
JOT-Fachbuch

Judith Pietschmann

Industrielle Pulverbeschichtung

Grundlagen, Verfahren, Praxiseinsatz

6., überarbeitete und aktualisierte Auflage

Judith Pietschmann
Solothurn, Schweiz

JOT-Fachbuch

ISBN 978-3-658-40811-4

ISBN 978-3-658-40812-1 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-40812-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2002, 2003, 2010, 2013, 2019, 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Ellen Klabunde

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Anstoß für die Entwicklung und Anwendung von Pulverlacken waren wie so oft ökologische und ökonomische Erfordernisse der Gesellschaft. In den USA waren es die Rules 66, die zum ersten Mal eine Berücksichtigung von Umweltaspekten bei der Lackierung forderten. Später sind ähnliche Regelungen in vielen Industrieländern eingeführt worden.

Erste Entwicklungen von Pulverlacken wurden in den 1950er-Jahren vorgenommen. Nach anfänglicher Zurückhaltung in der industriellen Anwendung folgte kurze Zeit später ein wahrer Siegeszug. Heute, ist die Pulverlackierung in vielen Branchen etabliert. Bei der Erschließung neuer Märkte und vor allem der Durchsetzung im Markt, tut sich der Pulverlack oft schwer. Gründe dafür sind u. a. die Einbrennbedingungen und Vernetzungszeiten.

Die wichtigsten Anwendungsbereiche der Pulverlackiertechnik sind die Automobilzuliefererindustrie, das Bauwesen, der Maschinenbau, die Möbelindustrie und der riesige Markt der Hausgeräteindustrie. Antreibende Faktoren sind sowohl Umweltschutzbestimmungen wie die EU-VOC-Richtlinie, als auch die Forderung der Industrie nach Kostensenkungen, Abfallreduzierung, und die Verbesserung der computergestützten Prozessautomatisierung.

Die Entwicklungen bei den Pulverlacken konzentrieren sich auf eine deutliche Reduzierung der Einbrenntemperaturen und schnellen Vernetzungszeiten, sowie die Entwicklung von Systemen für neue Grundmaterialien und spezielle Anwendungsfälle.

Die Themen dieses Fachbuchs umfassen den kompletten Ablauf der Pulverlackierung. Angefangen beim Lackmaterial, dessen Herstellung, die Applikation, die Gehänge und Fördertechnik, das Einbrennen bzw. Härten der Lacke, die Reinigung und Vorbehandlung von Metallen, die Mess- und Prüftechnik sowie ausführliche Informationen, Beschreibungen und Lösungsmöglichkeiten zu Fehlern im Pulverlackfilm.

Das Buch wendet sich an Menschen, die Freude an der Pulverbeschichtung haben und ihr Fachwissen im Bereich der Oberflächentechnik vertiefen wollen.

Herzlich Dank sagen will ich allen, die in vielfältiger Weise zum Gelingen dieses Buches beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt Sabine Molitor, Thomas Gohmann, Marco Capizzi Hendrik Fliedner, Lars Sebralla, Michael Topp, Roman

Mlakar, Nils Reinke, Anton Ritter, Frank Berg und Michael Seeger. Ebenso möchte ich dem Lektorat Maschinenbau des Springer Verlags, Ellen-Susanne Klabunde, für die konstruktive Zusammenarbeit und die Unterstützung bei der Bearbeitung danken. Jochen Kecht danke ich für seine Anregungen zur 5. Auflage.

Ich freue mich über Ihr Feedback, denn trotz sorgfältiger Recherchen werden sich Verbesserungen und aktuellere Informationen finden lassen. Anregungen sind stets willkommen und werden in der 7. Auflage berücksichtigt.

Solothurn
im Februar 2023

Judith Pietschmann



POWDER
COATINGS

There is an answer
to every surface.
IGP FOR SURE

4201E13129L3F

igp-powder.com

Inhaltsverzeichnis

1	Pulverlacke	1
1.1	Verschiedene Pulverlacktypen	1
1.1.1	Filmbildner/Bindemittel	1
1.1.2	Thermoplast-Bindemittel	4
1.1.3	Duroplast-Bindemittel	4
1.1.4	Epoxide	5
1.1.5	Hybrides	7
1.1.6	Polyester/TGIC	8
1.1.7	Polyester/Hydroxyalkylamid	9
1.1.8	Aromatische Glycidylester	9
1.1.9	Polyurethane	12
1.1.10	Acrylate	13
1.1.11	Methyl-substituiertes TGIC	15
1.1.12	Additive	15
1.1.13	Pigmente	16
1.1.14	Füllstoffe	17
1.2	NT- und strahlenhärtende Systeme	17
1.2.1	NT-Pulverlacke	18
1.2.2	NIR-Pulverlacke	19
1.2.3	UV-Pulverlacke	20
1.3	Effektlacke	21
1.3.1	Extrusion	24
1.3.2	Trockenmischung – Dry-Blend	24
1.3.3	Bonding-Verfahren	24
1.3.4	Sicherheit beim Umgang mit Aluminiumpigmentpulvern	24
1.4	Pulver-Slurry	27
1.5	Filmbildung bei Pulverlacken	27
1.5.1	Schmelzviskosität und Oberflächenspannung	28
1.6	Pulverlackherstellung	30

1.7	Lagerung von Pulverlacken	32
1.8	Mess- und Prüftechnik bei Pulverlacken	35
1.8.1	Rieselfähigkeit (Fließverhalten)	36
1.8.2	Wirbelfähigkeit (Fluidisierung)	36
1.8.3	Tribofähigkeit	37
1.8.4	Korngrößenverteilung	37
1.8.5	Einbrennverlust bei Pulverlacken	37
1.9	Wirtschaftliche Bedeutung von Pulverlacken	38
1.9.1	Potenziale und zukünftige Entwicklungen	40
	Literatur	41
2	Applikation	43
2.1	Einführung	43
2.2	Elektrostatische Oberflächenbeschichtung	47
2.3	Physikalische Grundlagen der Beschichtungsverfahren	48
2.3.1	Auflademechanismen	49
2.3.2	Triboelektrische Aufladung	52
2.3.3	Ionisationsaufladung (Koronaaufladung)	55
2.3.4	Flugverhalten elektrisch aufgeladener Partikel	58
2.3.5	Verhältnis von Feld- und Schwerkraft	59
2.3.6	Abscheideverhalten	60
2.3.7	Bildung der Pulverschicht	60
2.3.8	Technologischer Vergleich der Sprühgeräte	64
2.4	Die Aufladesysteme in der Praxis	66
2.4.1	Die Korona-Aufladung	67
2.4.2	Tribo-Aufladung	71
2.4.3	Vergleich der Ladungssysteme	72
2.4.4	Die Düsensysteme	73
2.5	Pulvertransport und Förderung	77
2.5.1	Mechanische Eigenschaften des Pulvers	78
2.5.2	Anforderungen an das Fördersystem	79
2.5.3	Die Pulverfördersysteme	79
2.5.4	Trennung des Pulver-Luft-Gemischs	90
2.5.5	Die Pulveraufbereitung	95
2.5.6	Pulveraufbereitung im Behälter	103
2.5.7	Die Schlauchführung	107
2.6	Anlagenplanung und Auslegung	111
2.6.1	Anlagenkonzepte	112
2.6.2	Beschichtungskabine	115
2.6.3	Die Wahl des Kabinentyps	115
2.6.4	Die Rückgewinnungssysteme	123

2.6.5	Die Dimensionierung der Anlage	129
2.6.6	Die Beschichtungsgeräte – Pistolen	130
2.7	Das Pulverzentrum	134
2.7.1	Pulverzentrum mit Injektortechnik	135
2.7.2	Pulverzentrum mit Pumpentechnik	135
2.7.3	Integriertes Pulverzentrum	136
2.8	Die Anlagensteuerung und Automatisierung	136
2.8.1	Automatisierungsstufe 1 – Lückenerkennung	137
2.8.2	Automatisierungsstufe 2 – Höhererkennung	137
2.8.3	Automatisierungsstufe 3 – Breitererkennung	138
2.8.4	Automatisierungsstufe 4 – vertikale Pistolenanordnung	138
2.8.5	Automatisierungsstufe 5 – Dynamische Konturerkennung	140
2.8.6	Robotertechnik	142
2.8.7	Die Hubgeräte	143
2.8.8	Hubautomaten oder Beschichtungsroboter	144
2.8.9	Kabinensysteme für die automatische Beschichtung	145
2.9	Rohrleitung von der Kabine zum Zyklon	148
2.10	Die Anlagentechnik für die Verarbeitung von Effektpulverlacken	149
2.10.1	Rückgewinnungsprobleme	149
2.10.2	Aufladungsprobleme	150
2.10.3	Sprühbildveränderungen	150
2.10.4	Einfluss der Düsensysteme	151
2.10.5	Kurzschlussbildung zwischen Pistole und Düse	152
2.10.6	Kurzschlussbildung durch Schichtbildung im Pulverrohr oder Pulverschlauch	152
2.11	Sonderverfahren der Pulverbeschichtung	153
2.11.1	Pulverbeschichten ohne Pistolen – rein elektrostatisches Wirbelbadverfahren	153
2.11.2	Coil-Coating mit Pulverlack	153
2.11.3	Wirbelsintern	156
2.11.4	Rundsprühsysteme in der Omega-Schleife	157
2.12	Wirkungsgradverbesserung bei elektrostatischen Sprühverfahren	157
2.12.1	Geforderte Sicherheitseinrichtungen	159
2.13	Häufige Fehler in der Pulverbeschichtung und Lösungsmöglichkeiten	164
2.13.1	Das Einmaleins der Pulverbeschichtung [31]	165
	Literatur	176
3	Gehänge und Fördertechnik	181
3.1	Gehänge, Wareenträger	181
3.2	Fördertechnik	183

3.2.1	Anforderungen und Kriterien	183
3.2.2	Fördergut	185
3.3	Die Fördersysteme im Einzelnen	187
3.3.1	Handschiebebahnen	187
3.3.2	Kreisförderer	189
3.3.3	Verzweigungsfähige Kreisförderer	190
3.3.4	Power&Free-Systeme	191
3.3.5	Elektrohängebahn	195
3.3.6	Bodenförderer	195
3.3.7	Skid-Anlagen	199
3.3.8	Tauchanlagen	201
3.3.9	Beschickungsautomaten	203
3.3.10	Tischkreisförderer	204
3.3.11	Querstabförderer	204
3.3.12	Bänder	204
3.3.13	Rollenbahnen	205
3.3.14	Stapelautomaten	205
	Literatur	205
4	Einbrennen von Pulverlacken	207
4.1	Bauformen von Trocknern	208
4.1.1	Kammertrockner	208
4.1.2	Durchlauf Trockner	208
4.1.3	Sonderformen	210
4.2	Trocknungsverfahren	211
4.2.1	Konvektions- oder Umlufttrocknung	212
4.2.2	IR-Strahlungstrocknung	213
4.2.3	Sonderverfahren	214
4.2.4	Bewertung verschiedener Aushärteverfahren	217
4.3	Optimierung von Lacktrocknern	217
4.4	Messen der Einbrenntemperatur	219
4.4.1	Grundlagen der Temperaturmessung	219
4.4.2	Anwendung der Temperaturmessung	220
4.4.3	Prozessoptimierung mithilfe der Temperaturmessung	223
4.4.4	Optimierungsmöglichkeiten im Bereich Einbrennofen	223
	Literatur	224
5	Oberflächenvorbehandlung von Metallen	227
5.1	Reinigung und Vorbehandlung	227
5.2	Anforderungen an den Oberflächenzustand	228
5.2.1	Reinheitsgrad	228
5.2.2	Porosität und Lunker	233
5.2.3	Kontaminationen – Schmutz auf der Oberfläche	234

5.3	Mechanische Vorbehandlung	234
5.3.1	Schleifen und Bürsten	235
5.3.2	Strahlen	236
5.4	Flüssige Reinigungsverfahren	237
5.4.1	Parameter der Reinigung	238
5.4.2	Reinigungsmechanismus in wässrigen Lösungen	239
5.4.3	Reinigertypen	244
5.4.4	Beizen	245
5.4.5	Dekapierung	247
5.4.6	Spülen	247
5.4.7	Wasserqualität	247
5.4.8	Badpflege	248
5.5	Phosphatierv Verfahren	249
5.5.1	Schichtbildende Phosphatierung	251
5.5.2	Eisen-Phosphatierung	258
5.5.3	Eisen-Dickschichtphosphatierung	259
5.5.4	Methoden zur Charakterisierung von Phosphatschichten	260
5.5.5	Fehler und Fehlervermeidung beim Phosphatieren	262
5.6	Chromatierung	270
5.6.1	Grünchromatierung – CrIII	271
5.6.2	Gelbchromatierschichten – CrVI	271
5.7	Vorbehandlung von Eisenwerkstoffen	271
5.8	Zink und verzinkte Oberflächen	272
5.9	Aluminiumlegierungen	272
5.9.1	Eigenschaften des Werkstoffs Aluminium	272
5.9.2	Vorbehandlung von Aluminiumlegierungen	273
5.9.3	Vorbehandlung von Aluminiumgusslegierungen	276
5.9.4	Konversionsschichten für Aluminiumoberflächen	278
5.9.5	Chromfreie Verfahren	283
5.10	Magnesiumwerkstoffe	293
5.10.1	Vorbehandlung von Magnesiumlegierungen	293
5.10.2	Konversions- bzw. Passivierungsverfahren für Magnesium	294
5.11	Maßnahmen zur Qualitätssicherung	294
5.12	Automatische Badanalyse und Chemikalienergänzung	295
5.13	Vorbeugende Anlagenwartung	295
5.14	Wahl der passenden Vorbehandlung	295
	Literatur	298
6	Moderne industrielle Anwendungen	303
6.1	Pulverbeschichtung von Holz und Holzwerkstoffen	303

6.1.1	Anforderungen an den Werkstoff	303
6.1.2	Applikationstechniken	305
6.1.3	Pulverlacke	306
6.2	In-Mould-Coating	306
6.3	Pulver-in-Pulver-Technologie	310
6.3.1	Durchmischungseffekte minimieren	311
6.3.2	Abstoßung durch hohe Aufladung	312
6.3.3	Kantenabdeckung für besseren Korrosionsschutz	312
6.3.4	Applikation.	312
6.3.5	Unterschiedliche Lacktechnologien am Markt	314
6.3.6	Probleme beim Schichtaufbau	315
6.4	Berührungslose Schichtdickenmessung vor dem Einbrennen [13]	316
6.4.1	Möglichkeiten der Schichtdickenmessung.	318
6.5	Maßgeschneidertes Anlagenlayout in der Räderlackierung.	318
	Literatur.	322
7	Mess- und Prüftechnik	325
7.1	Aufgaben der Prüftechnik	325
7.1.1	Prüfung von Beschichtungsstoffen.	326
7.1.2	Prüfung des Untergrundes	326
7.1.3	Prüfung der Applikation und Trocknung (Einbrennvorgang)	327
7.1.4	Prüfung der Beschichtung	327
7.2	Appearance.	328
7.2.1	Glanzmessung	329
7.2.2	Glanzschleier – Haze	331
7.2.3	Welligkeit – Orange Peel	332
7.2.4	Bildschärfe – Distinctness of Image (DIO)	334
7.2.5	Farbe.	334
7.2.6	Farbmessung von Metallic-Lacken	341
7.2.7	Beurteilung von Farbunterschieden	341
7.3	Haftfestigkeit	342
7.3.1	Abreißversuch	345
7.3.2	Dornbiegeprüfung mit konischem Dorn	345
7.3.3	Dornbiegeprüfung mit zylindrischem Dorn.	345
7.3.4	Gitterschnitt	346
7.3.5	Kreuzschnitt mit Klebebandabriss	348
7.3.6	Kugelschlagprüfung/Prüfung durch ein fallendes Gewichtsstück	349
7.3.7	Kugelstrahlversuch.	350
7.3.8	Steinschlagprüfung, Einzelschlagprüfung	350
7.3.9	Steinschlagprüfung, Multischlagprüfung.	351

7.3.10	Tiefungsprüfung	351
7.3.11	Sternschnitt mit Tiefung nach Randel	352
7.3.12	Kratzprobe	353
7.3.13	Radierprobe	353
7.3.14	Ritzhärteprüfung	354
7.3.15	Dampfstrahlprüfung	354
7.3.16	Kochtest	355
7.4	Elastizität/Biegsamkeit	355
7.5	Härte	355
7.5.1	Pendelhärte	356
7.5.2	Buchholz-Eindruckprüfung	356
7.5.3	Universalhärtemessung nach dem Kraft-Eindringtiefe- Verfahren	357
7.6	Schichtdicke	359
7.6.1	Magnetinduktive Methode	359
7.6.2	Wirbelstrom-Methode	359
7.6.3	Messung der Pulverschichtdicke vor dem Einbrennen/ Vernetzen	360
7.6.4	Zerstörende Schichtdickenmessung – Querschliffverfahren	360
7.7	Korrosionsprüfungen	361
7.7.1	Korrosionsprüfmethoden	361
7.7.2	Kondenswasser-Prüfklima DIN EN ISO 6270	362
7.7.3	Beanspruchung im Kondenswasser-Wechselklima mit schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre DIN EN ISO 3231	363
7.7.4	Salzsprühnebelprüfung mit verschiedenen Natriumchloridlösungen DIN EN ISO 9227	363
7.7.5	Prüfung der Beständigkeit gegen Filiformkorrosion	365
7.8	Prüfung der Vernetzung	366
7.9	Wetterbeständigkeit – Freibewitterung und Kurzzeitprüfungen	367
7.9.1	Freibewitterung	367
7.9.2	Kurzbewitterung	369
	Literatur	373
8	Fehler in der Beschichtung	379
8.1	Fehlerursachen	380
8.1.1	Fehler bei der Herstellung des Lackes	380
8.1.2	Materialfehler	381
8.1.3	Fehler im Beschichtungsbetrieb	383
8.1.4	Transport- und Lagerungsfehler	387
8.2	Fehler im Lackfilm	388
8.2.1	Benetzungsstörungen/Karater	389

8.2.2	Blasen im Lackfilm	396
8.2.3	Nadelstiche	397
8.2.4	Schmutzeinschlüsse –Pickel oder Stippen	399
8.2.5	Pigment-Verschmutzungen/Pulverlackverunreinigungen	405
8.2.6	Gelteilchen	406
8.2.7	Fleckenbildung durch äußere Einflüsse	407
8.2.8	Farbschwankungen – durchscheinender Untergrund	411
8.2.9	Haftungsverlust	412
8.2.10	Kreiden der Lackoberfläche/Wetterbeständigkeit	415
8.2.11	Glanzunterschiede	417
8.3	Korrosion der Metalloberfläche	419
8.3.1	Beschreibung der verschiedenen Korrosionsarten	419
8.3.2	Korrosion durch äussere Einflüsse	421
8.3.3	Korrosion des Grundmetalls durch äußere Einflüsse	427
8.3.4	Korrosion des Grundmetalls durch „innere“ Einflüsse	429
8.3.5	Korrosion verursacht durch biologische Rückstände aus der Vorbehandlung	429
8.3.6	Fehler durch Verschmutzungen	430
8.3.7	Fehlende Pulverhaftung am Werkstück vor dem Einbrennen	432
8.3.8	Kantenflucht	433
8.4	Troubleshooting: Diagramme und Tabellen	435
	Literatur	450
9	Entlacken	453
9.1	Chemische Entlackung	455
9.1.1	Entlackungsmittel	455
9.1.2	Verfahrenstechniken bei der Entlackung	455
9.2	Strahlen mit Trockeneis	457
9.2.1	Wirkungsweise des Verfahrens	458
9.3	Hochdruckwasserstrahltechnik	459
9.4	Entlackung mit Laserstrahl	459
9.5	Entlackung mit Plasma	461
9.6	Induktives Entlacken/Wirbelstromentlacken	462
9.7	Wahl des Entlackungsverfahrens	462
	Literatur	464
10	Umwelt- und Energieaspekte	465
10.1	Emissionen aus dem Einbrennprozess [1]	465
10.2	Ökobilanz eines Pulverlackes	466
10.2.1	Applikationsparameter und ihr Einfluss	467
10.2.2	Beschichtungsstoff und Abfall	468
10.2.3	Harze	468

10.2.4	Vorbehandlung	469
10.2.5	Idee der Ökobilanz und wesentliche Merkmale	469
10.3	Verwertung von Pulverlacken [6].	470
10.4	Energiemanagement in der Lackieranlage	471
10.4.1	Analyse der Prozesse und Optimierung	472
10.4.2	Energie einsparen durch Anlagenkomponenten und Steuerungstechnik	472
10.4.3	Wärmeverluste minimieren – Wärmerückgewinnung	473
10.4.4	Energetischer Vergleich einer Flüssig- und Pulverlackieranlage [9]	475
	Literatur.	477
	Stichwortverzeichnis.	479



WAGNER



FARBE SCHUTZ FUNKTION

**Maßgeschneiderte Lösungen
für die Pulverbeschichtung**

Als einer der weltweit führenden Anbieter in der Oberflächentechnik bieten wir eine breite Auswahl an Anlagen und Komponenten. Für manuelle und automatische Anwendungen in einer Vielzahl von Branchen.

www.wagner-group.com

Geschichte der Pulverlackierung

Als die treibenden Faktoren der Entwicklung und Einführung der Pulverlackierung können ökologische und die Erdöl-Ressourcen betreffenden Zwänge Ende der 60er- und der frühen 70er-Jahre angesehen werden. In den USA war es 1966 die „Rule 66“, die erstmals eine Beachtung von Umweltaspekten bei Lackierungen forderte, ehe in Deutschland im Jahre 1974 das Bundes-Immissionsschutz-Gesetz (BImSchG) und 1986 die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) folgten.

Beschichtungen mit pulverförmigen, schmelzbaren Überzugsmassen wurden schon 1940 durchgeführt mit thermoplastische Kunststoffpulver. Das Verfahren selbst würde man heute als „Flammspritzen“ bezeichnen. Im Jahre 1952 wurde das sogenannte Wirbelsinterverfahren von E. Gemmer (Firma Knapsack AG, Frankfurt/Main) entwickelt, durch das erstmalig größere Pulvermengen für den Beschichtungssektor verbraucht wurden [1]. Die Anwendungen beschränkten sich zunächst auf Elektroisolation und Rohrbeschichtung, mit Schichtdicken im Bereich von 200 bis 300 μm . Das Aufschmelzen des Schutzfilms auf hinreichend vorgewärmte Werkstücke erfolgt während des Eintauchens in der Wirbelschicht eines Kunststoffpulvers. Der Pulverwerkstoff war zunächst Polyethylen, später gefolgt von weiteren Thermoplasten wie Polyamid und PVC. Erst Anfang der 60er-Jahre kam mit Epoxidharz ein duroplastisches Material auf den Markt. Hier war es die Fa. Bosch, die auf der Suche nach einem geeigneten elektrischen Isolierstoff den Grundtyp des Epoxidharzpulvers entwickelte [2]. Es waren sog. „Langzeitpulver“, die 20 bis 30 min bei Temperaturen von 200 °C benötigten, um zu vernetzen. Die Eignung dieses völlig lösungsmittelfreien Beschichtungsmaterials auch für dekorative Zwecke war so offensichtlich, dass nur noch ein geeignetes Auftragsverfahren und die feinere Vermahlung für dünnere Schichtdicken fehlten. Mit den elektrostatischen Sprühpistolen der Fa. SAMES, die für das elektrostatische Auftragen die Bezeichnung „Samesieren“ vorschlugen, war Mitte der 60er-Jahre auch diese Hürde genommen. Sprühpistole und Hochspannungsgenerator waren eng an die elektrostatischen Sprühpistolen für Flüssiglack angelehnt, mit einem Pulverbehälter in der Art eines Lackdruckgefäßes war die Anlage komplett [3]. Die Pulverschicht haftete auf kalten Werkstücken mit den gleichen elektrostatischen Kräften ausreichend lange, d. h. mindestens bis zum anschließenden Aufschmelzen und Aushärten. Zunächst war man

von diesem Auftragsverfahren enttäuscht, da der Auftragswirkungsgrad, der so hoch wie bei Flüssiglack erwartet wurde, durch die pneumatische Pulverförderer wesentlich niedriger lag. Erst mit der auf dem Lackiergebiet völlig neuen Möglichkeit den Overspray direkt zurück zu gewinnen, konnte der erfolgreiche Start der Pulverlackierung gelingen, da jetzt der Gesamtwirkungsgrad unter Berücksichtigung des Pulverkreislaufs zur Beurteilung stand. Das war Ende 1966. Vorläufer eines elektrostatischen Auftrags feiner Teilchen hatte es zuvor schon beim elektrostatischen Räuchern und dem Bestäuben von Zigarren gegeben [4].

Der nächste Entwicklungsschritt war, die Epoxidpulver durch vergilbungssichere Epoxid-Polyester-Hybridpulver zu ergänzen. So konnte in Europa im Jahr 1968 der erste Durchbruch erfolgen, nachdem diese Pulver mit kürzeren Aushärtezeiten und konstanten Qualitäten in größeren Mengen zur Verfügung standen und zugleich die elektrostatischen Applikationsgeräte weiter verbessert und zunehmend auch für Großanlagen geeignet erschienen [5]. Die Entwicklung der carboxylgruppenhaltigen Polyesterharze mit deutlich verminderter Vergilbungsresistenz war allerdings hinsichtlich der Wetterbeständigkeit noch keine Lösung [6]. Die Zahl der Pulverbeschichtungsanlagen allein in Deutschland stieg von 4 im Jahr 1966 auf 51 im Jahr 1970 [7]. Anfang der 70er-Jahre war im 1, 3, 5-Triglycidyl-Isocyanurat, kurz TGIC, ein Härter gefunden, mit dem sich in den folgenden zwei Jahrzehnten ein Pulverlacksystem mit großer Vielfalt an Qualitäten für breiteste Anwendungen herstellen ließ. Schrittweise konnten die Reaktivität, Verlauf und Flexibilität und eine ausgezeichnete Wetterbeständigkeit erreicht werden. Alternativen dazu waren Polyurethan-Systeme, zunächst mit Caprolactam als Blockierungsmittel. Auch Acrylat-Pulver standen bereits zur Verfügung, konnten jedoch wegen Unverträglichkeit bei Herstellung und Verarbeitung mit anderen Pulverwerkstoffen in Europa damals nicht Fuß fassen. Die Notwendigkeit separater Anlagen behinderte in Europa die Anwendung dieses Pulversystems. Lediglich in Japan und USA kam es zur Anwendung.

Die Epoxidsysteme verloren an Bedeutung, blieben dennoch für den Innenbereich und besonders wegen ihrer chemischen Beständigkeit gegen Laugen und Säuren weiterhin unentbehrlich.

Der größte Mengenzuwachs im Pulververbrauch wurde 1978/1979 erreicht [6]. Es standen damals folgende Bindemittelsysteme zur Verfügung: Epoxid, Polyester/Epoxid, Polyester/TGIC, Polyurethan, Acrylat. Unterschieden wurde in Pulverlacke für den Inneneinsatz und Qualitäten für den wetter- und kreidungsbeständigen Außeneinsatz.

Anlagentechnisch konnte 1972 in Patenten zur triboelektrischen Aufladung des Pulvers eine weitere Möglichkeit neben der Aufladung durch Korona im Hochspannungsfeld für den elektrostatischen Pulverauftrag aufgezeigt werden. Es waren in [7] der Werkstoff Polytetrafluorethylen (PTFE Polytetrafluorethylen) als Reibpartner und in [8] die konstruktive Lösung der Aufladeinheit mit Ringspalt und später 1980 die Aufladung in Schläuchen und das Versprühen aus Fingerdüsen in [9], für die Patente erteilt wurden. Die triboelektrische Aufladung verlangt jedoch eine besondere chemische Ausrüstung des Pulvers, die bei den Epoxidpulvern von vornherein gegeben war, bei

Polyester und den Hybridpulvern jedoch erst mit leicht Elektronen abgebenden Molekülgruppen bei der Pulverformulierung geschaffen werden musste.

Zu Beginn der 70er-Jahre setzte eine Ideenflut ein, um an Stelle der Sprühpistolen völlig andere Lösungen für Pulversprüheinrichtungen vorzuschlagen. Sie wurden als „Pulversprühgeräte der zweiten Generation“ bezeichnet [10]. Hierzu zählten z. B. der 1970 von AEG vorgestellte Bandzerstäuber. Ein perforiertes Kunststoffband, das aus einem fluidisiertem Pulvervorrat das Pulver aufnimmt, in die Höhe trägt wobei Luftdüsen durch die Löcher der Perforation das Pulver durch eine Vielzahl paralleler Koronadrähte hindurch auf die zu beschichtenden Werkstücke blasen. Eine andere Lösung bot die Fa. Mueller mit dem Pulver-Jet, einem System von aneinander gekoppelten Einzeldüsen, welche jede direkt, d. h. ohne Schlauchleitung, aus einem eigenen Fluidbehälter als Pulvervorrat gespeist wird. Eine ähnliche Lösung ohne Pulverschlauch war die in Frankreich von der Fa. Somip 1971 vorgestellte Pulverrampe. Mehrere Hersteller propagierten den rotierenden Scheibenzerstäuber und in Abwandlung das Pulver-Schleuderrad, um mit der Zentrifugalkraft die gleichmäßige Pulververteilung zu unterstützen. Einzig überlebt hat bis vor wenigen Jahren die Pulverscheibe, in einem Exemplar zur Beschichtung von Waschmaschinen bei der Fa. Bosch in Giengen. Bei Koronapistolen erzielte die Fa. GEMA in der Schweiz zur gleichen Zeit einen Entwicklungssprung indem es gelang, den Hochspannungstransformator und die Gleichspannungs-Kaskade in der Pistole selbst unterzubringen und so auf das „steife“ Hochspannungskabel verzichten zu können [11]. Möglich gemacht wurde diese Hochspannungserzeugung durch die Fortschritte bei der Miniaturisierung der Bauelemente Kondensator und Gleichrichter für die Fernsehtechnik und der Durchschlagsfestigkeit von Gießharzisolierungen.

Der Einsatz von Hochspannung birgt Gefahrenmomente, die einmal in der Annäherung oder Berührung spannungsführender oder hochaufgeladener Anlagenteile liegen und zum anderen in der möglichen Explosions- und Brandgefahr zündwilliger Pulver- Luft-Gemische durch Funkenentladungen bedingt sind. Infolgedessen war es notwendig mit entsprechenden Sicherheitsvorschriften diesen Gefahren vorzubeugen. So erschien seitens der Berufsgenossenschaft die erste Richtlinie mit dem Titel „Pulverbeschichten“ als ZH 1/444 mit Ausgabedatum 10.1971. Wegen des ähnlichen Arbeitsverfahrens wie beim Farbspritzen folgte die Forderungen der Unfallverhütungsvorschrift „Farbspritzen, -tauchen und Anstricharbeiten“ (VGB 23) sinngemäß anzuwenden. Eine nicht erfüllbare Forderung war die nach der Erdungskontrolle, die ein Stillsetzen der Förderbahn verlangte, wenn beim Einlaufen eines Werkstücks oder Gehänges ein größerer Erdableitwiderstand als 10 kOhm gemessen wurde. Dieser Wert Jahre wurde später auf 1 MOhm korrigiert wurde. Spätestens jetzt wurde die Kabine bzw. der Sprühstand mit zwangsweiser Belüftung zur notwendigen Voraussetzung. Dazu haben sich ergänzend der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) mit dem VDMA-Einheitsblatt 24 371 im März 1974 eigene Richtlinien zur Einhaltung auferlegt, die sich hinsichtlich des Explosionsschutzes auf Ergebnisse experimenteller Untersuchungen stützen.

Gegen mögliche Gesundheitsschäden veranlasste der Europäische Ausschuss für Beschichtungspulver der CEPE (Europäische Vereinigung der Verbände der Lack-, Druckfarben- und Künstlerfarbenfabrikanten) toxikologische Untersuchungen mit unterschiedlichen Beschichtungspulvern, gestützt auf mehrjährige Kontrollen von Beschäftigten in der Pulverherstellung. Die Ergebnisse sind in einer Broschüre mit Empfehlungen für die Gefahrenverhütung zusammengefasst [12]. Die Broschüre erschien erstmals im Jahr 1985 und liegt inzwischen in mehreren Nachauflagen vor.

Heute haben Pulverlacke den Ruf eine umweltfreundliche Alternative zu Lösemittel-lacken zu sein. Vor allem die Gesetzgebung und Vorgaben zu VOC-Reduktion haben dazu beigetragen bei Neuplanung, Umbau oder aus internen Umweltrichtlinien heraus auf eine Lösemittelfreie Lackierung mit Pulverlacken umzusteigen. Die Entwicklungen im Bereich der Anlagentechnik konzentrieren sich in den letzten Jahren auf die Effizienzsteigerung, Optimierung bei Farbwechsel und der benötigten Zeit. Ein großes Thema ist die Automatisierung und hier liegt vor allem bei der Steuerung und Bedienung der Fokus.

Heute konnten Pulverlacke Marktsegmente für sich gewinnen, die als klassische Nasslacksegmente galten, wie z. B. Land- und Baumaschinen mit einem Gewicht von bis zu mehreren Tonnen.

Literatur zur Geschichte der Pulverlackierung

Die Geschichte der Pulverlackierung wurde freundlicherweise von Prof. Dr.-Ing. habil. W. Kleber zusammengetragen.

1. Gemmer, E.: Kunststoff-Rundschau 7 (1960)
2. Sträter, F.-J.: Stand der Pulverentwicklung. In: Berichte der IV. Tag. „Elektrostatisches und Elektrophoretisches Beschichten“, HfV Dresden, S. 70–71 (1969)
3. Auerbach, D.: Entwicklung von Auftragsgeräten für das elektrostatische Plastbeschichten. *Plaste Kautsch.* **14**, 34–38 (1967)
4. Neubert, U.: Elektrostatik in der Technik, S. 150–151. Oldenbourg, München (1954)
5. Gunia, G.: Der Trend zur Automatik, EPS-Bilanz 72. Dokumentation der Zeitschrift JOT. mi-Publikationsgesellschaft, München (1972)
6. Chemismus, Herstellung und technologische Eigenschaften von Pulverlacken, Pulverlack 73. Tagungsband Pulverlacktagung, Hamburg (1973)
7. Noll, G.: 20 Jahre Pulverlacke. Fachtagung Pulverlack Hamburg, Tagungsband (1985)
8. Kleber, W.: Triboelektrische Pulveraufladung. *Metalloberfläche* **50**(7), 564–567 (1996)
9. Ruud, J.: Pulverspritzgerät. Patentschrift DE 3 100 002 Schwed. Priorität 04.01.80
10. Gebhardt, O.: Pulverbeschichtungsanlagen der zweiten Generation. In: Berichte der V. Tagung „Elektrostatisches und Elektrophoretisches Beschichten“, HfV Dresden, S. 144–149 (1972)

11. Braun, F.: Elektrostatische Pulverbeschichtungspistole mit eingebautem Hochspannungserzeuger; Elektrostatische Aufladungen. In: DECHEMA-Monographien, Bd. 72, S. 281–292. Verlag Chemie, Weinheim (1974)
12. anonym: Ergebnisse der experimentellen Toxikologiestudie über wärmehärtbare Pulverlacke. Europäischer Ausschuss der Verbände der Lack-, Druck- und Künstlerfarbenfabrikanten, Brüssel (1985)