

Dieter Möckel, Michael Beyer

Untersuchung der Explosionsfähigkeit organisch lösemittelfreier UV-Lacke in feinversprühtem Zustand



ISSN 1868-5838
ISBN 978-3-95606-208-7

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Explosionsschutz
PTB-Ex-8
Braunschweig, September 2015

Dieter Möckel, Michael Beyer

**Untersuchung der Explosionsfähigkeit organisch
lösemittelfreier UV-Lacke in feinversprühtem Zustand**

Untersuchung der Explosionsfähigkeit organisch lösemittelfreier UV-Lacke in feinversprühtem Zustand

Abschlussbericht zu den
PTB-Forschungsvorhaben
FV-37015, 37016, 37020

Laufzeit: 01.11.2011 – 31.03.2013
Projektleiter: Dr.-Ing. Michael Beyer
Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Dieter Möckel

Kooperationspartner

Berufsgenossenschaft Holz und Metall

Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie

KARL WÖRWAG Lack- und Farbenfabrik GmbH & Co. KG

Lankwitzer Lackfabrik GmbH

Sturm Maschinenbau GmbH

Eisenmann Anlagenbau GmbH & Co. KG

WALTHER Spritz- und Lackiersysteme GmbH

Inhaltsverzeichnis

Kooperationspartner	2
Inhaltsverzeichnis	3
1 Einleitung	5
2 Bisheriger Kenntnisstand	6
3 Versuchsaufbau	7
4 Versuchsdurchführung	9
5 Ergebnisse	11
6 Sicherheitstechnische Schlussfolgerungen	14
7 Zusammenfassung	15
8 Literatur	16
Anhang A: Lackmischungen	17
Anhang B: Messergebnisse UV-Lacke	18
Anhang C: Messergebnisse Lösemittel	19

1 Einleitung

Zur genaueren Beurteilung der Explosionsgefährdung wurde in mehreren von der PTB-Braunschweig durchgeführten Forschungsvorhaben [1, 2] die Entzündbarkeit flüssiger organischer Beschichtungsstoffe in feinversprühtem Zustand untersucht. Mit Hilfe einer dabei entwickelten Formel („PTB-Formel“) [1, 2, 3] ist es möglich, die Entzündbarkeit der Beschichtungsstoffe zu bewerten, sofern deren Anteile an organischem Lösemittel, organischem Feststoff, anorganischem Feststoff und Wasser bekannt sind.

Diese Formel wurde empirisch entwickelt und besitzt streng genommen nur innerhalb der Untersuchungsbereiche ihre Gültigkeit. Andererseits besagt die Formel, dass eine Spritzwolke dann entzündbar ist, wenn es gelingt, ihre Komponenten so auf binäre Gemische zu verteilen, dass jedes binäre Gemisch brennbar ist. Die Anwendung dieser Formel auf flüssige Lacke mit organischen Bestandteilen, aber ohne flüssige organische Lösemittel (VOC-frei) und Wasser, ist daher nicht von sich aus ausgeschlossen. Sie führt zwangsläufig zu der Einstufung „entzündbar“, da überwiegend brennbare Komponenten vorliegen.

Diese Einstufung steht im Einklang zur Einstufung organischer Pulverlacke [4, 5], die ebenfalls frei von organischen Lösemitteln und entzündlich sind. Aus der Einstufung folgt, dass die nach den Produktnormen – insbesondere für die elektrostatische Applikationstechnik – geforderten Explosionsschutzmaßnahmen einzuhalten sind, also Zündschutz und ggf. örtlich wirkende Löschanlagen.

Bei der in der Praxis des Spritzlackierens angewendeten EN 12215 [6] bildet jedoch die Berechnung der Durchschnittskonzentration von organischen Lösemitteln innerhalb einer Spritzkabine oder eines Spritzstandes die Grundlage zur Beurteilung der Explosionsgefährdung. Beim Fehlen organischer Lösemittel ergibt sich in der Berechnung der Wert „0 % der UEG“. Die Gefahren durch brennbare Stoffe in der Spritzwolke und auf dem Werkstück werden somit nicht berücksichtigt. Diese Vernachlässigung ist bei lösemittelhaltigen Spritzwolken vertretbar, führt jedoch bei lösemittelfreien UV-Lacken (VOC-freien Spritzwolken) zu dem fragwürdigen Ergebnis, dass kein explosionsgefährdeter Bereich, keine Zone eingeteilt wird und somit keine Explosionsschutzmaßnahmen notwendig sind.

Hierdurch ergibt sich eine sicherheitstechnische Lücke, die durch den Widerspruch zwischen der Beurteilung „keine Ex-Zone“ und der Forderung nach Zündschutz in der Praxis zu Problemen führt. Diese sicherheitstechnische Lücke soll durch dieses Projekt geschlossen werden.

2 Bisheriger Kenntnisstand

Organisch lösemittelfreie UV-Lacke und zugehörige organisch lösemittelfreie Reinigungsmittel werden als „nicht brennbare Flüssigkeiten“ hergestellt, transportiert, gelagert und verspritzt. Diese Lacke sind in der Regel vor der Aushärtung mittels UV-Licht für die menschliche Haut gesundheitsschädlich. Wegen dieser Eigenschaft werden ihre Gebinde sichtbar gekennzeichnet und die Sicherheitsdatenblätter enthalten entsprechende Hinweise. Aufgrund der Angabe „lösemittelfrei“ bzw. „VOC-frei“ wurde bisher bei der Spritzapplikation dieser Lacke nicht von einer Explosionsgefahr ausgegangen. Im Bereich des Spritzlackierens bekommen der Lackierer und der Betreiber der Beschichtungsanlagen keine offen ersichtlichen Hinweise auf potentielle Gefährdungen in Bezug auf Brand- und Explosionsgefahren.

Die ATEX-Richtlinie [7] definiert „Explosionsfähige Atmosphäre“ als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben unter atmosphärischen Bedingungen, in dem sich der Verbrennungsvorgang nach erfolgter Entzündung auf das gesamte unverbrannte Gemisch überträgt. Fein versprühte Flüssigkeiten aus entzündbarem Material können explosionsfähige Nebel bilden, auch dann, wenn sie keine leicht flüchtigen Bestandteile enthalten und somit bei atmosphärischen Bedingungen keine explosionsfähigen Dampf/Luft-Gemische entstehen können [8, 9]. Die Nebel können auch dann explosionsfähig sein, wenn sie wie Wasserlacke nur zum Teil aus entzündbaren Bestandteilen bestehen [1, 2].

Es ist bekannt, dass Dämpfe normalentzündlicher Lösemittel wie z.B. Hexan und andere einen Flammpunkt deutlich kleiner 25 °C aufweisen und eine Mindestzündenergie (MZE) im Bereich von 0,20 mJ bis 0,55 mJ besitzen [10]. Für das Spritzlackieren geht man von einer MZE der verwendeten Lacke und Lösemittel von größer 0,24 mJ aus [3].

Dämpfe von organischen Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt oberhalb der Umgebungstemperatur können selbst mit einer starken Zündquelle, z.B. einer offenen Flamme, nicht entzündet werden. Dies ändert sich jedoch schlagartig, wenn diese Flüssigkeiten verspritzt werden [8, 9].

Frühere Versuche der PTB ergaben, dass in Abhängigkeit von Turbulenz, Spritzstrahldichte und Viskosität verspritzte VOC-freie organische Lösemittel bei optimierter Turbulenz und Spritzstrahldichte eine Zündenergie zwischen 6 mJ und 10 mJ aufweisen [1, 2]. Im Experiment war diese Zündenergie unabhängig vom Flammpunkt der zwischen 38 °C und 150 °C lag [2]. Bei höheren Flammpunkten nahm die Viskosität zu und das Ergebnis war deshalb nicht vergleichbar. Beispielsweise erzielten höher viskose Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt von 190 °C Zündenergiewerte von mindestens 130 mJ [2]. Eine erhöhte Turbulenz erhöht ebenfalls die Zündenergie auf 10.000 mJ und mehr [2].

3 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden in einem Brandcontainer durchgeführt, dessen Vorderseite offen und dessen anderen Seiten geschlossen waren. Vor dem Container war die Beschichtungsstoffversorgung, bestehend aus einem mit Druckluft von bis zu 8 bar versorgten Druckgefäß mit Beschichtungsstoff, Versorgungs- und Steuerleitungen für Druckluft und Versorgungsleitung für Beschichtungsstoff, aufgebaut. Über die Versorgungs- und Steuerleitungen wurde eine Automatik Spritzpistole der Firma WALTHER PILOT vom Typ WA 700 im vorderen Bereich des Containers betrieben.

Die Beschichtungsstoffe wurden über eine Funkenstrecke in den nicht dargestellten Brandcontainer hinein zerstäubt (Bild 1). Im Druckgefäß wurden 25 kg Beschichtungsstoff mit Förderluft von 2 bar bis 6 bar beaufschlagt und an der Pistole mit Zerstäuber- und Steuerluft im Bereich von 2 bar bis 6 bar über die Funkenstrecke mit der kleinstmöglicher Düse von 1,0 mm Durchmesser verspritzt. Versuche mit einem Düsendurchmesser von 0,8 mm führten sofort zu einer Verstopfung der Düse, sodass kleinere Düsen nicht verwendet werden konnten. Die Verwendung der kleinstmöglichen Düse von 1,0 mm Durchmesser stellt sicher, dass ein möglichst feiner Nebel erzeugt wird.

Durch Vorversuche konnte der am besten zündfähige Bereich der Spritzwolke ermittelt werden. Dort wurde die Funkenstrecke platziert (Bild 2). Der Endladekreis, bestehend aus Hochspannungsgenerator, Hochspannungsimpulskondensatoren, Leitungen und Elektroden, entspricht dem der Mindestzündenergiebestimmung (Bild 1). Variiert wurden die Ladespannung und die Kapazität des Entladekondensators.

Die Zerstäuber- und die Steuerluft wurden während jeder Versuchsreihe so variiert, dass sich ein möglichst fein zerstäubter Spritzstrahl und möglichst wenig Turbulenz im Bereich der Funkenstrecke einstellten. Dies geschah sehr sorgfältig, da sich die Einstellungen für feinste Zerstäubung und geringste Turbulenz gegenläufig verhalten.

Bei den Versuchen wurde zur Gewährleistung optimaler Zündbedingungen der Elektrodenabstand der Funkenstrecke, in Abhängigkeit der über einen Hochspannungsgenerator und einer Reihe von Hochspannungsimpulskondensatoren eingestellten Funkenenergie sowie des Spritzstrahles, optimiert. Bei Zündung der Spritzwolke wurde die Beschichtungsstoffversorgung abgestellt und brennender Beschichtungsstoff mit einem CO₂-Handfeuerlöscher abgelöscht.

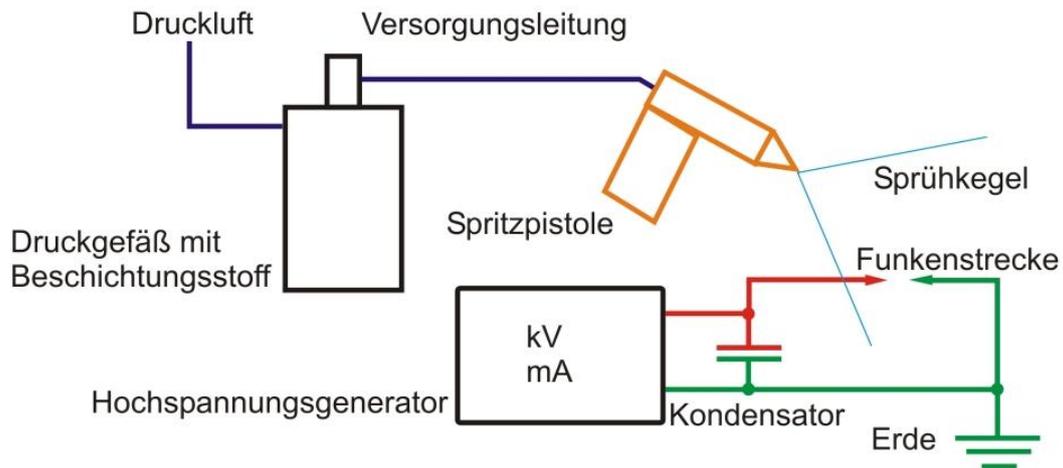


Bild 1: Versuchsaufbau

Nach erfolgreicher Zündung wurde die Versuchsreihe mit niedriger Entladeenergie fortgeführt bis, bei unterschiedlichen Kombinationen von Kapazität und Hochspannung jedoch gleicher Entladeenergie und Variation der Zerstäuber- und Steuerluft, keine Zündung mehr auftrat. Als Zündung wurde jede sichtbare Flammenerscheinung im Bereich des Spritzstrahles berücksichtigt.

Die Zündenergie wurde als Energie W der letzten Zündung nach $W = 0,5 \cdot C \cdot U^2$ angegeben. Hierbei ist C die Kapazität an der Entladeelektrode und U die Ladenspannung der Hochspannungsimpuls-kondensatoren.

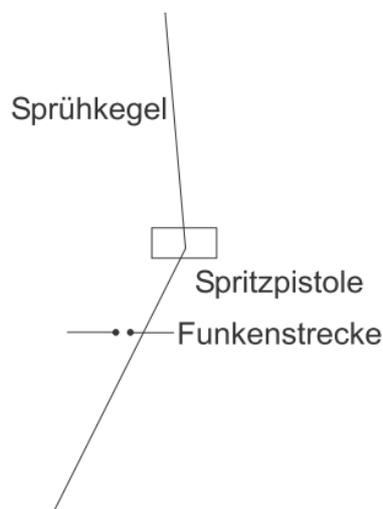


Bild 2: Anordnung der Funkenstrecke

4 Versuchsdurchführung

UV-Lacke bestehen typischerweise aus diversen Monomeren und Oligomeren in unterschiedlichem Mischungsverhältnis. Es wurden daher drei typischerweise eingesetzte Monomere zusammen mit zwei typischerweise eingesetzten Oligomeren in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen untersucht. In den experimentellen Untersuchungen wurden organisch lösemittelfreie (VOC-freie) UV-Lacke sowie zugehörige (VOC-freie und nicht VOC-freie) Reinigungsmittel verspritzt, deren Zünd- und Explosionsverhalten geprüft und ihre Zündenergie ermittelt. Neben den Monomeren und Oligomeren enthalten UV-Lacke außerdem Additive und Fotoinitiatoren.

Untersucht wurden die Monomere HEMA, HDDA und Phenoxyethylacrylat, die Oligomere Epoxyacrylat und Urethanacrylat in den Mischungsverhältnissen Monomer/Oligomer 69%/20%, 50%/39% und 35%/54% mit jeweils 2% Additiven und 9% Fotoinitiatoren (Tabelle 1). Weitere Details sind in Anhang A aufgeführt. Dabei wurden neun UV-Lackmischungen und zwei Lösemittel untersucht. Wegen des hohen Versuchsaufwands wurde auf die weitergehende Untersuchung von UV-Lacken verzichtet, die bezüglich ihres Zündverhaltens ähnlich sind, jedoch andere Oligomere enthalten.

Es wurden besonders kritische Lackzusammensetzungen ausgewählt, die in dieser Form kommerziell nicht verfügbar sind, und speziell für die Untersuchungen hergestellt wurden. Dies geschah einerseits um die Lacke mit ihren Bestandteilen geeignet charakterisieren zu können und andererseits um allgemeingültige Schlussfolgerungen zu ermöglichen.

Die Konzentration der restlichen Stoffe (Additive und Fotoinitiatoren) wurden konstant gehalten. Zusätzlich wurden noch ein typisches VOC-freies Reinigungsmittel und ein typisches Universalreinigungsmittel in die Untersuchungen mit einbezogen. Diese Reinigungsmittel gewährleisteten eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu Ergebnissen von früher durchgeführten Untersuchungen.

Somit ergibt sich für die Untersuchungen der ungünstigste praxisnahe Fall für das Verspritzen mit Spritzpistolen. Wird der Lack feiner zerstäubt, z. B. mit Hochrotationsglockenzerstäubern, können grundsätzlich auch deutlich niedrigere Zündenergien erreicht werden [2].

Tabelle 1: Untersuchte Mischungen

	Konzentrationen		
Monomer 1	69 % HEMA	50 % HEMA	35 % HEMA
Oligomer 1	20 % Epoxyacrylat	39 % Epoxyacrylat	54 % Epoxyacrylat
Stoffnummer	1666	1687	1688
Monomer 1	69 % HEMA		35 % HEMA
Oligomer 2	20 % Urethanacrylat		54 % Urethanacrylat
	1667		1689
Monomer 2	69 % HDDA		35 % HDDA
Oligomer 1	20 % Epoxyacrylat		54 % Epoxyacrylat
Stoffnummer	1715		1716
Monomer 3	69 % Phenoxyethylacrylat		35 % Phenoxyethylacrylat
Oligomer 1	20 % Epoxyacrylat		54 % Epoxyacrylat
Stoffnummer	1717		1718
VOC-freies Reinigungsmittel, Stoffnummer 1645			
Universal Reinigungsmittel, Stoffnummer 1650			

5 Ergebnisse

Die Versuche zeigten, dass alle untersuchten UV-Lacke und Reinigungsmittel grundsätzlich entzündet werden können (Bild 3). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass nur Lacknebel, welche eine hinreichende Dichte an Beschichtungsstoff aufweisen, sich im Experiment als entzündbar erwiesen. Da sehr dichte Lacknebel für qualitativ hochwertige Lackierungen ungeeignet sind, tritt der für die Entzündbarkeit erforderliche sehr hohe Lackdurchsatz im Lackierprozess mit Spritzpistolen in der Regel nicht auf.



Bild 3: Zündung eines VOC-freien UV-Lacknebels

Je nach Zusammensetzung verlöschen die Spritzwolken nach der Zündung von selbst oder reagieren explosionsartig. Nebel dünnflüssiger Lacke und Reinigungsmittel lassen sich erheblich leichter entzünden als höher viskose Beschichtungsstoffe. Bei konventionell mit oder ohne Luftunterstützung verspritzten Beschichtungsstoffen wurden für die Nebel von Reinigungsmitteln Zündenergien von 45 mJ und für UV-Lacke von 100 mJ und darüber hinaus ermittelt (Bild 4). Die Ursache liegt darin, dass beim Verspritzen dünnflüssiger Lacke und Reinigungsmittel feinere Tröpfchen erzeugt werden, welche zu ihrer Zündung weniger Energie benötigen als größere Tröpfchen [9].

Bild 5 zeigt, dass die Zündenergie umso niedriger ausfällt, je höher der Monomeranteil bzw. je geringer die Viskosität ist, da bei diesen Lacken die Viskosität maßgeblich vom Monomeranteil bestimmt wird.

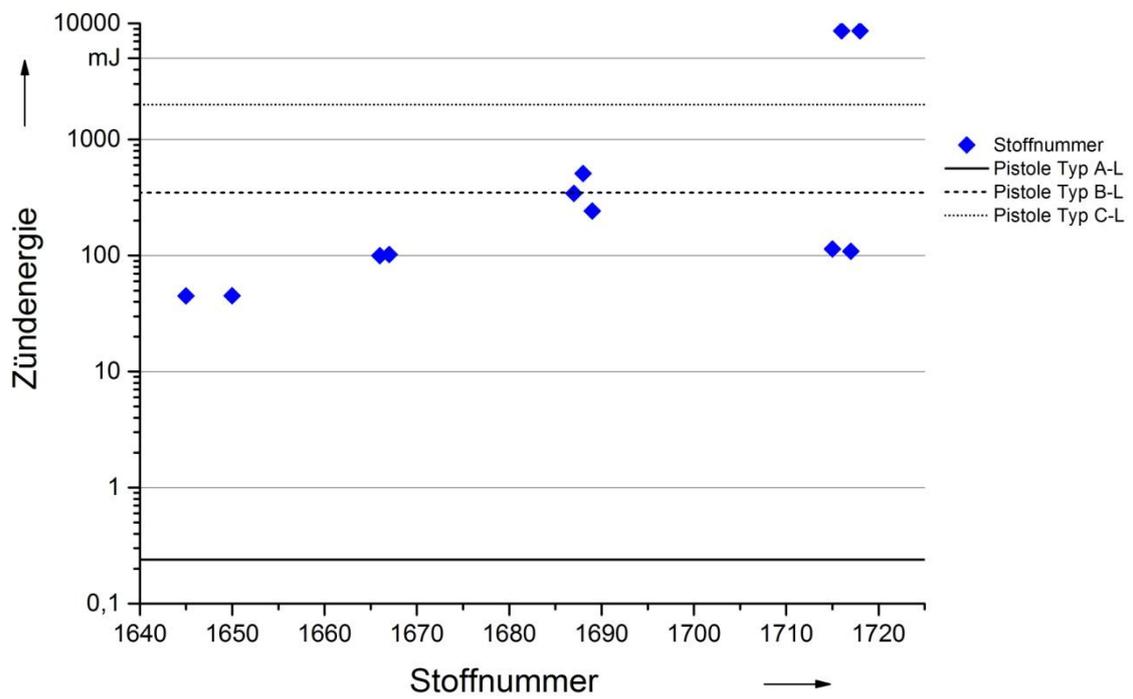


Bild 4: Zündenergie der untersuchten Proben (Stoffnummer siehe Anhang B und C)

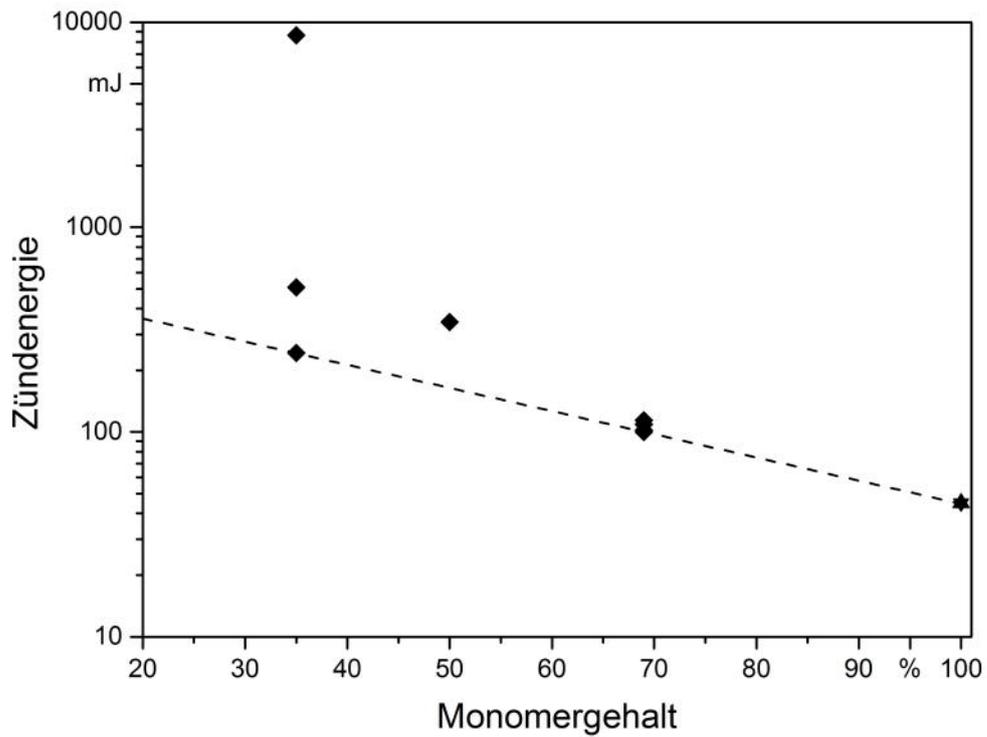


Bild 5: Zündenergie in Abhängigkeit des Monomergehalts

Vergleicht man die Zündenergie der Nebel von Reinigungsmitteln (45 mJ) mit denen vergleichbarer Lösemittel, die mit Hochrotationsglockenzerstäubern erzeugt wurden (7 mJ, [2]), reduziert sich die erforderliche Zündenergie für die feineren Nebel um etwa eine Größenordnung. Überträgt man das auf die Lacke selbst, wären minimale Zündenergien in der Größenordnung von etwa 10 mJ zu erwarten. Aus diesen Analogiebetrachtungen heraus folgt, dass selbst mit Hochrotationsglockenzerstäubern verspritzte UV-Lacke und zugehörige Reinigungsmittel nicht durch Büschelentladungen oder kleine Funkenentladungen gezündet werden können. Der Vergleich der Zündenergien von Reinigungsmitteln bei der Hochrotationsglockenzerstäubung (7 mJ bei geringer Turbulenz, 10.000 mJ bei hoher Turbulenz, [2]) mit der konventionellen Düsenzerstäubung (45 mJ) belegt auch, dass die Turbulenz bei der eingesetzten Zerstäubung im für eine Zündung günstigen Bereich lag.

6 Sicherheitstechnische Schlussfolgerungen

Die Qualitätsanforderungen an moderne Lackierungen bieten ein gewisses Maß an inhärenter Sicherheit. Bei automatisierten Lackierprozessen ist die Spritzwolke normalerweise so dünn, dass keine und wenn doch allenfalls nur kurzfristig und örtlich begrenzt eine entzündbare Konzentration erreicht werden kann. Außerhalb der Spritzwolke besteht für VOC-freie Lacke grundsätzlich nicht die Gefahr der Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre, da weder eine Lösemitteldampf/Luft-Atmosphäre noch ein entzündlicher Nebel auftreten kann. Dessen ungeachtet sind darüber hinaus jedoch auch Fehlerzustände der Bewegungsautomaten (Roboter, Hubsysteme), Lack- und Lüftungstechnik bei der Sicherheitsbetrachtung mit zu berücksichtigen, die zu nicht beabsichtigten Spritzbereichen oder höheren Konzentrationen führen könnten.

Aus der beobachteten Entzündbarkeit von **allen** eingesetzten Stoffen folgt, dass beim Spritzlackieren mit organisch lösemittelfreien UV-Lacken und zugehörigen Reinigungsmitteln nicht generell auf Brand- und Explosionsschutz verzichtet werden kann. Beim Spritzlackieren mit und ohne Luftunterstützung erfüllt das Volumen der Spritzwolke Bedingungen, die einer Zone 2 entsprechen. Dementsprechend sind die Bereiche zwischen dem Beschichtungsstoffaustritt an der Düse der Spritzpistole und dem Werkstück sowie ein eng begrenzter Bereich um die Werkstückkontur herum in der Gefährdungsbeurteilung und im Schutzkonzept als gefährdeter Bereich anzusehen. Bei konventionellen und elektrostatischen Applikationsverfahren sind in diesem Bereich Zündquellen zu vermeiden. Dort installierte Geräte, Komponenten sowie Sicherheits-, Kontroll- und Regelvorrichtungen müssen der zutreffenden Gerätekategorie nach Richtlinie 94/9/EG (ATEX) [7] entsprechen. Im Bereich der elektrostatischen Applikationsverfahren ist die Auslegung von Geräten, Komponenten, Sicherheits-, Kontroll- und Regelvorrichtungen gemäß EN 50176 [3] hinreichend.

Explosionsfähige Nebel lassen sich generell schwerer als die entsprechenden Dampf/Luft-Gemische entzünden. Sollte es jedoch zu einer Zündung kommen, ergeben sich zumindest die gleichen Folgewirkungen, da sich die Explosion auf die gesamte Spritzwolke übertragen kann, die in Form der Flüssigkeitströpfchen ggf. sogar mehr brennbares Material enthält als ein homogenes Dampf/Luft-Gemisch und dadurch zu einem erheblichen Druck-, Temperatur- und Volumenanstieg beiträgt. Außerdem ergibt sich innerhalb von Lackierkabinen, Abscheide- und Rückgewinnungssystemen eine Brandlast vergleichbar zu der von lösemittelhaltigen Lacken oder anderen flüssigen Beschichtungsstoffen. Aufgrund dessen ist in der Lackierkabine, im Abscheide- und Rückgewinnungssystem sowie im ggf. nachgeschalteten Lacktrockner für einen ausreichenden Brandschutz zu sorgen.

7 Zusammenfassung

Es wurden organisch lösemittelfreie UV-Lacke sowie zugehörige Reinigungsmittel (VOC-frei) mit einer konventionellen Spritzpistole mit kleinstmöglichem Düsendurchmesser von 1,0 mm luftunterstützt verspritzt und deren Zünd- und Explosionsverhalten untersucht. Die Versuchsbedingungen entsprechen dem ungünstigsten Fall für die Praxis des Spritzlackierens.

Die Untersuchungen zeigen, dass beim Spritzlackieren mit organisch lösemittelfreien (VOC-freien) UV-Lacken und zugehörigen Reinigungsmitteln mit realen Brand- und Explosionsgefahren zu rechnen ist.

Viskose Lacke lassen sich sehr viel schwerer entzünden als dünnflüssige Lacke. Wenn die Stoffe konventionell luftunterstützt zerstäubt werden, sind für Reinigungsmittel Zündenergien von 45 mJ und bei UV-Lacken von 100 mJ und mehr nötig. Im Falle von Hochrotationsglockenzerstäubern reduzieren sich diese Werte um etwa eine Größenordnung. Diese Gefahren sind in der Gefährdungsbeurteilung und im Schutzkonzept zu berücksichtigen.

Explosionsgefahr besteht in der Spritzwolke. Für eine Zündung sind sehr dichte Spritzwolken erforderlich, wie sie in der Praxis nur im Fehlerfall vorkommen dürften, da sehr dichte Spritzwolken zur qualitativ hochwertigen Lackierung ungeeignet sind. Folglich wäre beim Verspritzen mit und ohne Luftunterstützung selten und dann nur kurzzeitig mit explosionsfähigen Atmosphären zu rechnen.

Außerhalb der Spritzwolke besteht keine Gefahr durch eine explosionsfähige Atmosphäre, weder durch eine Dampf-/Luft-Atmosphäre noch durch Nebel. Dementsprechend sind die explosionsgefährdeten Bereiche zwischen Sprühstoffaustritt und Werkstück und ein eng begrenzter Bereich um die Werkstückkontur herum in der Gefährdungsbeurteilung und im Schutzkonzept zu berücksichtigen.

Im Bereich der elektrostatischen Applikationsverfahren ist die Auslegung von Geräten, Komponenten und Sicherheit-, Kontroll- und Regelvorrichtungen gemäß EN 50176 hinreichend. Bei konventionellen (nicht elektrostatischen) Applikationsverfahren ist auf entsprechende Zündquellenvermeidung zu achten.

Bei der Applikation von UV-Lacken entsteht eine Brandlast innerhalb einer Lackierkabine und den Abscheide- und Rückgewinnungssystemen, die vergleichbar ist zur üblichen Brandlast in Lackierkabinen, Abscheide- und Rückgewinnungssystemen für andere flüssige Beschichtungsstoffe. Aufgrund dessen ist für einen ausreichenden Brandschutz zu sorgen.

8 Literatur

- [1] von Pidoll, U., Krämer, H.: Flammability characteristics of sprays of water-based paints. *Fire and Safety* 29 (1997) S. 27 – 39.
- [2] von Pidoll, U.: Ignitability of spray clouds of organic solvent/water mixtures and water based paints by electric sparks and open flames. *IEEE Transactions on Industry Application* (2008), 44/1, S. 15 – 19. (doi: 10.1109/TIA.2007.912764).
- [3] EN 50176:2009. Stationäre Ausrüstung zum elektrostatischen Beschichten mit entzündbaren flüssigen Beschichtungsstoffen — Sicherheitsanforderungen
- [4] Beck, H., Gleinke, N., Möhlmann, C.: Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben. BIA-Report 12/97, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), St. Augustin, 1997.
- [5] von Pidoll, U., Krämer, H.: The minimum ignition energy of coating powders for the electrostatic powder coating process, *Journal of Electrostatics* 30 (1993) 103-113.
- [6] EN 12215:2004 + A1:2009. Beschichtungsanlagen - Spritzkabinen für flüssige organische Beschichtungsstoffe – Sicherheitsanforderungen.
- [7] Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen, *Abl. EG L 100* vom 19. April 1994, S. 1 – 29.
- [8] Puttick, S.: Liquid mists and sprays flammable below the flash point - The problem of preventative bases of safety. *Proceedings of Hazards XX: Process Safety and Environmental Protection* (2008), IChemE Symposium series No. 154, S. 825 – 837.
- [9] Gant, S., Bettis, R., Santon, R., Buckland, I. Bowen, P., Kay, P.: Generation of flammable mists from high flashpoint fluids: Literature review. *Proceedings of Hazards XXIII* (2012), IChemE Symposium series No. 158, S. 327 – 338.
- [10] IEC TS 60079-32-1, 2013, Explosive atmospheres, Part 32 Electrostatics, Part 1 Guidance, Section C.6.

Ein Auszug dieses Berichtes wurde bereits in einer Fachzeitschrift veröffentlicht:

- [11] Möckel D., Beyer, M.: Explosionsfähigkeit organisch lösemittelfreier UV-Lacke in feinversprühtem Zustand. *Technische Sicherheit* 1-2 (2014) S. 30-32.

Anhang A: Lackmischungen

Zusammensetzung der verwendeten UV-Lackmischungen und Lösemittel:

Reihenfolge Stoffnummer	Zünd- energie	Monomer	Oligomer	gefährliche Inhaltsstoffe
I ZF-UD-1667/0	102 mJ	69 % HEMA	20 % Urethan- acrylat	Methacrylsäure-2-Hydroxyethylester 50 - 100 %, 2-Benzoyl-2-Propanol 2,5 - 10 %, Dipropylenglykoldiacrylat 2,5 - 10 %
II ZF-UD-1666/0	100 mJ	69 % HEMA	20 % Epoxy- acrylat	Methacrylsäure-2-Hydroxyethylester 50 - 100 %, 2-Benzoyl-2-Propanol 2,5 - 10 %, Dipropylenglykoldiacrylat 2,5 - 10 %, Triphenylphosphin < 2,5 %, 4-Methoxyphenol < 2,5 %
III ZF-UD-1687/0	344 mJ	50 % HEMA	39 % Epoxy- acrylat	Methacrylsäure-2-Hydroxyethylester 25 - 50 %, Dipropylenglykoldiacrylat 10 - 25 %, 2-Benzoyl-2-Propanol 2,5 - 10 %, Triphenylphosphin < 2,5 %, 4-Methoxyphenol < 2,5 %
IV ZF-UD-1688/0	509 mJ	35 % HEMA	54 % Epoxy- acrylat	Methacrylsäure-2-Hydroxyethylester 10 -25 %, Dipropylenglykoldiacrylat 10 - 25 %, 2-Benzoyl-2-Propanol 2,5 - 10 %, Triphenylphosphin < 2,5 %, 4-Methoxyphenol < 2,5 %
V ZF-UD-1689/0	243 mJ	35 % HEMA	54 % Urethan- acrylat	Methacrylsäure-2-Hydroxyethylester 25 -50 %, 2-Benzoyl-2-Propanol 2,5 - 10 %, Dipropylenglykoldiacrylat < 2,5 %
VI ZF-UD-1718/0	> 8650 mJ	35 % Phenoxy- ethylacrylat	54 % Epoxy- acrylat	Acrylsäure-2-Phenoxyethylester 10 -25 %, Dipropylenglykoldiacrylat 10 - 25 %, 2-Benzoyl-2-Propanol 2,5 - 10 %, Triphenylphosphin < 2,5 %, 4-Methoxyphenol < 2,5 %
VII ZF-UD-1716/0	> 8650 mJ	35 % HDDA	54 % Epoxy- acrylat	1.6-Hexandioldiacrylat 10 -25 %, Dipropylenglykoldiacrylat 10 - 25 %, 2-Benzoyl-2-Propanol 2,5 - 10 %, Triphenylphosphin < 2,5 %, 4-Methoxyphenol < 2,5 %
VIII ZF-UD-1715/0	114 mJ	69 % HDDA	20 % Epoxy- acrylat	1.6-Hexandioldiacrylat 50 - 100 %, 2-Benzoyl-2-Propanol 2,5 - 10 %, Dipropylenglykoldiacrylat 2,5 - 10 %, Triphenylphosphin < 2,5 %, 4-Methoxyphenol < 2,5 %
IX ZF-UD-1717/0	109 mJ	69 % Phenoxy- ethylacrylat	20 % Epoxy- acrylat	Acrylsäure-2-Phenoxyethylester 50 - 100 %, 2-Benzoyl-2-Propanol 2,5 - 10 %, Dipropylenglykoldiacrylat 2,5 - 10 %, Triphenylphosphin < 2,5 %, 4-Methoxyphenol < 2,5 %
X Lösemittel VU 80-0102/0	45 mJ			VOC-frei FP 124 °C, SP 274 °C, Zündtemperatur 186 °C
XI Lösemittel VX 40-0228/0	45 mJ	1-Methoxy- 2-Propanol		1-Methoxy-2-Propanol 50 - 100 % FP 32 °C, SP 119 °C, Zündtemperatur 270 °C

Anhang B: Messergebnisse UV-Lacke

Monomer	69 % HEMA	50 % HEMA	35 % HEMA
Oligomer	20 % Epoxyacrylat	39 % Epoxyacrylat	54 % Epoxyacrylat
	2 % Additive	2 % Additive	2 % Additive
	9 % Initiator	9 % Initiator	9 % Initiator
Mischung Nr.:	Mischung 1	Mischung 1.1	Mischung 1.2
Lacknummer	ZF-UD-1666/0	ZF-UD-1687/0	ZF-UD-1688/0
Versuchsreihe	II	III	IV
Energie, Zündung	100 mJ	344 mJ	509 mJ
Monomer	69 % HEMA	50 % HEMA	35 % HEMA
Oligomer	20 % Urethanacrylat	39 % Urethanacrylat	54 % Urethanacrylat
	2 % Additive	2 % Additive	2 % Additive
	9 % Initiator	9 % Initiator	9 % Initiator
Mischung Nr.:	Mischung 2		Mischung 2.2
Lacknummer	ZF-UD-1667/0		ZF-UD-1689/0
Versuchsreihe	I		V
Energie, Zündung	102 mJ		243 mJ
Monomer	69 % HDDA	50 % HDDA	35 % HDDA
Oligomer	20 % Epoxyacrylat	39 % Epoxyacrylat	54 % Epoxyacrylat
	2 % Additive	2 % Additive	2 % Additive
	9 % Initiator	9 % Initiator	9 % Initiator
Mischung Nr.:	Mischung 3		Mischung 3.2
Lacknummer	ZF-UD-1715/0		ZF-UD- 1716/0
Versuchsreihe	VIII		VII
Energie, Zündung	114 mJ, Lack verbraucht, Lack analog zu ZF-UD-1666/0 und 1667/0		bis 8,65 J keine Zündung, offene Flamme, Zündung jedoch selbst verlöschend
Monomer	69 % Phenoxyethylacrylat	50 % Phenoxyethylacrylat	35 % Phenoxyethylacrylat
Oligomer	20 % Epoxyacrylat	39 % Epoxyacrylat	54 % Epoxyacrylat
	2 % Additive	2 % Additive	2 % Additive
	9 % Initiator	9 % Initiator	9 % Initiator
Mischung Nr.:	Mischung 5		Mischung 5.2
Lacknummer	ZF-UD- 1717/0		ZF-UD- 1718/0
Versuchsreihe	IX		VI
Energie, Zündung	109 mJ, Lack analog zu ZF-UD-1666/0, 1667/0 und 1715/0		bis 2 (8,65) J keine Zündung, offene Flamme, Zündung jedoch selbst verlöschend

Anhang C: Messergebnisse Lösemittel

Anschlussversuch Reinigungsmittel	VOC-freies Reinigungsmittel VU 80-0102/0
Versuchsreihe	X
Energie, Zündung	45 mJ
Anschlussversuch Reinigungsmittel	Universal Reinigungsmittel VX 40-0228/0
Versuchsreihe	XI
Energie, Zündung	45 mJ



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**
Nationales Metrologieinstitut

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: (0531) 592-93 21
Fax: (0531) 592-30 08
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de

Vertrieb:

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH

Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen

Telefon: (04 21) 369 03-0
Fax: (04 21) 369 03-63
www.schuenemann-verlag.de