzzeit [s/m ³]	Effekt auf Werte der Deflagrationsdichte [g/m ³]
Anteil an Treibgas 68:32 -> 75:25 -> 80:20	++	++
Anteil an Co-Lösemittel Ethanol -> Ersatz durch Wasser	+	+
Art des Sprühkopfes Größerer -> geringerer Durchsatz	++	+
Seitenloch am Ventilkorb 0,5 mm -> kein Seitenloch	++	+

Tabelle 20: Quantitativer Einfluss der einzelnen Haupteinflussfaktoren auf die Werte der Äquivalenzzeit bzw. der Deflagrationsdichte

2.3.5 Effekte der Haupteinflussfaktoren für die Entzündbarkeit auf die Applikationseigenschaften der Aerosole

Neben der Erfüllung der Kriterien für die Nicht-Entzündbarkeit von Aerosolsystemen ist naturgemäß auch deren Sprühverhalten sowie die Eigenschaften der erhaltenen Beschichtungen von Wichtigkeit. Daher wurde der Einfluss der ermittelten Hauptfaktoren auf die Entzündbarkeit ebenfalls auf die Sprüheigenschaften der Aerosole betrachtet.

Hierbei konnten folgende Feststellungen getroffen werden:

- Die Reduktion des Treibgasanteils bedingt speziell bei Ventilen ohne Seitenloch die Ausbildung eines engeren Sprühstrahles sowie eine leicht zunehmende Nebelbildung, bei sehr geringen Treibgasmengen tritt eine Art von „Wasserschlaucheffekt“ auf. In Summe führt dieses zu einer Verschlechterung des Sprühbildes.
- Der Ersatz des Ethanol als Co-Lösemittel gegen Wasser führt zu einer signifikant feineren Zerstäubung, unabhängig von der Durchsatzmenge des Sprühkopfes oder dem Vorhandensein eines Seitenlochs am Ventil. Bei einem Abfüllverhältnis von 80 zu 20 war bei Verwendung von Ethanol in der Aerosolformulierung ein geeignetes Sprühbild mit keiner Kombination von Ventil und Sprühkopf mehr erzielbar.
- Bei höherem Durchlass des Sprühkopfs nimmt die Breite des Sprühstrahls bei Wegfall des Seitenlochs unabhängig vom Abfüllverhältnis bzw. vom Gehalt an Ethanol ab, bei geringerem Durchlass des Sprühkopfs dagegen zu.

Die nachfolgenden Abbildungen dienen zur Verdeutlichung der beschriebenen Zusammenhänge.

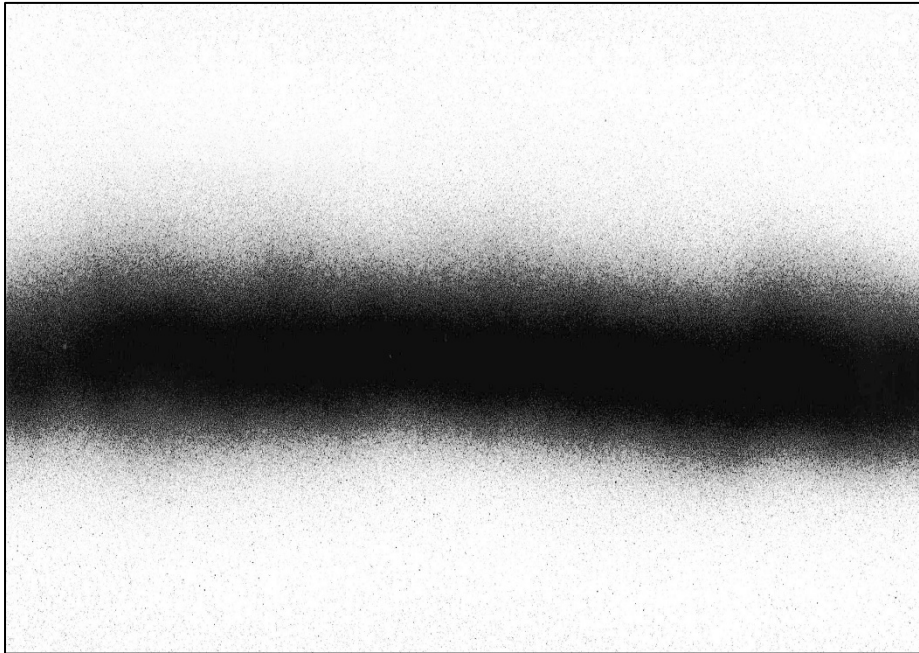


Abbildung 4: Sprühbild bei Abfüllverhältnis 68 zu 32, Einsatz des Sprühkopfes 010, mit Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil mit Seitenloch

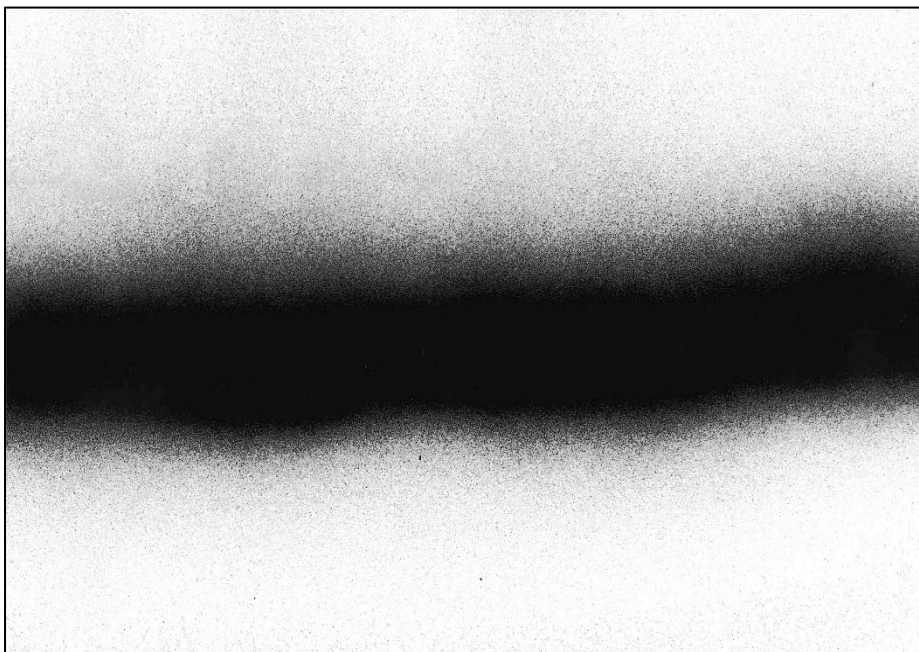


Abbildung 5: Sprühbild bei Abfüllverhältnis 68 zu 32, Einsatz des Sprühkopfes 010, ohne Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil mit Seitenloch

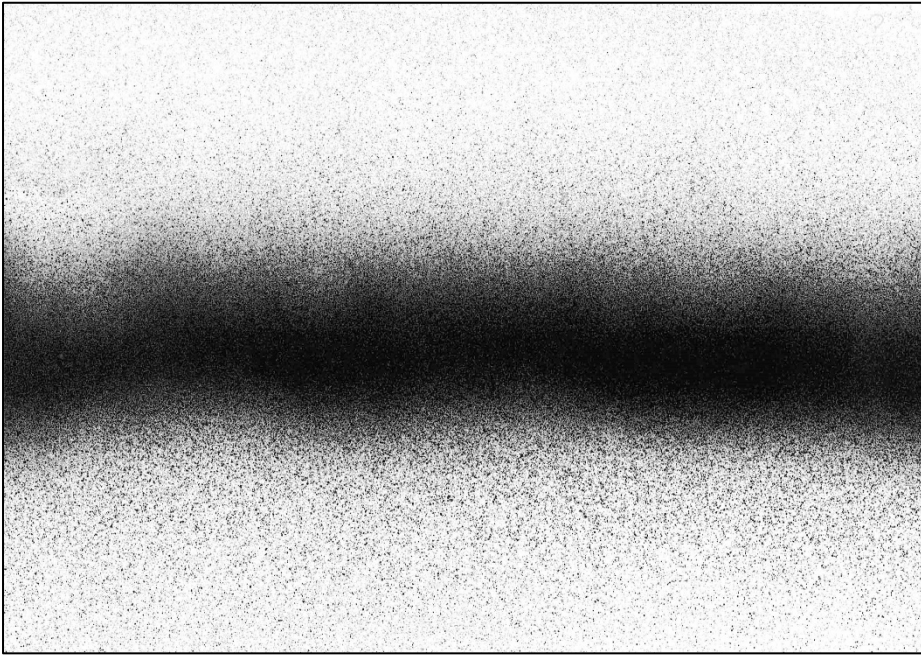


Abbildung 6: Sprühbild bei Abfüllverhältnis 80 zu 20, Einsatz des Sprühkopfes 010, mit Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil mit Seitenloch

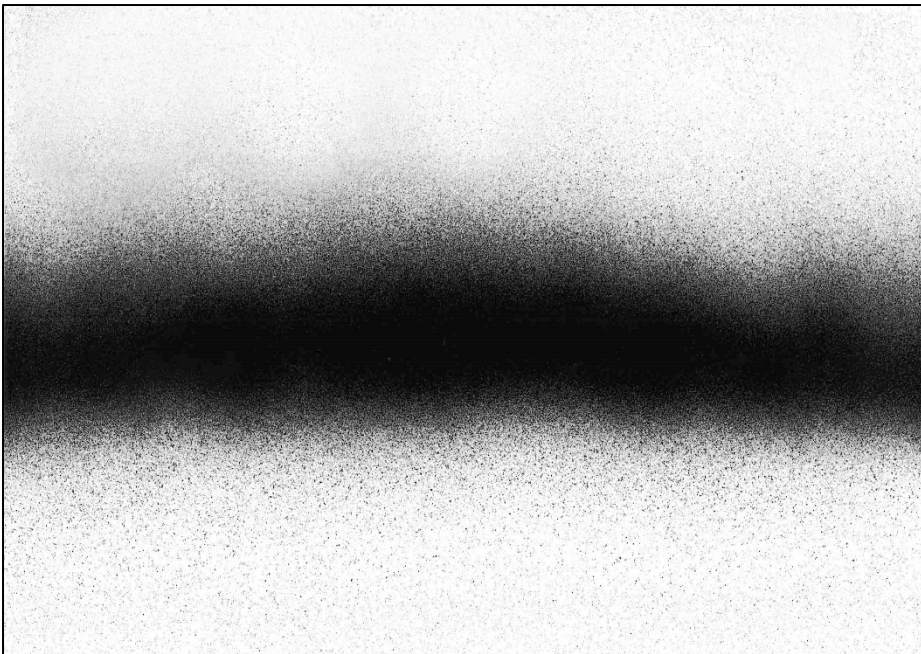


Abbildung 7: Sprühbild bei Abfüllverhältnis 80 zu 20, Einsatz des Sprühkopfes 010, ohne Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil mit Seitenloch

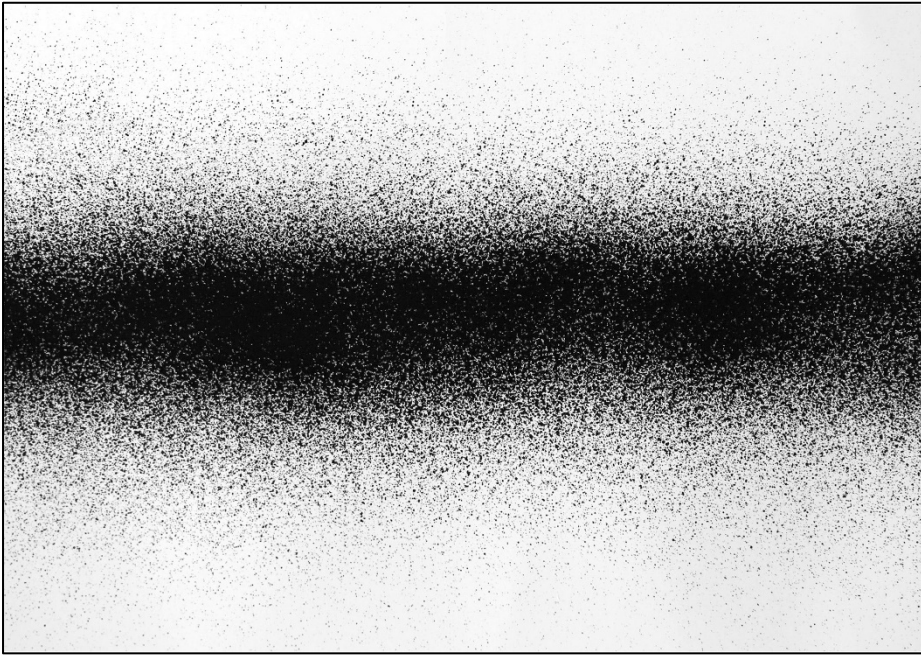


Abbildung 8: Sprühbild bei Abfüllverhältnis 80 zu 20, Einsatz des Sprühkopfes 010, mit Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil ohne Seitenloch

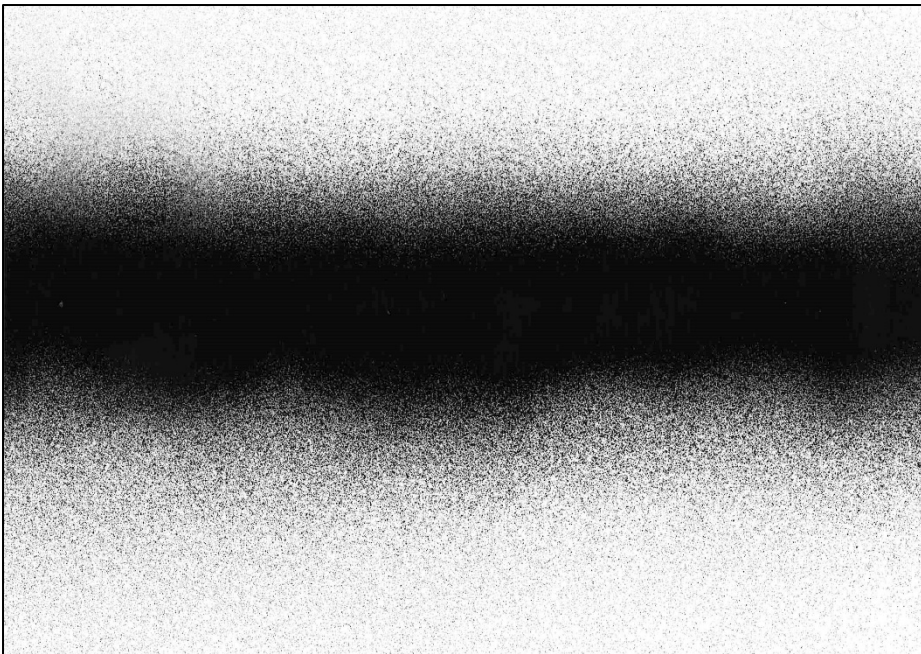


Abbildung 9: Sprühbild bei Abfüllverhältnis 80 zu 20, Einsatz des Sprühkopfes 010, ohne Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil ohne Seitenloch

Anzumerken ist, dass auch die als positiv bewerteten Aerosolkonfigurationen hinsichtlich des Sprühverhaltens noch kein marktfähiges Produkt darstellten.

Im Folgenden wurden daher im ersten Schritt die Einstellung des für die Entzündbarkeit maßgeblichen Parameters des Treibgasgehaltes nochmals im Detail optimiert, um die geeignetste Basis für die erforderliche Modifizierung des Aerosolgemisches zu generieren.

2.3.6 Feinjustierung des Treibgasgehaltes

Die Kennwerte für die Entzündbarkeit von Aerosolen wurden unter Variation des Abfüllverhältnisses in einem engeren Wertebereich ermittelt.

Abfüllverhältnis	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
75:25	433	323
77:23	557	346
80:20	745	416

Tabelle 21: Einfluss des Abfüllverhältnisses, Farbton RAL 1021 hochglänzend, Einsatz des Sprühkopfes 010, ohne Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil ohne Seitenloch

Abfüllverhältnis	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
75:25	503	310
77:23	507	338

Tabelle 22: Variation des Abfüllverhältnisses, Farbton RAL 9005 hochglänzend, Einsatz des Sprühkopfes 010, ohne Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil ohne Seitenloch

Aus den erhaltenen Messwerten wurde ersichtlich, dass erst ab einem Abfüllverhältnis von 77 zu 23 Werte der Deflagrationsdichte von größer 300 g/m³ mit ausreichender Sicherheit erhalten werden. Die Werte der Äquivalenzzeiten zeigten zwar große Unterschiede zwischen den einzelnen Messungen, liegen aber allesamt weit über dem geforderten Wert von 300 s/m³.

Mit Blick auf die Kriterien der Nicht-Brennbarkeit sowie auf die Sprüheigenschaften der Aerosole konnten somit folgende Einstellungen für die weiteren Ausarbeitungen festgelegt werden:

- Einsatz eines Abfüllverhältnisses von 77 zu 23
- Lackformulierung ohne Anteile an Ethanol
- Einsatz von Sprühkopf 010 mit geringerem Materialdurchlass
- Einsatz von Ventilen ohne Seitenloch

2.3.7 Optimierung des Sprühverhaltens

Eine verbesserte Atomisierung kann grundsätzlich durch Reduktion der Oberflächenspannung sowie mittels Verringerung der Viskosität erzielt werden.

Zur Reduktion der Oberflächenspannung bietet sich der Austausch eines Teils des Wassers gegen organische Bestandteile an. Da der Zusatz von Lösemitteln aufgrund des Effektes auf die Deflagrationsdichte nicht geeignet war, wurde stattdessen der Anteil des Wassers im Flüssiglack reduziert. Trotz gleichzeitiger Verringerung des Anteiles an Rheologieadditiv konnte hierbei jedoch keine Verbesserung des Sprühverhaltens erzielt werden.

Ebenso führte die Variation des Verhältnisses der beiden eingesetzten Bindemittel zu keinen signifikanten Verbesserungen.

Zur Verringerung der Viskosität wurden die 77 Gewichtsanteile an Flüssiglack in der Aerosolformulierung in folgende Zusammensetzungen aufgespalten:

72 Gew.% Flüssiglack + 5 Gew.% Wasser

67 Gew.% Flüssiglack + 10 Gew.% Wasser

Im Vergleich mit der Formulierung unter Einsatz von unverdünntem Flüssiglack wurde das Sprüh- und Applikationsverhalten wie folgt beurteilt:

Unverdünnter Lack: Treibgasretention, Blasenbildung, Vermattung, schlechte Zerstäubung

Zugabe 5 Gew.% Wasser: Treibgasretention, etwas geringere Blasenbildung, Vermattung, ungeeignete Zerstäubung

Zugabe 10 Gew.% Wasser: verbesserte Zerstäubung, aber Ablaufneigung

Da die Einstellung einer geeigneten Zerstäubung bei gleichzeitig ausreichendem Standvermögen nicht möglich war, war eine Umstellung der rheologisch wirkenden Additive erforderlich. Diese Änderung der rheologischen Eigenschaften ermöglichte ein prinzipiell geeignetes Sprühverhalten.

Nach Erreichen einer ersten nicht entzündbaren Aerosolformulierung mit potentiell geeigneten Sprüheigenschaften wurden die bislang erhaltenen Resultate mittels eines Produktionsversuches verifiziert.

Im Zuge des Produktionsversuches wurde gleichzeitig auch der Effekt des Einsatzes von Ventilen mit bzw. ohne Seitenloch mit in die Untersuchungen einbezogen.

Über die verschiedenen Farbtöne gemittelt wurden hierbei folgende Werte der Äquivalenzzeiten und Deflagrationsdichten erhalten:

Seitenloch im Ventilteller	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
+	625	310
-	395	340

Tabelle 23: Einfluss des Vorhandenseins eines Seitenloches, verschiedene Farbtöne, Abfüllverhältnis 77 zu 23, Einsatz des Sprühkopfes 010, ohne Ethanol als Co-Lösemittel

Die erhaltenen Resultate bestätigen die Erfüllung der Kriterien für die Nicht-Entzündbarkeit von Aerosolen. Ebenfalls wurden wiederum bei Verwendung von Ventilen ohne Seitenloch niedrigere Werte der Äquivalenzzeit und höhere Werte der Deflagrationsdichte erhalten.

Neben den Parametern für die Entzündbarkeit der Aerosole wurden auch deren Applikations- und Beschichtungseigenschaften ermittelt. Die nachfolgende Tabelle zeigt den Eigenschaftsvergleich mit der entzündbaren Aerosolformulierung. Hierbei stellen die angegebenen Zahlenwerte Mittelwerte über verschiedene Farbtöne dar.

Anforderungskriterium	Entwicklungsstand entzündbar	Entwicklungsstand 1 nicht entzündbar
Reduktion Lösemittelgehalt [%]	90	98
Reduktion VOC-Gehalt [%]	53	69
Reduktion CO ₂ -Emission [%]	53	69
Kennzeichnung mit Flammensymbol	ja	nein
Füllvermögen TSD /SG [µm]	25 - 30	30 - 35
Zerstäubung	8	4
Geruch	8	8
Deckvermögen (in Abhängigkeit vom Farbton)	1 – 3 SG	1 – 3 SG
Standvermögen [µm]	35 - 40	30 - 40
Überlackierbarkeit mit sich selbst	≤ 6 h	≤ 1 Tag
Trocknung		
Erreichung Trockengrad Tg 1 ¹	1,5 h	2 - 2,5 h
Erreichung Trockengrad Tg 3 ¹	3 - 3,5 h	3,5 h
Erreichung Trockengrad Tg 5 ¹	4,5 h	8 - 24 h
Lackoberfläche	8	8
Glanzgrad	matt	matt
Härte / Kratzbeständigkeit	3	3
Haftfestigkeit auf Stahl ²	Gt 0 - 1	Gt 0 - 1
Chemikalienbeständigkeit gegen Wasser und Haushaltsreiniger	7	7
Korrosion von Dosenkomponenten	nein	nein
Einsatz ökologisches Treibgas	ja	ja

Tabelle 24: Vergleich der Applikations- und Beschichtungseigenschaften der nicht-entzündbaren Aerosolformulierung mit der entzündbaren Aerosolformulierung

Die nicht entzündbare Aerosolformulierung zeigte in weiten Teilen mit der entzündbaren Aerosolformulierung vergleichbare Eigenschaften. Allerdings mussten speziell das Spritzbild sowie die Trocknungseigenschaften weiter überarbeitet werden.

Daher wurde im nächsten Entwicklungsschritt der Anteil des Grundlackes nochmals um ca. 10 Gewichtsprozent reduziert und durch die Erhöhung des Wasseranteils ausgeglichen. Ebenfalls wurde in diesem Schritt das zwischenzeitlich für die wässrigen Aerosollacke ausgearbeitete Stammlackkonzept mit Integration sämtlicher Additive in den Grundlack auf die Formulierungen übertragen.

In einem weiteren Produktionsversuch wurden verschiedene Farbtöne gefertigt.

Die Bestimmung der Kriterien für die Nicht-Entzündbarkeit ergab die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Resultate.

Farbton	Aussprührate [g/s]	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
RAL 5015 matt	0,87	431	374
RAL 9005 matt	0,82	452	371

Tabelle 25: Kennwerte der Entzündbarkeit von Aerosolen bei einem Abfüllverhältnis von 77 zu 23, Einsatz des Sprühkopfes 010, ohne Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil ohne Seitenloch

Aus den erhaltenen Werten wird ersichtlich, dass auch bei dieser Versuchsreihe sämtliche Formulierungen die Kriterien für die Nicht-Entzündbarkeit der Aerosoldosen erfüllen.

Zur Verifizierung der Messergebnisse hinsichtlich der Nicht-Entzündbarkeit der Aerosoldosen wurde bei der BAM an drei der gefertigten Produkte ein Fasstest durchgeführt.

Die dort ermittelten Resultate sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Farbton	Äquivalenzzeit [s/m ³]	Deflagrationsdichte [g/m ³]
RAL 5015 matt	493	440
RAL 9005 matt	600	433

Tabelle 26: Messergebnisse des Fasstests bei der BAM bei einem Abfüllverhältnis von 77 zu 23, Einsatz des Sprühkopfes 010, ohne Ethanol als Co-Lösemittel, Ventil ohne Seitenloch

Die bei der BAM ermittelten Werte bestätigten die Einstufung der Aerosolformulierungen als nicht entzündbar und lagen sogar noch deutlich höher als die intern bestimmten Werte.

Ein Vergleich wichtiger Kennwerte in Bezug auf den VOC-Gehalt bzw. der Applikations- und Beschichtungseigenschaften der verschiedenen Entwicklungsstände nicht entzündbarer Aerosole ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Hierbei stellen die angegebenen Zahlenwerte Mittelwerte über verschiedene Farbtöne dar.

Anforderungskriterium	Entwicklungsstand 1 nicht entzündbar	Entwicklungsstand 2 nicht entzündbar
Reduktion Lösemittelgehalt [%]	98	98
Reduktion VOC-Gehalt [%]	69	69
Reduktion CO ₂ -Emission [%]	69	69
Kennzeichnung mit Flammensymbol	nein	nein
Füllvermögen TSD /SG [μ m]	30 - 35	20 – 25
Zerstäubung	4	6
Geruch	8	8
Deckvermögen (in Abhängigkeit vom Farbton)	1 – 3 SG	1 – 3 SG
Standvermögen [μ m]	30 - 40	25 - 30
Überlackierbarkeit mit sich selbst	≤ 1 Tag	≤ 3 Tage
Trocknung (Glanzgrad matt)		
Erreichung Trockengrad Tg 1 ¹	2 - 2,5 h	2,5 h
Erreichung Trockengrad Tg 3 ¹	3,5 h	3,5 h
Erreichung Trockengrad Tg 5 ¹	8 - 24 h	24 h
Lackoberfläche	8	8
Glanzgrade	hochglzd bis matt	hochglzd bis matt
Härte / Kratzbeständigkeit	3	1
Haftfestigkeit auf Stahl ²	Gt 0 - 1	Gt 0 - 1
Chemikalienbeständigkeit gegen Wasser und Haushaltsreiniger	7	7
Korrosion von Dosenkomponenten	nein	nein
Einsatz ökologisches Treibgas	ja	ja

Tabelle 27: Vergleich der Applikations- und Beschichtungseigenschaften der verschiedenen Entwicklungsstände nicht entzündbarer Aerosole

Die neue Entwicklungsstand zeigte eine signifikant verbesserte Zerstäubung, jedoch war dieses mit einer Verringerung der Ergiebigkeit bei einer festgelegten Trockenschichtstärke verbunden. Die geringere Trockenschichtstärke pro Spritzgang war aufgrund der vergleichbaren Deckfähigkeit der neuen Muster nicht von Bedeutung. Die Trocknungsgeschwindigkeit lag weiterhin unterhalb derer der entzündbaren Aerosolformulierung.

2.3.8 Korrosionsschutzeigenschaften der Aerosolformulierungen

Erste Vorversuche an einfachen Modellsystemen unter Verwendung verschiedener Korrosionsschutzpigmente zeigten auf Stahlsubstraten im Salzsprühtest gute Haftungseigenschaften sowie keine Blasen- oder Rostbildung auf der Beschichtungsoberfläche. Hinsichtlich der Optimierung der Korrosionsschutzeigenschaften der nicht-entzündlichen Aerosolformulierungen sind jedoch aufgrund der relativ hohen inneren Oberfläche der Korrosionsschutzpigmente und der sich daraus ergebenden Erhöhung der Viskosität speziell im vorliegenden Bereich niedriger Treibgasgehalte umfangreichere Entwicklungsarbeiten zu erwarten.

2.4 Reduzierung der Lungengängigkeit von Aerosolgemischen

Ein wesentliches Kriterium hinsichtlich der gesundheitlichen Einstufung von Aerosolprodukten stellt deren Lungengängigkeit dar. Man unterscheidet hierbei zwischen folgenden Fraktionen:

Einatembarer Anteil – kann durch die Nase aufgenommen werden

Thorakaler Anteil – erreicht den Brustraum / die oberen Atemwege

Aveolengängiger Anteil – kann über die Lungenbläschen ins Blut aufgenommen werden,
wird oftmals mit dem lungengängigen Anteil gleichgesetzt

Die Zuordnung der Aerosoltröpfchen zu den einzelnen Fraktionen wird gemäß EN 481⁵ durch deren Partikelgröße bestimmt. So beinhaltet der thorakale Anteil Partikel mit einem Durchmesser unterhalb zehn Mikrometer, der aveolengängige Anteil umfasst die Partikel mit einem Durchmesser kleiner als vier Mikrometer.

Im Zuge der Entwicklung von nicht entzündbaren Aerosolformulierungen waren verschiedene Haupteinflussfaktoren identifiziert worden. In Fortsetzung dieser Entwicklungsarbeiten sollte nun untersucht werden, ob und welche Zusammenhänge zwischen Nicht-Entzündbarkeit und verminderter Lungengängigkeit von Aerosolen bestehen. Hierzu wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart Bestimmungen der Partikelgrößenverteilungen von Aerosolen mittels verschiedener Messmethodiken durchgeführt.

2.4.1 Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Aerosolen mittels Laserbeugung

Die Messungen erfolgten unter Einsatz des Laserbeugungsgerätes Typ Spraytec von Fa. Malvern Instruments.

Innerhalb der ersten Versuchsreihe sollte die am besten geeignete Einstellung der Messparameter sowie die Reproduzierbarkeit der Messwerte ermittelt werden. Hierzu wurden vergleichende Messungen an verschiedenen Spraydosen der neu entwickelten entzündbaren Aerosolformulierung im Farbton schwarz hochglänzend in unterschiedlichen räumlichen Bereichen des Sprühstrahls durchgeführt. Daneben wurden die Restfüllmengen der Dosen variiert.

Die in den Versuchen erhaltenen Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei größeren Messabständen von der Mitte des Partikelstrahls werden geringere Werte der Partikelgrößen erhalten.
- Die Erwärmung von Aerosolgemischen führt zu kleineren Werten der Partikelgrößenverteilungen.
- Bei Einsatz verschiedener Sprühköpfe desselben Typs wurden allgemein keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Partikelgrößenverteilungen ermittelt. Jedoch war dies in Einzelfällen wahrscheinlich auf Grund der Fertigungstoleranzen der Fall.
- Speziell bei höheren Messabständen von der Mitte des Partikelstrahls war eine gute Wiederholbarkeit bei zeitnahen Messungen gegeben.
- Die Messergebnisse werden in starkem Maße vom Sprühvorgang selbst bzw. der sprühenden Person beeinflusst. Hierbei spielt die exakte Richtung der auf den Sprühkopf ausgeübten Kraft eine wesentliche Rolle.
- Verschiedene Füllgrade der Dosen zeigten keinen Einfluss auf die ermittelten Partikelgrößenverteilungen, auch im Fall längerer Sprühdauern und trotz hörbarer Verringerung der Aussprührate.
- Sämtliche ermittelten Partikelgrößenverteilungen zeigten das Vorhandensein aveolengängiger Anteile im Sprühnebel an. Diese lagen unter vier Prozent bezogen auf die Volumenverteilung der Partikelgrößen.

Die Abnahme der gemessenen Partikeldurchmesser bei höherem Abstand der Messzone vom Mittelpunkt des Sprühstrahls ist wahrscheinlich dadurch bedingt, dass größere Partikel das Messvolumen gar nicht erreichen. Diese Partikel fallen schneller auf den Boden und erzeugten auch eine sichtbare Anlackierung des Untergrundes in Richtung des Messbereiches. Daneben nehmen die Durchmesser der Aerosolpartikel während des Fluges durch die Wirkung des Treibgases ab; zudem verbleiben die kleineren Partikel statistisch länger in der Messzone. Da für die Betrachtung der lungengängigen Anteile speziell die Aerosolpartikel mit kleinerem Durchmesser von Interesse sind, wurde für die weiteren Untersuchungen der Messabstand von 150 mm ausgewählt.

Bei den Messungen wurde der sog. Beamsteering-Effekt beobachtet. Bedingt durch Brechungsindex-Differenzen bei Austritt des Treibgases aus dem Aerosolgemisch sowie dessen Mischung mit der umgebenden Luft, wird bei der Laserbeugung ein zweiter Peak in der Partikelgrößenverteilung bei höheren Partikeldurchmessern angezeigt. Teilweise äußert sich dieser Effekt auch in einer Verbreiterung der Partikelgrößenverteilung in Richtung höherer Partikeldurchmesser. Mit Hilfe eines speziellen Rechenalgorithmus war es jedoch möglich, die ermittelten Partikelgrößenverteilungen nachträglich zu korrigieren.

Die primär ermittelten Partikelgrößenverteilungen sowie die durchgeführte Korrektur sind schematisch in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

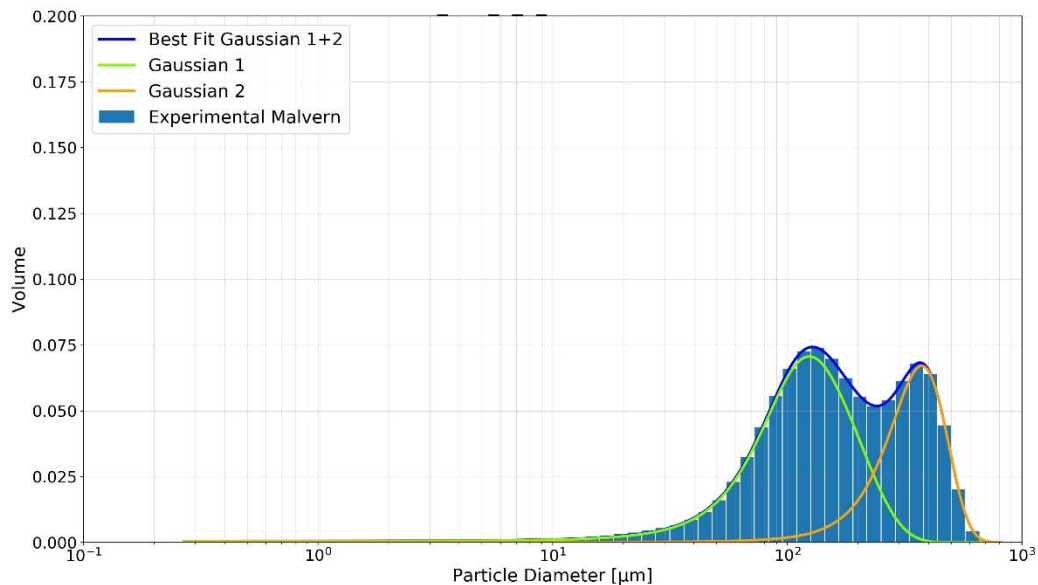


Abbildung 10: Schematische Darstellung der mittels Laserbeugung primär ermittelten Partikelgrößenverteilungen sowie der durchgeführten Korrektur

Hierbei bedeuten:

Grüne Kurve: tatsächliche Partikelgrößenverteilung der Aerosoltröpfchen

Orangene Kurve: berechneter Anteil an Partikeln aufgrund des Beamsteering-Effektes

Aufgrund der beobachteten starken Abhängigkeit der Messergebnisse vom Auslöseprozess der Sprühdosen wurde für die weiteren Messungen die gleiche pneumatisch arbeitende Auslösevorrichtung verwendet wie diese bereits für die Messungen der Entzündbarkeit eingesetzt wurde.

Nachdem im ersten Schritt die Reproduzierbarkeit der Messwerte sowie der Einfluss verschiedener Messparameter auf die erhaltenen Werte der Partikelgrößenverteilungen ermittelt worden waren, wurde im nächsten Schritt der Effekt verschiedener Variationen der Dosenkonfiguration sowie der Aerosolrezeptur selbst auf die Partikelgrößenverteilungen bestimmt. Als Ausgangspunkt diente wiederum der Produkttyp Belton Free 3.0 schwarz hochglänzend.

Zusammenfassend ließen sich folgende Aussagen treffen:

- Die Veränderung eines einzigen Parameters bzw. einer bestimmten Kombination von Parametern führte zu größeren Änderungen bzgl. der Partikelgrößenverteilung bzw. Ausprühraten.
- Bei Vergrößerung des Materialdurchsatzes durch den Sprühkopf sowie Einsatz von Ventilen ohne Seitenloch wurden höhere Werte der Partikelgrößen sowie der Ausprühraten beobachtet.
- Die Kombination der Parameter „Wegfall des Seitenloches“ und „Wegfall von Ethanol“ führte bei Einsatz verschiedener Sprühköpfe jeweils zu einer besonders signifikanten Erhöhung der Ausprühraten.

- Die Verringerung des DME-Anteiles auf 25 Gew.% führte wie erwartet zu einer Erhöhung der Partikelgrößen sowie zu einer Reduzierung der Aussprührate.
- Bei weiterer Reduktion des DME-Gehaltes auf 23 Gew.% änderte sich zwar die Partikelgrößenverteilung nicht, jedoch wurde eine deutlich schnellere Verringerung der Aussprührate beobachtet.

Aus den erhaltenen Resultaten wird ersichtlich, dass die maßgebenden Faktoren für die Entzündbarkeit von Aerosolen auch starke Auswirkungen auf die Partikelgrößenverteilungen der Aerosolnebel besitzen. Insbesondere war die Verringerung des Treibgasanteiles in den Aerosolformulierungen mit einer Erhöhung der Partikeldurchmesser und damit mit einer Reduzierung des lungengängigen Anteils des Aerosol-Sprühnebels verbunden. Eine Erhöhung der Aussprührate stand in den meisten Fällen ebenfalls mit einer Vergrößerung der Partikeldurchmesser in Zusammenhang.

Die Auswirkungen der verschiedenen Parameter auf die Werte der Aussprührate, der Partikelgrößenverteilung sowie der lungengängigen Fraktionen sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Versuchsnummer	mit Seitenloch	ohne Seitenloch	Gehalt an Ethanol	Sprühkopf	Abfüll-verhältnis	ASR [g/s] Mittelwert Wertebereich	D _{v50} [µm] Mittelwert Wertebereich	Einatembarer Anteil [%]	Thorakaler Anteil [%]	Aveolengängiger Anteil [%]
1	+	-	+	030	68:32	0,67	112,06	54,2	1,7	0,44
7	+	-	-	030	68:32	1,08	104,75	51,6	1,5	0,37
5	-	+	+	030	68:32	0,85	130,33	50,7	0,5	0,10
10	-	+	-	030	68:32	1,44	125	50,9	0,8	0,22
2	+	-	+	010	68:32	0,48	71,28	53,6	3,6	0,91
8	+	-	-	010	68:32	0,47	68,26	53,7	3,7	0,94
6	-	+	+	010	68:32	0,91	95,5	51,6	1,3	0,26
11	-	+	-	010	68:32	0,91	87,59	51,6	1,0	0,19
12	-	+	-	010	75:25	0,88	121,95	51,0	0,8	0,15
13	-	+	-	010	77:23	0,64	120,58	50,9	0,6	0,12

Tabelle 28: Werte der Aussprührate, der Partikelgrößenverteilung sowie der lungengängigen Fraktionen in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern der Aerosolformulierungen

Hierbei zeigte sich, dass verschiedene Aerosolformulierungen, speziell bei Reduktion des Treibgasanteiles sowie bei Einsatz von Ventilen ohne Seitenloch aveolengängige Anteile von lediglich noch ca. 0,1 Gewichtsprozent bezogen auf die Volumenverteilung aufwiesen. Dieses entspricht einer Reduktion von ca. 75 % bezogen auf den Referenzwert von Versuch 1. Gerade die Aerosolformulierungen mit deutlich verringertem Treibgasanteil sind auch zur Erzielung von nicht entzündbaren Aerosolgemischen geeignet.

Bei der Interpretation der Messergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei der Laserbeugung die sog. Volumen-gewichtete Partikelgrößenverteilung ermittelt wird, welche den Anteil an Partikeln mit höherem Partikeldurchmesser stärker betont. Zudem wird für die Auswertung der Rohdaten das Vorliegen einer log-normal-Verteilung der Partikeldurchmesser angenommen. Diese Faktoren führen dazu, dass der Feinanteil der Partikelgrößenverteilung nur mit größeren Unsicherheiten bestimmt werden kann.

Zur Absicherung der erhaltenen Resultate wurden die Werte der Partikelgrößenverteilungen nochmals mit einer zweiten Messtechnik verifiziert.

2.4.2 Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Aerosolen mittels Hochgeschwindigkeitskamera

Die Messungen erfolgten unter Einsatz des Kamerasystems SpraySpy von Fa. AOM.

Bildanalytische Messverfahren wie die Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera erfassen die sog. Anzahl-gewichtete Partikelgrößenverteilung, welche in der Lage ist, den Feinanteil der Partikel deutlich genauer zu erfassen. Daher wurden mehrere Muster aus der letzten Versuchsreihe zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mittels Laserbeugung herausgegriffen und diese vergleichend mit dem Verfahren der Hochgeschwindigkeitsbildanalyse vermessen. Da die Speicherung der bei einer einzelnen Messung erfassten Daten einen Zeitraum von mehreren Minuten in Anspruch nahm, war eine exakte Nachstellung der bei der Laserbeugung angewendeten Sprühvorgänge nicht möglich. Aus diesem Grund erfolgte eine Fokussierung auf bestimmte Zeitintervalle der Sprühprozesse.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden in allen Fällen Partikel von runder Form detektiert. Zudem erfolgte keine Veränderung der Partikelgröße während des Durchtritts durch den Messraum. Die Anzahl der erfassten und ausgewerteten Partikel lag bei jeder Messung über einem Wert von 100000, so dass eine ausreichende statistische Relevanz gegeben war. Im Gegensatz zu den Messungen mit Laserbeugung wurden monomodale Partikelgrößenverteilungen ermittelt.

Die mit den unterschiedlichen Messverfahren erhaltenen Kennwerte der Partikelgrößenverteilungen sind in der nachfolgenden Tabelle einander vergleichend gegenübergestellt. Hierbei wurden die mit dem bildanalytischen Verfahren erfassten Werte der Anzahl-gewichteten Partikelgrößenverteilung in die entsprechenden Werte der Volumen-gewichteten Verteilung umgerechnet.

Probennummer Laserbeugung	Messverfahren	D _v 10 [µm]	D _v 50 [µm]	D _v 90 [µm]
2	Laserbeugung	19	56	108
2	Bildanalyse	45	95	176
13	Laserbeugung	48	119	261
13	Bildanalyse	80	151	292

Tabelle 29: Vergleich der mit den Messverfahren der Laserbeugung bzw. Bildanalyse erhaltenen Kennwerte der Partikelgrößenverteilungen der Aerosoltröpfchen

Die mit den unterschiedlichen Messmethoden erhaltenen Kennwerte der Partikelgrößenverteilung zeigten zwar deutliche Unterschiede, jedoch ist hierbei die Umrechnung der Originaldaten der Bildanalyse zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Partikelanzahl wurden nur wenige größere Partikel detektiert, welche aber bei der Umrechnung in die Volumen-gewichtete Verteilung eine bedeutsame Rolle gewinnen. Daher ist bei der Bewertung der Messdaten von größerer Wichtigkeit, dass die erhaltenen Werte der Partikeldurchmesser hinsichtlich der Dimension vergleichbar sind. Auf dieser Basis zeigen die Einzeldaten und Mittelwerte der ermittelten Partikelgrößenverteilungen eine gute Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Messtechniken.

Bei dem bildanalytischen Verfahren bestehen jedoch auch Einschränkungen hinsichtlich der ermittelten Feinanteile. So wird die maximale Auflösung durch die Größe bestimmt, welche der Seitenlänge eines einzelnen Pixels entspricht. Für die durchgeführten Messungen beträgt dieser Wert ca. drei Mikrometer. Hierdurch können kleinere Partikel mit einem Durchmesser von weniger als zehn Mikrometer von der Hochgeschwindigkeitskamera im Gegensatz zu Messungen mit Laserbeugung nicht mehr erfasst werden. Die mangelhafte Auflösung im Feinstbereich könnte daher ebenfalls als Grund für die mit der Bildanalyse erhaltenen höheren Partikeldurchmesser herangezogen werden.

Insgesamt bestätigten die durchgeführten Messungen die geringen Anteile an lungengängigen Partikeln bei den neuen wässrigen Aerosolformulierungen. Die neu entwickelte Messmethodik stellt die Basis für zukünftige Aerosolentwicklungen mit weiter reduziertem Anteil an lungengängigen Partikeln dar.

Die geeignetste Messmethodik besteht dabei voraussichtlich in einer Kombination beider Messverfahren, wobei der mit der Bildanalyse ermittelte Kennwert der Partikelgrößenverteilung D_v50 als Normierung für die log-normal verteilte Kurve der mittels Laserbeugung ermittelten Partikelgrößenverteilung dienen kann.

Die Qualifizierung einer derartigen Messtechnik, welche unter realistischen Bedingungen die Partikelgrößenverteilung im Sprühkegel erfasst, ist jedoch Voraussetzung für die exakte Bestimmung der lungengängigen Fraktionen in Aerosolen.

2.5 Bewertung der Projektergebnisse

Die im Zuge des Entwicklungsprojektes ausgearbeiteten Aerosolformulierungen erfüllen die gestellten Anforderungen fast vollständig. Dies gilt insbesondere für die ökologischen Anforderungen in Bezug auf die Minimierung der Anteile an organischen Lösemitteln und Treibgasen sowie auch für die Reduktion der lungengängigen Aerosolpartikel. Durch die Reduzierung des Anteils an organischen Lösemitteln von mehr als 98 % sowie der VOC-Gehalte um mehr als 65 % konnten auch die CO₂-Emissionen um nahezu denselben Anteil reduziert werden. Hierdurch wurde die Nachhaltigkeit der Aerosolprodukte signifikant erhöht und eine maximale Entlastung der Umwelt erzielt. Bedingt durch die Reduktion der aveolengängigen Partikel um ca. 75 % kann auch von einer signifikanten Verringerung der Beeinträchtigung der Gesundheit ausgegangen werden. Die praktisch geruchsneutralen Aerosole sind nicht entzündbar und müssen daher nicht mehr mit dem Flammensymbol gekennzeichnet werden.

Die neu entwickelten wässrigen Aerosolformulierungen weisen trotz der Minimierung der organischen Komponenten mit den Lösemittel-basierten Aerosolsystemen vergleichbare anwendungstechnische Eigenschaften auf. Bei den nicht entzündbaren Formulierungen müssen jedoch Abstriche hinsichtlich der Trocknungsgeschwindigkeit, der Zerstäubung sowie der Kratzfestigkeit in Kauf genommen werden.

Die dargestellten Zusammenhänge werden in den nachfolgenden Diagrammen und Tabellen veranschaulicht.

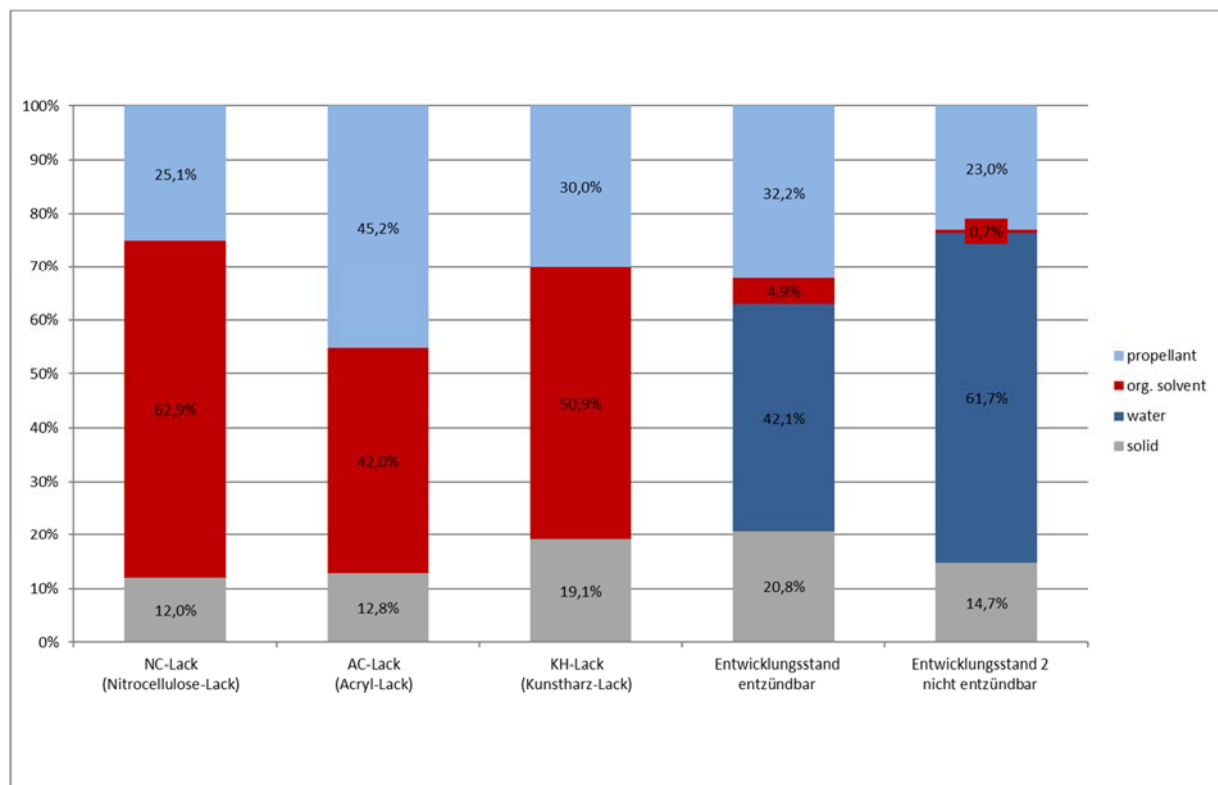


Diagramm 1: Vergleich der Zusammensetzungen Lösemittel-basierter Aerosole mit den neuen Wasser-basierten Formulierungen

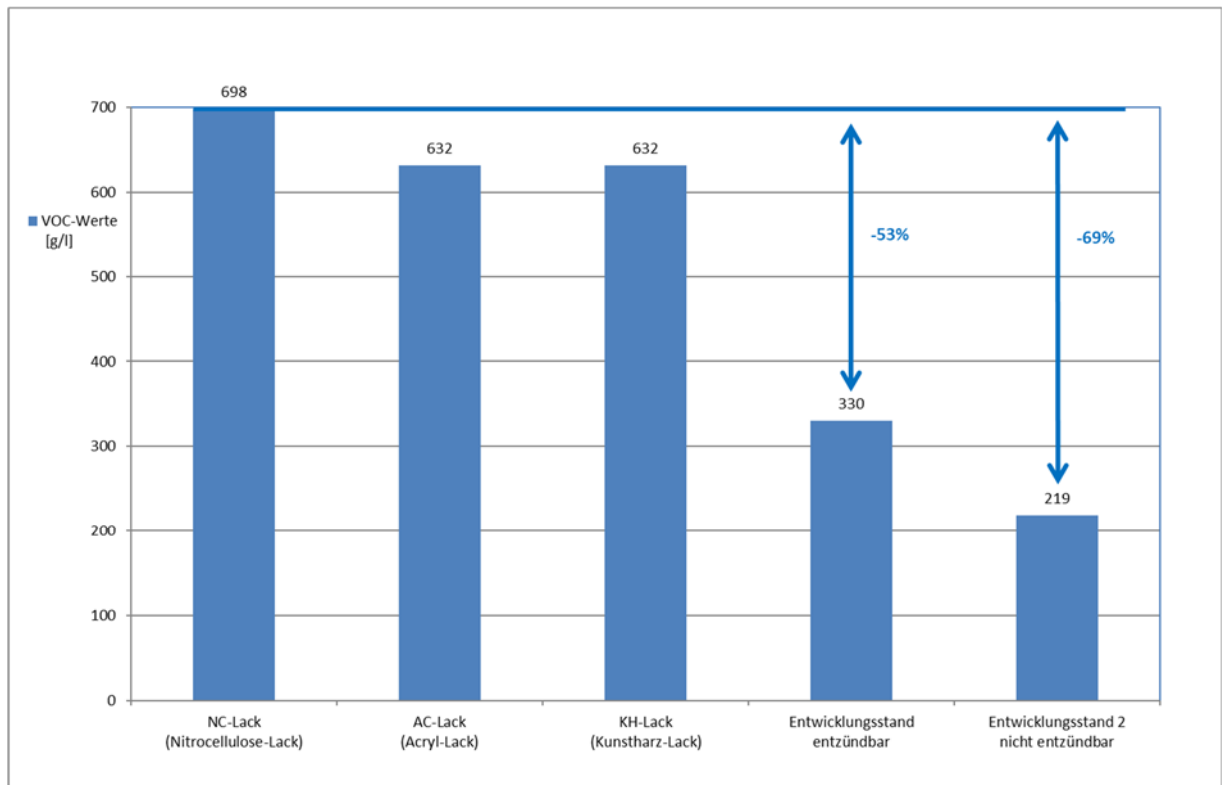


Diagramm 2: Vergleich der VOC-Werte Lösemittel-basierter Aerosole mit den neuen Wasser-basierten Formulierungen

Anforderungskriterium	Sollwert	Entwicklungsstand 2 nicht entzündbar
Reduktion Lösemittelgehalt [%]	> 90	98
Reduktion VOC-Gehalt [%]	> 50	69
Reduktion CO ₂ -Emission [%]	> 40	69
Kennzeichnung mit Flammensymbol	nein	nein
Verringerung der Lungengängigkeit [%]	> 70	75
Füllvermögen TSD /SG [µm]	> 20	20 - 25
Ergiebigkeit bei TSD 50 µm [m ² /Dose]	≥ 0,4	0,4
Zerstäubung	gut, ≥ KW 7	6
Geruch	neutral, ≥ KW 8	8
Deckvermögen (in Abhängigkeit vom Farbton)	1 – 3 SG	1 – 3 SG
Standvermögen [µm]	> 20	25 - 30
Überlackierbarkeit mit sich selbst	≤ 3 Tage	≥ 7 Tage

Trocknung (Glanzgrad hochglzd) (deckende Lackierung)		
Erreichung Trockengrad Tg 1 ¹	≤ 3 h	2,5 h
Erreichung Trockengrad Tg 3 ¹	≤ 12 h	3,5 h
Erreichung Trockengrad Tg 5 ¹	≤ 3 Tage	48 h
Lackoberfläche	gut, ≥ KW 7	8
Glanzgrade	hochglänzend bis matt	hochglänzend bis matt
Härte / Kratzbeständigkeit	gut, ≥ KW 6	1
Hafffestigkeit auf Stahl ²	Gt ≤ 1	Gt 0 - 1
Chemikalienbeständigkeit gegen Wasser und Haushaltsreiniger	gut, ≥ KW 7	7
Korrosionsschutz Salzsprühnebeltest ³ über 24 Stunden	Ri ≤ 1	Ri 1
Korrosion von Dosenkomponenten	nein	nein
Einsatz ökologisches Treibgas	ja	ja

Tabelle 30: Vergleich der Eigenschaftswerte der neu entwickelten Aerosolformulierungen mit dem Anforderungsprofil

Anforderungskriterium	Standardprodukt auf Nitrocellulose-Basis	Entwicklungsstand 2 nicht entzündbar
Reduktion Lösemittelgehalt [%]	0	98
Reduktion VOC-Gehalt [%]	0	69
Reduktion CO ₂ -Emission [%]	0	69
Kennzeichnung mit Flammensymbol	ja	nein
Verringerung der Lungengängigkeit [%]	0	75
Füllvermögen TSD /SG [µm]	15 - 20	20 - 25
Ergiebigkeit bei TSD 50 µm [m ² /Dose]	0,4	0,4
Zerstäubung	gut, ≥ KW 7	6
Geruch	stark, KW = 1	8
Deckvermögen (in Abhängigkeit vom Farbton)	1 – 3 SG	1 – 3 SG
Standvermögen [µm]	15 - 20	25 - 30
Überlackierbarkeit mit sich selbst	≤ 30 min	≥ 7 Tage
Trocknung (Glanzgrad hochglzd)		
Erreichung Trockengrad Tg 1 ¹	≤ 10 min	2,5 h

Erreichung Trockengrad Tg 3 ¹	≤ 30 min	3,5 h
Erreichung Trockengrad Tg 5 ¹	≤ 1 Tag	48 h
Lackoberfläche	8	8
Glanzgrade	hochglänzend bis matt	hochglänzend bis matt
Härte / Kratzbeständigkeit	gut, ≥ KW 6	1
Haftfestigkeit auf Stahl ²	Gt 1 - 2	Gt 0 - 1
Chemikalienbeständigkeit gegen Wasser und Haushaltsreiniger	gut, ≥ KW 7	7
Korrosionsschutz Salzsprühnebeltest ³ über 24 Stunden	Ri ≤ 1	Ri 1
Korrosion von Dosenkomponenten	nein	nein
Einsatz ökologisches Treibgas	nein	ja

Tabelle 31: Vergleich der Eigenschaftswerte der neu entwickelten Aerosolformulierungen mit einem Standard-Lösemittel-Produkt auf NC-Basis

Die neuen Aerosolformulierungen sind zusätzlich gekennzeichnet durch:

- Neutraler Geruch, ideal für Innenanwendungen
- Fast vollständiger Verzicht auf organische Lösemittel für erhöhten Schutz der Gesundheit
- Erfüllung der Norm EN 71-3 hinsichtlich Anforderungen für Kinderspielzeug (Zertifizierung noch ausstehend)
- Rezyklierbarkeit von verwendeten Kunststoffmaterialien und metallischen Komponenten

Eine weitere signifikante Erhöhung der Nachhaltigkeit, der Schonung natürlicher Ressourcen sowie die Reduktion der CO₂-Emissionen ergibt sich durch den Einsatz von aus Bio-Ethanol hergestelltem DME-Treibgas.

2.6 Verbreitung der Projektergebnisse

Als Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse befinden sich Veröffentlichungen in Fachzeitschriften sowie Vortragspräsentationen in Planung.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich aussagen, dass die im Zuge des Projektes ausgearbeiteten Aerosolformulierungen die gestellten Anforderungen fast vollständig erfüllen. Die gilt in speziellem Maße hinsichtlich der ökologischen Anforderungen in Bezug auf die Minimierung des Anteiles an organischen Lösemitteln und Treibgas. Zudem konnte die Lungengängigkeit der Aerosolpartikel signifikant reduziert werden. Hierbei konnten gleichzeitig die anwendungstechnischen Eigenschaften im Vergleich zu den bislang verfügbaren Wasser-basierten Systemen beibehalten werden. Das gleiche gilt auch in Bezug auf die bisherigen Lösemittel-basierten Aerosol-systeme. Bei den nicht entzündbaren Formulierungen müssen jedoch Abstriche hinsichtlich der Trocknungsgeschwindigkeit, der Zerstäubung sowie der Kratzfestigkeit in Kauf genommen werden.

Zukünftige Entwicklungsarbeiten sind auf folgende Zielsetzungen ausgerichtet:

- Modellierung des Fertigungsprozesses auf eine neu entwickelte Produktionsanlage
- Umsetzung des Stammlackkonzeptes durch im Glanzgrad eingestellte Stammlacke zur weiteren Vereinfachung und qualitativen Verbesserung des Fertigungsprozesses
- Einsatz automatischer Mischstationen für Pigmentpasten mit entsprechender Farbmetrik
- Verhinderung der Lungengängigkeit von wässrigen Aerosolen durch Beeinflussung der Tröpfchengröße durch die Lack- und Aerosolformulierung, inklusive der Weiterentwicklung und Verifizierung der Messtechnik
- Innovative und nachhaltige Lösungen für Dosenkomponenten, z.B. Kunststoffteile aus Biopolymeren
- Einbeziehung des Produktlebenszyklus inklusive der Entsorgung der Aerosoldosen

Literaturverzeichnis

- 1 Norm (zurückgezogen) DIN 53150: Beschichtungsstoffe - Bestimmung des Trockengrades von Beschichtungen
- 2 Norm EN ISO 2409: Beschichtungsstoffe - Gitterschnittprüfung
- 3 Norm EN ISO 4628-3: Beschichtungsstoffe - Beurteilung von Beschichtungsschäden - Bewertung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen - Teil 3: Bewertung des Rostgrades
- 4 UN-Prüfhandbuch, Abschnitt 31 „Classification procedures, test methods and criteria relating to flammable aerosols of class 2“.
- 5 Norm EN 481: Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel