Beschichtung hochwertiger Karosserieoberflächen mit Pulver-Slurry

Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Gero Weckerle

aus Böblingen

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. E. Westkämper Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. C. Eisenbach

Tag der mündlichen Prüfung: 04.11.2003

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2003

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. E. Westkämper, dem Leiter des Fraunhofer-IPA und des Institutes für industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart danke ich für die wertvolle Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. C. Eisenbach, Leiter des Instituts für angewandte makromolekulare Chemie der Universität Stuttgart und Leiter des Forschungsinstitutes für Pigmente und Lacke (FPL), Stuttgart, für die Bereitschaft zur Durchsicht des Manuskripts und die Übernahme des Mitberichts.

Bei Herrn Dipl.-Ing. R. Kraus, Leiter der Abteilung Verfahrensentwicklung Beschichtungstechnik und Korrosionsschutz, DaimlerChrysler Sindelfingen, bedanke ich mich herzlich für die Anregung und die Möglichkeit, die vorliegende Arbeit auf diesem Gebiet erstellen zu können, sowie für seine wohlwollende Unterstützung und Förderung.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. J. Domnick, der mit intensiven Diskussionen zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Darüber hinaus bedanke ich mich herzlich bei allen Mitarbeitern des Instituts für die anregende Kritik und Diskussion, insbesondere den Herren Dipl.-Ing. T. Steigleder und Dr.-Ing. A. Scheibe. Mein weiterer Dank gilt Frau Dipl.-Ing. (FH) Manuela Svejda und Herrn Dipl.-Ing. S. Schmidgall für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung sowie den Herren Dipl.-Ing. (FH) J. Eichhorn und Dipl.-Ing. (FH) S. Paustian für die hervorragende Zusammenarbeit im Technikum.

Meiner Frau Sabine danke ich für die entgegengebrachte Geduld und das große Verständnis, mit der sie diese Arbeit begleitet hat.

Stuttgart, November 2003

Gero Weckerle

für Sabine, Timo, Tobias und Thea

Kurzfassung

Die Beschichtung von Karosserieaußenflächen erfolgt heute vorwiegend durch elektrostatisch unterstützte Hochrotationszerstäuber (ESTA-HR) an Lackierautomaten, die zunehmend durch Lackierroboter ersetzt werden. Dieser technologische Wandel basiert auf den Qualitäts- und Kostenvorteilen, die sich beim Einsatz der Roboter ergeben. So kann beispielsweise durch die höhere Flexibilität der Bewegung die Zahl der erforderlichen Zerstäuber pro Lackierzone deutlich reduziert werden. Um dennoch die geforderten Taktzeiten zu erreichen, werden aber immer höhere Durchflussmengen mit den Hochrotationszerstäubern verarbeitet, wodurch die bisherigen Zerstäubersysteme zunehmend an Verarbeitungsgrenzen stoßen. Neben der Ausbildung eines homogenen Strömungsfeldes hinsichtlich Schichtdickenverteilung und Strahlstabilität sowie der Reduzierung der Eigenverschmutzung des Zerstäubers ist vor allem die erzielbare Zerstäubungsfeinheit bei Steigerung des Lackvolumenstromes eine Fragestellung zukünftiger Weiterentwicklungen.

Hinzu kommt der Einsatz neuer und umweltfreundlicherer Lacksysteme, die die Prozessfenster zusätzlich einschränken und so zu erhöhten Anforderungen an die Anlagen- und Applikationstechnik führen. Das Klarlackmaterial Pulver-Slurry, ein in Wasser dispergierter Pulverlack, repräsentiert solch ein völlig neues Materialkonzept, das mit der bisherigen Applikationstechnik verarbeitet wird. Die Weiterentwicklung und Optimierung von Hochrotationszerstäubern an diese Rahmenbedingungen erfordert jedoch das grundlegende Verständnis der ablaufenden physikalischen Vorgänge. Ziel dieser Arbeit ist es daher, durch systematische Untersuchungen die Grundlagen für dieses Verständnis zu schaffen.

In der hier vorliegenden Arbeit wird das rheologische Verhalten von Lackmaterialen unter den im Lackierprozess vorliegenden Randbedingungen untersucht und vorgestellt. Hierfür wird der Lackierprozess systematisch in Teilprozesse zerlegt, um die physikalischen Randbedingungen zu definieren. Durch die Bestimmung der auf das Material einwirkenden Kräfte kann das Fließverhalten der Lacke bestimmt werden. Beginnend mit der Filmströmung auf dem Glockenteller werden so die aufeinanderfolgenden Prozessschritte bis hin zum Filmverlauf auf dem Substrat charakterisiert. Mit den entwickelten Versuchs- und Messanordnungen können die aufgestellten Modelle und durchgeführten Berechnungen verifiziert werden. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen theoretischer Betrachtung und Versuch.

So können die rheologischen Eigenschaften von Pulver-Slurry für jeden Abschnitt des Gesamtprozesses dargestellt werden. Durch gleichzeitige Betrachtung eines Metallic-

Wasserbasislackes und Wasser wird das Spektrum der zu bewertenden rheologischen Eigenschaften erweitert, und die Methodik an weiteren Fluiden verifiziert. Mit den in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen ist der Zusammenhang zwischen den grundlegenden viskoelastischen Eigenschaften und dem Zerstäubungsverhalten bzw. dem Applikationsergebnis hergestellt. Zudem wird wichtiges Grundlagenwissen zu den Teilschritten der Lackapplikation bereitgestellt, das nun als Eingangsdaten für Simulationsrechnungen eingesetzt werden kann, und zudem die technischen Anforderungen an zukünftige Zerstäubergenerationen liefert.

Abstract

With the increasing paint flow rates enabled by the use of painting robots and new paint systems, necessary optimizations of the painting process can only be achieved by gaining basic knowledge on the individual process steps. Also, the description of the process steps within definite physical models is a significant request for universally valid computer simulations. Moreover, present empirical investigations often cannot be transferred to different paint systems, since the process parameters are directly coupled to the coating result without taking into consideration the physical interrelations of the individual process steps.

The present work presents the rheological behaviour of the clear-coat system "powderslurry" during the separate process steps of the paint application by high-speed rotary bell atomizers. First step to reach this goal was to take the coating process apart into its basic sub-processes. Experimental and theoretical investigations allowed for to determine the flow conditions in the individual sub-processes. The derived strain of the paint finally led to the rheological properties of the materials considered. These properties play a decisive role in the entire process and determine the coating result. In addition to powder-slurry, also plain water and a water-based metallic paint were examined to verify the results obtained.

From a rheological point of view the atomization process with the occuring high shear rates has been shown to be the decisive event in the application process. Irrespective of the shear stress before atomization, the further behaviour of the materials is determined by the shear stress in this significant process step.

To get sufficient knowledge on the dynamic viscosity on the atomizer disc it has been necessary to determine the film thickness as well as the corresponding film velocity. A relationship for the film flow of Newtonian fluids on rotating discs was used and extended for shear-thinning materials to calculate these quantities. The theoretical results show that the viscosity drops to very low values at the bell edge due to the high shear rates. The shear rates by far exceeded those used in quality assurance which did not show any indication for the expected result of the atomization.

A measuring setup for the film flow has been developed that allowed for the verification of the described calculations under process conditions. The results obtained correspond to the calculation results within the measuring accuracy. This setup also made it possible to analyse critical states, for example, at the onset of the application or for the application at a low flow rate.

Within the scope of the present work it was possible to represent the rheological properties of powder-slurry at each step of the application process up to the paint film levelling. By at the same time taking into consideration, a water-based metallic paint extended the spectrum of the relevant rheological properties and allowed for a verification of the methods with a second paint system. Important basic knowledge on processing paints by high-speed rotary atomizers could be acquired through the obtained results. This specific knowledge is needed on the one hand to improve computer simulations of the coating process by providing detailed input data, and on the other hand to formulate the specifications for the development of atomizers and the appropriate paint systems.

		Seite
Inhalt		9
Verzeic	hnis der verwendeten Symbole	12
1	Einleitung	16
1.1	Ausgangslage	16
1.2	Aufgabenstellung	18
2	Stand der Technik	20
2.1	Automobilserienlackierung	20
2.1.1	Prozessablauf und Lackschichtaufbau	20
2.1.2	Klarlacke	22
2.1.2.1	Anforderungen	22
2.1.2.2	Unterschiede der Klarlacksysteme bei der Applikation	23
2.1.2.3	Pulver-Slurry	24
2.2	Zerstäubungsverfahren	25
2.2.1	Hochrotationszerstäuber	25
2.2.2	Pneumatische Zerstäuber	27
2.3	Charakterisierung von Beschichtungseigenschaften	28
2.3.1	Optische Kenngrößen von Oberflächen	28
2.3.1.1	Welligkeit	29
2.3.1.2	Glanz und Glanzschleier	30
2.3.2	Schichtdicke	31
3	Grundlagen der Rheologie	32
3.1	Fließ- und Deformationsverhalten von Substanzen	32
3.2	Viskoses Fließverhalten	33
3.2.1	Grundbegriffe	33
3.2.2	Idealviskoses Fließverhalten nach Newton	34
3.2.3	Strukturviskosität	34
3.2.4	Dilatanz	35
3.2.5	Fließgrenze	35
3.2.6	Zeitabhängiges Fließverhalten	35
3.2.7	Mathematische Ansätze	36
3.3	Elastisches Deformationsverhalten	37
3.4	Viskoelastisches Deformationsverhalten	38

5.4.1	Kriechverhalten	39
3.4.2	Schwingungsversuche	40
3.4.2.1	Schwingungsmessung mit variabler Amplitude (Amplituden-Versuch)	42
3.4.2.2	Schwingungsmessung mit variabler Frequenz (Frequenz-Versuch)	43
3.4.2.3	Schwingungsmessung mit konstanten Oszillationsparametern	45
4	Rheologische Eigenschaften von Pulver-Slurry im Vergleich	
	zu anderen Lacksystemen	46
4.1	Viskoses Fließverhalten	46
4.2	Amplituden-Versuch	47
4.3	Frequenz-Versuch	48
5	Theoretische Betrachtung und experimentelle Untersuchung	
	der Hochrotationsapplikation	50
5.1	Untersuchungsbedarf und Lösungsansatz	50
5.2	Filmströmung auf dem Glockenteller	53
5.2.1	Grundlagen der Rotationszerstäubung	54
5.2.2	Berechnung der Filmströmung	57
5.2.2.1	Bestimmung der Viskositätsfunktionen	57
5.2.2.2	Berechnung der Filmströmung und Einflussanalyse	63
5.2.3	Experimentelle Untersuchung der Filmströmung	69
5.2.3.1	Messverfahren zur Verifizierung der Filmströmungsberechnung	69
5.2.3.2	Strömungsverhalten auf dem Glockenteller	73
5.3	Ablösung am Glockentellerrand	76
5.3.1	Zerfallsmechanismen	76
5.3.2	Bestimmung der Zerfallsarten	79
5.3.3	Fadencharakterisierung	80
5.3.4	Einfluss der Luftströmung	82
5.3.5	Diskussion der Ergebnisse	85
5.4	Tropfengrößen	86
5.4.1	Messtechnik	86
5.4.2	Versuchsaufbau	88
5.4.3	Versuchsergebnisse	91
5.4.3.1.	Einfluss der Zerstäuberdrehzahl und Farbmenge	91
5.4.3.2.	Einfluss Lackmaterial	91
5.4.3.3.	Einfluss Glockentellerdurchmesser und Rändelung	94
5.5	Einfluss der Filmeigenschaften auf den Zerfall und die resultierenden	
	Tropfengrößen	96

6	Eigenschaften des Nassfilms	100
6.1	Einflussgrößen auf den Verlauf	100
6.2	Abdunstung im Sprühstrahl	102
6.2.1	Abdunstrate	102
6.2.2	Bestimmung der Viskosität nach der Applikation	104
6.2.3	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	105
6.3	Verlaufsverhalten des Nassfilms	109
6.3.1	Verlaufsmechanismen	109
6.3.2	Rheologische Charakterisierung des Nassfilms	111
6.3.2.1	Versuchsdurchführung	111
6.3.2.2	Ergebnisse	113
6.3.2.3	Rheologisches Verhalten im Nassfilm	118
6.3.3	Optische Charakterisierung des Nassfilms	120
6.3.3.1	Versuchsaufbau	120
6.3.3.2	Ergebnisse	121
6.3.3.3	Diskussion der Einflussgrößen auf den Verlauf	125
7	Zusammenfassung	128
8	Literaturverzeichnis	131
Anhang		136

Verzeichnis der verwendeten Symbole

Lateinische Symbole

А	Fläche	m²	
d	Durchmesser		
d _d	Düsendurchmesser	mm	
d _F	Durchmesser Flüssigkeitsfaden	μm	
dh	Differenzielle Dicke einer Strömungsschicht	m	
d _T	Durchmesser Tropfen	μm	
dv	Geschwindigkeitsdifferenz zweier Strömungsschichten	m/s	
D	Scherrate	s ⁻¹	
De	Deborah-Zahl	-	
$D_{k,r}$	Kennwert von Tropfengrößenverteilungen	μm	
DZ	Drehzahl	min ⁻¹	
f	Frequenz	Hz	
F	Kraft	Ν	
FK	Festkörpergehalt	%	
FM	Farbmenge	ml/min	
G	Schubmodul	Pa	
Gʻ	Speichermodul	Pa	
G"	Verlustmodul	Pa	
G*	Komplexes Schubmodul	Pa	
h	Plattenabstand	m	
I	Hochspannung Stromwert	μA	
k	Konsistenzfaktor	Pas	
LL	Lenkluft	NI/min	
Mw	Molmassenmittel	g/mol	
n	Drehzahl	min ⁻¹	
Oh	Ohnesorge-Zahl	-	
р	Fließexponent	-	
r	Radius, Laufvariable	m	
R	Radius Scheibenrand	m	
Re	Reynolds-Zahl	-	
S	Auslenkung	m	
Sm	mittlere Filmdicke	μm	
•	Breite einer Schichtdickenverteilung bei 50 % der maximalen	~	
Sb 50	Schichthöhe		
t	Zeit	S	
to	Zeitpunkt Start	S	
t ₁	Zeitpunkt	S	
t _{exp}	Versuchszeit	S	
t _P	Profiltiefe	μm	

Т	Temperatur	°C
u	Geschwindigkeit, Komponente in radialer Richtung	m/s
u _m	Mittlere, radiale Geschwindigkeit	m/s
U _{max}	Maximale, radiale Geschwindigkeit	m/s
U	Hochspannung	kV
v	Geschwindigkeit	m/s
v	Geschwindigkeit, Komponente in tangentialer Richtung	m/s
VL	Abfluggeschwindigkeit	m/s
Vu	Umfangsgeschwindigkeit	m/s
V	Volumenstrom	m³/h
w	Geschwindigkeit, Komponente in axialer Richtung	m/s
WP	Geschwindigkeit der Flüssigkeitsteilchen in Punkt P	m/s
W _{r0}	Ablösegeschwindigkeit radial	m/s
W _{rP}	Geschwindigkeit radial in Punkt P	m/s
$W_{\phi P}$	Geschwindigkeit tangential in Punkt P	m/s
We	Weber-Zahl	-
х	Koordinate	-
X _{FK0}	Festkörpergehalt der Referenzprobe	%
X _{FK1}	Festkörpergehalt der abgedunsteten Lackprobe	%
X _{LMO}	Lösemittelgehalt der Referenzprobe	%
X_{LM1}	Lösemittelgehalt der abgedunsteten Lackprobe	%
у	Koordinate	-
Z	Koordinate	-

Griechische Symbole

α	Winkel	0
α_{AD}	Abdunstrate	%
β	Steigungswinkel der Deformationskurve	o
β	Konturwinkel Glockenteller	o
δ	Filmdicke	μm
δ	Phasenverschiebungswinkel, Verlustwinkel	0
δ_{R}	Filmdicke Scheibenrand	μm
tan δ	Verlustfaktor, Dämpfungsfaktor	1
Φ	Divergenzwinkel	0
γ	Deformation $(100 \% = 1)$	%
γ _A	Oszillationstest: Deformationsamplitude	%
γe	Kriechversuch: Elastische Auslenkung	%
γs	sofortige Rückdeformation	%
γ.	Kriechversuch: Viskose Verformung	%
γz	zeitlich verzögerte Rückdeformation	%
γ1	Deformation spontan	%
γ2	Deformation Phase 2	%
γ ₃	Deformation Phase 3	%
	Scherrate	s ⁻¹
η	Scherviskosität	Pas
η_{B}	Bingham-Viskosität	Pas
η _c	Casson-Viskosität	Pas
η_0	Null-Scherviskosität	Pas
η*	komplexe Viskosität	Pas
φ	Drehwinkel	0
λ	Eigenzeit	S
λ_w	Wellenlänge	m
ν	Kinematische Viskosität	m²/s
ρ	Dichte	kg/m³
σ	Oberflächenspannung	N/m
τ	Schubspannung	Pa
$ au_{\mathrm{A}}$	Oszillationstest: Schubspannungsamplitude	Pa
$ au_e$	Kriechversuch: Schubspannung elastischer Anteil	Pa
τ_v	Kriechversuch: Schubspannung viskose Verformung	Pa
$ au_{o}$	Mindestschubspannung, Fliessgrenze	Pa
÷	zeitliche Änderung der Schubspannung	Pa/s
ω	Kreisfrequenz (Oszillation)	rad/s
ω	Winkelgeschwindigkeit	1/s

Abkürzungen

AWG	Auftragswirkungsgrad
CC	Clear-Coat (Klarlack)
ESTA-HR	Elektrostatisch unterstützte Hochrotationszerstäuber
He-Ne-Laser	Helium-Neon-Laser
HS	High Solid, Flüssigkeit mit hohem Festkörperanteil
KTL	Kathodische Tauchlackierung
LK	Luftkappe
LM	Lösemittel
LVE	Linear-viskoelastisch
LW	Longwave
MK	Messkegel
MP	Messplatte
PDA	Phasen-Doppler-Anemometrie
PS	Pulver-Slurry
RT	Raumtemperatur
SW	Shortwave
UV	Ultraviolette Strahlung
VOC	Volatile organic compounds (flüchtige organische Bestandteile)
WBL	Wasserbasislack

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Automobilserienlackierung hat in den letzten Jahren eine Reihe bemerkenswerter Neu- und Weiterentwicklungen erfahren. Als Ursache hierfür sind zum einen die gestiegenen Qualitätsanforderungen der Kunden, zum anderen die Anforderungen an die Umweltverträglichkeit der Lacksysteme aufgrund der immer strenger werdenden Gesetzgebung zu nennen /1/. Auch der immense Preisdruck bei der Herstellung von Automobilen zwingt zu neuen Entwicklungen, die den energie- und damit kostenintensiven Lackierprozess wirtschaftlicher gestalten.

Den gewachsenen Ansprüchen an Qualität und Wirtschaftlichkeit der Beschichtung kann, bei gleichzeitiger Verbesserung der Umweltbilanz, durch Einsatz von Lackierrobotern entgegengekommen werden. Die Automatisierung bietet die Möglichkeit, den Lackierprozess reproduzierbar unter optimalen Bedingungen zu führen, wodurch die Zahl der Fehler verringert und das Qualitätsniveau gehoben wird. Zudem können, um die Auftragswirkungsgrade zu steigern und somit die Lackverluste zu verringern, elektrostatisch unterstützte Applikationsgeräte verwendet werden /2/.

Das wachsende Interesse der Öffentlichkeit am Schutz der Umwelt führt in zunehmenden Maße dazu, dass Ökologie und Ökonomie nicht mehr getrennt voneinander betrachtet werden können. Umweltbezogene Anforderungen an Produkte und Dienstleistungen haben sich als wichtiges Kriterium in Politik, Wirtschaft und der Öffentlichkeit etabliert. Dabei besitzt die Lackierbranche eine erhebliche ökologische Relevanz. Durch die Applikation von Lacken fallen nach Schätzungen des Umweltbundesamtes jährlich 250.000 t bis 300.000 t Lackschlämme (ca. 50 % Wassergehalt) an /3/. Gleichzeitig werden dabei ca. 400.000 bis 450.000 t/a an flüchtigen organischen Verbindungen emittiert. Diese Emissionen von flüchtigen Kohlenwasserstoffen (VOC) entsprechen einem Anteil von ca. 50 % der industriellen Lösemittelanwendung. Da die Gesamtemissionen jeweils zur Hälfte vom Pkw-Verkehr und der industriellen Lösemittelanwendung verursacht werden, kann davon ausgegangen werden, dass die Lackierbranche nach dem Pkw-Verkehr an zweiter Stelle der Emissionsquellen liegt /4/. Trotz gestiegener Fahrleistungen zeigt jedoch der Pkw-Verkehr eine Tendenz zur Minderung von Emissionen /5/, während der Einsatz organischer Lösemittel im Lackiersektor weiter steigt /6/.

Die bisherigen Bemühungen zur Reduktion der Umweltbelastungen haben im Bereich der Automobilserienlackierung - im Vergleich zur übrigen Lackiertechnik - bereits zu deutlichen Erfolgen geführt. So konnten mit der Einführung von Wasserbasislacken die Emissionen organischer Verbindungen um ca. 3,5 kg pro Karosse reduziert werden, da diese Lacksysteme 80 % weniger organische Lösemittel als konventionelle Lacke enthalten. Während bei konventionellen Lösemittellacken drei Viertel des Volumens aus organischen Verbindungen bestehen, enthalten die wasserlöslichen Basislacke rund Wasser als Lösemittel /7/. Mit der schrittweisen Einführung 70 % von Wasserbasislacksystemen für Uni- und Metallic-Farben ging der Wandel zum generellen Zwei-Schichtaufbau im Decklackbereich für Pkw-Karossen einher. Auf die farb- und effektgebende Basislackschicht wird dabei eine gegen Umwelteinflüsse schützende, lösemittelhaltige Klarlackschicht appliziert. Die Aufteilung in zwei getrennte Schichten ermöglicht eine gezielte Optimierung der jeweiligen Schicht hinsichtlich ihrer Funktion.

Um die Emission von Lösemitteln auch bei der Applikation von Klarlack deutlich zu reduzieren, sind in den letzten Jahren gerade auf diesem Gebiet neue Entwicklungen in Serie gegangen. Erstmals kommt ein lösemittelfreier Pulverklarlack zum Einsatz /8/, der jedoch eine von bisherigen Nasslacksystemen grundlegend abweichende Applikationstechnik benötigt und deshalb in bestehende Anlagen nicht integriert werden kann.

Eine weitere Klarlackentwicklung wurde von der Daimler-Benz AG in die Pkw-Serienlackierung eingeführt. Hier entstand das völlig neue Klarlacksystem Pulver-Slurry, ein in Wasser dispergierter Pulverklarlack. Mit der Verwendung von Pulver-Slurry kann die bewährte Anlagen- und Applikationstechnik der Flüssiglacke mit den geringen Emissionen von Pulverlacken betrieben werden. Im Vergleich zu 2K-Klarlack können so, je nach Karossenoberfläche, bis zu 1,5 kg Lösemittel pro Karosse eingespart werden /9/. Ein weiterer Vorteil der Pulver-Slurry-Verarbeitung ist, neben der Option, vorhandene Anlagen umrüsten zu können, die höhere Dosiergenauigkeit der Nasslacktechnik. Darüber hinaus erreicht Pulver-Slurry aufgrund der sehr kleinen Pulverpartikel die positiven Verlaufseigenschaften von Nasslacken bei geringen Schichtdicken /10, 11/. Durch Verwendung der neuen Klarlacktechnologie kann die Schichtdicke von ca. 60-70 µm bei Trockenpulvern /12/ auf 45 µm bei Pulver-Slurry reduziert werden. Die Rückgewinnung des Pulvers aus der Auswaschung der Lackieranlage ist für Pulver-Slurry im Technikumsmaßstab erprobt /13/, bei Trockenpulver ist die Wiederverwertung des Pulveroversprays Stand der Technik.

1.2 Aufgabenstellung

Die Beschichtung von Karosserieaußenflächen erfolgt heute vorwiegend durch elektrostatisch unterstützte Hochrotationszerstäuber (ESTA-HR) an Lackierautomaten sowie durch Lackierroboter mit pneumatischen Zerstäubern im Falzbereich. In der Automobilproduktion gewinnt der Lackierroboter aufgrund seiner Flexibilität, der Qualitäts- und Kostenvorteile auch für die Lackierung von Außenflächen zunehmend an Bedeutung. Angesichts der größeren Arbeitsbereiche kann die Zahl der erforderlichen Zerstäuber pro Lackierzone reduziert werden. Um dennoch die geforderten Taktzeiten werden jedoch höhere Durchflussmengen zu erreichen, immer mit den Hochrotationszerstäubern verarbeitet, wodurch die bisherigen Zerstäubersysteme zunehmend an Verarbeitungsgrenzen stoßen. Neben der Ausbildung eines homogenen Strömungsfeldes hinsichtlich Schichtdickenverteilung und Strahlstabilität sowie der Reduzierung der Eigenverschmutzung des Zerstäubers ist vor allem die erzielbare Zerstäubungsfeinheit eine Fragestellung zukünftiger Weiterentwicklungen.

Hinzu kommt der Einsatz neuer und umweltfreundlicherer Lacksysteme, die die Prozessfenster zusätzlich einschränken und so zu erhöhten Anforderungen an die Anlagen- und Applikationstechnik führen /14/. Die unter diesen Rahmenbedingungen erforderlichen Optimierungspotenziale des Lackierprozesses lassen sich daher nur über genauere Kenntnis der physikalischen Vorgänge aufzeigen und umsetzen. Sie sollen im Rahmen dieser Arbeit erweitert werden.

Die Zusammenhänge zwischen den prozessbeeinflussenden Größen und dem Lackierergebnis sind jedoch so komplex und nur für definierte Randbedingungen bekannt, dass bislang keine allgemeingültige mathematisch-physikalische Modellierung des Lackierprozesses gelingt /2/. Bisherige empirische Untersuchungen sind oftmals Lacksysteme übertragbar, nicht auf andere obwohl sie unter definierten Randbedingungen erfolgten. Der Grund liegt in der Fokussierung auf die verfahrenstechnischen Applikationsparameter und dem damit erzielten Lackierergebnis, ohne die physikalischen Zusammenhänge der durchlaufenen Teilprozesse zu berücksichtigen. Sollen zeitaufwendige Versuchsreihen aufgrund von Prozessänderungen zukünftig verkürzt werden, müssen gängige Erfahrungswerte in der Lackiertechnik durch wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse ersetzt werden.

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, durch experimentelle Untersuchungen und theoretische Betrachtungen ein besseres Verständnis der physikalischen Abläufe bei der Lackapplikation zu ermöglichen. Den Schwerpunkt der Untersuchungen sollen dabei die rheologischen Eigenschaften des Lackmaterials sowie das rheologische Verhalten unter Applikationsbedingungen bilden.

Die Zerlegung des Lackierprozesses in seine Teilprozesse bietet dabei die Möglichkeit, die einzelnen Prozessabschnitte isoliert zu betrachten. Mit der genaueren Kenntnis der grundlegenden Vorgänge innerhalb der Teilprozesse lassen sich dann allgemeine Rückschlüsse auf deren Beitrag zum Gesamtergebnis ziehen.

Im Mittelpunkt der Untersuchung steht dabei die Applikation des neuartigen Klarlackmaterials Pulver-Slurry. Anhand dieses Materials können die grundsätzlichen physikalischen und strömungsmechanischen Vorgänge des Zerstäubungsprozesses beschrieben werden. Beginnend mit der Filmströmung auf dem Glockenteller soll die Desintegration an der Glockentellerkante, unter Berücksichtigung der tatsächlichen Scherbelastung des strukturviskosen Materials, charakterisiert werden. Die dabei entwickelten Methoden und Verfahren werden zusätzlich an einem gebräuchlichen Wasserbasislack verifiziert. Diese Vorgehensweise stellt die Übertragbarkeit der erhaltenen Ergebnisse auf andere Lacksysteme sicher. Außerdem werden Erkenntnisse zur Auslegung und Gestaltung von Zerstäubergeometrien für höhere Farbmengen gewonnen.

Neben der Abdunstung von Lösemitteln während des Tropfentransports bestimmt der Strukturaufbau (Regeneration) des Materials die Viskosität beim Aufprall der Tropfen. Es ist zu analysieren, wie groß die Viskositätsänderungen während der durchlaufenen Teilprozesse sind, und wie sich das Materialverhalten auf den Verlauf des Lackfilms auswirkt. Als wesentliches Charakteristikum kann hier das erzeugte Tropfengrößenspektrum angesehen werden, das zum einen durch die Lackeigenschaften bestimmt wird, zum anderen aber aufgrund der tropfengrößenabhängigen Abdunstung Rückwirkungen auf die Materialeigenschaften ausübt. In Zusammenhang mit Pulver-Slurry ergibt sich ergänzend die Fragestellung, inwieweit die Welligkeit der Oberfläche durch das Verlaufsverhalten der Pulverschmelze im Decklacktrockner bestimmt ist, und welchen Beitrag zuvor der Eigenlauf des Nassfilms leistet.

Die Untersuchung der physikalischen Grundlagen des bestehenden Lackierprozesses bietet durch Schaffung einer breiteren Wissensbasis folgende Vorteile:

- Gezielte Optimierung der Zerstäuber
- Ableitung von Maßnahmen zur Fehlerreduzierung
- Definition der Anforderungen an neue Lacksysteme möglich
- Abschätzung von Risiken bei Einführung neuer Prozesse
- Verkürzung von Entwicklungszeiten und damit Reduzierung des finanziellen und personellen Aufwands bei Prozessänderungen
- Erkenntnisse bilden Bausteine für die Modellierung und rechnerische Simulation des gesamten Applikationsprozesses

2 Stand der Technik

2.1 Automobilserienlackierung

Den Schwerpunkt dieser Arbeit bilden die in der Automobilserienlackierung angewandten Zerstäubungsverfahren. Daher wird zunächst ein Überblick über die Verfahrensschritte und die verwendeten Materialien bei der Beschichtung von Automobilkarossen gegeben. Die Bedeutung des Klarlacks sowie die in der Autoindustrie eingesetzten Klarlackkonzepte stehen dabei im Vordergrund. Ausgehend von der Beschreibung der eingesetzten Zerstäubungstechnik werden abschließend die Zielgrößen der Klarlackapplikation definiert.

2.1.1 Prozessablauf und Lackschichtaufbau

Um den Beschichtungsprozess unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten weiter zu optimieren, werden neben der Weiterentwicklung der Verfahrens-, Anlagenund Steuerungstechnik Anstrengungen unternommen, den Materialeinsatz zum einen durch Senkung der Schichtstärken zu reduzieren, zum anderen soll trotz einer verminderten Anzahl von Schichten eine gleiche oder verbesserte Qualität erzielt werden. Dafür wird die Funktionalität verschiedener Lackschichten in weniger Schichten zusammengefasst /10/. Die kontinuierliche Optimierung der Lackierprozesse führte zu einer Vielzahl realisierbarer Lackierkonzepte. Die wesentlichen Prozessschritte einer modernen Serienlackierung laufen wie folgt ab:

Der Lackierprozess beginnt mit der Vorbehandlung der Karosse. In diesem ersten Schritt wird die Karosse von Fetten, Ölen und anderen Verunreinigungen vorhergehender Produktionsschritte befreit und anschließend phosphatiert. Die Phosphatschicht bietet neben einem temporären Korrosionsschutz noch eine verbesserte Haftfähigkeit des nachfolgenden Lackes auf dem Karosserieblech. Anschließend erhält das Fahrzeug durch die kathodische Tauchlackierung eine Korrosionsschutzschicht, die aufgrund des Tauchverfahrens auch in alle Hohlräume dringen kann und so für ausreichenden Korrosionsschutz sorgt. Nachdem die Rohkarosse den KTL-Trockner durchlaufen hat, ist die Vorbehandlung abgeschlossen /15/.

Die anschließend applizierte Füllerschicht soll Unebenheiten der Karosserie ausgleichen, zusätzlichen Schutz vor Korrosion, Steinschlagschäden und UV-Strahlung bieten sowie der nachfolgenden Schicht als Haftgrund dienen. Nach einer Zwischentrocknung folgt die Applikation der farb- und effektgebenden Basislackschicht. Dabei werden zunächst die Detailbereiche wie Motorraum und Türeinstiege von Lackierrobotern mit pneumatischen Zerstäubern beschichtet, die Außenhaut wird flächig mit ESTA-Hochrotationszerstäubern lackiert. Es folgt erneut eine Zwischentrocknung, bevor abschließend die Klarlackschicht aufgebracht wird. Die Applikation des Klarlacks erfolgt gleichfalls durch Roboter für Detailflächen und mit Hochrotationszerstäubern im Außenbereich. Diese zuletzt applizierte Schicht bestimmt den optischen Eindruck und Umwelteinflüssen gleichzeitig den Schutz vor (z.B. Kratzmuss und Chemikalienbeständigkeit) gewährleisten. Die Vernetzung aller Lackschichten im Decklacktrockner schließt den Prozess ab. Eine abschließende Inspektion der Fahrzeugoberfläche auf der "weißen Platte", einer optimal ausgeleuchteten Beurteilungsfläche, sichert ein hohes Qualitätsniveau der beschichteten Karossen.

Mit der fortgeschrittenen Automatisierung der letzten Jahre konnte die Lackierqualität ständig verbessert werden. Um dieses Niveau zu halten bzw. weiter zu verbessern, ist es erforderlich, mögliche Prozessabweichungen oder Anlagenstörungen frühzeitig erkennen und lokalisieren zu können. Die hierfür notwendige Transparenz moderner Lackieranlagen wird zunehmend durch Systeme sichergestellt, die alle lackierrelevanten Signale erfassen und zur Diagnose bereitstellen können. Neben den Anlagen- und Applikationsdaten sind dies auch die Daten der Lackversorgung und der Qualitätskontrolle. In einer typischen Lackierstraße kann die Prozessdatenerfassung so bis zu 5000 Messsignale von Reglern, Sensoren und Ventilen beinhalten, deren Daten permanent aufgezeichnet werden /14/. Diese kontinuierliche Erfassung von Prozessdaten ist Grundlage einer erfolgreichen Fehler-Ursachen-Analyse von Abweichungen, Fehlern und Störungen. Wichtig ist dabei, den direkten Bezug zwischen einem entdeckten Fehler und der tatsächlichen Ursache herstellen zu können, um so Abweichungen von vornherein zu vermeiden /16/.

2.1.2 Klarlacke

Um den gestiegenen Forderungen nach mechanischer und chemischer Festigkeit der Karosserieoberfläche nachzukommen, ist seit Einführung von Wasserbasislacken der Einsatz von Klarlack auch auf Uni-Lackschichten erforderlich geworden. Gerade dieser gestiegene Bedarf nach Klarlacken führte in den letzten Jahren zu einer Vielzahl von Neuentwicklungen umwelfreundlicher Klarlacksysteme, die eine Alternative zu den konventionellen ein- oder zweikomponentigen Lösemittellacksystemen darstellen.

2.1.2.1 Anforderungen

Als zuletzt applizierte Schicht bestimmt der Klarlack das optische Erscheinungsbild des Automobils sowie die Gebrauchseigenschaften der Lackierung. Aus diesem Grunde ist das Ziel der Klarlackapplikation eine möglichst glatte Oberfläche ohne Restwelligkeit. Während Farbton und Effekt einer Lackierung von den farbgebenden Basislackschichten bestimmt wird, sind der Verlauf und der Glanz als kundenrelevante Qualitätsmerkmale vom Klarlacksystem abhängig. Weitere, wichtige Anforderungen, die moderne Klarlacke zu erfüllen haben, sind die Gebrauchseigenschaften. Hierunter fällt vor allem, wie in Abb. 2.1 dargestellt, die mechanische Widerstandsfähigkeit gegen verschiedenste, äußere Einflüsse.



Abb. 2.1: Anforderungen an Klarlacksysteme.

2.1.2.2 Unterschiede der Klarlacksysteme bei der Applikation

Neben den gebräuchlichen Flüssiglacken haben sich in der Zwischenzeit das Trockenpulver und Pulver-Slurry als emissionsarme Klarlacke in der Automobilserienlackierung etabliert. In Abb. 2.2 sind drei grundlegende Klarlacksysteme und deren Verarbeitungsbedingungen gegenübergestellt. Da bei Flüssiglacken während der Applikation Lösemittel (organische LM oder Wasser) verdunstet, sind die Viskosität und der Festkörpergehalt auf dem Lackierobjekt höher als im Ausgangszustand.



Abb. 2.2: Verarbeitungsbedingungen von Klarlacksystemen im Vergleich.

Nach der Applikation wird Pulver-Slurry in einem Vortrockner physikalisch getrocknet, um das Dispersionsmedium Wasser aus der Pulverschicht zu entfernen. Die Pulverpartikel sind nach der Vortrocknung noch nicht verschmolzen, sondern haften als feine Pulverschicht auf dem Basislack. Erst im Decklacktrockner wird das Pulver bei höherer Temperatur aufgeschmolzen und die chemische Vernetzung des Bindemittels eingeleitet. Auch bei konventionellen Nasslacken ist eine Vortrocknung erforderlich, um Restlösemittel aus der Lackschicht diffundieren zu lassen, bevor die Oberfläche vollständig vernetzt. Im Gegensatz hierzu wird der Pulverlack trocken aufgebracht, die Vortrocknung entfällt, so dass der Verlauf zu einem geschlossenen Film allein im Trockner stattfindet. Wichtige Einflussparameter auf den Verlauf sind die Schichtdicke, die Korngrößenverteilung sowie die Schmelzviskosität. Bei der Verarbeitung von Pulver-Slurry dagegen tragen die Einebnung des Nassfilms und die kleineren Korngrößen zusätzlich zum Filmverlauf bei.

2.1.2.3 Pulver-Slurry

Pulver-Slurry ist ein in Wasser dispergierter und stabilisierter Pulverklarlack. Dieser wird in einem konventionellen Verfahren zunächst mit einer durchschnittlichen Partikelgröße von 30 µm hergestellt. Anschließend wird das Pulver unter Zugabe von Additiven in Wasser dispergiert und durch Nassvermahlung auf eine Partikelgröße von kleiner 5 µm reduziert. Es entsteht eine homogene, milchig-weiße Suspension mit einem pH-Wert von 6,0-6,5 und einem Lösemittelgehalt von deutlich unter 2 %. Das Vorhandensein einer wässrigen Phase weist gegenüber Trockenpulvern eine Reihe von Vorteilen auf: So ist z.B. bei Pulverlacken nach dem Vermahlen eine Modifizierung kaum mehr möglich, während bei Pulver-Slurry durch Zugabe von Additiven in die wässrige Phase das Eigenschaftsbild gezielt verändert werden kann. In Tabelle 2.1 sind die Eigenschaften von Pulver-Slurry aufgeführt.

Nasslackeigenschaften:	
Festkörper (1h, 130°C)	35-38 %
Lösungsmittel	< 2 %
Partikelgröße	3 µm
ph-Wert	6,0 - 6,5
Viskosität 23 °C (1000 s ⁻¹)	150-200 mPas
Dichte	1,05 g/cm ³

 Tabelle 2.1: Nasslackeigenschaften von Pulver-Slurry /17/.

Durch die Vermahlung der Partikel kleiner 5 µm kann die Schichtdicke von ca. 60-70 µm bei Trockenpulvern auf 45 µm im Fall von Pulver-Slurry herabgesetzt werden. Neben der Materialeinsparung ergibt sich auch eine Verbesserung des Verlaufs. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die Möglichkeit zur Aus- bzw. Nachrüstung vorhandener Anlagen, da Pulver-Slurry mit der bewährten Anlagen- und Applikationstechnik von Wasserbasislacken verarbeitet werden kann. So wird ermöglicht, neben der höheren Dosiergenauigkeit der Nasslacktechnik auch die Effizienz der elektrostatisch unterstützten Hochrotationszerstäuber mit den geringen Emissionen von Pulverlacken zu kombinieren. Tabelle 2.2 fasst die Unterschiede der Pulverklarlacke nochmals zusammen:

Eigenschaft	Pulverlack	Pulver-Slurry
Schichtdicke	60 – 70 µm	35 – 45 µm
Applikation	Pulverlack-Ausrüstung	Wasserlack-Ausrüstung
Partikelgröße	Ø > 15 μm	Ø 3 µm
Rezeptmodifikation	Keine	Additive in wässriger
		Phase
Filtration	> 60 µm	25 – 50 μm
Verlauf / Appearance	Spezielle	Geringe Partikelgröße +
	Pulverlackformulierung	Verlauf im Nassfilm

Tabelle 2.2: Eigenschaften von Pulverlack und Pulver-Slurry im Vergleich /17/.

2.2 Zerstäubungsverfahren

Zur Zerstäubung von Lackmaterialien stehen eine Vielzahl verschiedener Verfahren zur Auswahl, die je nach Produktanforderungen Verwendung in der Industrie finden /18, 19, 20/. Vorrangig werden in der Automobilindustrie elektrostatisch unterstützte Hochrotationszerstäuber und pneumatische Hochdruckzerstäuber eingesetzt, deren Aufbau und Funktionsweise im Folgenden dargestellt wird.

2.2.1 Hochrotationszerstäuber

Aufgrund des hohen Auftragswirkungsgrades von 70-95 % /21/ hat sich im Fall der Automobillackierung von Außenflächen die elektrostatisch unterstützte Hochrotationsapplikation, kurz ESTA-HR, durchgesetzt. Das Lackmaterial wird dabei mit Hilfe einer schnell rotierenden Glocke zerstäubt, wobei die Glockentellerdrehzahlen typischerweise zwischen 30.000-60.000 U/min betragen. Durch eine Verteilerscheibe wird der Lack gleichmäßig auf der Glockentellerinnenfläche verteilt und strömt durch die aus der Drehbewegung resultierenden Zentrifugalkraft zur Glockentellerkante, an der sich das Lackmaterial vorzugsweise unter Bildung von Fäden ablöst. Aufgrund der hohen Relativgeschwindigkeit zwischen Glockentellerkante und Umgebungsluft zerfallen die Fäden umgehend in feine Tröpfchen.

Der erzeugte, radial von der Glockentellerkante abströmende Tröpfchennebel wird mit Hilfe eines Luftstromes, der sogenannten Lenkluft, die aus konzentrischen Bohrungen hinter dem Glockenteller zugeführt wird, auf die in axialer Richtung liegende Werkstückoberfläche gelenkt. Die Form des Sprühstrahls und damit die Schichtdickenverteilung auf dem Substrat kann durch die Lenkluftmenge beeinflusst werden. Um den Auftragswirkungsgrad, also das Verhältnis zwischen der auf einem Werkstück abgeschiedenen und der verspritzten Masse des Lackfestkörpers /21/, zu erhöhen, wird das zerstäubte Lackmaterial zusätzlich elektrostatisch aufgeladen und dadurch verstärkt auf dem geerdeten Werkstück abgeschieden. Die Aufladung der Tröpfchen kann direkt an der Glockentellerkante (Direktaufladung) oder beim Durchqueren des elektrischen Zerstäuber angeordneten Außenelektroden Feldes von kreisförmig um den (Außenaufladung) erfolgen. Nachteilig bei der Direktaufladung ist die notwendige Potenzialtrennung der Lackversorgung bei Verwendung von wassergelösten Lacken, die technisch aufwendige Lösungen erfordert. Aus diesem Grund wird in der Praxis die Außenaufladung mit mehreren Nadelelektroden angewandt, die jedoch nicht die Effektivität der direkten Aufladung erreicht /23/. In den ionenreichen Zonen in Elektrodennähe werden die Lacktröpfchen aufgeladen und analog zur Direktaufladung im elektrischen Feld beschleunigt. Abb. 2.3 zeigt einen Hochrotationszerstäuber wie er zur Applikation von Pulver-Slurry eingesetzt wird.



Abb. 2.3: Schematische Darstellung eines Hochrotationszerstäubers (Quelle: Dürr).

2.2.2 Pneumatische Zerstäuber

Detailflächen im Karosserieinnenbereich werden mit pneumatischen Automatikpistolen, von Lackierrobotern geführt, beschichtet. Zwar liegen die Lackoversprayverluste deutlich über denen der ESTA-HR-Zerstäuber, dafür sind die pneumatischen Spritzpistolen (Abb. 2.4) aufgrund ihrer kompakten Bauweise und des geringeren Gewichts zweckmäßiger für die Handhabung mit Robotern. Hier kommt es aufgrund der hohen Bahngeschwindigkeiten auf eine schnelle und flexible Strahlformung an.

Dem Einsatz von Hochrotationszerstäubern auch in diesem Bereich stehen derzeit noch die verminderte Zugänglichkeit des größeren Zerstäubers sowie die Gefahr von Überbeschichtungen an Kanten aufgrund der elektrostatischen Effekte entgegen. Es werden aber Bestrebungen unternommen, durch geeignete Lenkluft und Glockentellerkombinationen auch diese Bereiche mit Hochrotationszerstäubern zu beschichten.





Die Zerstäubung erfolgt bei der pneumatischen Applikation allein mittels Druckluft. Durch einen Ringspalt, der aus der Mittelbohrung der Luftkappe und der Farbdüse gebildet wird, strömt die Zerstäuberluft auf den austretenden Lackstrom. Weitere um die Mittelbohrung angeordnete Zerstäuberluftbohrungen fördern den Zerstäubungsvorgang und verhindern ein Rückströmen von Lacktropfen, die den Zerstäuber verschmutzen könnten. Die hohe Relativgeschwindigkeit zwischen Lack und Zerstäuberluft bewirkt ein Zerreißen des Lackstroms in einzelne Partikel, wobei der Zusammenhalt der Lackflüssigkeit aufgrund der Oberflächenspannung durch den Impulsaustausch aufgehoben wird, da der äußere Staudruck die inneren Kohäsionskräfte übersteigt. Während des Zerfalls werden die entstehenden Tropfen in der Luftströmung beschleunigt und mitgerissen.

Mit der Zerstäuberluft allein würde man ausschließlich kegelförmige Spritzstrahlen erzeugen, was aber nicht immer gewünscht ist. Durch Luftzufuhr an den zwei gegenüberliegenden "Hörnern" der Luftkappe (LK) können Spritzstrahlen mit elliptischem Querschnitt erzeugt werden. Je nach Verhältnis von Hornluft zu Zerstäuberluft ergeben sich unterschiedlich flache Spritzstrahlquerschnitte. Die Luftbohrungen der LK müssen sehr exakt gefertigt werden, da schon geringe Abweichungen zu unsymmetrischen Spritzbildern führen. Ein großer Nachteil der pneumatischen Spritzpistolen sind die großen Luftmengen, die zur Zerstäubung erforderlich sind. Kleine Tröpfchen im Sprühstrahl folgen aufgrund ihrer geringen Trägheit der starken Luftströmung am Werkstück vorbei und bewirken so einen Auftragswirkungsgrad von lediglich 30-40 % /21/.

2.3 Charakterisierung von Beschichtungseigenschaften

2.3.1 Optische Kenngrößen von Oberflächen

Das visuelle Erscheinungsbild (Appearance) einer Oberfläche lässt sich in den Farbeindruck und den Glanz der Oberfläche unterteilen. Sieht man vom Farbton der Lackschicht einmal ab, so wird der Eindruck der Oberfläche im Wesentlichen von ihren Abbildungseigenschaften bestimmt. Um das Erscheinungsbild für das subjektive Empfinden des menschlichen Auges zu charakterisieren, müssen mehrere Faktoren, die in Tabelle 2.3 zusammengefasst sind, berücksichtigt werden. So kann man eine Oberfläche durch Fokussieren des Spiegelbildes einer Lichtquelle oder eines Gegenstandes betrachten, oder man fokussiert die Oberfläche selbst. Beide Beobachtungen tragen zum Gesamteindruck der Oberfläche bei /24/.

Appearance	Betrachtung der Oberfläche	Englisch	Betrachtung des Spiegelbildes	Englisch
Erscheinung:	Welligkeit	Orange Peel	Abbildungsqualität	Distinctness
				of Image
Messwerte:	Langwelle	Longwave	Glanz	Gloss
	Kurzwelle	Shortwave	Glanzschleier	Haze

Tabelle 2.3: Kriterien zur optischen Bewertung von Oberflächen.

2.3.1.1 Welligkeit

Wird die Oberfläche selbst fokussiert, so ist auf Oberflächen, die mit zerstäubenden Verfahren beschichtet wurden, grundsätzlich eine gleichmäßig verteilte, wellige Struktur der Oberfläche (Orangenhautstruktur) vorhanden. Ihre Wellenlänge liegt im Bereich 0,1-10 mm, die Amplitudenwerte in der Größenordnung 1 µm. Erkennbar ist diese Störung als welliges Muster heller und dunkler Flecken. Um das Fokussieren der Oberfläche nachzubilden, steht das Wave-Scan-Messgerät zur Verfügung. Ein Laserlicht beleuchtet dabei die Probe unter einem Einfallswinkel von 60°, ein Detektor auf der Gegenseite empfängt die reflektierte Strahlung. Wird das Messgerät über eine Strecke von 100 mm Länge bewegt, so erhält man das Profil der reflektierten Lichtintensität und damit das optische Profil der Oberfläche (Abb. 2.5). Durch Filtern wird das gemessene Helligkeitsprofil in langwellige (0,6-10 mm) und kurzwellige (0,1-0,6 mm) Strukturen aufgeteilt, um das Auflösungsvermögen des Auges bei ferner und naher Betrachtungsweise nachzubilden.



Abb. 2.5: Messprinzip der Oberflächenwelligkeit (Wave-Scan).

Da der Kontrast zwischen hell und dunkel, aus dem das menschliche Auge den Tiefeneindruck der Oberfläche gewinnt, durch die statistische Größe der Varianz der Kontrastwerte gut wiedergegeben werden kann, bildet man zwei Kennwerte:

- Langwelligkeit (Longwave)
 Varianz der Lichtintensität f
 ür langwellige Strukturen.
- Kurzwelligkeit (Shortwave)
 Varianz der Lichtintensität f
 ür kurzwellige Strukturen.

Die Wiederholbarkeit der Messungen liegt bei dem verwendeten Wave-Scan Messgerät bei 2 %, die Vergleichbarkeit der Werte erreicht 3 % (jeweils Standardabweichung) bei einem Messbereich von 0-99,9 Einheiten.

2.3.1.2 Glanz und Glanzschleier

Wenn man eine an der Oberfläche reflektierte Lichtquelle fokussiert, erhält man Aussagen über die Abbildungseigenschaften einer Oberfläche. Der Glanz einer Beschichtung kann durch den Anteil des Lichtes, der gerichtet reflektiert wird, gemessen werden.

Bei hochglänzenden Oberflächen gilt das Reflexionsgesetz, die reflektierte Lichtintensität hängt vom Einstrahlwinkel und den Materialeigenschaften ab. Ein an der Oberfläche gespiegeltes Objekt erscheint ebenso klar und scharf wie bei direkter Betrachtung (Abb. 2.6 a). Eine glänzende Oberfläche mit Glanzschleier dagegen streut diffuses Licht geringer Intensität nahe der Hauptreflexion (Abb. 2.6 b), hervorgerufen durch mikroskopische Filmstörungen. Die Oberfläche erscheint glänzend, das betrachtete Objekt wird aber trübe oder milchig empfunden.

Die Glanzmessung erfolgt mit Reflektometern, deren Aufbau genormt ist /25/. Zur Messung einer hochglänzenden Oberfläche wird ein Einstrahl- bzw. Abstrahlwinkel von 20° vorgeschlagen. Mit Messgeräten, die die reflektierte und gestreute Strahlung differenziert messen (z.B. Haze-Gloss, Fa. BYK), kann auch der Glanzschleier bestimmt werden.



Abb. 2.6: Glanzmessung:

- a) Messung einer hochglänzenden, fehlerfreien Oberfläche.
- b) Messung einer Oberfläche mit Glanzschleier.

Der gemessene Glanzwert wird in Glanzeinheiten (GE) von 0-180 wiedergegeben, die Messgenauigkeit ist kleiner 1 GE im Bereich von 0-100 GE. Bei den Haze-Werten ist der Messbereich von 20-500 Einheiten (Hlog) definiert, die Wiederholbarkeit beträgt ± 1 Einheit.

2.3.2 Schichtdicke

Die Schichtdicke eines applizierten Lackfilms hat entscheidenden Einfluss auf die optischen und mechanischen Eigenschaften der erzeugten Oberfläche. So ändern sich z.B. der Farbton und die Verlaufseigenschaften der Oberfläche mit variierender Schichtdicke. Zu hohe Schichtdicken können zu Oberflächenstörungen (Kocherbildung) bei der Trocknung führen, da an der Oberfläche die Filmbildung schon einsetzt, bevor die Lösemittel in den unteren Schichten ausgetrieben sind. Zudem erhöhen große Schichtdicke des Lackfilms stellt somit ein Optimum aller Anforderungen dar und ist eine wesentliche Zielgröße der Lackierung. Da die angestrebte, optimale Schichtdicke von Pulver-Slurry feststeht, im Außenbereich liegt diese bei ca. 45 µm, wird sie im Folgenden nur noch angegeben, falls bei Untersuchungen Abweichungen von dieser Vorgabe auftreten.

Messtechnisch erfasst wird die Schichtdicke mit Hilfe einer Messsonde, die gemäß dem magnetinduktiven Verfahren arbeitet /26/. Um den Höhenverlauf der Schichtdicke über eine lackierte Fläche hinweg ermitteln zu können, steht ein Schichtdickenprüfgerät mit frei programmierbaren Achsen zur Verfügung. So können Messwerte auf beliebig generierten Bahnen aufgenommen und die Kennwerte der mathematischen Verteilungsfunktionen berechnet werden. Abb. 2.7 zeigt beispielhaft ein gemessenes Schichtdickenprofil quer zur Lackierrichtung.



Abb. 2.7: Schichtdickenprofil einer dynamischen Lackierbahn (pneumatische Spritzpistole).

3 Grundlagen der Rheologie

Da das technologische Verhalten von Lacken bei der Verarbeitung im Wesentlichen von deren Fließeigenschaften bestimmt wird, kommen den Messmethoden, Modellen und Theorien der Rheologie bei der Beschreibung dieser Vorgänge große Bedeutung zu. Im folgenden Kapitel sind daher allgemeine Grundlagen der Rheologie, die für das Verständnis der durchgeführten Untersuchungen des Lackierprozesses erforderlich sind, zusammengefasst. Um weiterführende Informationen zu erlangen, wird auf entsprechende Literatur verwiesen /27, 28, 29/.

3.1 Fließ- und Deformationsverhalten von Substanzen

Das Fließverhalten beschreibt die irreversible Verformung eines Stoffes als Reaktion auf eine äußere Beanspruchung. Unter Einwirkung äußerer Kräfte (z.B. Zug-, Druckoder Schubspannungen) verformen sich Stoffe elastisch oder aber durch viskoses Fließen, wobei sich in realen Stoffen meist beide Verformungseigenschaften überlagern. Idealfälle des rheologischen Verhaltens sind demnach die reversible, idealelastische Verformung nach Hooke sowie das irreversible, idealviskose Fließen nach Newton. Tabelle 3.1 zeigt verschiedene, mechanische Modelle, die das Deformationsverhalten von Substanzen beschreiben.

Name	Beschreibung	Verhalten	Modell	Symbol
Hooke	Idealelastische Substanz	Vollständige Rückdeformation	Feder	$\mathcal{W}\mathcal{W}$
Newton	ldealviskose Flüssigkeit	Keine Rückdeformation	Dämpfer	Ŧ
Maxwell	Viskoelastische Flüssigkeit	Viskose Deformation bleibt erhalten	Feder-Dämpfer in Reihe	
Kelvin- Voigt	Viskoelastische Festkörper	Vollständige Rückdeformation	Feder-Dämpfer parallel	
Burgers	Reale Stoffe z.B. Kunststoffe, Lacke	Viskose Restdeformation bleibt erhalten	Feder-Dämpfer in Reihe + Feder-Dämpfer parallel	

Tabelle 3.1: Deformationsmodelle zur Beschreibung von Substanzen.

Neben den Materialeigenschaften und der einwirkenden Kraft prägen die Randbedingungen wie Temperatur, Belastungsart, -höhe und -dauer das Fließverhalten.

3.2 Viskoses Fließverhalten

3.2.1 Grundbegriffe

Das rheologische Verhalten von Stoffen lässt sich anschaulich mit der Scherung zwischen zwei planparallelen Platten beschreiben (Abb. 3.1). Um die obere Platte zu bewegen, muss eine Kraft F aufgewendet werden. Unter der Voraussetzung einer laminaren, ebenen Schichtenströmung des Materials mit Wandhaftung, stellt sich in Abhängigkeit der Fläche A sowie des Plattenabstandes h eine materialspezifische Geschwindigkeit v ein.



Abb. 3.1: Zwei-Platten-Modell zur Ableitung der Viskosität.

Das Verhältnis von Kraft F zur Fläche A ist als Schubspannung τ definiert:

$$\tau = \frac{F}{A}$$
 Gleichung 3.1

In der verbreiteten Darstellung der Fließkurve wird die Schubspannung τ über die Scherrate D aufgetragen. Die Scherrate ist der Geschwindigkeitsunterschied dv zweier Strömungsschichten bezogen auf deren Höhe dh:

$$D = \frac{dv}{dh} = \dot{\gamma} \qquad \qquad \text{Gleichung 3.2}$$

Aus diesen Größen lässt sich dann die Scherviskosität η bestimmen, man erhält das Newton`sche Gesetz:

$$\eta = \frac{t}{D}$$
 Gleichung 3.3

3.2.2 Idealviskoses Fließverhalten nach Newton

Ist die Schubspannung proportional zum Geschwindigkeitsgefälle, spricht man von Newton`schen Flüssigkeiten. Mechanisch kann das Newton`sche Fließen mit einem Dämpfer, wie in Tabelle 3.1 gezeigt, beschrieben werden. Die Scherviskosität η ist in diesem Fall eine nur von Temperatur und Druck abhängige Stoffkonstante. Trägt man die Viskositäten solcher idealviskoser Flüssigkeiten gegen die Scherrate auf, so ergeben sich parallele Geraden. Wechselwirkungskräfte zwischen den Molekülen treten in idealviskosen Medien nicht oder nur in geringem Umfang in Erscheinung. Nur bei Newton`schen Medien besteht eine Proportionalität zwischen Schubspannung und Schergefälle, wie die Fließkurven von Medien mit unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften in Abb. 3.2 zeigen.



Abb. 3.2: Fließverhalten von Medien (schematisch).

3.2.3 Strukturviskosität

Nimmt die Viskosität mit steigender Scherrate ab, liegt eine strukturviskose oder pseudoplastische Substanz vor. Die Strukturviskosität kann bei dispersen Lacksystemen durch Orientierung von Partikeln in der Strömung oder mit der Aufhebung energetischer Wechselwirkungen zwischen den Partikeln erklärt werden. Bei Kunststoffschmelzen führt man dieses Fließverhalten auf das Entschlaufen langkettiger Makromoleküle zurück. Für den Lackierprozess ist dieses Verhalten günstig, da die Viskosität bei Förderung und Zerstäubung klein ist, bei Lagerung und Filmbildung jedoch ausreichend hoch, um ein Absetzen bzw. eine Läuferbildung bei ausreichender Schichtdicke zu vermeiden.

3.2.4 Dilatanz

Eine weitere mögliche Reaktion auf steigende Scherbelastungen ist die Zunahme der Viskosität. Dieser Vorgang wird als dilatantes Fließverhalten bezeichnet. Zu beobachten ist die Fließverfestigung mit steigender Scherrate z.B. in eng gepackten Dispersionen, in denen die ansonsten stabil dispergierten Partikel durch die äußere Scherbelastung aufeinandergedrückt werden, und die Viskosität durch die entstehende Reibung der flockulierten Partikel reversibel steigt.

3.2.5 Fließgrenze

Eine Stoff erst mit Fließgrenze liegt vor, wenn ein Erreichen einer Mindestschubspannung zu fließen beginnt. Der Übergang von kleinsten, elastischen Deformationen zum viskosen Fließen findet beim Überschreiten der sog. Fließgrenze statt. Vorhandene Überstrukturen werden dabei zunächst elastisch vorgespannt und brechen bei Überschreitung der Fließgrenze schließlich auf. Zur mathematischen Beschreibung dieses plastischen Verhaltens stehen mehrere Modelle z.B. von Bingham oder Casson zur Verfügung /27/.

3.2.6 Zeitabhängiges Fließverhalten

Im Fall des zeitabhängigen Fließverhaltens sind die Fließeigenschaften nicht einzig von der Schergeschwindigkeit, sondern auch von der Beanspruchungsdauer abhängig. Der Zusammenhang zwischen Schubspannung und Scherrate hat also einen zeitlichen Charakter. Ist eine der beiden Größen konstant, ändert sich die zweite mit der Dauer des Versuchs.

Sinkt die Viskosität der Probe während einer konstanten Scherphase, so ist das Material thixotrop. Um thixotrope Eigenschaften wissenschaftlich korrekt zu bestimmen, muss entweder die Schubspannung oder die Scherrate konstant gehalten werden. Da der zeitlich bestimmte Viskositätsabbau reversibel ist, wird zur vollständigen Charakterisierung auch der Viskositätsaufbau in einer Entlastungsphase gemessen. Die Scherrate während der Belastungsphase ist ausreichend hoch zu wählen, um die Gitterstruktur des Materials aufzulösen. In der Entlastungsphase kann bei ausreichend kleiner Scherung dann der Strukturaufbau beobachtet werden.

Bei rheopexen Materialien hingegen wird ein Anstieg der Viskosität mit der Zeit beobachtet. Der zeitabhängige Strukturaufbau unter einer konstanten Scherbelastung kann nur bei verhältnismäßig kleinen Belastungen eintreten. Rheopexie ist im Gegensatz zur Thixotropie in der Praxis jedoch selten zu finden.

3.2.7 Mathematische Ansätze

Bei Newton`schen Fluiden ist nach Gleichung 3.3 die Schubspannung τ proportional zur Schergeschwindigkeit D. Viele in der Technik verwendete Substanzen, auch die Mehrzahl der wassergelösten Lacke, gehorchen nicht diesem Zusammenhang. Um aber auch das Verhalten dieser Substanzen mathematisch wiederzugeben, stehen eine Reihe von Ansätzen zur Verfügung, von denen an dieser Stelle die in der Lackierpraxis relevanten vorgestellt werden:

Das strukturviskose bzw. dilatante Stoffverhalten kann mathematisch mit dem Kraftgesetz nach Ostwald / de Waele, auch als Power-Law bezeichnet, beschrieben werden /30/:

$$t = k \cdot D^{p}$$
 Gleichung 3.4

Es enthält zwei stoffspezifische Parameter, den Konsistenzfaktor k sowie den Fließexponenten p, die experimentell ermittelt werden müssen.

Für p < 1 liegt strukturviskoses Fließen vor.

Wird p > 1, so beschreibt Gleichung 3.4 dilatantes Fließverhalten.

Ist p = 1, so entspricht vorstehende Gleichung mit $k = \eta$ dem Newton´schen Gesetz (Gleichung 3.3), d.h. idealviskoses Fließverhalten liegt vor.

Der Potenzansatz nach Ostwald / de Waele ist insbesondere dazu geeignet Viskositäten in hohen Scherratenbereichen berechnen zu können, die messtechnisch schwer erfassbar sind.

Um das Fließverhalten von Substanzen mit Fließgrenze zu beschreiben, wird oftmals die Funktion nach Bingham herangeführt. Diese Annäherung ist aufgrund der linearen Anpassung des Fließverhaltens oberhalb der Fließgrenze (Mindestschubspannung τ_0) sehr einfach auswertbar und weit verbreitet:

$$\boldsymbol{t} = \boldsymbol{t}_0 + \boldsymbol{h}_{\mathrm{B}} \cdot \boldsymbol{D}$$
 Gleichung 3.5

Reale Stoffe können deshalb mit diesem Modell nur sehr ungenau charakterisiert werden. Das Fließgesetz nach Casson dagegen berücksichtigt das nicht-lineare Verhalten von Stoffen oberhalb der Fließgrenze und eignet sich besser zur Beschreibung plastischer Stoffe:

$$\sqrt{t} = \sqrt{t_0} + \sqrt{h_{\rm C} \cdot D}$$
 Gleichung 3.6
3.3 Elastisches Deformationsverhalten

Den Beschreibungen der Fließeigenschaften von Fluiden in Kap. 3.2 mit Fließ- und Viskositätskurven liegt die Vorstellung zugrunde, dass sich Substanzen nach Überschreiten einer möglichen Fließgrenze rein viskos verhalten, also über keine innere Elastizität verfügen. Reale Flüssigkeiten, z.B. verschiedene Lacksysteme oder Polymerschmelzen, entsprechen nicht diesem idealisierten Modell, sie weisen neben den viskosen stets elastische Anteile auf, sind also viskoelastisch. Der elastische Anteil kann bei niederviskosen Flüssigkeiten jedoch sehr gering und kaum nachweisbar sein.

Analog zur Herleitung der Scherviskosität, kann das Zwei-Platten-Modell unter Voraussetzung von Wandhaftung und homogener Verformung auch zur Definition einer elastischen Deformation herangezogen werden. Die Kraft F bewirkt bei idealelastischen Proben eine sofortige, reversible Auslenkung der beweglichen Fläche. Die Deformation γ ergibt sich aus dem Plattenabstand h und der Auslenkung s bzw. aus dem Auslenkwinkel α (Abb. 3.3):

$$\gamma = \frac{s}{h} = \tan \alpha$$
 Gleichung 3.7

Bei reinelastischen Körpern ist das Verhältnis aus Schubspannung und Deformation konstant und über den Schubmodul G verknüpft. Im zerstörungsfreien, linearen Bereich ist der Schubmodul eine Materialkonstante. Es gilt das Hooke`sche Gesetz:

$$\tau = \mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\gamma}$$
 Gleichung 3.8

Das mechanische Modell für den elastischen Körper nach Hooke ist eine Feder (Tabelle 3.1).



Abb. 3.3: Zwei-Platten-Modell zur Beschreibung der Deformation.

3.4 Viskoelastisches Deformationsverhalten

Viskoelastische Deformationen setzen sich aus viskosen und elastischen Anteilen zusammen und können sowohl bei Flüssigkeiten als auch bei Festkörpern auftreten (siehe Tabelle 3.1). Ein Teil der eingebrachten Energie wird dabei irreversibel in Wärme dissipiert (viskoser Anteil), ein anderer Teil wird reversibel in einer elastischen Verformung gespeichert.

Viskoelastische Flüssigkeiten (auch Maxwell-Fluide genannt) können danach als Reihenschaltung eines Dämpfers und einer Feder gesehen werden. Durch Einwirkung einer äußeren Kraft wird der elastische Anteil (Feder) spontan vorgespannt, während sich der viskose Anteil, der durch einen Dämpfer repräsentiert wird, kontinuierlich die verformt. solange äußere Kraft aufrechterhalten wird. Infolge der Hintereinanderschaltung von Feder und Dämpfer bildet sich bei Rücknahme der äußeren Kraft die reversible, elastische Auslenkung der Feder γ_e sprunghaft zurück, während die viskose Verformung γ_v des Dämpfers erhalten bleibt. Die bleibende Restdeformation kennzeichnet eine Flüssigkeit. Im Bereich kleinster Deformationen verhalten sich viskoelastische Fluide rein elastisch. Die Differentialgleichung der Bewegung ergibt sich aus der Summe der Scherraten zu:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{v} + \dot{\gamma}_{e} = \frac{\tau}{\eta} + \frac{\tau}{G}$$
 Gleichung 3.9

Viskoelastische Festkörper hingegen lassen sich mit dem Kelvin-Voigt-Modell darstellen. Hierbei handelt es sich um eine Parallelschaltung von Feder und Dämpfer. Die sofortige Verformung der Feder bei Belastung wird durch das Fließverhalten des Dämpfers gebremst. Erreicht die Federkraft den Wert der äußeren Kraft kommt die Bewegung, im Gegensatz zur Flüssigkeit, zum Stillstand. Nach Entlastung bewirkt die Feder eine durch den Dämpfer zeitlich verzögerte, vollständige Rückdeformation, welche charakteristisch für einen Festkörper ist. Aus der Summe der Schubspannungen erhält man die Differentialgleichung des Kelvin-Voigt-Modells:

$$\tau = \tau_v + \tau_e = \mathbf{h} \cdot \mathbf{g} + \mathbf{G} \cdot \gamma$$
 Gleichung 3.10

3.4.1 Kriechverhalten

Um die beiden Modelle zur Beschreibung viskoelatischen Verhaltens weiter an das Verhalten realer Substanzen anzunähern, wurde von Burgers eine Reihenschaltung (Abb. 3.4) vorgeschlagen. Mit dem sogenannten Burgers-Modell lassen sich auch sehr langsam ablaufende, zähe Fließvorgänge, die als Kriechen bezeichnet werden, modellieren.

Die rheologische Charakterisierung des Kriechverhaltens einer Substanz findet im sog. Kriechversuch durch sprungartiges Aufbringen einer sehr kleinen, äußeren Kraft statt. Viskoelastische Substanzen reagieren in drei Phasen auf die angelegte Schubspannung (Abb. 3.4):

Zum Zeitpunkt t_0 reagiert die Probe analog einer idealelastischen Substanz mit einer spontanen Deformation γ_1 der Feder F₁. Anschließend überlagern sich in der zweiten Deformationsphase die verzögerte Auslenkung entsprechend dem Kelvin-Voigt-Modell (D₂ und F₂) und das viskose Fließen von Dämpfer D₁ zur Deformation γ_2 . Erreicht am Ende von Phase 2 auch Feder F₂ das Gleichgewicht mit der äußeren Kraft, wird die weitere Deformation γ_3 nur noch vom Dämpfer D₁ bestimmt, dessen Viskosität sich aus der Steigung während Phase 3 berechnen lässt.



Abb. 3.4: Kriech- und Kriecherholungskurve γ(t) eines Wasserbasislackes mit Auswertegrößen.

Nach Wegnahme der äußeren Kraft zum Zeitpunkt t₁ formt sich Feder F₁ sprunghaft um die elastische Verformung γ_s zurück. Die parallel geschalteten Elemente F₂ und D₂ erfahren in der Kriecherholungsphase eine zeitlich verzögerte Rückdeformation γ_z , die sich mit γ_s zur elastischen Rückdeformation γ_e aufsummiert. Dagegen bleibt die viskose Deformation γ_v von Dämpfer D₁ bei Entlastung vollständig erhalten.

Im Bereich ausreichend kleiner Schubspannungen stellt sich bei einigen Substanzen ein konstanter Viskositätswert unabhängig von der Scherrate ein. Diesen Viskositätsbereich nennt man ersten Newton`schen Bereich, die Viskosität wird als Nullviskosität η_0 bezeichnet.

$$\eta_0 = \lim \eta(\dot{\gamma})$$
 für $\dot{\gamma} \to 0$ Gleichung 3.11

Repräsentiert wird die Nullviskosität im Burgers-Modell durch den Dämpfer D₁. Die Nullviskosität ist eine Stoffkonstante und gibt z.B. bei Polymeren Aufschluss über die mittlere Molmasse M. Dispersionen, deren Stabilisierung auf physikalischen oder chemischen Wechselwirkungen beruhen, zeigen keine Nullviskosität, sondern bauen eine Ruhestruktur (Fließgrenze) auf, die bei Scherbeanspruchung aufgebrochen wird.

3.4.2 Schwingungsversuche

Schwingungsmessungen stellen eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung viskoser und elastischer Anteile in einer Probe dar. Hierzu wird die Probe einer sinusförmigen Deformationsschwingung ausgesetzt, worauf viskoelastische Materialien aufgrund ihres Relaxationsverhaltens mit einer Phasenverschiebung δ zwischen Spannung und Deformation reagieren /28/.

In Abhängigkeit der viskoelastischen Eigenschaften der Messprobe ergibt sich zwischen der aufgebrachten Schwingungsbewegung $\gamma(t)$ und dem resultierenden Schubspannungsverlauf $\tau(t)$ eine Phasenverschiebung δ zwischen 0° und 90° (Bild 3.5). Bei idealelastischen Substanzen verlaufen beide Kurven synchron, der Phasenverschiebungswinkel δ beträgt hier 0°. Dagegen erfährt die $\tau(t)$ -Kurve bei idealviskosen Substanzen eine Verzögerung um einen Phasenverschiebungswinkel von 90° gegenüber der Deformationsvorgabe.

Zur Ermittlung der Materialfunktionen gibt man die Amplitude der Deformation sowie die Schwingungsfrequenz vor und detektiert mit einem Rheometer den resultierenden Schubspannungsverlauf und die Phasenverschiebung δ als Antwort des Systems auf die oszillierende Belastung. Dabei darf die Deformation nicht zu groß gewählt werden, um Messungen im linear-viskoelastischen Bereich der Probe sicherzustellen. Innerhalb des LVE-Bereichs besteht ein proportionaler Zusammenhang zwischen angelegter Deformation und der resultierenden Schubspannung. Außerdem ist das Messergebnis im LVE-Bereich noch von der Frequenz, nicht aber von der Größe der Deformation abhängig. Das Materialverhalten außerhalb des LVE-Bereichs dagegen lässt sich nur mit nicht-linearen Differentalgleichungen, die nicht oder nur näherungsweise lösbar sind, beschreiben /28/ und wird bei rheologischen Untersuchungen nicht berücksichtigt. Die zulässige Grenzdeformation des LVE-Bereichs ermittelt man durch kontinuierliche Erhöhung der Schwingungsamplitude bei festgelegter Belastungsfrequenz. Erfolgt die Schwingungsmessung im LVE-Bereich kann aus der Ergebniskurve ein komplexer Schubmodul G* berechnet werden, der nach Zerlegung in einen Real- und einen Imaginärteil den Speichermodul G' sowie den Verlustmodul G" liefert.



Abb. 3.5: Oszillationskurven γ (t) und τ (t) einer viskoelastischen Substanz bei Deformationsvorgabe.

Der Speichermodul G' ist ein Maß für die reversibel in der Probe gespeicherte Deformationsenergie und charakteristisch für die elastischen Eigenschaften einer Substanz. Er gibt den Schubspannungswert, der in Phase mit der Deformationskurve detektierbar ist, wieder:

$$G' = \frac{t_A}{g_A} \cdot \cos d \qquad \qquad \text{Gleichung 3.12}$$

Der Verlustmodul G" spiegelt die Größe der irreversibel dissipierten Energie wieder und charakterisiert somit die viskosen Eigenschaften einer Substanz. Der zugehörige Schubspannungsanteil wird unter einer Phasenverschiebung von 90° gemessen.

$$G'' = \frac{t_A}{g_A} \cdot \sin d$$
 Gleichung 3.13

Entscheidend für das viskoelastische Verhalten sind nicht allein die Absolutwerte der Module, sondern vielmehr das Verhältnis von viskosen zu elastischen Anteilen. Dieses Verhältnis ist durch den Verlustfaktor tan δ definiert, der aus Gleichung 3.12 und 3.13 hervorgeht:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'}$$
 Gleichung 3.14

Für den Betrag der komplexen Viskosität gilt in Analogie zum Newton`schen Gesetz (Gleichung 3.3):

$$|\eta^*| = \frac{\tau^*}{\gamma^*}$$
 Gleichung 3.15

3.4.2.1 Schwingungsmessung mit variabler Amplitude (Amplituden-Versuch)

Mit Hilfe von Schwingungsmessungen können viskoelastische Materialeigenschaften ermittelt und deren Einfluss auf den Prozess beurteilt werden. Führt man Schwingungsmessungen im LVE-Bereich durch, nutzt man zudem den Vorteil einer im Grunde zerstörungsfreien Strukturprüfung, da bei kleinen Deformationen die Struktur der Probe unter den geringen Belastungen unzerstört und stabil bleibt. Auch für qualitative und quantitative Vergleiche von Lacksystemen ist die Beachtung des LVE-Bereichs des jeweiligen Materials Voraussetzung. Wichtig ist deshalb die Kenntnis der zulässigen Grenzdeformation, um diese nicht zu überschreiten. Im Amplituden-Versuch wird zu diesem Zweck bei konstanter Frequenz langsam die Amplitude der Deformation gesteigert, wie dies beispielhaft in Abb. 3.6 wiedergegeben ist. Übersteigt die Deformation im Beispiel einen Wert von 0,02 wird der LVE-Bereich verlassen, die reversibel aufgebaute Ruhestruktur des Materials bricht auf, Verlust- und Speichermodul sowie der Betrag der komplexen Viskosität fallen stark ab.



Abb. 3.6: Schwingungsmessung mit variabler Amplitude.

Die Stärke der Ruhestruktur einer Substanz kann folglich bei geringen Deformationen im LVE-Bereich bestimmt werden. Anschaulich lässt sich dieser Sachverhalt mit dem Verlustfaktor tan δ beschreiben: Ist tan $\delta > 1$, dominieren die viskosen Eigenschaften im Material, es verhält sich überwiegend wie eine Flüssigkeit. Ist der Speichermodul größer dem Verlustmodul überwiegen elastische Merkmale, es gilt tan δ < 1. In Abb. 3.6 zeigt die Substanz elastisches Verhalten im LVE-Bereich. Oberhalb dieses Bereichs beginnt das Material zu fließen, die elastischen Bindungen werden aufgelöst, tan δ nimmt Werte größer 1 an. Somit erlangt man im Amplituden-Versuch neben der zulässigen Grenzdeformation auch grundsätzliche Informationen über den viskoelastischen Charakter der vorliegenden Probe.

3.4.2.2 Schwingungsmessung mit variabler Frequenz (Frequenz-Versuch)

Ist die zulässige Grenzdeformation im Amplituden-Versuch ermittelt, können in einer weiteren Versuchsvariante, dem sogenannten Frequenz-Versuch, Kenntnisse über die Strukturstärke bei Dispersionen und die Molekulargewichtsverteilung bzw. den Vernetzungsgrad bei Polymeren gewonnen werden. Hierfür wird bei konstanter Deformation innerhalb des LVE-Bereichs die Belastungsfrequenz der Probe gesteigert.

Über die Lage und das Kurvenanstiegsverhalten des Speichermoduls können dann Rückschlüsse über die oben genannten Eigenschaften gezogen werden.

In der Lackiertechnik dient der Frequenztest zur Ermittlung des Probencharakters bei kleinsten Deformationen. Neben dem Verlustfaktor tan δ ist besonders der Verlauf der komplexen Viskosität bestimmend für den Charakter der Probe. Abb. 3.7 zeigt zwei grundsätzliche Viskositätsverläufe. Material a gibt den Verlauf eines Materials mit Nullviskosität wieder, Material b repräsentiert ein Material mit Fließgrenze.



Abb. 3.7: Schwingungsmessung mit variabler Frequenz.

Nimmt die komplexe Viskosität bei ausreichend kleiner Frequenz einen konstanten Wert an, entspricht dieser der Nullviskosität η_0 . Der Frequenztest ist somit neben dem Kriechversuch (Vorgabe einer konstanten Schubspannung) und der Rotationsmessung bei kleinsten Scherraten eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Nullviskosität. Vorteilhaft ist die Bestimmung mit dem Frequenztest, da die Nullviskosität in diesem Versuch aus dem Kurvenverlauf als Konstante sicher bestimmbar ist und nicht von der vorgegebenen Schubspannung abhängt.

Steigt dagegen die komplexe Viskosität bei fallender Frequenz (Material b), besitzt die Substanz eine Fließgrenze. Der Wert des Speichermoduls G' bei kleinsten Frequenzen entspricht dann der Fließgrenze τ_o , die auch durch langsames Steigern der

Schubspannung im Rotationsversuch ermittelt werden kann. Allerdings ist gerade der Übergang von kleinsten, elastischen Deformationen zum viskosen Fließen bei Rotationsversuchen schwer zu bestimmen. Im Frequenztest dagegen ist der Speichermodul im Bereich kleiner Frequenzen konstant und sicher bestimmbar.

Analog zum Amplitudentest gibt das Verhältnis von Speicher- zu Verlustmodul auch beim Frequenz-Versuch Anhaltspunkte über die viskoelastischen Eigenschaften des Materials.

3.4.2.3 Schwingungsmessung mit konstanten Oszillationsparametern

Konstante Oszillationsparameter im LVE-Bereich schaffen die Voraussetzung, zeitliche Veränderungen der rheologischen Eigenschaften zu beobachten, ohne die innere Struktur der Probe zu beeinflussen. Die Änderungen der Materialeigenschaften können dabei durch sehr unterschiedliche Faktoren hervorgerufen werden. Neben dem Strukturaufbau nach vorangegangener Scherbelastung können dies sowohl chemische Reaktionen als auch physikalische Vorgänge wie das Abdunsten von Lösemittel sein. So steigt beispielsweise nach dem Applikationsprozess die Viskosität in der Lackschicht aufgrund des Wiederaufbaus der Materialstruktur und der Abdunstung von Lösemittel an. Eine weitere, signifikante Änderung der Materialeigenschaften findet während der Trocknung statt. Hier sinkt die Viskosität aufgrund der Erwärmung zunächst, während die einsetzende Vernetzung eine Viskositätssteigerung bewirkt. Aus der Überlagerung beider, parallel ablaufender Prozesse resultiert auch bei der Filmbildung von Pulverlacken ein Viskositätsminimum /31/, das durch die Prozessführung beeinflusst werden kann.

Schwingungsmessungen erlauben es also, das Materialverhalten in Abhängigkeit der Prozessbedingungen zu analysieren und den Anteil verschiedener Parameter am Gesamtprozess zu beurteilen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Schwingungsmessungen eingesetzt, um Einflussgrößen des Lackierprozesses auf das rheologische Verhalten des Lackmaterials zu bestimmen und in ihrer Signifikanz bewerten zu können. Neben dem viskosen Fließverhalten beeinflussen die viskoelastischen Eigenschaften eines Lackes dessen Verarbeitungseigenschaften deutlich. Aus diesem Grund sind für ein umfassendes Verständnis des Zerstäubungsvorgangs und der Filmbildung von Lacken diese Eigenschaften von großer Bedeutung. Nachfolgend werden die rheologischen Eigenschaften verschiedener Lacksysteme beschrieben. Es handelt sich hierbei um zwei wassergelöste Systeme: Pulver-Slurry und einen silbermetallicfarbenen Wasserbasislack (WBL) sowie um einen 2-Komponenten Lösemittelklarlack. Die deutlich unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften werden in dem folgenden Kapitel dargestellt, auf deren Auswirkungen auf den Lackierprozess wird im weiteren Verlauf der Arbeit eingegangen.

4.1 Viskoses Fließverhalten

Üblicherweise wird das Fließverhalten von Lacken seitens der Qualitätssicherung der Lackhersteller bzw. –verarbeiter durch eine Fließ- und Viskositätskurve bestimmt. Zur Ermittlung dieser Kurven wird die Scherrate kontinuierlich gesteigert. Als Kenndaten des Materials dienen dann häufig nur die Viskositätswerte bei den Scherraten 100 s⁻¹ und 1000 s⁻¹ (Tabelle 4.1). In Abb. 4.1 sind die Viskositätskurven der drei Vergleichslacke dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der konstante Viskositätsverlauf des Lösemittellackes mit Newton`schem Fließverhalten. Die wassergelösten Lacke Pulver-Slurry und der Wasserbasislack zeigen strukturviskoses Verhalten, wobei die anfänglich hohe Viskosität des Basislackes bei höheren Scherraten unter der von Pulver-Slurry liegt. Werden in diesem Fall nur Viskositätswerte bei den Standardscherraten 100 s⁻¹ bzw. 1000 s⁻¹ berücksichtigt, könnte dem Wasserbasislack eine geringere Ruhestrukturstärke zugesprochen werden, was nicht dem tatsächlichen Verhalten entspricht.

Lacksystem	Viskosität in mPas		
	Scherrate 100 s ⁻¹	Scherrate 1000 s ⁻¹	
2K-Klarlack	135	135	
Pulver-Slurry	530	248	
WBL	340	115	

<u>Randbedingungen:</u> Messsystem Physica MK 50 mm, 2°; Temperatur 20 °C.

 Tabelle 4.1:
 Scherviskosität der Lacksysteme.



Abb. 4.1: Fließ- und Viskositätskurven unterschiedlicher Lacksysteme.

4.2 Amplituden-Versuch

Mit dem Amplituden-Versuch wird der linear-viskoelastische Bereich der zu vergleichenden Lacke bestimmt, zudem können erste Aussagen über den Strukturaufbau und das elastische Verhalten des Materials gemacht werden. Abb. 4.2 zeigt das Verhalten von Pulver-Slurry im Vergleich zum Wasserbasislack und dem lösemittelhaltigen 2K-Klarlack.

Die Grenze des LVE-Bereichs wird im Fall von Pulver-Slurry bei einer Deformation von $\gamma = 0,01$ erreicht. Im LVE-Bereich sind G' und G" annähernd konstant, bei Überschreitung der Deformationsgrenze fallen die Werte von Speicher- und Verlustmodul aufgrund der Auflösung der inneren Materialstruktur jedoch stark ab. Dieser Vorgang ist reversibel, d.h. nach einiger Zeit bauen sich die Wechselwirkungen der Partikel und damit die innere Struktur wieder auf. Der Wasserbasislack besitzt ebenfalls eine innere Struktur, die jedoch stärker ausgeprägt ist als die des Pulver-Slurry-Materials. Zum einen reicht der LVE-Bereich bis zu einer Deformation $\gamma = 0,05$, zum anderen ist der Speichermodul in diesem Bereich deutlich größer als der zugehörige Verlustmodul, die elastischen Anteile in der Probe überwiegen demnach.

Dies ist für die Stabilisierung einer Dispersion durchaus vorteilhaft, da es eine Sedimentation von Partikeln verzögert. Andererseits erschwert es jedoch das Verlaufen des Lackmaterials im Anschluss an die Applikation. Im Gegensatz dazu zeigen Pulver-Slurry und der 2K-Klarlack überwiegend viskose Anteile, der Verlustmodul ist in diesem Fall größer als der Speichermodul, was die Verlaufseigenschaften positiv beeinflusst. Da es sich bei dem 2K-Klarlack um ein Lacksystem mit Newton`schem Fließverhalten handelt, sind Speicher- und Verlustmodul auch bei steigender Deformation nicht belastungsabhängig.



Abb. 4.2: Schwingungsmesssung mit variabler Amplitude (Amplitudentest).

4.3 Frequenz-Versuch

Abb. 4.3 zeigt einen Frequenz-Versuch mit Pulver-Slurry und dem Wasserbasislack. Entsprechend dem Amplituden-Versuch zeigt der Wasserbasislack auch im Frequenz-Versuch überwiegend elastische Eigenschaften. Dies spiegelt sich sowohl in der Tatsache wieder, dass der Speichermodul über den gesamten Frequenzbereich größer dem Verlustmodul ist, zugleich liegt der Speichermodul auf annähernd konstant hohem Niveau, eine Eigenschaft die für Dispersionen mit hoher Strukturstärke charakteristisch ist. Pulver-Slurry zeigt überwiegend viskoses Verhalten, jedoch steigen Speicher- und Verlustmodul entsprechend einem Maxwell-Fluid gleichermaßen. Verfolgt man den Verlauf der komplexen Viskosität zu kleinen Frequenzen hin, können große Unterschiede zwischen beiden Materialien festgestellt werden. Für Pulver-Slurry strebt der Betrag der Viskosität dem konstanten Wert η_0 entgegen. Analog Gleichung 3.11 gilt:

$$\eta_0 = \lim |\eta^*(\omega)|$$
 für $\omega \to 0$ Gleichung 4.1

Dagegen steigt die komplexe Viskosität des Wasserbasismaterials bei fallender Frequenz kontinuierlich an. In der Praxis bedeutet dies das Vorhandensein einer Fließgrenze, die sich aus dem Plateauwert des Speichermoduls G'(ω) bei kleinsten Frequenzen ergibt. Im Bereich hoher Frequenzen nähern sich die Viskositäten beider Materialien an und überschneiden sich sogar (Vgl. Kap 4.1).



Abb. 4.3: Schwingungsmessung mit variabler Frequenz (Frequenztest).

5 Theoretische Betrachtung und experimentelle Untersuchung der Hochrotationsapplikation

5.1 Untersuchungsbedarf und Lösungsansatz

Aufgrund der technischen Bedeutung von Rotationszerstäubern im Bereich der Sprühtrocknung oder bei Verbrennungsvorgängen, existieren eine Vielzahl grundlegender Untersuchungen zur Zerstäubung von Fluiden mit rotierenden Zerstäubergeometrien, SO beispielsweise /32/, /33/, /34/. Die untersuchten Drehzahlbereiche der Zerstäuber liegen allerdings weit unter denen moderner Hochrotationszerstäuber der Lackiertechnik. Es zeigt sich, dass vorhandene Korrelationen zur Beschreibung des Zerstäubungsverhaltens von allgemeinen Rotationszerstäubern nicht unmittelbar auf Hochrotationszerstäuber übertragen werden können. Vorausgegangene Forschungsarbeiten zur Hochrotationsapplikation von Lacken konzentrieren sich auf das Ablöseverhalten des Lackes am Glockentellerrand, die erzeugten Tropfengrößen sowie die Mehrphasenströmung in Richtung des zu lackierenden Objekts, z.B. /21/, /35/, /36/. Corbeels /37/ berücksichtigt in seiner Arbeit zudem das Strömungsverhalten von Fluiden unterschiedlicher Viskosität und Oberflächenspannung auf dem Glockenteller sowie das Ablöseverhalten am Glockentellerrand. Allerdings handelt es sich bei den zerstäubten Flüssigkeiten um Newton`sche Fluide, deren Viskosität unabhängig von der Scherrate ist.

Über die bisherigen Untersuchungen zum Einfluss der Betriebsparameter auf die Zerstäubungsfeinheit Newton`scher Fluide hinaus, soll nun die Strömung sowie das Ablöseverhalten strukturviskoser Lackmaterialien an der rotierenden Glocke analysiert werden. Durch Ermittlung der Fließeigenschaften von strukturviskosen Lackmaterialien auf dem rotierenden Glockenteller sollen genauere Kenntnisse über die in der Zerstäubungsphase tatsächlich vorliegenden rheologischen Eigenschaften erlangt werden, um dann einen Zusammenhang mit der Zerstäubungsfeinheit herzustellen. Die Ursachen für diese unterschiedlichen Zerstäubungsverhalten der Lacksysteme, insbesondere das von Pulver-Slurry, sollen so aufgezeigt werden.

Zunächst werden deshalb die physikalischen Randbedingungen der Filmströmung auf dem Glockenteller ermittelt. Mit den so gewonnenen Erkenntnissen können zudem auch Maßnahmen zur Optimierung und Weiterentwicklung von Rotationszerstäubern abgeleitet und Anforderungen an künftige Lackentwicklungen formuliert werden.

Da die Filmbildung und der Verlauf insbesondere von Klarlacken wesentlich von der resultierenden Materialviskosität auf dem beschichteten Substrat abhängt, wird das Viskositätsverhalten auch in diesen Prozessabschnitten betrachtet. Gerade die Frage, inwieweit das Fließverhalten von Lackfilmen durch Variation der Lackierparameter beeinflusst werden kann, ist von großer Praxisrelevanz. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 dargestellten Unterschiede viskoelastischer Lackmaterialien wird auch der Frage nachgegangen, wie ausgeprägt sich die rheologischen Eigenschaften verschiedener Materialien unter den hohen Scherbelastungen der Hochrotationsapplikation unterscheiden, und in welchem Umfang diese Unterschiede den Zerstäubungsvorgang beeinflussen. Hierzu werden die entwickelten Methoden anhand von Wasser und einem Wasserbasislack verifiziert.

Um die physikalischen Randbedingungen während des durchlaufenen Applikationsprozesses exakt ermitteln zu können, wird der Lackiervorgang in Teilprozesse unterteilt. Die Unterteilung in Prozessschritte erlaubt es, die äußeren Einwirkungen auf das Material aufzuzeigen und so den resultierenden rheologischen Zustand des Lackes in jedem dieser Teilschritte zu bestimmen. Beginnend mit der Filmströmung auf dem Glockenteller wird der Lackierprozess, wie in Abb. 5.1 dargestellt, in folgende Teilschritte getrennt:

• Zerstäubung:

Fluidströmung auf dem rotierenden Glockenteller Ablösung am Glockentellerrand Zerfall in Tropfen

• Flugphase:

Mehrphasenströmung des Sprays Abdunstung von Lösemittel Regeneration des Materials

• Filmbildung auf dem Substrat:

Wechselwirkung Tropfen-Untergrund Fließ- und Abdunstverhalten des erzeugten Lackfilms Ausgleich des Anfangsgebirges (Verlauf)

• Trocknung:

Viskositätsverhalten im Trockner Eigenschaften des fertigen Films

Aus rheologischer Sicht ist in diesem Prozess das Verhalten auf dem Glockenteller am schwierigsten abzuschätzen und zu bestimmen und deshalb bei den weiteren Betrachtungen von besonderem Interesse. In Tabelle 5.1 sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf das Zerstäubungsergebnis zusammengefasst.



Abb. 5.1: Teilschritte des Lackierprozesses eines Hochrotationszerstäubers.

Einflussgrößen	Variablen des Prozesses	Abkürzung	Einheit
Lackmaterial	Viskosität	η	Pas
	Dichte	ρ	kg/m³
	Festkörpergehalt	, FK	%
	Oberflächenspannung	G	mN/m
	Temperatur	T	°C
Zerstäuber	Zerstäuberbauart		
	Düsendurchmesser	d _d	mm
	Glockentellergeometrie		
Verfahren	Farbmenge	FM	ml/min
	Luftmenge	LL	NI/min
	Drehzahl	n	min ⁻¹
	Hochspannung	U	kV
	Stromstärke der Hochspannung	I	μA

 Tabelle 5.1:
 Einflussgrößen auf das Zerstäubungsergebnis.

Da das Beschichtungsergebnis bei der Hochrotationszerstäubung von zahlreichen Prozessparametern und Einflussfaktoren abhängt, ist eine genaue Definition und Überwachung der Randbedingungen erforderlich. Um reproduzierbare Versuchsergebnisse zu gewährleisten, steht im Oberflächentechnikum des Fraunhofer-IPA ein <u>prozessintegriertes modulares Analysesystem "PRIMAS" zur Verfügung, mit dessen</u> Hilfe alle lackierrelvanten Anlagendaten erfasst und kontrolliert werden.

5.2 Filmströmung auf dem Glockenteller

Abbildung 5.2 zeigt einen verbreiteten Glockenteller zur Verarbeitung von Wasserlacken im Querschnitt. Während des Zerstäubungsvorgangs wird der Lack zunächst mittels einer Verteilerscheibe gleichmäßig auf der lackführenden Innenkontur verteilt, wobei ein Teil des Fluidstroms durch die Mittelbohrung auf die Oberfläche der Verteilerscheibe gelangt. Der so erzeugte, permanente Nassfilm auf der Verteilerscheibe soll Antrocknungen von rückströmenden Lacktröpfchen vermeiden /66/.



Abb. 5.2: Schematische Darstellung eines Glockentellers mit Lackströmung.

Durch die Reibung zwischen Fluid und Glockentelleroberfläche nimmt das Lackmaterial unmittelbar nach Auftreffen auf den Glockenteller die gegenwärtige Umdrehungsgeschwindigkeit an und wird aufgrund der starken Zentrifugalkraft in radialer Richtung unter dem Konturwinkel β zum Glockentellerrand hin beschleunigt /34/. Zusätzlich wirken auf ein Massenelement des Lackes Coriolis- und Reibungskräfte entgegen den inneren Kräften des Materials. hervorgerufen durch die Oberflächenspannung und die rheologischen Eigenschaften.

Im folgenden Abschnitt wird das Strömungsverhalten des Lackmaterials auf dem Glockenteller berechnet und anschließend durch Messungen mit einer eigens entwickelten Methodik verifiziert.

5.2.1 Grundlagen der Rotationszerstäubung

1

1

Die Strömungsberechnung auf dem Glockenteller erfolgt zunächst vereinfachend anhand der Strömung auf einer rotierenden Scheibe, um anschließend auf die in der Automobilserienlackierung verwendeten Glockentellergeometrien übertragen zu werden. Ausgehend von einer Staupunktströmung an einer rotierenden Scheibe (Abb. 5.3 a) kann die Strömung aus den Navier-Stokes`schen Gleichungen, erweitert durch die Randbedingung einer rotierenden Wand, berechnet werden. In Abhängigkeit der radialen Laufvariablen r und der Höhenkoordinate z erhält man die lokale Geschwindigkeitskomponente u in radialer Richtung, die Umfangsgeschwindigkeit v sowie die Sinkgeschwindigkeit w in einem ortsfesten Koordinatensystem x, y, z /39/:

$$u = \left(\frac{3rw^4\dot{V}}{2pn^2}\right)^{\frac{1}{3}}z - \frac{rw^2}{2n}z^2$$
 Gleichung 5.1

$$\mathbf{v} = \mathbf{r}\mathbf{w} \left(1 - \frac{\dot{V}}{\mathbf{p}\mathbf{n}r^{2}} \mathbf{z} - \left(\frac{\mathbf{w}^{4}\dot{V}}{18\mathbf{p}\mathbf{n}^{5}\mathbf{r}^{2}} \right)^{\frac{1}{3}} \mathbf{z}^{3} + \frac{\mathbf{w}^{2}}{12\mathbf{n}^{2}} \mathbf{z}^{4} \right) \text{ Gleichung 5.2}$$

$$\mathbf{w} = \left(\frac{3\mathbf{w}^4 \dot{V}}{16\mathbf{p}\mathbf{n}^2 \mathbf{r}^2}\right)^{\frac{1}{3}} \mathbf{z}^2 - \frac{\mathbf{w}^2}{2\mathbf{n}} \mathbf{z}^3$$
 Gleichung 5.3.

im ortsfesten Koordinatensystem aufgrund der einwirkenden Kräfte entlang einer Spiralbahn in Richtung Scheibenrand, an dem es unter einem Winkel α tangential weggeschleudert wird. Die Filmdicke δ an dieser Stelle, die das Zerstäubungsergebnis maßgeblich beeinflusst. folgt aus Gleichung 5.3. Setzt man laminare Strömungsbedingungen verschwindet die axiale Geschwindiakeitsvoraus, komponente w am Scheibenrand, der Film strömt parallel zur Scheibenoberfläche. Mit $R = r, w = 0, z = \delta$ gilt dann:

$$\delta_{\rm R} = \sqrt[3]{\frac{3\nu \dot{\rm V}}{2\pi R^2 \omega^2}}$$
 Gleichung 5.4.

Die maximale radiale Geschwindigkeit an der Scheibenkante lässt sich nach Substitution von z durch δ_R in Gleichung 5.1 schreiben als

$$u_{max} = \sqrt[3]{\frac{9\omega^2 \dot{V}^2}{32\pi^2 v R}}$$
Gleichung 5.5.

Für die mittlere Geschwindigkeit

$$u_m = \frac{2}{3}u_{max}$$
 Gleichung 5.6

folgt mit der radialen Geschwindigkeit aus Gleichung 5.5

$$u_{m} = \sqrt[3]{\frac{\omega^{2} \dot{V}^{2}}{12\pi^{2} v R}}$$
 Gleichung 5.7.

Die bei allen Rotationszerstäubern auftretende Corioliskraft wirkt entgegen der Drehrichtung senkrecht zur radialen Strömungsrichtung und bewirkt so eine Verzögerung der Umfangsgeschwindigkeit des Fluids zur Bewegung der Scheibenoberfläche. Inwieweit dieser Effekt, der allgemein als Schlupf bezeichnet wird, im betrachteten Anwendungsfall zu berücksichtigen ist, kann nach einer Gleichung, die Bayvel angibt, abgeschätzt werden. Danach ist unter den Bedingungen der Lackapplikation nicht mit einer nennenswerten Schlupfbildung zu rechnen. Auch in /33/ wird der Schlupf auf dem Glockenteller aufgrund der geringen Filmdicken vernachlässigt. Hier wird die Bahn eines Massenelements und damit des Fluidstroms als Gerade in radialer Richtung beschrieben. Kurzzeitaufnahmen, die im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurden, bestätigen die Richtigkeit dieser Annahme.

Entsprechend ergeben sich der Abflugwinkel α sowie die Abfluggeschwindigkeit v_L aus dem Geschwindigkeitsverhältnis von radialer Geschwindigkeit u_{max} zur Umfangsgeschwindigkeit v_u zu

$$\tan(\alpha) = \frac{u_{max}}{v_{u}}$$
Gleichung 5.8.
$$v_{L} = \frac{v_{u}}{\cos(\alpha)}$$
Gleichung 5.9.

Für die in der Lackiertechnik gebräuchlichen Glockenteller gelten formal die Gleichungen der Scheibenzerstäuber. Die Geometrie der Glocke findet durch Einführung des Konturwinkels β (vgl. Abb. 5.2) Berücksichtigung. Nach /33/ und /38/ gilt für die Filmdicke an der Stelle r auf dem Glockenteller

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3\nu\dot{V}}{2\pi r^2 \omega^2 \sin\beta}}$$
 Gleichung 5.10

und die mittlere Geschwindigkeit



Abb. 5.3: Schematische Darstellung der Staupunktströmung an einer rotierenden Scheibe sowie einer resultierenden Partikelbahn im ortsfesten Koordinatensystem nach /39/.

5.2.2 Berechnung der Filmströmung

Mit Hilfe der dargestellten Berechnungsgrundlagen lassen sich nun Filmströmungen Newton`scher Fluide auf rotierenden Glocken berechnen. Die Anwendung dieser Berechnungen stößt jedoch bei strukturviskosen Lackmaterialien an ihre Grenzen, da die starke Abhängigkeit der Viskosität von der Scherrate in den Formeln unberücksichtigt bleibt. So sind sowohl die Schichtdicke δ als auch die Geschwindigkeit u von der resultierenden Viskosität abhängig. Die Viskosität wiederum ist eine Funktion der Scherrate, die nach Gleichung 3.2 das Verhältnis von maximaler Geschwindigkeit zur Filmdicke wiedergibt.

Zunächst ist deshalb eine Funktion zu wählen, die das Viskositätsverhalten der betrachteten Medien in Abhängigkeit der Scherrate beschreibt. Erweitert man den Potenzansatz nach Ostwald / de Waele (Gleichung 3.4) mit Gleichung 3.3 und löst nach der Viskosität η auf, folgt:

$$h = k \cdot D^{p-1}$$
 Gleichung 5.12

Zu beachten ist, dass der Gültigkeitsbereich der Funktion für die zu erwartenden hohen Scherraten von bis zu 10⁶ s⁻¹ gewährleistet bleibt /27/. Messungen unter extremen Scherraten, die deutlich über den üblichen Angaben der Qualitätssicherung von 1000 s⁻¹ liegen, sollen dies ermöglichen.

Durch die materialspezifische Viskositätsfunktion kann anschließend die Filmströmung mit Hilfe eines Iterationsverfahrens bestimmt werden. Mit einer angenommenen, relativ hohen Viskosität werden dabei Filmdicke und -geschwindigkeit nach den Gleichungen 5.10 und 5.11 sowie die momentane Scherrate berechnet. Setzt man diese Scherrate in Gleichung 5.12 ein, erhält man eine angenäherte Viskosität, die wiederum in die Ausgangsgleichungen eingesetzt wird. Dieses Iterationsverahren wiederholt ein Rechenprogramm, bis durch Annäherung an die exakte Lösung, ein stabiler Zustand erreicht ist.

5.2.2.1 Bestimmung der Viskositätsfunktionen

Der Bestimmung der Viskositätsfunktion kommt eine zentrale Bedeutung innerhalb der Strömungsberechnung zu, sind doch die Auswirkungen unterschiedlicher Materialeigenschaften von besonderem Interesse. Da Viskositätsangaben der Hersteller meist auf einen Scherratenbereich bis 1000 s⁻¹ beschränkt sind, werden Messungen bei höheren Scherraten erforderlich, um eine möglichst exakte Anpassung von Gleichung 5.12 an das reale Materialverhalten zu erreichen.

In Abb. 5.4 ist die Viskositätskurve eines Wasserbasislackes über einen Scherratenbereich, der mehrere Dekaden umfasst, dargestellt. Um Messungen über einen so großen Scherratenbereich realisieren zu können, muss die Messgeometrie zu kleinen Scherraten dahingehend angepasst werden, dass ein ausreichend großes Drehmoment des Messgerätes erhalten bleibt. Die Messungen bei hohen Scherraten werden zweckmäßigerweise mit einer Platte-Platte-Scheranordnung durchgeführt, da sich durch Änderung des Plattenabstands und der Drehzahl ein sehr großer Scherratenbereich realisieren lässt /40/. Noch höhere Scherraten können mit einem Hochdruck-Kapillar-Rheometer erzielt werden.



Abb. 5.4: Kombination mehrerer Viskositätsmessungen mit verschiedenen Messgeometrien bzw. -verfahren zu einer Viskositätskurve über einen Beanspruchungsbereich von mehreren Dekaden.

Allerdings sind besonders bei hohen Scherraten einige physikalische Gegebenheiten, die das Messergebnis bei Rotationsmessungen beeinflussen können, zu berücksichtigen:

Aufgrund der begrenzten Drehzahl des Rheometers wird der Messspalt sehr klein gewählt, um hohe Scherraten zu erreichen. Die dabei eingetragene, mechanische Eneraie wird in Wärme umgewandelt, die einem temperaturbedingten zu Viskositätsabfall der Messsubstanz führen kann. Um konstante Temperaturen zu gewährleisten, ist das Messsystem temperiert. Allerdings kann mit dem Temperatursensor der Temperaturregelung aufgrund des großen Volumenstroms der Kühlflüssigkeit keine Erwärmung im Messspalt detektiert werden. Um eine Erwärmung im Spalt dennoch ausschließen zu können, werden die Materialien über eine Messdauer

von 20 s hoch geschert. Da unter diesen Bedingungen die gemessene Viskosität nahezu konstant bleibt (Abb. 5.5), kann man eine nennenswerte, innere Erwärmung der Probe ausschließen.

Die Spalthöhe selbst sollte mindestens fünfmal so groß wie die größten Partikel im Fluid gewählt werden /27/. Dieser Wert wird im Fall des Wasserbasislackes unterschritten. Vergleichsmessungen an einem Hochdruckkapillarviskosimeter zeigen jedoch keine signifikanten Unterschiede der gemessenen Viskositätswerte aufgrund der Aluminiumflakes, sondern stimmen mit den im Rotationsrheometer erhaltenen Ergebnissen bei einer Scherrate von 50.000 s⁻¹ überein (Abb. 5.5).



Abb. 5.5: Zeitliches Viskositätsverhalten bei hohen Scherraten.

Zum Zeitverhalten der Lacke ist anzumerken, dass strukturviskose bzw. viskoelastische Fluide im Gegensatz zu Newton`schen Flüssigkeiten stationäre Viskositätswerte nach einem Scherratensprung erst nach einer ausreichend langen Scherzeit erreichen. Diese Zeitspanne nennt man Eigenzeit λ . Um stationäre Verhältnisse zu erhalten, muss die Beanspruchungs- bzw. Versuchszeit t_{exp} größer der Eigenzeit sein. Die Deborah-Zahl /29/ verknüpft diese beide Zeiten zu einer dimensionslosen Kennzahl.

$$De = \frac{\lambda}{t_{exp}}$$
Gleichung 5.13

Bei kleinen Deborah-Zahlen können transiente Vorgänge vernachlässigt werden. Große Eigenzeiten dagegen erschweren eine Berechnung schnell ablaufender Prozesse, wie z.B. die Filmströmung auf dem Glockenteller, da sich dann der momentane (transiente) Viskositätswert nicht eindeutig der stationären Viskositätsfunktion zuordnen ließe. Aufgrund dessen wird das Zeitverhalten von Pulver-Slurry analysiert: Hier zeigt sich, dass das Zeitverhalten im Wesentlichen von der Beschleunigung des verwendeten Rheometers abhängt. Abb. 5.6 zeigt nach 2 s Vorscherung mit einer Scherrate von 1000 s⁻¹ einen Sollwertsprung auf 15.000 s⁻¹. Die Beschleunigungsdauer bis zum Erreichen der vorgegebenen Scherrate beträgt 200 ms, nach dieser Zeit hat sich die Lackviskosität bereits bis auf 15 % an den resultierenden, stationären Wert angeglichen. Bei Vorgabe des Sollwertsprungs von 0,1 auf 1.000 s⁻¹ zu Beginn des Versuchs ist die Viskosität mit Erreichen der Sollscherrate stationär. Die sehr kurze Eigenzeit von Pulver-Slurry liegt demnach unter den Beschleunigungszeiten und der zeitlichen Auflösung des Messgerätes.



Abb. 5.6: Viskositätsabbau bei sprunghafter Scherratensteigerung.

In diesem Zusammenhang sei auf Untersuchungen von Gleißle /41/ verwiesen, der Fließeigenschaften von hochviskosen Kunststoffschmelzen bestimmt und aufgrund der starken inneren Erwärmung der Materialien Kurzzeitmessungen bis zu höchsten Scherraten vornimmt. Unabhängig von der vorgegebenen Schergeschwindigkeit treten danach die maximalen Schubspannungen der Beschleunigung bei gleichen Werten der Scherdeformation auf.¹ Daraus ist abzuleiten, dass Zeiteffekte bei großen Scherraten extrem rasch ablaufen.

Weitere Erkenntnisse zur transienten Viskosität werden durch Messungen an Silikonölen mit einem speziellen Rheometer gewonnen /40/. Dieses ermöglicht Beschleunigungszeiten auf stationäre Schergeschwindigkeiten von 1200 s⁻¹ in weniger als 5 ms. Es zeigt sich, dass bei sehr kurzen Beschleunigungszeiten die Anpassungszeit der Viskosität sehr stark von der erreichenden zu Schergeschwindigkeit abhängt. Dabei reduziert sich die Anpassungszeit mit zunehmender Schergeschwindigkeit (0,006–1200 s⁻¹) von mehreren Sekunden bis auf weniger als 10 ms.

Aufgrund der kurzen Eigenzeit von Pulver-Slurry wird bei Berechnung der Filmströmung auf dem Glockenteller eine stationäre Viskositätsfunktion zugrunde gelegt. Zur Bestimmung der Viskositätsfunktion wird bis zu einer Scherrate von 3000 s⁻¹ eine Viskositätskurve mittels Messkegel aufgenommen (vgl. Abb. 4.1). Die Viskositätswerte unter höheren Scherraten werden mit Platte-Platte-Messanordnungen als stationäre Einpunktmessungen gewonnen.

Die für die Strömungsberechnung erforderliche Viskositätsfunktion erhält man schließlich durch Anpassung einer Potenzfunktion an die Messwerte (Abb. 5.7 und Abb. 5.8), die für Gleichung 5.12 folgende Kennwerte der Ostwald / de Waele Viskositätsfunktionen ergibt:

	Pulver-Slurry	Wasserbasislack
Viskositätsfunktion:	$\eta = 6031,2*D^{-0,4789}$	$\eta = 9034,6^{*}D^{-0.5647}$
k	6031,2	9034,6
р	0,5211	0,4353
p-1	-0,4789	-0,5647

 Tabelle 5.2:
 Kennwerte der Viskositätsfunktionen.

¹ Die Scherdeformation entspricht einer Scherstrecke.



Abb. 5.7: Viskositätsfunktion Pulver-Slurry.



Abb. 5.8: Viskositätsfunktion Wasserbasislack.

Die Berechnung der Filmdicke kann nun unter Berücksichtigung des strukturviskosen Materialverhaltens erfolgen. Im Folgenden werden verschiedene Einflussparameter variiert und deren Auswirkungen auf die Filmströmung diskutiert:

- Einfluss Viskosität

Anhand Abb. 5.9 soll zunächst der Einfluss der Strukturviskosität auf die Filmströmung verdeutlicht werden. Setzt man zur Berechnung der Filmdicke einen konstanten Viskositätswert ein (in diesem Beispiel 250 mPas, entsprechend einer Scherrate von 1000 s⁻¹) und vergleicht diesen mit dem Schichtdickenverlauf unter Berücksichtigung der Viskositätsfunktion, erhält man mit der gleichbleibenden Viskosität eine doppelt so große Filmdicke an der Glockentellerkante. Der leichte Anstieg der Filmdicke nahe der Glockentellerkante wird durch eine Änderung des Konturwinkels von 40° auf 60° (vgl. Abb. 5.2) an dieser Stelle hervorgerufen.

Abb. 5.10 zeigt die berechneten Filmdicken unterschiedlicher Materialien. So ist die Filmdicke von Pulver-Slurry um ca. 25 % größer als die des Wasserbasislackmaterials. Wasser weist aufgrund seiner geringen Viskosität und des Newton`schen Verhaltens schon bei kleinen Radien einen verhältnismäßig dünnen Film mit ca. 10 µm Filmdicke an der Glockentellerkante auf. Die Ausbildung von Flüssigkeitsfilmen auf rotierenden Scheiben wird auch in /44/ untersucht. Hierbei kann gezeigt werden, dass sich geschlossene Flüssigkeitsfilme auf rotierenden Scheiben erzeugen lassen, deren Dicke nur 5–10 µm betragen.

Die nachfolgenden Betrachtungen der Einflussfaktoren auf die Filmeigenschaften beziehen sich auf das Pulver-Slurry-Klarlackmaterial. Die grundlegenden Abhängigkeiten stimmen jedoch mit dem Wasserbasislack überein und lassen sich auf diesen übertragen. Anhand zweier Drehzahlen verdeutlicht dies Abb. 5.11 bei verschiedenen Farbmengen, die im Falle des WBL zu jeweils dünneren Filmen bei höheren Geschwindigkeiten führen.



Abb. 5.9: Einfluss der Strukturviskosität auf die berechnete Filmdicke (Drehzahl 50.000 min⁻¹ und Farbmenge 200 ml/min).



Abb. 5.10: Berechnete Filmdicke von Pulver-Slurry, Wasserbasislack und Wasser im Vergleich (Drehzahl 30.000 min⁻¹ und Farbmenge 150 ml/min).





- Einfluss der Lackierparameter Drehzahl und Farbmenge

Erwartungsgemäß sinkt die Filmdicke auf dem Glockenteller mit zunehmender Drehzahl, wobei die Filmdickendifferenzen unterschiedlicher Farbmengen bei hohen Drehzahlen deutlich geringer werden. Abb. 5.12 zeigt die Filmdicke am Glockentellerrand im Farbmengenbereich von 50-300 ml/min. Deutlich ist der geringere Einfluss der Farbmenge auf die Filmdicke bei hohen Drehzahlen zu erkennen, wie dies z.B. auch Corbeels /37/ beschreibt. Aufgrund der Kontinuitätsbedingung führt eine abnehmende Filmdicke gleichzeitig zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten und damit zu höheren Scherraten (vgl. Abb. 5.13). Die Tendenz zu geringeren Schichtdicken bei höherer Geschwindigkeit wird also nicht einzig durch die größere Radialbeschleunigung hervorgerufen, sondern auch durch das damit ausgelöste Absinken der Viskosität des strukturviskosen Materials begünstigt (Abb. 5.14).



Abb. 5.12: Einfluss der Drehzahl auf die Filmdicke von Pulver-Slurry bei verschiedenen Farbmengen.



Abb. 5.13: Einfluss der Drehzahl auf die Strömungsgeschwindigkeit von Pulver-Slurry sowie die Scherrate bei verschiedenen Farbmengen.



Abb. 5.14: Resultierende Viskosität an der Glockentellerkante bei verschiedenen Zerstäubungsparametern.

Den Zusammenhang zwischen resultierender Viskosität und Filmdicke veranschaulicht Abb. 5.15. Danach führen hohe Drehzahlen zu kleinen Viskositätswerten bei geringen Filmdicken. Bemerkenswert ist das Absinken der Viskosität mit steigender Farbmenge bei gleichzeitig zunehmender Filmdicke. Die Scherrate steigt in diesem Fall trotz zunehmender Filmdicke aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeit.

Wie groß die Einwirkung der Drehzahl auf die resultierende Viskosität und damit die Filmdicke ist, verdeutlicht Abb. 5.16. So kann trotz einer Verdopplung der Farbmenge von einer gleichbleibenden Filmdicke ausgegangen werden, falls - wie im Beispiel gezeigt - gleichzeitig die Drehzahl von 50.000 auf 60.000 Umdrehungen pro Minute erhöht wird. In Bezug auf die zu erwartenden Tropfengrößen des unmittelbar folgenden Zerfallsprozesses sind indes die größeren Strömungsgeschwindigkeiten zu berücksichtigen.



Abb. 5.15: Filmdicke auf dem Glockenteller in Abhängigkeit der resultierenden Viskosität.



Abb. 5.16: Einfluss sehr hoher Farbmengen auf die Filmdicke bei Pulver-Slurry für zwei Drehzahlen sowie Filmdicke verschiedener Fluide auf dem Glockenteller bei einer Drehzahl von 50.000 min⁻¹ und einer Farbmenge von 200 ml/min.

Mit der experimentellen Untersuchung der Filmströmung werden mehrere Ziele verfolgt. Zum einen sollen die vorangegangenen Berechnungen verifiziert werden, zum anderen gilt es, das Strömungsverhalten in verschiedenen Drehzahlbereichen festzuhalten. Für die Praxis zudem interessant sind kritische Zustände wie der Einschaltvorgang und das Lackieren mit geringen Farbmengen, da in diesem Fall aufgrund der sehr kleinen, rechnerischen Filmdicken keine vollständige Benetzung der Glockentelleroberfläche zu erwarten ist. Gerade für schnell drehende Rotationszerstäuber liegen kaum Erkenntnisse zu diesen Fragestellungen, die auch zur Ableitung von Maßnahmen zur Optimierung und Weiterentwicklung von Glockentellern benötigt werden, vor.

5.2.3.1 Messverfahren zur Verifizierung der Filmströmungsberechnung

Die Messung der Filmdicke auf dem rotierenden Glockenteller stellt aufgrund der schnellen Bewegung und des erzeugten Sprühnebels große Anforderungen an die Versuchsdurchführung. Zunächst sollte die Bestimmung der Nassfilmdicke mit einem berührungslosen Messverfahren, wie es in der Lackiertechnik zur Qualitätssicherung eingesetzt wird, realisiert werden. Die hierfür zur Verfügung stehenden Geräte, die die Reflexion Laserstrahls auf thermische des einem Substrat zur Schichtdickenbestimmung auswerten, sind jedoch aus mehreren Gründen nicht anwendbar: So ist bereits die Messung ruhender Lackfilme mit diesen Messsystemen sehr aufwendig, da für jedes Lacksystem eine Kalibrierung bei verschiedenen Schichtdicken erforderlich ist. Erschwerend kommt hinzu, dass die Verfahrgeschwindigkeit über das Substrat aufgrund der Reflexionsmessung auf 200 mm/s begrenzt ist /42/. Eine zuverlässige Messung des Lackfilms, der sich mit der Umfangsgeschwindigkeit des Glockentellers durch den Messfleck bewegt, erscheint somit unerreichbar.

Diese Überlegungen führten zur direkten Messung der Filmdicke. Hierbei wird eine positionierbare Tastspitze senkrecht zur Glockentelleroberfläche in Richtung des strömenden Films bewegt. Die Lagedifferenz bzw. der Verfahrweg zwischen erster Berührung des Films und dem Nullpunkt der Glockentelleroberfläche entspricht der Filmdicke. Dieses Verfahren nutzt z.B. Marengo /43/ in seinen Untersuchungen, um Filmdicken an rotierenden Walzen zu bestimmen. Um die Berührung des Films auch bei sehr hohen Drehzahlen exakt bestimmen zu können, wird eine Blitzlampe (Nanolite FX-Xenon) mit einer Blitzdauer von 150 ns in Verbindung mit einer CCD-Kamera eingesetzt. Die kurze Blitzdauer ermöglicht auswertbare Auflichtbeleuchtungen des schnell strömenden Films auf dem unter Applikationsbedingungen rotierenden Glockenteller. Den Versuchsaufbau zur Messung der Filmdicke zeigen Abb. 5.17 und Abb. 5.18.



Abb. 5.17: Schematische Darstellung (Draufsicht) des Versuchsaufbaus zur Messung der Filmdicke auf dem Glockenteller.



Abb. 5.18: Photographie der Versuchsanordnung.

Tastspitze, Videokamera und Blitzlampe befinden sich in der gezeigten Versuchsanordnung in einer Ebene mit der Zerstäuberachse. Um vagabundierenden Spritznebel zu vermeiden, ohne die Farbabströmung auf dem Glockenteller zu behindern, trifft der abgesprühte Lack in kurzer Distanz vom Glockenteller auf ein ringförmiges Auffangblech und wird anschließend einem Auffangbehälter zugeleitet.

Das beschriebene Verfahren ermöglicht nun, sowohl die Position beim Eintauchen der Tastspitze als auch die Lage bei Berührung des Glockentellers zu detektieren und daraus die Filmdicke zu ermitteln. Problematisch zeigt sich die Unebenheit der Glockentellerinnenfläche sowie das Axialspiel des Luftlagers bei Turbinenstillstand. Um diese Fehlerquellen, die sich zu einigen Mikrometern addieren können, zu kompensieren, startet die Messung mit Berührung der höchsten Stelle auf dem rotierenden Glockenteller und nicht, wie geplant, mit einer Nullpunktsbestimmung im Stillstand. Die höchste Stelle kann mittels einer farblichen Markierung während der Drehung mitverfolgt werden. Abbildung 5.19 zeigt nacheinander beispielhaft die Phasen der Messung des Wasserbasislacks bei einer Drehzahl von 30.000 min⁻¹ und einer Farbmenge von 150 ml/min. Ist der Berührungspunkt auf dem Glockenteller gefunden, startet die Messung mit Einschalten der Lackversorgung (Abb. 5.19 a), die Tastspitze bewegt sich nun kontinuierlich aus dem Film heraus (Abb. 5.19 b). Während die Tastspitze in Abb. 5.19 c) die Oberfläche gerade noch anreißt, bewegt sich der Film in Abb. 5.19 d) ohne Störung darunter hindurch. Zwischen beiden Aufnahmen liegt eine Höhendifferenz von ca. 3 µm. Die Bestimmung der Filmdicke erfolgt durch Auswertung des Videofilms unter Berücksichtigung der gemessenen Position der Tastspitze zwischen den Positionen a) und d). Die Genauigkeit der Messungen hängt auch von der optischen Qualität der aufgenommenen Bilder ab und kann unter den genannten Randbedingungen mit ± 2 µm angegeben werden. Steigert man die Drehzahl, wird die exakte Filmdickenbestimmung durch den dünneren Film und die zunehmende Unschärfe der Bilder erschwert. Aus diesem Grund werden die Verifikationsmessungen von Pulver-Slurry und dem WBL bei 30.000 min⁻¹ durchgeführt, der Glockenteller bewegt sich in diesem Fall innerhalb der Blitzdauer um ca. 9 µm weiter. Dargestellt ist in Abb. 5.19 der Wassserbasislack, da das Pulver-Slurry-Material bei den auftretenden, dünnen Filmen transparent erscheint und schlechter darstellbar ist.



- Abb. 5.19: Messung der Filmdicke von Wasserbasislack (Drehzahl 30.000 min⁻¹; Farbmenge 150 ml/min).
 - a) Start der Messung auf Glockenteller;
 - b) Tastspitze abgehoben im Film;
 - c) Letztes, leichtes Anreißen des Films;
 - d) Tastspitze abgehoben.

In Tabelle 5.3 ist der Vergleich der gemessenen Filmdicke mit den berechneten Werten wiedergegeben. Für Pulver-Slurry und den Basislack bei kleiner Farbmenge können die berechneten Werte und damit das rheologische Modell durch die Messung bestätigt werden. Allein die Messung des Basislackmaterials bei höheren Farbmengen ergibt eine zu geringe, rechnerische Schichtdicke. Dieses Verhalten kann auf die im Metalliclack vorhandenen Aluflakes zurückgeführt werden, die in der Rechnung nicht berücksichtigt wurden. Mit einer mittleren Größe im Bereich von 40 µm sind die Flakes als helle, aus dem Film ragende Flecken in Abb. 5.19 zu erkennen. Die gemessene, höhere Schichtdicke kann durch die verlangsamende Wirkung der Flakes in der Strömung verursacht werden. Die Filmströmungsberechnung des Basislackes tendiert demzufolge bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten zu etwas niedrigeren Filmdicken als die Messung nachweist.
	Farbmenge	Schichtdicke	e [µm]	berechnete Werte		
	Vorgabe	Mittelwert	berechneter	v Film	Scherrate	Viskosität
	[ml/min]	Messung	Wert	[m/s]	[s ⁻¹]	[mPas]
PS	150	23	21	0,9	64653	30
WBL	75	13	14	0,7	79655	15
WBL	150	20	16	1,2	115474	12

 Tabelle 5.3:
 Vergleich der Messwerte mit den berechneten Werten.

5.2.3.2 Strömungsverhalten auf dem Glockenteller

Das vorhandene System der Kurzzeitbelichtung kann auch zur qualitativen Analyse der Filmströmung auf dem Glockenteller genutzt werden. Abbildung 5.20 zeigt die Strömungsausbildung auf dem Glockenteller nach dem Öffnen der Hauptnadel. Schon während des instationären Anlaufvorgangs strömt der Lack bei einer Drehzahl von 50.000 min⁻¹ radial, ohne Schlupf nach außen und bestätigt die Aussage in Kapitel 5.2.1 zum Schlupfverhalten auf dem Glockenteller.



Abb. 5.20: Strömungsausbildung auf dem Glockenteller (WBL, DZ 50.000 min⁻¹, FM 300 ml/min).

Bei geringen Farbmengen bis 100 ml/min können auf dem Glockenteller im gesamten Drehzahlbereich unbenetzte Stellen beobachtet werden (Abb. 5.21). Diese sind auch, wie in Abb. 5.22 zu erkennen ist, auf der Verteilerscheibe zu finden, da der durch die Mittelbohrung der Verteilerscheibe strömende Anteil der Farbmenge nicht ausreicht, um diese vollständig zu benetzen. Im Lackierprozess sind unbenetzte Stellen zu vermeiden, da diese zu Antrocknungen führen können, die bei höherer Farbmenge wieder mitgerissen werden und Störungen in der erzeugten Lackschicht hervorrufen. Um eine vollständige Benetzung über große Farbmengenbereiche zu gewährleisten, sollte der Glockentellerdurchmesser nicht zu groß gewählt werden.



Abb. 5.21: Strömungsverhalten von Pulver-Slurry auf dem Glockenteller bei einer geringen Farbmenge von 50 ml/min.



Abb. 5.22: Verteilerscheibe während der Applikation von Wasserbasislack Uni (DZ 20.000 min⁻¹, FM 50 ml/min).

Auch die Zuführung des Lackmaterials auf den Glockenteller hat neben dem Durchmesser der Glocke großen Einfluss auf die Strömungsausbildung und das Zerstäubungsergebnis. So zeigt Abb. 5.23 beispielhaft einen Glockenteller mit ringförmig angeordneten Bohrungen als Lackzufuhr.



Abb. 5.23: Glockenteller mit Bohrungen zur Farbzuführung.

Die erzeugten mittleren Tropfendurchmesser dreier Glockenteller bei vergleichbarer Umfangsgeschwindigkeit werden in Abb. 5.24 gezeigt. Glockenteller 1 und 2 mit Verteilerscheibe unterscheiden sich im Radius, Glockenteller 3 hat einen geringfügig größeren Radius als Glockenteller 2, die Farbzufuhr erfolgt hier jedoch durch Bohrungen, wie in Abb. 5.23 dargestellt.

Während der größere Durchmesser von Glockenteller 2 im Vergleich zu Glockenteller 1 im betrachteten, niedrigen Farbmengenbereich von 100-300 ml/min zu kleineren Filmdicken führt, zeigt Glockenteller 3 mit den Zulaufbohrungen eine deutlich gröbere Zerstäubung, obwohl die rechnerischen Filmdicken auf demselben Niveau liegen. Die höheren Tropfengrößen des Glockentellers 3 können nur durch einzelne Teilströme in Richtung Glockentellerrand erklärt werden, die sich schlechter zerstäuben lassen. Bei parallel durchgeführten Lackierversuchen waren neben insgesamt schlechteren festzustellen. Verlaufswerten auch Einzelstörungen aufgrund großer Tropfen Grundvoraussetzung für die zuverlässige Zerstäubung der Lackmaterialien ist demnach eine gleichmäßige Filmströmung auf dem Glockenteller. Die Ausbildung dieser Strömung wird durch schlecht benetzende Flüssigkeiten bei hohen Drehzahlen und geringen Farbmengen zusätzlich erschwert. In diesem Zusammenhang sind Untersuchungen von Theissing /44/ zu erwähnen, der starke Schwankungen der Benetzungsgrenze von Wasser auf rotierenden Scheiben in Abhängigkeit des Zustands der Scheibenoberfläche feststellt. So hängt die minimale Wassermenge, die noch eine vollständige Benetzung erlaubt, vom Randwinkel γ_R zwischen Flüssigkeit und Glockenteller ab. Der Randwinkel ist jedoch nicht einzig von den Eigenschaften der festen Oberfläche und der Flüssigkeit abhängig, sondern schwankt stark durch mögliche Verunreinigungen auf dem Glockenteller und erschwert somit die Angabe eines minimal erforderlichen Volumenstroms.

Abb. 5.25 zeigt abschließend das Strömungsverhalten auf dem Glockenteller bei Betriebsparametern. Abgesehen von den Einstellungen mit kleinen Farbmengen, werden hier gleichmäßige Filme mit vollständiger Benetzung erzielt. Der Film des Pulver-Slurry-Materials wirkt aufgrund der im Verhältnis zur Filmdicke kleinen Partikel sehr homogen, wohingegen die Filmoberfläche des Wasserbasislacks durch die Flakes gestört wird. Unabhängig von der unterschiedlichen Filmdicke zeigen beide Lacksysteme insgesamt sehr ähnliche Filmbildungs- und Benetzungsverhalten im betrachteten Parameterbereich.



Abb. 5.24: Tropfengrößen in Abhängigkeit der Glockentellergeometrie.



Abb. 5.25: Betriebszustand bei a) WBL und b) Pulver-Slurry (Farbmenge 150 ml/min; Drehzahl WBL 40.000 min⁻¹, PS 50.000 min⁻¹).

5.3 Ablösung am Glockentellerrand

5.3.1 Zerfallsmechanismen

Unmittelbar nach Überströmen der Glockentellerkante beginnt der Film aufgrund der einwirkenden Zentrifugalkraft und den auftretenden aerodynamischen Kräften zu zerfallen. Diesem Zerfall wirken die Oberflächenspannung und die viskosen Kräfte des Materials entgegen. Der sich einstellende Zerfallsmechanismus hängt dabei von den Materialeigenschaften und den Applikationsbedingungen ab. Mit zunehmender Farbmenge treten bei konstanter Drehzahl grundsätzlich vier aufeinanderfolgende Mechanismen unterschiedlicher Zerstäubung auf, wie sie in Abb. 5.26 wiedergegeben sind:

- 1. Tropfenzerstäubung;
- 2. Fadenzerstäubung;
- 3. Aerodynamische oder laminare Lamellenzerstäubung;
- 4. Turbulente Lamellenzerstäubung.





Abhängig vom vorherrschenden Zerfallsmechanismus lässt sich der Tropfenbildungsprozess wie folgt beschreiben /46/:

Bei konstanter Drehzahl bewirken geringe Lackvolumenströme direktes Abtropfen an der Glockentellerkante, an der sich zunächst ein Wulst mit Knoten bildet, aus denen Tropfen direkt weggeschleudert werden. Die dadurch erzeugte, breite Tropfengrößenverteilung mit großen Durchmessern ist nicht zum Lackieren geeignet. Im Bereich der Fadenzerstäubung bilden sich aus den am Glockentellerrand vorhandenen Knoten Fäden aus, die in kleinste Tröpfchen mit einer engen Größenverteilung zerfallen. Fadenbildung wird durch das Erhöhen der Lackmenge, mit steigender Viskosität des Lackes und durch Verwendung gerändelter Glockenteller begünstigt.

Bei weiterer Steigerung der Lackmenge erreicht man den Bereich der aerodynamischen Lamellenzerstäubung. Der sich nach außen bewegende Lackfilm zerfällt nun nicht mehr an der Glockentellerkante, sondern überströmt diese als Film, der infolge der radialen Ausdehnung immer dünner wird und sich aufgrund der Luftströmung destabilisiert, um schließlich in Tropfen zu zerfallen. Stabilisiert sich die Lamelle mit steigender Farbmenge aufgrund der hohen Fliehkräfte, beginnt der Zerfall durch Störfronten vom Glockentellerrand her, die den Lamellenrand zerreißen. Man spricht dann von turbulenter Lamellenzerstäubung. Die im Bereich der Lamellenzerstäubung erzeugten Tropfengrößen liegen über denen der Fadenzerstäubung.

Die vorangegangene Bestimmung der Filmdicke ergab für Pulver-Slurry höhere Viskositätswerte und dadurch höhere Schichtdicken im Vergleich zum Wasserbasislack. Nun soll ermittelt werden, inwiefern sich diese Unterschiede auf das Ablöseverhalten und den Zerfallsmechanismus auswirken. Mehrhardt /45/ gibt in seiner Kennlinienfeld Arbeit ein an. nach dem der zum Tragen kommende Zerfallsmechanismus anhand dimensionsloser Kennzahlen bestimmt werden kann. In Abb. 5.27 ist der Arbeitsbereich der beiden betrachteten Lackmaterialien im Kennlinienfeld gekennzeichnet. Nach dieser Abschätzung überschneiden sich die Zerfallsmodi beider Materialien, die am Rande der Fadenzerstäubung im Bereich des Lamellenzerfalls liegen. Aufgrund der unterschiedlichen Filmströmungseigenschaften sind jedoch Unterschiede in der Ablösung zu erwarten.



Abb. 5.27: Kennlinienfeld zum Zerfallsmechanismus bei Hochrotationszerstäubern /aus 46 nach 45/.

5.3.2 Bestimmung der Zerfallsarten

Um nun die tatsächlich vorliegenden Zerfallsmechanismen bestimmen zu können, soll das Ablöseverhalten durch Ultrakurzzeitphotographie sichtbar gemacht werden. Den prinzipiellen Aufbau dieses Aufnahmeverfahrens zeigt Abb. 5.28. Im Gegensatz zu den Aufnahmen der Filmströmung ist zur Bestimmung des Ablöseverhaltens eine Vergrößerung des Abbildungsmaßstabes bei kürzerer Blitzdauer erforderlich. Die Verwendung einer Punktfunkenblitzlampe (Nanolite KL-L) gewährleistet eine Blitzdauer von 18 ns. Das Licht wird zusätzlich mit einer Linse auf den betrachteten Bereich des Glockentellerrandes fokussiert und ermöglicht in Kombination mit einer Balgenkamera Gegenlichtaufnahmen bei einer Vergrößerung von bis zu 10:1.



Abb. 5.28: Schematischer Aufbau zur Ultrakurzzeitphotographie.

In Tabelle 5.4 ist das Ablöseverhalten von Pulver-Slurry, Wasserbasislack und von Wasser bei einer Drehzahl von 30.000 min⁻¹ im Vergleich dargestellt. Mit steigender Farbmenge können bei der Zerstäubung von Pulver-Slurry nacheinander die klassischen Zerfallsmechanismen beobachtet werden. So erhält man bei einer Farbmenge von 50 ml/min direktes Abtropfen an der Glockentellerkante, welches bei einer Farbmenge von 100 ml/min in den Bereich der Fadenablösung übergeht. Farbmengen größer 150 ml/min bilden Ansätze von Lamellen am Glockenteller aus. Das Wasser verhält sich sehr ähnlich, der Übergang vom Faden- zum Lamellenzerfall wird jedoch nicht erreicht. Dagegen bildet der Wasserbasislack schon bei 50 ml/min deutlich Fäden aus, die bereits bei 100 ml/min in erste Lamellen umschlagen. Der Fadenzerfall bleibt jedoch auch bei weiterer Steigerung der Farbmenge bestimmende Zerfallsart.

Drehzahl 30.000 min ⁻¹ Maßstab 1 mm ← ►					
Farbmenge in ml/min	Pulver-Slurry	Wasserbasislack	Wasser		
50		a Jud Allid			
	$\delta = 15 \ \mu m; \ u_m = 0.3 \ m/s$	$\delta = 11 \ \mu m; \ u_m = 0.4 \ m/s$	$\delta = 4 \ \mu m; \ u_m = 1,1 \ m/s$		
100	ala dunnilla	halithing	in the second		
	$\delta = 18 \ \mu\text{m}; \ u_{m} = 0.5 \ \text{m/s}$	$\delta = 13 \ \mu m; \ u_m = 0.7 \ m/s$	δ = 5 µm; u _m = 1,7 m/s		
150 (Wasser 200)	Alin alie	and Martisch	Lun H / Cor		
	$\delta = 20 \ \mu\text{m}; \ \text{u}_{\text{m}} = 0.7 \ \text{m/s}$	$\delta = 15 \ \mu m; \ u_m = 1.0 \ m/s$	$\delta = 6 \ \mu\text{m}; \ u_{\text{m}} = 2,3 \ \text{m/s}$		
250	sullak a	Martin	aled int. it		
	δ = 22 µm; u _m = 1,1 m/s	δ = 17 µm; u _m = 1,5 m/s	δ = 7 µm; u _m = 3,2 m/s		

 Tabelle 5.4: Ablöseverhalten von Pulver-Slurry, Wasserbasislack und Wasser im Vergleich.

5.3.3 Fadencharakterisierung

Auch in der Ausbildung der Fäden weicht das Wasserbasislackmaterial von den beiden anderen Fluiden ab. Die Anzahl der Fäden ist wesentlich größer, zudem sind sehr lange Einzelfäden zu beobachten, die sich teilweise als Ganzes vom Glockentellerrand lösen. Die Ermittlung einer mittleren Fadenlänge ist aufgrund der sehr starken Schwankungsbreite in diesem Fall nicht sinnvoll. Werden die extrem langen Fäden jedoch nicht berücksichtigt, können zumindest Aussagen über den Großteil der Fäden getroffen werden. Man erhält so die in Tabelle 5.5 aufgeführten Längen als Anhaltspunkt. Wasser und Pulver-Slurry zeigen geringere Streuungen der Zerfallslängen; Der Fadenzerfall gestaltet sich hier insgesamt homogener, wobei im Einzelfall auch bei Pulver-Slurry Fäden größer 1000 µm beobachtet werden können.

Mit steigender Farbmenge bilden die Lackmaterialien längere Fäden aus, während dieser Effekt bei Wasser weniger deutlich hervortritt (vgl. Tabelle 5.4 zunehmende Farbmenge in Spalten). Erhöht sich dagegen die Drehzahl auf 40.000 min⁻¹ bleiben die Fadenlängen bei Pulver-Slurry und Wasser annähernd konstant, während die Fäden des Wasserbasislacks bei der höheren Drehzahl tendenziell bei kürzeren Längen zerfallen.

	Fadenabmessungen in μm				
Drehzahl 30.000 min ⁻¹	Mittlere Länge	Standard-	Maximale Längen		
FM 100 ml/min	[µm]	abweichung [µm]	[µm]		
PS	170	32	Vereinzelt > 1000		
Wasserbasislack	> 600	-	> 1000		
Wasser	220	59	ca. 300		
Drehzahl 40.000 min ⁻¹					
FM 100 ml/min					
PS	210	62	Vereinzelt > 1000		
Wasserbasislack	> 500	-	> 1000		
Wasser	200	86	ca. 300		

 Tabelle 5.5:
 Fadengeometrie an der Glockentellerkante.

Auf die Angabe konkreter Fadendurchmesser wird verzichtet, da eine regelmäßige Ausbildung von Fäden, wie sie in Abb. 5.26-2 dargestellt ist, im untersuchten Drehzahlund Farbmengenbereich nicht vorliegt. Deutlich ausgebildete Einzelfäden zeigen neben einer Querschnittsverjüngung stromab auch unregelmäßige Verdickungen im Faden, die eine Durchmesserangabe zusätzlich erschweren. Hinzu kommt die Bewegungsunschärfe, die sich im Bereich einiger um bewegt, sowie die bei starker Vergrößerung reduzierte Auflösung des empfindlichen Filmmaterials und der mangelnde Kontrast zwischen Faden und Hintergrund. Aus denselben Gründen kann der Fadenabstand nicht eindeutig festgestellt werden, zumal der Fadenzulauf teilweise aus trichterförmigen Lamellen erfolgt, und eine eindeutige Bestimmung des Abstands unmöglich macht.

Anhand der Aufnahmen lassen sich dennoch grundsätzliche Unterschiede des Zerstäubungsverhaltens der Materialien aufzeigen. Die Beobachtungen des Zerfalls bei Wasser entsprechen den in der Literatur wiedergegebenen Zerfallsmechanismen, die Mehrhardt /45/ in seiner Arbeit zusammenfasst. Der Faden zerfällt demnach in Primärtropfen, die einen größeren Durchmesser als der ursprüngliche Faden aufweisen. Dazwischen können sich Flüssigkeitsfäden ausbilden, die zu kleineren Sekundärtropfen zerfallen.

Das Pulver-Slurry-Material zeigt die Bildung dieser größeren Primärtropfen am Fadenende kaum, hier zerfallen die vergleichsweise dicken Fäden in Tropfen gleichen oder kleineren Durchmessers. Der größere Fadendurchmesser wird durch die höhere Schichtdicke bei geringerer Strömungsgeschwindigkeit auf dem Glockenteller begünstigt. Bei höherer Farbmenge läßt Pulver-Slurry eine geringere Anzahl Fäden erkennen, die aufgrund des größeren Querschnitts auch stabiler sind und länger aufrecht erhalten werden können. Aus der Kontinuitätsbedingung folgt, dass mit abnehmender Fadenanzahl deren Durchmesser zunimmt. Dagegen bildet der Wasserbasislack vergleichsweise viele dünne Fädchen aus, die in ihrer Länge die Vergleichsmaterialien weit übertreffen.

5.3.4 Einfluss der Luftströmung

Zunächst muss unterschieden werden zwischen der Lenkluft, die hinter dem Glockenteller in axialer Richtung ausströmt und der Strahlformung dient, und der Luftströmung, die sich aus der Relativgeschwindigkeit zwischen rotierendem Glockenteller und Umgebungsluft einstellt. Die Lenkluft hat aufgrund der relativ geringen Geschwindigkeit kaum Einfluss auf das Ablöseverhalten und die entste-henden Tropfengrößen /36/.

Im Gegensatz dazu wird das Ablöseverhalten entscheidend von der turbulenten Grenzschicht zwischen der rotierenden Glockentellerkante und der Umgebungsluft geprägt. Die abströmenden Fäden werden sehr schnell durch den Luftwiderstand abgebremst /35/ und zerreißen bei hoher Drehzahl in kürzere Längen, da sich der Glockenteller unvermindert weiterbewegt. Neben den bereits erwähnten Ablösemechanismen beschreibt Bayvel /38/ ein weiteres, auf der direkten Filmzerstäubung an der Glockentellerkante basierendes Ablöseverhalten, den "atomization mode", der sich ab einer bestimmten Umfangsgeschwindigkeit des Zerstäubers durchsetzt. Die Zerstäubung wird durch die dynamischen Vorgänge, die durch die umgebende, langsame Luft hervorgerufen werden, verursacht. Es handelt sich hierbei um einen anderen, als von den Tropfen-, Faden- und Lamellenablösungen her bekannten Mechanismus. Das Erreichen einer bestimmten Winkelfrequenz ω führt zu diesem

Ablöseverhalten. Tabelle 5.6 zeigt den Einfluss zunehmender Drehzahl auf das Ablöseverhalten von Pulver-Slurry. Neben der steigenden Geschwindigkeitsdifferenz ist auch die geringere Schichtdicke auf dem Glockenteller zu berücksichtigen, die zur Ausbildung dünnerer Fäden mit höherer Strömungsgeschwindigkeit führt. Aufgrund der steigenden Anströmgeschwindigkeit können sich die Fäden jedoch nicht mehr vollständig ausbilden. Bei sehr hohen Umfangsgeschwindigkeiten scheint das Geschwindigkeitsgefälle in der Luftgrenzschicht das Zerfallsverhalten zu dominieren, die hohen Reibungskräfte der Luftströmung zerreißen die sich bildenden Fadenansätze sofort.

Farbmenge 100 ml/min	Maßstab 1 mm
Drehzahl Umfangsgeschwindigkeit	Pulver-Slurry
30.000 min ⁻¹ 86,4 m/s	Gastanilla collin.
	δ = 18 µm; u _m = 0,5 m/s
40.000 min ⁻¹ 115,2 m/s	$\delta = 13 \ \mu\text{m}; \ u_{\text{m}} = 0.7 \ \text{m/s}$
50.000 min ⁻¹ 144 m/s	$\delta = 11 \ \mu\text{m}; \ u_{\text{m}} = 0.9 \ \text{m/s}$
60.000 min ⁻¹ 172,8 m/s	$\delta = 9 \ \mu m; \ u_m = 1.1 \ m/s$

Tabelle 5.6: Einfluss Drehzahl auf das Ablöseverhalten von Pulver-Slurry.

Nach Gleichung 5.8 liegt der Abflugwinkel α im Fall der abgebildeten Parametereinstellungen unter 1°. Der Einfluss der radialen Geschwindigkeitskomponente w_{r0} auf das Abströmverhalten des Lackes kann folglich vernachlässigt werden, die Abströmung erfolgt in nahezu tangentialer Richtung, wie dies in Abb. 5.29 dargestellt ist. Messungen der mittleren Tropfengeschwindigkeiten in unmittelbarer Nähe des Glockentellers bei 45.000 min⁻¹ /47/ bestätigen die spontane Verzögerung der Lacktropfen. So können hohen Umfangsgeschwindigkeit ungeachtet der von 130 m/s nur Tropfengeschwindigkeiten bis zu 43 m/s festgestellt werden. Dies ist der maximale Wert der tangentialen Geschwindigkeit (Messposition 2 mm oberhalb Punkt B), in radialer Richtung werden maximal 34 m/s gemessen. Der hohe Wert der radialen Komponente entsteht durch Messung von Tropfen, die ihren Ursprung in Drehrichtung vor Punkt B haben und deren Geschwindigkeit w_P im Messbereich bereits eine erhebliche Komponente in radialer Richtung aufweist. Ergänzende Messungen der partikelfreien, induzierten Luftströmung in diesem Bereich ergeben maximale Strömungsgeschwindigkeiten von nur 25 m/s in tangentialer und ca. 14 m/s in radialer Richtung. Dieses extreme Geschwindigkeitsgefälle zwischen Glockenteller und Umgebungsluft erfüllt die Randbedingung für den "atomization mode" nach Bayvel, die Ausbildung der Lackfäden ist unvollständig, der Zerfall findet, wie gezeigt, bei sehr kurzen Längen statt.



Abb. 5.29: Entwicklung eines Flüssigkeitsfadens mit einer Radialgeschwindigkeit von $w_{r0} = 0$ an der Glockentellerkante. Die gerade Bahn AP im ortsfesten Koordinatensystem, Evolventen im rotierenden Koordinatensystem /45/.

5.3.5 Diskussion der Ergebnisse

Bei kleinen bis mittleren Drehzahlen lassen sich die klassischen Zerfallsformen Tropfen-, Faden- und Lamellenablösung an der Glockentellerkante beobachten. Pulver-Slurry und Wasser zeigen dabei grundsätzlich ähnliches Verhalten, der Wasserbasislack hebt sich durch Bildung langer Fäden, die sich teilweise als Ganzes ablösen, deutlich ab. Ein Zusammenhang mit den Filmeigenschaften ist nicht zu erkennen, liegen die Filmdicke und die Strömungsgeschwindigkeit des Basislackes doch zwischen Wasser und Pulver-Slurry. Die Ermittlung mittlerer Fadendurchmesser gestaltet sich schwierig, aufgrund der höheren Fadenanzahl kann unter Berücksichtigung der Kontinuitätsbedingung jedoch nachgewiesen werden, dass die Fäden des Wasserbasislackes dünner sind. In dem für die Verarbeitung von Lacken relevanten Drehzahlbereich größer 40.000 min⁻¹ ist die Ausbildung von Fäden deutlich eingeschränkt, hier setzt sich der von Bayvel beschriebene "atomization mode" durch, der durch das hohe Geschwindigkeitsgefälle zwischen Glockentellerkante und Umgebungsluft begünstigt wird.

Die Ausbildung der langen Fäden des Wasserbasislackes kann auf dessen rheologische Eigenschaften zurückgeführt werden. So zeigt dieses Material im Gegensatz zu Wasser oder Pulver-Slurry deutlich viskoelastisches Verhalten. Schwingungsmessungen in Kap. 4 belegen dies durch den hohen Wert der elastischen Komponente (Speichermodul G'), die deutlich über der viskosen Komponente (Verlustmodul G'') liegt. Das Gesamtverhalten ist demnach gekennzeichnet durch die ausgeprägte Viskoelastizität.

Mansour /48/ beschreibt in seinen Untersuchungen zur pneumatischen Luftzerstäubung Ähnlichkeiten des Zerfalls viskoser Fluide mit Wasser. Viskoelastische Fluide dagegen zeigen durch Ausbildung langer Fäden ein deutlich anderes Ablöse- und Zerfallsverhalten. Die dabei entstehenden Normalspannungen überschreiten die vorhandenen Scherspannungen bei weitem und bestimmen den Zerfall des Fadens. Die bestimmende Zerfallsgröße ist danach die Dehnviskosität (extensional viscosity) des Materials. Diese Stoffgröße konnte aber z.B. für Pulver-Slurry nicht bestimmt werden, da hier der Aufbau von Normalspannungen unter der Nachweisgrenze des Messgerätes liegt. Für solche viskose Flüssigkeiten wird die Viskosität bei unendlich hoher Scherrate als bestimmend für den Zerfall angegeben.

Die Korrelation von Dehnviskosität zu Tropfengrößen, wie sie z.B. von Xing /49/ beobachtet wird, kann nur auf viskoelastische Fluide mit deutlichen, elastischen Anteilen zutreffen. Dagegen lassen die in Kap. 4 gezeigten Oszillationsmessungen Rückschlüsse auf das zu erwartende Ablöseverhalten zu. Es konnte gezeigt werden, dass der Zerfall überwiegend viskoser Materialien sehr stark dem Zerfall von Wasser ähnelt, während bei Messung elastischer Anteile im Material eine verstärkte Fadenbildung, die zur Ablösung ganzer Fäden führt, vorhergesagt werden kann. Dem Einfluss dieser beiden charakteristischen Zerfallsarten (viskoser bzw. viskoelastischer Zerfall) auf die Tropfengrößen wird im folgenden Kapitel nachgegangen.

5.4 Tropfengrößen

Die Effektivität und Qualität des Zerstäubungsvorgangs wird anhand des resultierenden Tropfengrößenspektrums bewertet. Da diese Größe das Lackierergebnis im Hinblick auf Farbton und Verlauf stark beeinflusst und gleichzeitig in hohem Umfang durch die Zerstäubereinstellungen beeinflussbar ist, sind grundlegende Erkenntnisse der Zusammenhänge zur gezielten Prozessführung unabdingbar.

Aus der Vielzahl wissenschaftlicher Arbeiten zu diesem Thema lassen sich folgende Schlüsse ziehen: Die in der Literatur wiedergegebenen, empirischen Korrelationen zur erzeugten Tropfengröße sind stark an die jeweiligen technischen Randbedingungen gebunden und nur eingeschränkt auf die Verarbeitung nicht-Newton`scher, viskoelastischer Materialien mit Hochrotationszerstäubern übertragbar /50/. Meist wird mit den Berechnungen nicht die gesamte Verteilung, sondern nur ein charakteristischer Durchmesser bestimmt. Da dabei nicht alle, für den Lackierprozess relevanten berücksichtigt werden. Einflussgrößen sind zur genauen Bestimmuna der Tropfengrößenverteilungen jeweils Messungen erforderlich. Scholz /36/ und Mehrhardt /45/ fassen in Ihren Arbeiten anschaulich Ergebnisse anderer Autoren zur Rotationszerstäubung zusammen, leiten daraus aber ebenfalls den Bedarf an weiteren Untersuchungen ab.

Um Tropfengrößenverteilungen in einem Lackspray messtechnisch zu bestimmen, werden in der Praxis verschiedene optische Messverfahren zum Einsatz gebracht, da diese die Mehrphasenströmung zwischen Zerstäuber und Werkstück nicht beeinflussen. Zwei Messverfahren haben sich zur Tropfengrößenbestimmung in Lacksprays etabliert. Zum einen die Laserbeugungsspektrometrie zur Tropfengrößenbestimmung /51/, zum anderen die Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) zur gleichzeitigen Messung der Tropfengröße und -geschwindigkeit im Sprühstrahl /52/.

5.4.1 Messtechnik

Während mit der PDA in einem sehr kleinen Messvolumen sequentiell einzelne Tropfengrößen und –geschwindigkeiten bestimmt werden, erlaubt das Laserbeugungsverfahren integrale Messungen der gesamten Spraywolke. Diese Eigenschaft ermöglicht auf einfache und schnelle Weise Aussagen zur Zerstäubungsfeinheit auch bei Parametervariationen, die das gesamte Strömungsbild beeinflussen. Dagegen sind Messungen mit dem PDA aufgrund der hohen räumlichen Auflösung sehr aufwendig und finden daher vor allem bei Fragestellungen Anwendung, die eine genaue Kenntnis der lokalen Größenverteilungen erfordern, wie z. B. Eingangsdaten für Simulationen. Da im folgenden Kapitel das erzeugte Tropfengrößenspektrum in Abhängigkeit der Materialeigenschaften bzw. der Parametereinstellungen im Vordergrund steht, werden die Messungen mit einem Laserbeugungspektrometer durchgeführt. Dabei wird das von einem He-Ne-Laser emittierte Licht beim Auftreffen auf die zu untersuchenden Partikel gebeugt und die Lichtenergieverteilung nach Durchtritt durch eine Empfängerlinse auf ringförmig um den Brennpunkt angeordneten Detektoren gemessen. Das von den Detektoren erfasste, überlagerte Beugungsmuster ist für eine bestimmte Partikel-größenverteilung charakteristisch und wird von der Auswertesoftware berechnet. Große Partikel erzeugen kleine Divergenzwinkel Φ , kleinere Partikel bewirken große Divergenzwinkel Φ (Abb. 5.30).



Abb. 5.30: Beugungswinkel in Abhängigkeit der Teilchengröße bei der Laserbeugungsspektrometrie.

Mit dem verwendeten Particle-Sizer 2600 der Firma Malvern /53/ kann prinzipiell ein Partikelgrößenbereich von 1,2 bis 1880 µm vermessen werden, wobei der tatsächliche Messbereich je nach verwendeter Empfangslinse festgelegt ist. Bei Messungen im Lackspray hat sich die Brennweite von 300 mm sehr gut bewährt, da innerhalb einer ausreichenden Messstrecke von 400 mm Länge Tropfen zwischen 5,8 und 564 µm detektiert werden können.

Die Auswertesoftware liefert statistische Partikelgrößenverteilungen, die sowohl graphisch als auch durch Kennwerte beschrieben werden können. Vorteilhaft bei der Verwendung von Kennwerten ist die einfachere Darstellung und bessere Vergleichsmöglichkeit der Tropfengrößenverteilungen. So ist z.B. der sogenannte Sauter-Durchmesser $D_{3,2}$ als Verhältnis von Volumen zur Oberfläche des Tropfennebels definiert. Dieser gilt als kennzeichnender Durchmesser für den Zerstäubungsgrad eines Sprays, der Kehrwert wird häufig als spezifisches Volumen bezeichnet. Aus der Häufigkeitsverteilung lassen sich weitere Kennwerte berechnen, deren allgemeine Form $D_{k,r}$ - mit k als Anzahlhäufigkeit in % eines Durchmesser $D_{90,3}$ drückt beispielsweise aus, dass 90 % des zerstäubten Volumens einen kleineren Durchmesser als diesen aufweist. Häufig findet man diesen Kennwert in der Literatur auch als $D_{v 0,9}$ oder $D_{0,9}$ bezeichnet.

5.4.2 Versuchsaufbau

Um exakte Ergebnisse zu erhalten und Fehlinterpretationen zu vermeiden, sind einige Besonderheiten bei der Versuchsanordnung zu berücksichtigen. Abbildung 5.31 zeigt das rotationssymmetrische schematisch Strömungsfeld eines Hochrotationszerstäubers. Dieses bildet im Zentrum je nach Parametereinstellung ein unterschiedlich starkes Rückstromgebiet aus /54/. Diese Rückströmung führt zur Rezirkulation bevorzugt kleiner Tropfen, die das Messvolumen mehrmals durchqueren und so die unter diesen Voraussetzungen gemessene Tropfengrößenverteilung im Vergleich zum erzeugten Spektrum zu kleineren Durchmessern hin verschieben. Tatsächlich wurde mit einem Aufbau, wie in Abb. 5.31 dargestellt, ein starker Einfluss des Lenkluftvolumenstromes auf die gemessenen Tropfengrößen festgestellt. Hohe Lenkluftmengen engen dabei den Sprühstrahl ein, die Rezirkulation wird vermindert, wodurch scheinbar höhere Tropfengrößen bei sonst gleichen Zerstäubereinstellungen Versuchsanordnung vorliegen. Diese wurde gewählt, um unter realen Applikationsbedingungen Aussagen über die sich deponierenden Tropfengrößen zu erhalten.

Ungeachtet der Rückströmung birgt diese Messung in einiger Entfernung des Glockentellers eine weitere mögliche Fehlerquelle. Während die Tropfengeschwindigkeiten an der Glockentellerkante nahezu homogen über alle Größenklassen verteilt sind, zeigt sich, dass kleinere Tropfen in einiger Entfernung die Geschwindigkeit der langsameren Luftströmung annehmen, während die größeren Tropfen aufgrund des höheren Impulses kaum abgebremst werden. Mit dem Beugungsmessverfahren wird jedoch eine konzentrationsgewichtete Verteilung bestimmt. Liegen also Größenklassen mit deutlich unterschiedlichen Geschwindigkeiten vor, findet eine Überbewertung zugunsten der langsamer fliegenden Teilchen statt. Im genannten Fall führt dies ebenfalls zu einer Verschiebung zugunsten der kleineren Größenklassen.



Abb. 5.31: Aufbau zur Tropfengrößenmessung vor ebener Platte.

Mit dem Ziel, diesen Effekt auf die Messergebnisse gering zu halten, wurde der Messort dicht an die Glockentellerkante verschoben (Abb. 5.32). Die Messung erfolgt hier in einer nahezu zweidimensionalen Ebene mit homogener Geschwindigkeitsverteilung. In diesem Abstand (10 mm) von der Glockentellerkante ist die Zerstäubung analog zur Filmströmung auf dem Glockenteller nur noch als Funktion der Farbmenge und der Drehzahl zu betrachten. Die das globale Strömungsfeld beeinflussenden Lackierparameter, wie z.B. Lenkluft oder Hochspannung, stellen an dieser Stelle keine Einflussgröße auf das Messergebnis dar und brauchen nicht weiter berücksichtigt zu werden.

Um vagabundierende Tropfen aus dem Messstrahl fern zu halten, ist am Sender des Lasers ein Schutzrohr angebracht (Abb. 5.33). Dieses Schutzrohr endet kurz vor dem eigentlichen Messort und verhindert so Fehlmessungen aufgrund rezirkulierender oder absinkender Teilchen. Die so an die Gegebenheiten angepasste Versuchsanordnung erlaubt reproduzierbare Ergebnisse und ist generell bei Rotationszerstäubern anwendbar.



Abb. 5.32: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung zur Tropfengrößenmessung (Aufsicht).



Abb. 5.33: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung zur Tropfengrößenmessung (Seitenansicht).

5.4.3 Versuchsergebnisse

5.4.3.1. Einfluss der Zerstäuberdrehzahl und Farbmenge

Die Messungen an der Glockentellerkante zeigen erwartungsgemäß abnehmende Tropfengrößen mit zunehmender Drehzahl. Produktionstechnisch relevant ist die Tatsache, dass der Einfluss der Farbmenge ab 50.000 min⁻¹ deutlich abnimmt (Abb. 5.34). Das Tropfengrößenspektrum erreicht ein Plateau auf geringem Niveau, der Sauter-Durchmesser ist in diesem Bereich nahezu unabhängig von der eingestellten Farbmenge (Abb. 5.35). Durch Festlegung der Drehzahl auf 50.000 min⁻¹ kann somit im Produktionsprozess trotz Farbmengenänderungen eine gleich bleibende Tropfengrößenverteilung gewährleistet werden.

5.4.3.2. Einfluss Lackmaterial

Die erzeugten Sauter-Durchmesser von Pulver-Slurry im Vergleich zum Wasserbasislack und Wasser zeigt Abb. 5.36. Das Pulver-Slurry-Material zerfällt danach unter gleichen Zerstäubungsbedingungen deutlich gröber, während der Wasserbasislack und Wasser vergleichbares Zerstäubungsverhalten zeigen. Allerdings erzielt man mit Pulver-Slurry durch deutliche Drehzahlsteigerung auf 50.000 min⁻¹ ein mit den beiden anderen Materialien bei 30.000 min⁻¹ vergleichbares Ergebnis.

Die Tatsache, dass Pulver-Slurry höhere Zerstäubungsenergien als konventionelle Wasserbasislacke benötigt, ist auch in Abb. 5.37 wiedergegeben. Hier zeigt neben Pulver-Slurry einzig der lösemittelbasierte Zwei-Komponenten-Klarlack bei niederer Drehzahl ein ebenfalls abweichendes Zerstäubungsverhalten in Form einer sehr breiten Verteilung des Tropfenspektrums, gekennzeichnet durch den hohen Wert des D_{v0,9} bei vergleichsweise kleinem D_{v0,5}. Dies deutet auf das Vorhandensein großer Tropfen hin, repräsentiert durch den D_{v0,9}, lässt aber gleichzeitig auf einen großen Feinanteil schließen, der den mittleren Durchmesser auf dem Niveau der Wasserbasislacke hält.



Abb. 5.34: Tropfendurchmesser $D_{v 0,5}$ in Abhängigkeit der Drehzahl und Farbmenge.



Abb. 5.35: Tropfendurchmesser D_{3,2} in Abhängigkeit der Drehzahl und Farbmenge.



Abb. 5.36: Sauter-Durchmesser verschiedener Fluide als Funktion von Farbmenge und Drehzahl.



Abb. 5.37: Einfluss Drehzahl auf Zerstäubungsfeinheit $D_{v0,5}$ und $D_{v0,9}$ verschiedener Lacksysteme bei einer Farbmenge von 200 ml/min.

5.4.3.3. Einfluss Glockentellerdurchmesser und Rändelung

In der Praxis wird häufig versucht das Zerstäubungsergebnis durch eine Rändelung, also radiale Kerben im Bereich des Glockentellerrandes, zu verbessern. Die Rändelung soll dabei die gleichmäßige Fadenbildung am Glockentellerrand sicherstellen und zu einer homogenen, feinen Zerstäubung führen.² Aufgrund der nachgewiesenen, geringen Filmdicke auf dem Glockenteller und den im Verhältnis hierzu sehr groben Rändelungen (> 100µm) ist jedoch ein gegenläufiger Effekt zu erwarten: Der dünne Film wird in den Kerben kanalisiert und strömt in sehr viel dickeren Fäden über den Glockentellerrand, die zu einer gröberen Zerstäubung führen. Deutlich zu erkennen ist dies anhand von Tropfengrößenmessungen im direkten Vergleich (Abb. 5.38). Beide Messungen werden mittels identischer Glockenteller mit 65 mm Durchmesser bei einer Drehzahl von 40.000 min⁻¹ und mit einer Farbmenge von 800 ml/min durchgeführt, wobei einer der Glockenteller eine Rändelung aufweist. Die durch die Farbmenge höhere Filmdicke soll den Vorteil der Rändelung, die feinere Zerstäubung, tendenziell noch hervorheben. Tatsächlich führt die Rändelung aber auch bei hohen Filmdicken zu einer schlechteren Zerstäubungsfeinheit. Zu erkennen ist dies am zweiten Maximum in der Volumenhäufigkeit über 100 µm. Die gröbere Zerstäubung spiegelt sich gleichermaßen in den charakteristischen Tropfendurchmessern wieder.



Abb. 5.38: Einfluss einer Rändelung auf die Zerstäubungsfeinheit.

² Bei der Verarbeitung von Lacksystemen, die zu Bläschenbildung im applizierten Nassfilm neigen, werden teilweise gerändelte Glockenteller eingesetzt, um das Lackierergebnis etwas zu verbessern.

Den Einfluss verschiedener Glockentellerdurchmesser auf die Zerstäubungsfeinheit zeigt Abb. 5.39. Werden die Tropfendurchmesser, wie im Beispiel, über die Umfangsgeschwindigkeit aufgetragen, so ist tendenziell kein Unterschied zwischen den unterschiedlichen Durchmessern zu erkennen. Bei gleicher Drehzahl zerstäubt ein größerer Glockenteller feiner bzw. der kleinere Glockenteller erreicht mit derselben Umfangsgeschwindigkeit ein vergleichbares Zerstäubungsergebnis.



Abb. 5.39: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit unterschiedlicher Glockentellerdurchmesser auf die Zerstäubungsfeinheit $D_{v0,5}$ und $D_{v0,9}$.

5.5 Einfluss der Filmeigenschaften auf den Zerfall und die resultierenden Tropfengrößen

Um das Ergebnis der Zerstäubung verschiedener Medien erklären zu können, sollen an dieser Stelle zunächst die Materialdaten, welche die Zerstäubung beeinflussen, dargestellt werden (Tabelle 5.7). Im direkten Vergleich wird deutlich, wie sich die Eigenschaften von Wasser, Wasserbasislack und Pulver-Slurry unterscheiden.

Eigenschaft	Abk.	Einheit	Wasser	Wasserbasislack	Pulver-Slurry
Viskosität (70.000 s⁻¹)	η	mPas	1	18,6	25,9
Dichte	ρ	kg/m³	1	1,026	1,055
Festkörpergehalt	FK	%	0	22	35
Oberflächenspannung	σ	mN/m	72	27	37
Filmdicke bei Drehzahl 40000 min ⁻¹ und Farbmenge 200 ml/min	δ	μm	6	12	16
Tropfendurchmesser	$D_{v0,5}$	μm	27	33	56

 Tabelle 5.7:
 Materialdaten der Vergleichsmaterialien.

Ungeachtet dieser Unterschiede zeigen die Ergebnisse der Tropfengrößenmessung sehr große Übereinstimmung zwischen Wasser und dem Metallic-Wasserbasislack (Abb. 5.36). Bezogen auf die berechnete Filmdicke liegen hier jedoch größere Differenzen vor, als die Tropfengrößen vermuten lassen. Dies scheint die Erkenntnis zu bestätigen, die auch Mehrhardt bei seinen Untersuchungen gewonnen hat: Die Filmdicke ist nicht alleinig bestimmend für die Größe der resultierenden Tropfen. Dieser Sachverhalt spiegelt sich im unterschiedlichen Verhältnis von Tropfendurchmesser zu Filmdicke ($D_{v0,5}/\delta$) von Wasser (4,8) und WBL (2,8) wieder. Dagegen zeigen die Verhältnisse der beiden Lacksysteme ähnliche Werte bei der oben aufgeführten Parametereinstellung von 40.000 min⁻¹ und 200 ml/min. Aus diesem Grund sind in Abb. 5.40 die Tropfendurchmesser aller gemessenen Parametervariationen der beiden Lacksysteme über der Filmdicke dargestellt.

Unabhängig von den völlig unterschiedlichen Zerfallsformen zeigen die beiden Lacksysteme denselben linearen Zusammenhang zwischen Filmdicke und mittlerem Tropfendurchmesser. Da die berechnete Filmdicke unmittelbar von der Materialviskosität bei hohen Scherraten abhängt, sind die Werte des Wasserbasislackmaterials, bei gleichzeitig feineren Tropfengrößen, zu kleineren Werten hin verschoben.



Abb. 5.40: Tropfendurchmesser D_{v 0,5} in Abhängigkeit der Filmdicke auf dem Glockenteller.

Betrachtet man jedoch das Ablöseverhalten eines Wertepaares, bei dem Pulver-Slurry und der Wasserbasislack gleiche Tropfengröße und Filmdicke aufweisen, so sind die Mechanismen durchaus vergleichbar. Abbildung 5.41 verdeutlicht dies anhand zweier völlig unterschiedlicher Parameterkombinationen, die diese Bedingung erfüllen. Das Ablöseverhalten (Fadenanzahl und -länge) ähnelt sich in diesem Fall stark, wobei der Basislack aufgrund der elastischen Anteile schon bei kleineren radialen Geschwindigkeiten Fäden ausbildet. Die elastische Fadenbildung ermöglicht hier eine Stabilisierung der Fäden, der Zerfall wird verzögert. Unabhängig von der Entstehung führt die Bildung von Fäden im Beispiel zu vergleichbaren Tropfengrößen.

Im betrachteten Fall der beiden Lacksysteme führen also vergleichbare Filmdicken auf dem Glockenteller zu sehr ähnlichen Fadendimensionen und damit Tropfengrößen (bei stark unterschiedlichen Drehzahleinstellungen). Analysiert man die Aufnahmen des Ablöseverhaltens bezüglich der Durchmesserverhältnisse von Fäden zu entstehenden Tropfen, gilt für beide Lacke, dass der Durchmesser der Tropfen der Größenordnung der Fadendurchmesser entspricht. Die folgende Abschätzung dient der Darstellung der Plausibilität dieser Zusammenhänge. Geht man von einer mittleren Tropfengröße von ca. 30 μ m im Beispiel aus (Abb. 5.40), so entspricht dies den mittels Bildverarbeitung ermittelten Fadendurchmessern, die zwischen 25 – 40 μ m liegen.

Der zugehörige Film, aus der sich die Fadenansätze herausbilden, muss aus Kontinuitätsgründen kleiner als der Fadendurchmesser sein. Diese Bedingung ist mit



einer Filmdicke von 10 µm erfüllt.

WBL Drehzahl 40.000 min⁻¹; Farbmenge 150 ml/min.

Pulver-Slurry Drehzahl 60.000 min⁻¹; Farbmenge 200 ml/min.

Abb. 5.41: Vergleich Ablöseverhalten bei gleicher Filmdicke und Tropfengröße.

Die resultierenden Tropfengrößen bei der Zerstäubung von Wasser hängen ebenfalls von der Filmdicke ab, hier wirken jedoch auch andere Mechanismen mit. Steigert man die Drehzahl bei gleich bleibender Farbmenge, bilden sich mehr Fäden an der Glockentellerkante aus, die aus Kontinuitätsgründen dünner sind (Abb. 5.42). Die Zerstäubung wird bei kaum verminderter Filmdicke feiner. Die Erwartung, bei der Zerstäubung von Wasser aufgrund der geringsten Viskosität neben den kleinsten Filmdicken auch die feinsten Tropfen zu erhalten, bestätigt sich nicht. Vielmehr sind die entstehenden Tropfen bei gleicher Filmdicke sogar größer als die des Lackmaterials (Abb. 5.40). Erklärbar wird diese Tatsache durch die vergleichsweise hohe Oberflächenspannung, die zur Ausbildung von großen Primärtropfen am Fadenende führt.

Nach Weber /55/ und Rayleigh /56/ zerfällt ein Flüssigkeitsfaden mit dem Durchmesser d_F in Tropfen, die einen 1,891-fachen Durchmesser d_T zum zugehörigen Faden aufweisen.

$$d_{T} = 1,891 * d_{F}$$
 Gleichung 5.14

Vergleicht man identische Zerstäubereinstellungen, so treten bei Wasser vergleichsweise dünne Filme auf, die erzeugten Tropfendurchmesser liegen bei kleineren Filmdicken jedoch auf dem Niveau des Wasserbasislackes.



Wasser DZ 30.000 min⁻¹; Farbmenge 200 ml/min

Wasser DZ 60.000 min⁻¹; Farbmenge 200 ml/min

Abb. 5.42: Ablöseverhalten von Wasser.

Im direkten Vergleich der drei Fluide scheint die Oberflächenspannung sehr großen Einfluss auf die einer bestimmten Filmdicke zuzuordnenden Tropfengrößen zu haben. Bei gleichen Zerstäubereinstellungen sind die Filmdicken des Wassers die kleinsten. Durch die hohe Oberflächenspannung wird dieser Umstand jedoch nicht in eine deutlich feinere Zerstäubung umgesetzt. Hier zeigt das Wasserbasismaterial trotz größerer Filmdicke aufgrund der höheren Viskosität eine ähnliche Zerstäubungsfeinheit, da durch die Elastizität lange Fäden entstehen, die schließlich bei geringen Durchmessern zu kleinen Tropfen zerfallen /37/. Das von viskosen Eigenschaften geprägte Pulver-Slurry mit einer nochmals höheren Viskosität und höheren Oberflächenspannung als der Basislack zeigt die gröbste Zerstäubung.

6 Eigenschaften des Nassfilms

6.1 Einflussgrößen auf den Verlauf

Um eine qualitativ hochwertige Lackschicht mit guten Verlaufseigenschaften zu erzeugen, müssen die applizierten Lacktropfen zusammenfließen und die Ausgangsrautiefe der Oberfläche (auch Ausgangsgebirge), die durch Überlagerung unterschiedlich großer Lacktröpfchen entstanden ist, möglichst weitgehend reduzieren. Die Ausbildung des Ausgangsgebirges, auch als Eigenstruktur bezeichnet, hängt von der Tropfengrößenverteilung des Tröpfchennebels ab, die anschließende Einebnung (Eigenverlauf) von den Materialeigenschaften des Lackes. Aus diesem Grund wird beim Lackieren zunächst eine gleichmäßig feine Zerstäubung angestrebt, da damit die Ausgangsrautiefe von vornherein geringer ausfällt, und der Lack während des Viskositätsanstieges zu einer ebenen Fläche verlaufen kann /65/. Das rheologische Verhalten eines Lackes unmittelbar nach der Filmbildung wird von verschiedenen Mechanismen beeinflusst, die je nach betrachtetem Lacksystem unterschiedlich stark ausgeprägt sind und so zu einem charakteristischen Verhalten des jeweiligen Lacksystems führen. Als maßgebende Einflussfaktoren auf den Eigenverlauf sind die Abdunstung im Sprühstrahl, die Strukturviskosität sowie die thixotropen Eigenschaften des Lackmaterials zu nennen.

In Abhängigkeit der Applikationsparameter dunstet während des Tropfenfluges ein gewisser Anteil Lösemittel aus der Sprayoberfläche ab, wodurch die Viskosität der zerstäubten Lacke grundsätzlich ansteigt. Im Vergleich zum Ausgangsmaterial ermöglicht dieser Effekt den Aufbau von Lackschichten mit höherer Dicke bei ausreichender Standfestigkeit auch an senkrechten Flächen. Liegt die Anfangsviskosität jedoch zu hoch, verschlechtert sich der Verlauf. Da die Abdunstrate bei Wasserlacken aufgrund des höheren Dampfdruckes in der Kabinenluft geringer liegt als die der Lösemittellacke auf organischer Basis, kommt bei diesen Lacksystemen dem Viskositätsanstieg aufgrund des Wiederaufbaus der internen Struktur besondere Bedeutung zu. Wie in Kap 3.2 beschrieben, steigt bei strukturviskosen Materialien die Viskosität nach Reduzierung einer Scherbelastung wieder an. Genau diese Randbedingung wird während des Tropfenfluges in direkter Abfolge an die Zerstäubung, die ja unter höchsten Scherraten stattfindet, erfüllt. Da der zeitliche Verlauf des Strukturaufbaus zusätzlich von den thixotropen Eigenschaften abhängt, ist derzeit keine Vorhersage der rheologischen Eigenschaften unmittelbar nach der Applikation möglich. Aus diesem Grund soll im folgenden Kapitel das rheologische Verhalten des Pulver-Slurry-Klarlackmaterials näher betrachtet und eine Erklärung der Zusammenhänge zwischen Filmeigenschaften und Applikationsparametern abgeleitet werden.

Neben dem Eigenverlauf, der von der Eigenstruktur und den rheologischen Eigenschaften abhängt, wird die Oberfläche der Lackierung zusätzlich durch die Abbildung des Untergrundes und bei senkrechten Flächen außerdem von einer durch die Schwerkraft hervorgerufene Ablaufströmung beeinflusst.

Zusammenfassend lassen sich die Einflussgrößen auf den Verlauf der Lackschicht in Abhängigkeit der Applikations- und Lackeigenschaften wie folgt beschreiben: Es ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen erzeugter Oberflächenstruktur und mittlerem Tropfenvolumen /57/.

	Einflussfaktoren:		Auswirkung
Applikation:	Schichtdicke	s(t)	Eigenverlauf verbessert sich mit zunehmender Schichtdicke
	Mittleres Lacktropfenvolumen	Vo	$\sim \sqrt{V_o}$ Zunehmende Tropfengröße verschlechtert den Verlauf
Lack:	Viskosität	η(t)	schneller Anstieg verschlechtert Eigenverlauf
	Oberflächenspannung	σ	treibende Kraft der Einebnung

 Tabelle 6.1:
 Einflussgrößen auf den Eigenverlauf.

Durch die ständige Ausdunstung des Lösemittels und die Regeneration der Materialstruktur steigt die Viskosität nach der Filmbildung an, der Verlauf wird zunehmend behindert. Erreicht die Materialviskosität die Fließgrenze, kommt die Ausgleichsströmung vollständig zum Erliegen, die zu diesem Zeitpunkt vorliegende Oberflächenstruktur erstarrt. Die hohen Temperaturen der abschließenden chemischphysikalischen Härtung (Trocknung) im Decklacktrockner können kurzzeitig noch eine Verlaufsbewegung erlauben, falls der Viskositätsabfall aufgrund der Erwärmung schneller einsetzt als die parallel laufende Vernetzungsreaktion, die viskositätserhöhend wirkt.

6.2 Abdunstung im Sprühstrahl

Um den Einfluss der Lösemittelabdunstung auf die Materialeigenschaften des Pulver-Slurry-Klarlacks näher zu bestimmen, wird die Scherviskosität nach der Applikation auf ein Substrat mit unterschiedlichen Lackierparametereinstellungen ermittelt. Durch die Viskositätsmessung mit einer vorgegebenen, konstanten Scherrate können zeitliche Einflüsse durch den Wiederaufbau der Materialstruktur zunächst eliminiert werden. Im Vordergrund steht der viskositätserhöhende Einfluss der Abdunstung von Lösemitteln. Die Abdunstrate der Lösemittel hängt von mehreren Faktoren ab, die wichtigsten sind im folgenden Kapitel beschrieben.

6.2.1 Abdunstrate

Die Abdunstrate ist als prozentualer Massenanteil der flüchtigen Komponente des Lacks, der im Vergleich zu einer Referenzprobe abgedunstet ist, definiert. Sie lässt sich aus den gemessenen Festkörpergehalten vor und nach der Applikation berechnen. Aus $1 - X_{FK} = X_{LM}$ erhält man den Anteil der flüchtigen Komponente X_{LM} . Die Abdunstrate α_{AD} einer Applikation berechnet sich wie folgt:

a
$$_{AD} = \frac{X_{LM0} - X_{LM1}}{X_{LM0}} = \frac{X_{FK1} - X_{FK0}}{1 - X_{FK0}}$$
 Gleichung 6.1

Mit:

X_{LM0}: Lösemittelgehalt der Referenzprobe

X_{LM1}: Lösemittelgehalt der abgedunsteten Lackprobe

X_{FK0}: Festkörpergehalt der Referenzprobe

X_{FK1}: Festkörpergehalt der abgedunsteten Lackprobe

Vorangegangene Untersuchungen am Wasserbasislack zeigen, dass sich die Abdunstraten bei wassergelösten Systemen im Bereich weniger Prozent bewegen. Auch für Pulver-Slurry liegt dieser Wert unter Applikationsbedingungen bei ca. 2-3 % /17/. Es lässt sich jedoch eine starke Abhängigkeit der Abdunstrate vom Tropfendurchmesser nachweisen (Abb. 6.1). Auffällig ist eine sehr geringe Abdunstung des WBL 744 bei Applikationsparametern, die ein grobes Tropfenspektrum (Tabelle 6.2) erzeugen. Erst bei Klimaeinstellungen, die weit über den Verarbeitungsgrenzen liegen, so z.B. bei niedriger Luftfeuchte und erhöhter Temperatur (30 % rel. F., 30°C), kann überhaupt eine merkliche Abdunstung registriert werden.

Zusammenfassend kann die erzeugte Tropfengrößenverteilung als bedeutendster Einflussfaktor auf die Abdunstrate angesehen werden, da mit feinerer Zerstäubung die Oberfläche des Sprays zunimmt, und damit die Abdunstrate steigt. Die Temperatur hingegen hat einen eher geringen Einfluss. Von den klimatischen Verhältnissen her beeinflusst vielmehr die Luftfeuchte das Abdunstverhalten des Lösemittels Wasser, bei höherer Luftfeuchte sinkt die Partialdruckdifferenz zwischen dem Wasser im Tropfen und der umgebenden Luft, die Abdunstrate nimmt ab.

Variationen der Lenkluft führen bei Steigerung des Volumenstromes zu geringeren Abdunstraten. Während die Abdunstrate bei Standardapplikationsparametern bei ca. 2 % liegt, zeigt sich bei der Einstellung mit hohem Lenkluftvolumenstrom (Erhöhung von 150 auf 220 NI/min) eine geringere Abdunstung von ca. 1,7 %. Die Abnahme der Abdunstung mit Zunahme der getrockneten Lenkluftmenge ist so nicht zu erwarten, kann aber mit der kürzeren Flugdauer der Tropfen und dem eingeengten Sprühstrahl, der zu einer lokalen Dampfdruckerhöhung führt, erklärt werden.



Abb. 6.1: Abdunstrate WBL 744 bei Variation der Applikationsparameter und der klimatischen Verhältnisse.

	Zerstäubung	Sauter-Durchmesser D _{3,2} in μm	Abdunstrate in %
Standard	DZ 50000 min ⁻¹ ; FM 150 ml/min	14,5	2,08
Fein	DZ 60000 min ⁻¹ ; FM 50 ml/min	9,4	4,2
Grob	DZ 30000 min ⁻¹ ; FM 200 ml/min	29,6	0,28

Tabelle 6.2: Abdunstraten (WBL) bei verschiedenen Zerstäubungsfeinheiten unter

 Standardklima.

6.2.2 Bestimmung der Viskosität nach der Applikation

Zur Bestimmung der Scherviskosität des Lackes unmittelbar nach der Applikation wird bei verschiedenen Lackierparametereinstellungen mehrere Sekunden auf ein Target gesprüht, wobei die Applikationsdauer keinen nachweisbaren Einfluss auf die Abdunstrate zeigt /58/. Der deponierte Lack wird möglichst vollständig abgenommen und in einen luftdicht verschließbaren Behälter gefüllt, um eine weitere Abdunstung zu vermeiden. Die Viskositätsunterschiede aufgrund unterschiedlicher Applikationsparameter und damit Abdunstraten werden mit einer vorgegebenen Scherrate ermittelt. Durch den Messablauf, wie er in Tabelle 6.3 dargestellt ist, wird sichergestellt, dass bei Zeiten unterschiedlichen zwischen der Applikation der Proben und der Viskositätsmessung sowie den abweichenden Zeitkonstanten beim Strukturaufbau keine Fehlinterpretationen entstehen.

Messabschnitt	Anschnittsdaten	Randbedingungen	
	Dauer in s	Scherrate in s ⁻¹	
1	30	500	Messsystem MK 233
2	180	Regeneration - 0	Ø 50 mm; 2°
3	60	100	Temperatur 20 °C

 Tabelle 6.3:
 Messablauf zur Viskositätsmessung.

Nach ca. 30 s erhält man in Messabschnitt 3 einen stationären Wert der Scherviskosität, der zur Auswertung herangezogen wird.

Die Applikation selbst erfolgt unter Prozessbedingungen, wie sie in der Serienlackierung vorliegen. In Tabelle 6.4 sind die Verarbeitungsparameter des Pulver-Slurry-Klarlackmaterials zusammengefasst. Sofern Standardeinstellungen einzelner Parameter vorliegen, werden die entsprechenden Werte bei der Diskussion der Ergebnisse nicht explizit mit angegeben.

Mit der Erkenntnis aus Kap. 6.2.1, dass die Tropfengröße die Abdunstrate maßgeblich beeinflusst, wird neben der Lenkluft und der Farbmenge auch die Drehzahl variiert, um Parametersätze mit deutlich unterschiedlichen Tropfengrößenverteilungen zu erhalten.

Klima:	Vorgabe	Einheit	Toleranz
Temperatur:	22	°C	± 2
Luftfeuchtigkeit	65	% rel. F.	±5
Luftsinkgeschwindigkeit	0,25	m/s	± 0,05
Lackierparameter:	Sollwert		
Lenkluft:	120	NI/min	Prozessbedingte Anpassung
Farbmenge:	150	ml/min	Prozessbedingte Anpassung
Drehzahl:	50.000	min⁻¹	Prozeßkonstante
Hochspannung:	450	μA	Prozeßkonstante
Lackierabstand:	230	mm	Prozessbedingte Anpassung
Bahngeschw.:	200	mm/s	Prozessbedingte Anpassung
Schichtstärke:	45	μm	± 5

Tabelle 6.4: Standard-Verarbeitungsparameter von Pulver-Slurry.

6.2.3 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

In Abb. 6.2 ist die Zunahme der Scherviskosität mit steigender Drehzahl dargestellt. Da Farbmenge und Lenkluft konstant gehalten werden, nimmt die Tropfengröße mit steigender Drehzahl ab. Der Zusammenhang zwischen feinerer Zerstäubung, also verstärkter Abdunstung und erhöhter Viskosität des applizierten Materials ist unmittelbar ersichtlich. Weiter zu erkennen ist, dass die Viskosität im betrachteten Drehzahlbereich nicht linear steigt, sondern ab 50.000 min⁻¹ stark zunimmt. Hier entstehen im applizierten Material vermutlich die ersten Wechselwirkungen zwischen Pulverpartikeln (Pulveragglomerationen), die zusätzlich viskositätssteigernd wirken.

Eine Erhöhung der Lenkluft führt, wie beim Wasserbasislack, zu einer tendenziell niedrigeren Viskosität (Abb. 6.3). Auch in diesem Fall kann als Ursache die kürzere Flugdauer und der höhere Dampfdruck im Sprühnebel angeführt werden.

Abbildung 6.4 zeigt den Einfluss steigender Farbmenge (bei konstanter Drehzahl) auf die Scherviskosität des applizierten Materials. Wird die Farbmenge 200 ml/min überschritten, stagniert der Viskositätsrückgang. Analog zu den Ergebnissen der Tropfengrößenmessungen (Abb. 5.36) geht auch die resultierende Viskosität ab einer Farbmenge von 200 ml/min in einen Sättigungsbereich über.



Abb. 6.2: Einfluss der Drehzahl auf die Scherviskosität nach der Applikation.



Abb. 6.3: Einfluss der Lenkluft auf die Scherviskosität nach der Applikation.



Abb. 6.4: Einfluss der Farbmenge auf die Scherviskosität nach der Applikation.

Abbildung 6.5 stellt diesen Zusammenhang anhand aller gemessenen Parametervariationen (vgl. Ergebnisse in Tabelle 6.5) dar. Liegt der mittlere Tropfendurchmessser $D_{v 0,5}$ über 40 µm, so sinkt die Viskosität nach der Applikation mit gröber werdender Zerstäubung nur langsam ab. Liegt der $D_{v 0,5}$ im Spray unter einem Wert von 40 µm, so reagiert das Material im applizierten Film zunehmend empfindlich auf jede weitere Reduzierung des Tropfendurchmessers und einer damit verbundenen Erhöhung der Abdunstung. Dies hängt mit den bereits erwähnten Wechselwirkungen der Pulverpartikel im festkörperreicheren Material zusammen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Tropfengrößen aus technischen Gründen nicht simultan mit dem Abdunstverhalten zu bestimmen waren. In Abb. 6.5 erhält man deshalb bei identischem Tropfendurchmesser verschiedene Viskositätswerte. Diese Viskositätsunterschiede resultieren zum einen aus verschiedenen Lenkluftmengen, zum andern können diese auch aus Streuungen des mittleren Durchmessers resultieren.



Abb. 6.5: Einfluss der Tropfengröße $D_{v\,0,5}$ auf die Scherviskosität nach der Applikation.

Drehzahl	Farbmenge	Lenkluft	Viskosität	Tropfengröße D _{v 0,5}
[min ⁻¹]	[ml/min]	[NI/min]	[mPas]	[µm]
-	-	-	464	Original Material
30000	150	120	1770	63
40000	150	120	1870	52
50000	150	120	2650	37
60000	150	120	3710	29
30000	250	120	1520	69
50000	100	120	3340	34
50000	150	120	2790	37
50000	150	120	2910	37
50000	150	120	2700	37
50000	200	120	2040	40
50000	250	120	2070	43
50000	150	80	2970	37
50000	150	160	2610	37

Tabelle 6.5: Parametervariationen mit gemessenen Tropfengrößen und der nach derApplikation ermittelten Scherviskosität.
6.3 Verlaufsverhalten des Nassfilms

Bisher wurde der Einfluss der Applikationsparameter auf die Abdunstung und die resultierende Scherviskosität des applizierten Lackes ermittelt. Einflüsse durch den zeitlich abhängigen Strukturaufbau des Materials wurden durch die vorgegebene Scherbelastung eliminiert.

Im Folgenden soll nun das rheologische Verhalten in Abhängigkeit der Zeit betrachtet werden. Um den Strukturaufbau nicht zu beeinflussen, erfolgt die rheologische Charakterisierung direkt im applizierten Film. In einem weiteren Schritt soll dann der Einfluss der Materialrheologie auf den Verlauf der Oberflächenstruktur geklärt werden.

6.3.1 Verlaufsmechanismen

Während der Applikation des Lackes entsteht auf dem Substrat aufgrund der statistischen Überlagerung der Lacktropfen ein Film mit endlicher Profiltiefe. Der einsetzende Verlauf des Films zu einer ebenen Fläche wird von der Oberflächenspannung σ (Abb. 6.6) hervorgerufen. Mit zunehmender Dauer der Abdunstphase kommt dieser Vorgang durch die entgegengesetzt wirkenden und zeitlich anwachsenden viskosen Kräfte zum Stillstand. Ein hoher Wert der Oberflächenspannung forciert zwar den Verlauf, ist aber nachteilig für eine vollständige Benetzung des Substrats bei der Applikation, die Oberflächenspannung stellt somit einen Kompromiss aus beiden Anforderungen dar.

Aufgrund der weiteren Lösemittelabdunstung, verstärkt durch die Regeneration der Materialstruktur, erhöht sich die Viskosität kontinuierlich. Die im Film wirkende Schubspannung kann mit Gleichung 6.2 abgeschätzt werden /59/. Während des Filmverlaufs sind die Oberflächenspannung σ , die Wellenlänge λ_W sowie die mittlere Filmdicke s_m annähernd konstant, die Schubspannung τ nimmt daher mit abnehmender Unebenheit ab. Sinkt die treibende Schubspannung unter die Fließgrenze τ_o des Materials ab, kommt die Ausgleichsströmung aufgrund der nun dominierenden, elastischen Materialstruktur zum Erliegen.

Um die Oberflächenstruktur einzuebnen, muss der Lack also eine genügend lange Zeit viskose Eigenschaften aufweisen. Andererseits soll der Aufbau der Materialstruktur schnell genug erfolgen, um das Ablaufen des Films zu verhindern.

Allgemein geht man bei Lacken von einer Verlaufszeit zwischen 30 und 300 s aus /60/. Der Übergang vom viskosen Materialverhalten hin zum elastischen wird durch den Aufbau der inneren Materialstruktur hervorgerufen und kann mittels Oszillationsmessungen beobachtet werden. Das Verhältnis von viskosen zu elastischen Eigenschaften wird durch den chemischen Aufbau bestimmt.





Hester /59/ beschreibt drei Mechanismen in Lacken, die zur Stabilisierung der Bindemittel bzw. Partikel und damit zur Bildung elastischer Eigenschaften führen können. Als erste Möglichkeit wird die Verschlaufung von langen Molekülketten (chain entanglement) bei wasserlöslichen Polymeren hoher Molekülgewichte angeführt. Überschreiten diese ihre kritische Konzentration, verschlaufen sich die Molekülketten und erhöhen die Viskosität. Unter Scherbelastung werden diese Molekülketten dann orientiert und gestreckt, wobei sie elastische Energie speichern können. Nach Wegnahme der äußeren Kraft ziehen sich die Ketten wieder zusammen. Da dieses Verhalten zu einer schlechten Zerstäubung sowie einem schlechten Verlauf führt, ist es für die Lackchemie von geringerer Bedeutung.

Werden die Bindemittel durch Anlagerung niedermolekularer Polymere (particle bridging) gelöst, so ergibt sich ein günstigeres rheologisches Verhalten. Die hydrophoben Anteile assoziieren sich mit der Bindemitteloberfläche und führen zu einem ausgeprägten Netzwerk von Lackpartikeln, die durch die hydrophilen Enden dieser Moleküle in der wässrigen Umgebung beweglich verbunden sind. Da die innere Struktur bei Scherbelastung abgebaut wird, speichert das Material keine elastische Energie, die Struktur baut sich aber während des Verlaufs langsam wieder auf. Dies ist ein typisches Beispiel für einen Lack mit Fließgrenze.

Bildet sich ein hydrophobes Cluster niedermolekularer Polymere (micellar bridging), so werden die Bindemittel in einem Netzwerk von lose verbundenen Polymeren stabilisiert. Es ist keine Adsorption der niedermolekularen Polymere an den Bindemitteln erforderlich. Unter Scherbelastung wird das Netzwerk aufgebrochen und baut sich in Ruhe ohne Rückdeformation (Elastizität) wieder auf. Dieses Verhalten ähnelt dem der Anlagerung niedermolekularer Polymere, wobei die Übergänge der in der Praxis existierenden Systeme fließend sind.

Die Filmbildung selbst kann wie folgt wiedergegeben werden /61/: Mit fortschreitender Abdunstung von Wasser und flüchtigen Anteilen steigt der Festkörpergehalt in der applizierten Schicht kontinuierlich an, die Partikel werden zunehmend verdichtet. Es bilden sich wassergefüllte Kapillare aus, die sich mit weiterer Abdunstung verlieren und so zur Kompaktierung der Partikel führen. Sowohl Anziehungs- als auch Abstoßungskräfte wirken gleichzeitig, hervorgerufen unter anderem von Kapillarkräften, van der Waals-Kräften oder Coulomb`sche Abstoßungskräften. Jede dieser Kräfte lässt sich für verschiedene Dispersionen berechnen oder messen. Koaleszenz tritt auf, wenn die Abstoßungskräfte kleiner den Anziehungskräften sind. Durch Diffusion von Polymermolekülen zwischen den Partikeln entsteht ein isotroper Polymer-Film, aus dem das Restlösemittel ausdiffundiert und an der Oberfläche verdunstet. Hier unterscheidet sich das Verhalten von Pulver-Slurry grundsätzlich von konventionellen Wasserlacken. Nach der Kompaktierung der Pulverpartikel liegen diese als deponierte Pulverschicht vor, die Filmbildung und Vernetzung des Films erfolgt erst im Trockner.

6.3.2 Rheologische Charakterisierung des Nassfilms

6.3.2.1 Versuchsdurchführung

Um die direkte Messung im Nassfilm zu ermöglichen, wird auf ein Hintergrundblech appliziert, in welches kreisförmige Platten mit einem Durchmesser von 120 mm integriert sind, die nach der Applikation entnommen und direkt im Rheometer als Grundplatte fixiert werden können (Abb. 6.7). Verwendet man ein Platte-Platte-Messsystem, besteht zudem die Möglichkeit, den Messspalt an die applizierte Schichtdicke anzupassen. Auf diese Weise kann das Materialverhalten auch nach definierten Abdunstzeiten analysiert werden. Ist die Probe als Grundplatte im Rheometer fixiert, wird durch die von oben aufgesetzte Messgeometrie und eine zusätzliche Lösemittelfalle die weitere Abdunstung von Lösemitteln verhindert. Der momentane Abdunstgrad wird gewissermaßen eingefroren.



Abb. 6.7: Rheologische Charakterisierung der Nassfilmeigenschaften.

Diese Anordnung ermöglicht somit Messungen von Materialeigenschaften, die aufgrund der Applikationsbedingungen dem tatsächlichen Zustand der Serienlackierung entsprechen. Einschränkend ist die Zeitspanne zwischen Ende der Applikation und Beginn der Messung zu erwähnen. Da die erforderlichen Schritte wie die Entnahme der Grundplatte, die Fixierung im Rheometer sowie die Anfahrt der Messposition aber in 1,5 min ausgeführt werden konnten, wurde dieser Zeitablauf konstant gehalten.

Ausgehend von einer Standardeinstellung der Applikationsparameter wird in den folgenden Versuchen die Drehzahl im Bereich zwischen 30.000 und 60.000 min⁻¹ variiert, um den Einfluss unterschiedlicher Tropfengrößenverteilungen auf das rheologische Verhalten zu untersuchen. Insbesondere Unterschiede im Strukturaufbau und des Verlustfaktors tan δ (Verhältnis von Speicher- zu Verlustmodul) beeinflussen den Lackfilmverlauf und sollen durch Oszillationsmessungen im LVE-Bereich bestimmt werden. Um eine konstante Schichtdicke bei variabler Drehzahl zu erreichen, wird die Förderergeschwindigkeit geringfügig angepasst.³ Soweit nicht anders beschrieben, gelten die Parametereinstellungen aus Tabelle 6.4. Die für die einzelnen Messungen verwendeten Messgeometrien und Einstellungen des Rheometers sind im Anhang zusammengefasst.

³ Bei sonst gleichen Einstellungen wird einzig die Förderergeschwindigkeit zwischen 1.0 m/min (bei DZ 30.000 min⁻¹) und 1,3 m/min (bei DZ 60.000 min⁻¹) variiert.

6.3.2.2 Ergebnisse

Entsprechende Messungen nach der Applikation mit der Standardeinstellung zeigt Abb. 6.8. Deutlich zu erkennen ist der höhere Verlustmodul in der Probe, hier überwiegen die viskosen Materialeigenschaften, d.h. das Material ist fließfähig. Liegen Verlust- und Speichermodul auf gleichem Niveau oder steigt G⁴ sogar über G⁴, so ist das ein Beleg für eine Strukturausbildung im Material, die Fließvorgänge erschwert bzw. ganz unterbindet. Für einen guten Verlauf der Oberfläche ist das viskose Verhalten erwünscht. Die gemessene komplexe Viskosität liegt auf dem Niveau der Scherviskosität, die in den vorangegangenen Kapiteln bestimmt wurde. Das Ansteigen der Materialviskosität während der Messung kann durch eine Störung der Struktur beim Eintauchen der Messgeometrie hervorgerufen werden, die sich zeitlich verzögert wieder aufbaut.



Abb. 6.8: Oszillationsmessung bei Standardeinstellung des Zerstäubers $(DZ = 50.000 \text{ min}^{-1}, \text{FM} = 150 \text{ ml/min}, \text{LL} = 120 \text{ Nl/min}).$

Ausgehend von der Oszillationsmessung bei der Standardeinstellung wird im nächsten Schritt die Drehzahl im Bereich 30.000 - 60.000 min⁻¹ variiert, um den Einfluss der unterschiedlichen Abdunstung auf das Materialverhalten im Film darzulegen. Wie in Abb. 6.9 gezeigt wird, können überraschender Weise keine tendenziellen Unterschiede im Materialverhalten als Funktion der Applikationsparameter festgestellt werden. Dieses Ergebnis steht zunächst in einem Widerspruch zu den Schermessungen, die im vorangegangenen Kapitel sehr deutliche Unterschiede bei unterschiedlichen Abdunstraten ergaben. Um zu klären, ob diese Ergebnisse durch abweichendes Verhalten im LVE-Bereich bzw. im Scherbereich des Materials auftreten, wird ein Amplitudensweep durchgeführt. Diese Oszillationsmessung startet im LVE-Bereich und geht langsam in Deformationen über, die einer Scherbelastung entsprechen.



Abb. 6.9: Materialstruktur nach Applikation mit unterschiedlichen Drehzahlen.

Abb. 6.10 gibt das Ergebnis des Amplituden-Versuchs wieder. Bei kleinen Deformationen im LVE-Bereich liegen alle Proben auf demselben Niveau. Übersteigen die Deformationen jedoch einen gewissen Betrag, geht die Belastung der Probe von einer elastischen Deformation der Struktur zunehmend in eine oszillierende Scherbelastung über. Die komplexe Viskosität sowie beide Module fallen stetig. In diesem Übergangsbereich ist zumindest tendenziell ein Unterschied zwischen den mit unterschiedlichen Tropfengrößen applizierten Proben zu erkennen. Mit der Drehzahl 30.000 min⁻¹ erhält man die kleinsten Werte. Man kann das Materialverhalten demnach in zwei Bereiche unterteilen: Bei geringen äußeren Kräften im LVE-Bereich zeigen alle Proben unabhängig von der Applikation sehr ähnliche. viskos dominierte Materialeigenschaften. Unter Scherbelastung dagegen machen sich die Applikationsbedingungen in Form stark unterschiedlicher Viskositätswerte bemerkbar.



Abb. 6.10: Amplituden-Versuch nach Applikation mit unterschiedlichen Drehzahlen.

Der in Abb. 6.11 dargestellte Versuch soll Aufschluss darüber geben, auf welche Weise sich die Materialeigenschaften im Film mit zunehmender Abdunstung des Lösemittels Wasser ändern. Um neben den Aussagen über die Scherviskosität auch eine Änderung in der Struktur festzustellen, wird eine Oszillationsmessung direkt mit einem anschließenden Scherversuch gekoppelt. Nach der Applikation bleiben die Proben zunächst die gewünschte Abdunstzeit in der klimatisierten Lackierkabine. Anschließend werden die Probenträger zur Vermessung in das Rheometer eingebracht, das Programm startet mit der Oszillationsmessung. Auch in diesem Fall zeigen sich im LVE-Bereich keine Unterschiede in der Materialstruktur, während im Scherbereich die Viskosität erwartungsgemäß mit längerer Abdunstzeit ansteigt. Der Verlustfaktor tan δ liegt bei allen Proben im Bereich überwiegend viskoser Materialeigenschaften.

Da im LVE-Bereich keine deutlichen Unterschiede zu detektieren sind, stellt sich die Frage nach den Vorgängen im Übergangsbereich von elastischen Deformationen hin zum viskosen Fließen. Diese werden im Allgemeinen durch die Fließgrenze beschrieben. Dabei zeigen sich bei langsamer Erhöhung der Schubspannung zunächst elastische Deformationen, die in ein Fließen übergehen. Berechnet man zu jeder Schubspannung die aktuelle Viskosität, erhält man, wie in Abb. 6.12 dargestellt, im Übergangsbereich ein Maximum der Viskositätskurve /62/.



Abb. 6.11: Materialeigenschaften vergleichend im Oszillations- und Scherversuch.

Während das Ausgangsmaterial eine Nullviskosität η_o und damit keine Fließgrenze aufweist, bilden die applizierten Proben ein Viskositätsmaximum aus. Dies deutet auf die Bildung einer Struktur im Material, die im Bereich elastischer Deformationen zunächst ausgedehnt wird (Viskositätsanstieg) und bei weiterer Deformation, also mit steigender Schubspannung, durch Abreissen von Bindungen schließlich abgebaut wird. Das Viskositätsmaximum markiert den Übergang in ein gleichmäßiges Fließen. Mit zunehmender Abdunstung während der Applikation (bei steigender Drehzahl) wächst das Viskositätsmaximum an und verschiebt sich zu höheren Schubspannungen.

Der Ausdruck Fließgrenze scheint angesichts des geringen Niveaus des Viskositätsmaximums nicht angebracht. Abbildung 6.13 zeigt den Wasserbasislack im Vergleich zu Pulver-Slurry. Bei kleinen Schubspannungen liegt die Viskosität des Basislackes deutlich über der des Pulver-Slurry-Materials.



Abb. 6.12: Fließverhalten bei kleinen Schubspannungen.



Abb. 6.13: Fließgrenze nach Applikation von WBL und Pulver-Slurry.

Um das Ablaufen der Lackschicht an vertikalen Flächen zu vermeiden, muss der Strukturaufbau bei thixotropen Lacken sehr schnell erfolgen. Wie eingangs erwähnt, vergehen von der Applikation bis zur Messung im Rheometer 1,5 min. Dass sich der Strukturaufbau deutlich schneller vollzieht, ist in Abb. 6.14 dargestellt. In diesem Beispiel wird das Lackmaterial nach der Applikation nochmals mit einer Deformationsrate von 100 s⁻¹ vorgeschert, anschließend wird die Scherrate auf 6.000 s⁻¹ erhöht und dann der Strukturaufbau in Ruhe mittels Oszillationsmessung gemessen. Innerhalb der ersten 5 s nach der Scherbelastung ist die Viskosität von ca. 120 mPas bereits wieder auf 1000 mPas angestiegen.



Abb. 6.14: Strukturaufbau nach Applikation.

6.3.2.3 Rheologisches Verhalten im Nassfilm

Die Messungen im Nassfilm haben gezeigt, dass das applizierte Pulver-Slurry-Klarlackmaterial überwiegend viskose Eigenschaften besitzt. Der Verlustmodul G" ist unabhängig von den Applikationsbedingungen durchweg größer als G'. Durch den geringen elastischen Anteil G' bleibt der Film fließfähig, der Klarlackfilm kann verlaufen.

Da die Scherviskosität bei der Bestimmung der Abdunstrate eine deutliche Abhängigkeit von den Applikationsbedingungen zeigt, wird dieser Zusammenhang auch bei Oszillationsmessungen erwartet. Diese zeigen jedoch keine Unterschiede im Materialverhalten als Funktion der Applikationsparameter. Vielmehr können bei geringen äußeren Kräften im LVE-Bereich unabhängig von der Applikation sehr ähnliche, viskos dominierte Materialeigenschaften nachgewiesen werden.

Die differierende Abdunstung von Wasser ändert demnach die Ruhestruktur im Material kaum, Auslenkungen im LVE-Bereich führen zum selben Ergebnis. Erst mit Überschreiten des LVE-Bereichs macht sich eine dichtere Packung im lösemittelärmeren Film durch höhere Scherviskositäten bemerkbar. Für das Verlaufsverhalten nach der Applikation, das unter sehr geringen Belastungen abläuft, ist daher keine Abhängigkeit von den Applikationsbedingungen zu erwarten. Diese These wird im folgenden Kapitel untersucht.

Einzig die Bestimmungen zur Fließgrenze zeigen bei geringen Belastungen unterschiedliches Materialverhalten, wenn auch die Größenordnung dieses Viskositätsmaximums im Vergleich zum Basislack als gering einzustufen ist. Berechnet man die Schubspannung im Material nach Gleichung 6.2 mit Randbedigungen wie sie nach der Applikation vorliegen (Tabelle 6.6), so erhält man Schubspannungswerte kleiner 0,01 Pa im waagrechten Fall. Diese geringen Schubspannungen lassen sich zwar messtechnisch nicht umsetzen, liegen aber in einem Bereich, deutlich bevor das Viskositätsmaximum durchlaufen wird. Kapitel 6.3.3 wird zeigen, ob diese geringen Unterschiede im Fließübergang ausreichen, um den Verlauf zu beeinflussen.

Größe	Einheit	Eingesetzter Wert	
Oberflächenspannung σ	[N/m]	0,036	
Mittlere Schichtdicke sm	[µm]	120	
Tiefe t _P	[µm]	20	
Wellenlänge λ_w	[m]	0,01	
Resultierende Schubspannung τ < 0,01 Pa			

Tabelle 6.6: Berechnung der Schubspannung im Film.

Darüber hinaus kann gezeigt werden, dass wenige Sekunden nach der Applikation die Struktur bereits wieder einen Wert größer 1000 mPas erreicht hat. Die sich einstellende Ruhestruktur ist nach ca. 20 s nahezu aufgebaut. Dies stimmt mit Ergebnissen überein, die bei der Untersuchung des Verlaufsverhaltens verschiedener Lacke erhalten wurden /63/. Hier zeigen die untersuchten Lacksysteme unterschiedliche Regenerationszeiten zwischen 14 und 60 s, wobei aber bei allen Lackproben der Verlauf nur mit den Viskositätswerten nach kurzen Zeiten korreliert. Der Verlauf der Oberfläche findet demnach in den ersten 10 - 30 s nach der Applikation statt.

6.3.3 Optische Charakterisierung des Nassfilms

Die durchgeführten rheologischen Analysen zeigen bei geringen Materialdeformationen im LVE-Bereich keine signifikanten Unterschiede im Materialverhalten zwischen verschiedenartig applizierten Lackproben. Dies lässt den Schluss zu, dass sich der ebenfalls bei geringen Belastungen abspielende Materialverlauf sehr ähnlich darstellt. Weitere Eingangsgrößen sind neben den Materialeigenschaften das Ausgangsgebirge aufgrund der statistischen Überlagerung der Lacktröpfchen bei der Filmbildung. So entsteht durch ein gröberes Tropfenspektrum eine stärker ausgebildete Eigenstruktur (Ausgangsgebirge). Andererseits gelangt das Lackmaterial aufgrund der geringeren Lösemittelausdunstung mit höherem Lösemittelanteil und damit nasser auf das Werkstück. Die Viskosität des Films ist niedriger, der Eigenverlauf (Einebnung des momentane Ausgangsgebirges) wird begünstigt. Um die tatsächliche. Oberflächenstruktur festzuhalten, wird in den folgenden Versuchen der Nassfilm nach verschiedenen Zeiten optisch vermessen und bewertet.

6.3.3.1 Versuchsaufbau

Mit dem Wave-Scan steht ein standardisiertes optisches Messgerät zur Bewertung von Oberflächen zur Verfügung (vgl. Kap 2). Um die Struktur der Oberfläche abzutasten, wird das Wave-Scan üblicherweise 10 cm über die zu bewertende, trockene Lackschicht bewegt. Die Wegmessung erfolgt durch eine der Rollen des Messgerätes. Der Umstand, dass die frisch applizierte Pulver-Slurry-Nassschicht reflektiert, ermöglicht prinzipiell die Messung der Struktur auch in diesem Zustand. Allerdings muss dabei gewährleistet sein, dass die Rollen sowie das Gerät nicht verschmutzen. Zu diesem Zweck wurde eine Messvorrichtung angefertigt, die in den Nassfilm gelegt wird. Eine 2 cm breite Aussparung in der Mitte der Messvorrichtung ermöglicht nun die Vermessung der unbeeinflussten, darunter liegenden Oberfläche (Abb. 6.15).

Die Applikation auf Hochglanzbleche (Tabelle 6.7) erfolgt an einem vertikalen Hintergrundblech. Unmittelbar nach der Applikation wird das beschichtete Blech in der klimatisierten Spritzkabine in eine horizontale Position gebracht und die Schablone fixiert. Die Zeitdauer von Applikationsende bis zur ersten Verlaufsmessung liegt bei ca. 30 s und wird bei der Darstellung des zeitabhängigen Verlaufswertes berücksichtigt.



Abb. 6.15: Schematischer Aufbau zur Verlaufs-Messung im Nassfilm.

Lackierparameter:	Sollwert:	Einheit:	Variaitionsbreite:
Lenkluft:	120	NI/min	
Farbmenge:	150	ml/min	
Drehzahl:	50.000	min⁻¹	30.000 - 60.000
Hochspannung:	450	μA	
Lackierabstand:	225	mm	
Bahngeschw.:	200	mm/s	
Schichtstärke:	45	μm	

 Tabelle 6.7:
 Applikationsparameter bei Verlaufsmessungen Pulver-Slurry.

6.3.3.2 Ergebnisse

Abbildung 6.16 zeigt das Verlaufsverhalten von Pulver-Slurry auf Hochglanzblech nach Applikation mit der Standarddrehzahl 50.000 min⁻¹. Während die Ausgangsstruktur des Films in den ersten zwei Minuten nach der Applikation deutlich abgebaut wird, stellt sich nach ca. vier Minuten ein zeitlich konstanter Verlaufswert ein, die Oberfläche ändert sich kaum mehr. Messungen bis 12 Minuten nach der Applikation bestätigen dies. Der Verlaufswert knapp unter drei Longwave Einheiten repräsentiert den Eigenverlauf des Pulver-Slurry-Nassfilms auf glattem Untergrund. Aufgrund der flüssigkeitsähnlichen Oberfläche können keine Strukturen im Shortwave Bereich detektiert werden.

Während Abb. 6.16 das Verlaufsverhalten nach der Applikation mit konstanter Drehzahl darstellt, zeigt Abb. 6.17 den zeitlichen Ablauf des Filmverlaufs anhand von Proben, die mit unterschiedlicher Drehzahleinstellung beschichtet werden. Die Unterschiede zwischen den Messreihen liegen im Bereich der Messgenauigkeit, ein Einfluss der Tropfengröße bzw. Abdunstrate auf den Verlauf lässt sich daraus nicht ableiten. Vielmehr bestätigt sich die Annahme, dass aufgrund der geringen Unterschiede bei den rheologischen Messungen im LVE-Bereich auch das Verlaufsverhalten ähnlich sein muss.



Abb. 6.16: Verlauf (LW) in Abhängigkeit der Zeit bei DZ 50.000 min⁻¹.



Abb. 6.17: Verlauf (LW) in Abhängigkeit der Zeit bei verschiedenen Drehzahlen.

In Abb. 6.18 sind die Verlaufswerte nach der Trocknung der Lackschicht dargestellt. Im Vergleich zum Nassfilm hat sich der Verlauf der Trockenschicht unter allen Applikationsvariationen gleichermaßen verschlechtert. Aufgrund des glatten Untergrundes kann jedoch der Einfluss der Schrumpfungsabbildung vernachlässigt werden. Um die Verlaufsmechanismen des Pulver-Slurry-Klarlacks im Anschluss an die Applikation zu interpretieren, soll an dieser Stelle auf den Filmbildungsprozess von eingegangen werden. Die Besonderheit des Pulver-Slurry-Pulverlacken Klarlackmaterials liegt gerade im Übergang vom Nassfilm zur trockenen Pulverschicht, der im Zwischentrockner bei 50 °C stattfindet.

Das Sintern stellt die erste Phase der Filmbildung von Pulverlacken durch Zusammenwachsen der Pulverpartikel bei Erwärmung dar. Treibende Kraft ist dabei die Differenz der freien Energie zwischen Ausgangs- und Endzustand durch Reduzierung der äußeren Begrenzungs- und inneren Oberflächen. Aufgrund des sehr kleinen Korngrößenspektrums und der Trocknung aus dem Nassfilm heraus sind die Zwischenräume im Pulver-Slurry-Haufwerk gegenüber herkömmlichen Pulverlacken stark reduziert. Für den Verlauf wirkt sich dies positiv aus, da mit abnehmender Größe und Inhomogenität der Pulverpartikel naturgemäß die Oberflächenqualität nach dem Sintern zunimmt. Ein Materietransport durch viskoses Fließen oder Diffusion ist nur in geringerem Umfang erforderlich.

Bei weiterer Temperaturerhöhung geht das Material schließlich in eine Schmelze über. Die Schmelzviskosität ist dabei unmittelbar vom Gewichtsmittel M_W des Harzes abhängig und wird von zwei gegenläufigen Prozessen beeinflusst. Mit steigender Temperatur sinkt die Viskosität der Schmelze zunächst. Wie in Abb. 6.19 anhand eines Pulverlackes gezeigt, überwiegen in dieser Phase die viskosen Eigenschaften, das Material kann zu einem geschlossenen Film verlaufen. Lokale Unregelmäßigkeiten bei der Applikation und der unvollständige Fluss der Schmelze sind die Ursache für verbleibende Welligkeiten im Lackfilm. Die zeitlich verzögert einsetzende Vernetzung kompensiert nach und nach den Viskositätsabfall und führt schließlich zu einem Anstieg der Viskosität. Die Eigenschaften des Lackfilms lassen sich nach ca. 400 s als elastischen Festkörper mit abnehmenden, viskosen Anteilen beschreiben. Die Materialeigenschaften erreichen schließlich einen Plateauwert /31/.



Abb. 6.18: Verlaufswerte (LW) verschiedener Drehzahleinstellungen nach Trocknung.



Abb. 6.19: Materialeigenschaften während der Trocknung.

Im Gegensatz zu den Messungen im Nassfilm sind in der Lackschicht nach der Trocknung auch Strukturen im Bereich der kurzen Welligkeit (Shortwave) festzustellen. Diese treten unabhängig von den Applikationsbedingungen bei allen ausgewerteten Beschichtungen auf und sind auf den Lackfilmverlauf während der Trocknung zurückzuführen. Ein signifikanter Unterschied in der erreichbaren Oberflächenqualität kann nicht festgestellt werden (Abb. 6.20).





6.3.3.3 Diskussion der Einflussgrößen auf den Verlauf

Das nach der Applikation viskose Material verläuft in den ersten Minuten nach der Applikation und baut so seine Ausgangsrauigkeit im Longwave Bereich ab. Ein Einfluss der Tropfengrößen auf die Ausgangsrauhigkeit konnte messtechnisch nicht nachgewiesen werden. Darüber hinaus zeigen unterschiedliche Abdunstraten keinen Einfluss auf den Verlauf und bestätigen somit die aus den rheologischen Messungen im LVE-Bereich resultierenden Erwartungen. Der Eigenverlauf des Pulver-Slurry-Klarlackmaterials liegt im Nassfilm bei ca. 3 LW-Einheiten, nach der Trocknung steigt dieser Wert auf 6-8 LW-Einheiten.

Die Welligkeit im Bereich kurzer Störungen (Shortwave) tritt erst nach der Trocknung auf und wird auf die Filmbildungsmechanismen während der Trocknung zurückgeführt. Hier können Schrumpfungsvorgänge oder lokale Viskositätsunterschiede zur Bildung dieser Struktur führen.

Die gefundenen Zusammenhänge können auch auf die Applikation des Klarlacks sowie den Gesamtlackschichtaufbau übertragen werden, wie folgende Messungen belegen /64/. In Abb. 6.21 ist der Einfluss des mittleren Tropfendurchmessers auf die LW-Werte dargestellt, Abb. 6.22 zeigt die erlangten SW-Werte, jeweils bei konstanten Bedingungen während der Basislackapplikation. Anschaulich sind die größeren Tropfendurchmesser bei geringer Drehzahl. Mit steigender Drehzahl nehmen diese ab, ein deutlicher Trend zu besserem Verlauf bei kleineren Tropfendurchmessern kann jedoch nicht festgestellt werden. Der erzeugte Verlauf der Oberfläche hängt also nicht direkt von der Qualität der Zerstäubung des Klarlacks ab.



Abb. 6.21: Einfluss des mittleren Tropfendurchmessers auf die Longwave-Werte.



Abb. 6.22: Einfluss des mittleren Tropfendurchmessers auf die Shortwave-Werte.

Wie schon bei der Applikation auf Hochglanzbleche ist demnach auch bei den Komplett-Beschichtungen keine signifikante Veränderung der Oberflächeneigenschaften durch Änderung der Drehzahl bzw. Zerstäubungsfeinheit zu beobachten. Vielmehr scheint der Untergrund, auf den appliziert wird, die Oberflächengüte maßgeblich zu bestimmen. Der direkte Vergleich der Verlaufswerte auf glattem mit Originalaufbau, verdeutlicht Untergrund, denen im dies. Da die Schrumpfungsabbildung die Welligkeit des Untergrundes noch verstärkt, liegen weitere Optimierungspotenziale zur Verlaufsverbesserung gerade in den darunterliegenden Lackschichten. Diese werden zwar hauptsächlich auf technologische und optische Eigenschaften hin optimiert, zukünftige Entwicklungen sollten aber auch den Verlauf dieser Schichten berücksichtigen, da die Klarlacke einen welligen Untergrund unabhängig von der Applikationstechnik nur bedingt kompensieren können.

7 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund steigender Farbvolumenströme, ermöglicht durch den Einsatz von Lackierrobotern und der Einführung neuer Lacksysteme, können erforderliche Optimierungspotenziale in der Lackiertechnik nur durch Erarbeitung von grundlegenden Kenntnissen der einzelnen Teilprozesse erschlossen werden. Auch für die Simulation des Lackierprozesses ist die Abbildung dieser Teilprozesse in physikalisch fundierten Modellen von größter Bedeutung, um allgemeingültige Module zu erhalten. Zudem sind bisherige empirische Untersuchungen oftmals nicht auf andere Lacksysteme übertragbar, da die verfahrenstechnischen Applikationsparameter direkt mit dem Lackierergebnis verknüpft werden, ohne die physikalischen Zusammenhänge der einzelnen Teilschritte zu berücksichtigen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das rheologische Verhalten des Klarlacksystems Pulver-Slurry in den einzelnen Prozessschritten der Lackapplikation bestimmt. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde der Lackierprozess zunächst in seine einzelnen Teilschritte zerlegt. Durch experimentelle und theoretische Untersuchungen konnten die physikalischen und strömungsmechanischen Randbedingungen in den Teilprozessen ermittelt werden. Die daraus abgeleitete Fluidbeanspruchung führte schließlich zu den rheologischen Eigenschaften der betrachteten Materialien, die den Prozessablauf und das Lackierergebnis maßgeblich bestimmen. Um die entwickelten Methoden und Berechnungen dieser Arbeit zu verifizieren, wurde neben Pulver-Slurry auch ein Wasserbasislack sowie Wasser analysiert.

Aus rheologischer Sicht konnte der Zerstäubungsvorgang mit den auftretenden, extrem hohen Scherraten als maßgebliches Ereignis im Gesamtprozess bestimmt werden. Unabhängig von den scherinduzierten Eigenschaften des Materials bis zu diesem Zeitpunkt wurde das weitere Verhalten nun durch die Belastung in diesem Teilprozess bestimmt.

Um Aussagen über die dynamische Viskosität auf dem Glockenteller treffen zu können, wurde zunächst die Filmhöhe sowie die zugehörige Filmgeschwindigkeit ermittelt. Zur Bestimmung dieser Größen wurde ein Berechnungsansatz für die Filmströmung Newton`scher Fluide auf rotierenden Glocken für strukturviskose Lackmaterialien erweitert. Die Berechnungsergebnisse zeigten, dass die resultierende Viskosität bei den vorhandenen, hohen Scherraten auf sehr geringe Werte abfiel. Die in der Qualitätssicherung verwendeten Scherraten wurden dabei bei weitem überschritten und lieferten zunächst keinen Hinweis auf das zu erwartende Zerstäubungsergebnis. Zur Verifikation der Filmströmungsberechnung wurde ein Messaufbau entwickelt, der es ermöglichte, die Filmdicke unter Prozessbedingungen zu bestimmen. Die mit dieser Methode erhaltenen Filmdicken stimmten im Rahmen der Messgenauigkeit mit den berechneten Werten überein. Mit dieser Versuchsanordnung konnten zudem kritische Zustände wie der Einschaltvorgang oder das Lackieren mit geringen Farbmengen analysiert werden. Im letzteren Fall war aufgrund der sehr geringen, rechnerischen Filmdicken keine vollständige Benetzung der Glockentelleroberfläche zu erwarten. So konnte tatsächlich festgestellt werden, dass für eine vollständige Benetzung des Glockentellers und der Verteilerscheibe ein Farbvolumenstrom von wenigstens 100 ml/min erforderlich ist, um im Lackierbetrieb Fehler durch angetrocknete Partikel zu vermeiden. Gerade für schnell drehende Rotationszerstäuber liegen kaum Erkenntnisse zu diesen Fragestellungen vor, die vor allem zur Ableitung von Maßnahmen zur Optimierung und Weiterentwicklung von Glockentellern benötigt werden.

Im Hinblick auf eine Steigerung der zu verarbeitenden Farbmengen wurde die Einwirkung der Drehzahl auf die resultierende Viskosität und damit die Filmdicke berechnet. So konnte bei einer Verdopplung der Farbmenge von einer gleichbleibenden Filmdicke auf dem Glockenteller ausgegangen werden, falls gleichzeitig die Drehzahl erhöht wurde.

Durch eine umfangreiche Parametervariation wurde das Ablöseverhalten der verschiedenen Fluide ermittelt. Dabei konnten in Abhängigkeit der Farbmenge die klassischen Zerfallsmechanismen, direktes Abtropfen, Faden- und Lamellenzerfall, beobachtet werden. In dem für Hochrotationszerstäuber typischen Drehzahlbereich von größer 40.000 min⁻¹ war die Ausbildung von Fäden aufgrund des hohen Geschwindigkeitsgefälles zwischen Glockentellerkante und Umgebungsluft deutlich eingeschränkt, hier setzte sich ein in der Literatur beschriebener "atomization mode" durch. Die Ausbildung von Fäden wurde durch viskoelastische Materialeigenschaften verstärkt, wie am Beispiel des betrachteten Wasserbasislackes gezeigt werden konnte.

Die anschließend bestimmten Tropfengrößen des Wasserbasislackes lagen unterhalb des Pulver-Slurry-Materials auf dem Niveau von Wasser. Hier zeigte sich, dass elastische Eigenschaften nicht notwendigerweise zu einer Vergrößerung des Tropfenspektrums führen müssen. Vielmehr nahmen die Durchmesser der zähelastischen Fäden mit zunehmender Länge ab und zerfielen schließlich bei geringem Fadendurchmesser in vergleichsweise kleine Tropfen. Es gelang die Materialgrößen, die den Zerfall beeinflussen, zu ermitteln, um zukünftig das Zerstäubungsverhalten von Lacken schon anhand rheologischer Messungen bewerten zu können. Für die betrachteten Lacksysteme konnte derselbe lineare Zusammenhang zwischen Filmdicke und mittlerer Tropfengröße nachgewiesen werden. Im gesamten Parameterbereich von Drehzahl und Farbmenge entsprach der mittlere Tropfendurchmesser der dreifachen Schichtdicke.

Die Charakterisierung des Nassfilms ergab eine deutliche Abhängigkeit der Scherviskosität von den Applikationsbedingungen und damit der Abdunstung während des Tropfenfluges. Dagegen konnten bei den Oszillationsmessungen im linearviskoelastischen Bereich keine Unterschiede aufgrund unterschiedlicher Applikationseinstellungen nachgewiesen werden. Entsprechend zeiaten die Verlaufsmessungen im nassen Film unmittelbar nach der Applikation keine Abhängigkeit von der Zerstäubungsfeinheit. Verlaufswerte und Dauer des Eigenverlaufs waren im betrachteten Bereich von der eingestellten Zerstäuberdrehzahl unabhängig und bestätigten die Übertragbarkeit der Rheometermessungen bei kleinsten Materialdeformationen auf das Verlaufsverhalten.

Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Berechnungsmodellen und Messmethoden konnten die rheologischen Eigenschaften von Pulver-Slurry für jeden Abschnitt des Gesamtprozesses dargestellt werden. Durch gleichzeitige Betrachtung eines Metallic-Wasserbasislackes konnte das Spektrum der zu bewertenden rheologischen Eigenschaften erweitert und die Methodik an einem weiteren Lacksystem verifiziert werden. Mit den so gewonnenen Ergebnissen wurde wichtiges Grundlagenwissen zu den Teilschritten der Lackapplikation bereitgestellt, das nun zum einen als Eingangsdaten für Simulationsrechnungen eingesetzt werden kann und zum andern Anhaltspunkte für zuküntige Zerstäuberentwicklungen liefert.

Weitere Fragestellungen ergeben sich vor allem hinsichtlich der Verbesserung des Lackfilmverlaufs. Unabhängig vom verwendeten Klarlacksystem sollte auch das Verlaufsverhalten der darunterliegenden Schichten betrachtet werden. Beginnend mit der Blechrauigkeit bildet sich auf der Karosse nach KTL und den folgenden Lackschichten eine Eigenstruktur aus, die durch Anpassung der Applikationstechnik an die Klarlackapplikation nicht mehr kompensiert werden kann. Optimierungspotenziale können hier nur durch ganzheitliche Verbesserung im Gesamtaufbau erschlossen werden.

8 Literaturverzeichnis

- /1/ Kraus, R.: *Anforderungen an neue Klarlacksysteme für Pkw-Lackierungen.* Vortragsmanuskript zur Tagung Praxis-Forum, Bad Nauheim, 1996
- /2/ Svejda, P.: Berechnung charakteristischer Spritzbild- und Qualitätsmerkmale beim Lackieren – Einsatz neuronaler Netze. Berlin u.a.: Springer, 1998. Zugl. Stuttgart, Universität, Diss., 1998
- /3/ Große Ophoff, M.: Ökologischer Vergleich- Gegenüberstellung unterschiedlicher Lacksysteme. In Metalloberfläche (MO) 50 (1996) Nr. 3, S. 196-199
- Harsch, M.: Modellierung und Optimierung verfahrenstechnischer
 Prozesse in der Lackiertechnik. Aachen, 1998. Zugl. Stuttgart, Universität, Diss., 1998
- /5/ DFO (Deutsche Forschungsgemeinschaft für Oberflächenbehandlung e.V.):
 Forschungsprogramm zur Weiterentwicklung der Pulverlackiertechnik.
 Düsseldorf, 1997
- /6/ Statistisches Bundesamt: Produktion der verschiedenen Lackarten in Deutschland 1999 nach Menge und Wert sowie prozentuale
 Veränderungen gegenüber 1998. Wiesbaden. In: Ondratschek, D.: Jahrbuch besser lackieren! 2001. Hannover: Vincentz Verlag, 2000
- /7/ Mercedes-Benz AG: Umweltverträgliche Lackierung bei Mercedes-Benz.Firmenschrift, Stuttgart-Untertürkheim, 1993
- /8/ Thaler, J.: *Pulverklarlack Eine glänzende Idee geht in Serie.* Vortragsmanuskript zur DFO-Automobiltagung, Bamberg, Oktober 1997
- /9/ N.N.: *Nachgefragt Pulverklarlack ein Jahr nach dem Serienstart.* In: JOT (1998) Nr.9, S.10-12
- /10/ Kraus, R.: Der neue Lackierprozess bei Daimler-Benz in Rastatt (A-Klasse). DFO-Automobiltagung, Bamberg, Oktober 1997
- /11/ Sickert, St.; Biallas, B.: Der neue Lackierprozess Daimler-Benz in Rastatt aus Sicht des Lackherstellers. DFO-Automobiltagung, Bamberg, Oktober 1997
- /12/ Wimmer, W.: *Eine glänzende Idee im Serienbetrieb*. DFO-Automobiltagung, Bamberg, Oktober 1997

- /14/ Leisin, O.-P.: Diagnose, Optimierung, Überwachung und Regelung von Lackieranlagen. In: Ondratschek, D.: Jahrbuch für Lackierbetriebe 2000.
 Hannover: Vincentz Verlag, 1999
- /15/ Warnecke, H.-J.: *Einführung in die Fertigungstechnik.*, Stuttgart: Teubner, 1990 (Teubner-Studienbücher: Maschinenbau)
- Westkämper, E. (Hrsg.): Null-Fehler-Produktion in Prozessketten:
 Maßnahmen zur Fehlervermeidung und -kompensation. Berlin u.a.:
 Springer, 1996
- /17/ Woltering, J.: *Pulverslurry in der Automobilserienlackierung*. In: JOT (1998) Nr.9, S. 14-22
- /18/ Hund, J. P.: Spray Application Processes. In: Metal Finishing, Vol. 95 (1997) No. 5a
- /19/ Ondratschek, D.: *Jahrbuch für Lackierbetriebe 2000*. Hannover: Vincentz Verlag, 1999
- /20/ Walzel, P.: Zerstäuben von Flüssigkeiten, In: Chem.-Ing.-Tech. 62 (1990) Nr. 12, S. 983-994
- /21/ Luderer, F.: Entwicklung von emissionsarmen, materialsparenden, schadstoffvermeidenden Lackauftragsverfahren für qualitätsgerechte Zweischicht- Serienlackierungen. Abschlußbericht BMFT, KZ: 01 ZH 8923/9, 07/1995
- /22/ Domnick, J.; Svejda, P.: *Auftragswirkungsgrad von Lackzerstäubern.* In: Metalloberfläche (MO) 52 (1998) Nr. 3, S. 194-198
- /23/ Börner, G.; Yamabe, H.: *Direkte und externe Aufladung bei Wasserlack-Hochrotationszerstäubung*. In: I-Lack 67 (1999) Nr. 1, S. 47-50
- /24/ BYK Gardner: Gerätebeschreibung Wave-Scan. Geretsried, 1990
- /25/ Norm DIN 67 530 1982-01: Reflektometer als Hilfsmittel zur Glanzbeurteilung an ebenen Anstrich- und Kunststoffoberflächen.
- /26/ Norm DIN EN ISO 2178 1995-04: Nichtmagnetische Überzüge auf magnetischen Grundmetallen - Messen der Schichtdicke.

/27/	Mezger, T.: Das Rheologie-Handbuch. Hannover: Vincentz, 2000
/28/	Kulicke, W. (Hrsg.): <i>Fliessverhalten von Stoffen und Stoffgemischen.</i> Basel: Hüthig & Wepf, 1986
/29/	Reiner, M.: <i>Rheologie in elementarer Darstellung</i> . 2. Ausgabe. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1959
/30/	Pahl, M.; Gleißle, W; Laun, HM.: <i>Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere.</i> Düsseldorf: VDI, 1995.
/31/	Hohmann, G.: Beschreibung und Beeinflussung der Filmbildung von Pulverlacken durch chemische und verfahrenstechnische Maßnahmen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994. Zugl. Paderborn, Univ., Diss., 1994
/32/	Dombrowski, N.; Lloyd, T.L.: <i>Atomisation of Liquids by Spinning Cups</i> . In: The Chemical Engeneering Journal, 08/1974, S. 63-81
/33/	Hinze, J.O.; Milborn, H.: <i>Atomization of Liquids by Means of a Rotating Cup.</i> In: J. Appl. Mech. (1950) Vol. 17, pp. 145-153
/34/	Fraser, R. P.; Dombrowski, N.; Routley, J.H.: <i>The filming of liquids by spinning cups</i> . In: Chemical Engineering Science 1963 Vol. 18, S. 323-337
/35/	Bell, G. C.; Hochberg, J.: <i>Mechanics of Electrostatic Atomization,</i> <i>Transport and Deposition of Coatings</i> , In:7th. Int. Conf. Org. Coatings, 1981, Athen
/36/	Scholz, T.: Experimentelle Untersuchungen zur Mehrphasenströmung im Sprühkegel eines elektrostatisch unterstützten Hochrotationszerstäubers. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998. Zugl. Bremen, Univ., Diss., 1998
/37/	Corbeels, P.L.; Senser, D.W.; Lefebvre, A.H.: <i>Atomization characteristics of a high-speed rotary-bell paint applicator.</i> In: Atomization and sprays Vol. 2 (1992), pp.87-99
/38/	Bayvel, L.; Orzechowski Z.: <i>Liquid Atomization</i> , London: Taylor & Francis, 1993
/39/	Scheibe, A.: Teilchenbahnberechnung zur Simulation von elektrostatischen Lackiervorgängen mit Hochrotationszerstäubern. Stuttgart, Univ., Diss., 2000
/40/	Pahl, M.; Gleißle, W.; Laun, HM.: <i>Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere.</i> Düsseldorf: VDI-Verl.,1991

/41/	Gleißle, W.: <i>Kurzzeitmessungen zur Ermittlung der Fließeigenschaften von Kunststoffen bis zu höchsten Schergeschwindigkeiten.</i> In: Praktische Rheologie der Kunststoffe / Verein deutscher Ingenieure. Düsseldorf: VDI-Verl., 1978, S. 83-102
/42/	Maxharraj, B.: <i>Robotergestützte Online-Messtechnik.</i> DFO- Automobiltagung, Dresden, Mai 2001
/43/	Marengo, M.: <i>Analisi dell`ìmpatto di gocce su film liquido sottile.</i> Università di Bergamo, Diss., 1996.
/44/	Theissing, P.: <i>Erzeugung von Flüssigkeitsfilmen, Flüssigkeitslamellen und Tropfen durch rotierende Scheiben</i> . Düsseldorf: VDI-Verlag, Forschungsheft 574, 1976
/45/	Mehrhardt, E.: <i>Zerstäubung von Flüssigkeiten mit rotierenden Scheiben.</i> Berlin, Techn. Univ., Diss., 1978
/46/	Goldschmidt, Artur: <i>Glasurit Handbuch.</i> 11., völlig neu bearb. und erw. Aufl Hannover: Vincentz, 1984
/47/	Steigleder, Th.: <i>PDA-Messungen im Sprühstrahl eines</i> <i>Hochrotationszerstäubers.</i> Persönliche Mitteilung, 2001
/48/	Mansour, A.; Chigier, N.: <i>Atomization of non-newtonian liquids.</i> In: ICLASS 94, Rouen, France, July 1994
/49/	Xing, LL; Glass, E; Fernando, R: <i>Parameters influencing the spray behavior of waterborne coatings.</i> In: Journal of Coatings Technology, Vol. 71, No. 890, March 1999
/50/	Domnick, J.; Scheibe, A.; Steigleder, T.; Weckerle, G.: <i>Jet disintegration and droplet formation of high speed rotary bells.</i> 15 th Annual Conference Liquid Atomization and Spray Systems, 5-7 July 1999, Toulouse, France.
/51/	Thomer, KW.: <i>Maßnahmen zum Verbessern der pneumatischen</i> <i>Lackzerstäubung – Teilchengrößenbestimmung im Spritzstrahl.</i> Stuttgart, Universität, Diss., 1981
/52/	Lindenthal, A.: Verbesserung der Effizienz der pneumatischen Lackapplikation mit Hilfe von Phasen-Doppler-Anemometrie- Untersuchungen. Aachen: Shaker,1997. Zugl. Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 1997
/53/	Malvern: System 2600 – Instruction Manual. Herrenberg, 1993 - Firmenschrift

/54/	Domnick, J.; Oehring, M.; Scheibe, A.; Weckerle, G.: <i>Untersuchungen zur</i> <i>Tropfenbildung und zu den Strömungsverhältnissen an</i> <i>Hochrotationszerstäubern.</i> Tagung SPRAY 98, 1998, Essen
/55/	Weber, C.: <i>Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles</i> . Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 11/2, 1931, S. 136-154
/56/	Rayleigh, F. R.: <i>On the instability of jets</i> . Proc. London Math. Soc. 10, 1878, S. 4 - 13
/57/	Schneider, M.: <i>Lackfilmverlauf beim Spritzlackieren.</i> Abschlußbericht, IPA 230979 464, Juni 1990
/58/	Schlüsener, T.: Untersuchungen zum Einfluß der thermo- und hydrodynamischen Vorgänge bei der Lackapplikation und –trocknung auf die Farbtonausbildung wasserbasierter Metallic-Lacke. Darmstadt, Univ., Diss., 2000
/59/	Hester, R.D.; Squire D. R.: <i>Rheology of waterborne coatings.</i> Journal of coatings technology, Vol 69, No. 864, Jan. 1997, S. 109-114
/60/	Schoff, C.K.: <i>Rheology.</i> Federation series on Coatings Technology, Blue Bell, PA, 34, 1991.
/61/	Rynders, R.M.; Hegedus, C.R.; Gilicinski, A.G.: <i>Charakterization of particle coalescence in waterborne coatings using atomic force microscopy.</i> Journal of coatings technology, Vol 67, No. 845, June 1995, S. 59-69
/62/	Marquardt, W.; Petri, HM.: <i>Klassische Methoden sind oft nicht ausreichend.</i> In: Farbe + Lack 103 (1997) Nr. 11, S. 26-31
/63/	Dodge, J. S.: Q <i>uantitative Measures of Leveling.</i> Journal of coatings technology, Vol 44, No. 564, January 1972, S. 72-78
/64/	Weckerle, G.: <i>Einflußgrößen auf das Zerstäubungsverhalten und das</i> Beschichtungsergebnis bei der Applikation von Pulver-Slurry. Stuttgart, Univ., Diplomarbeit, 1997
/65/	Schene, H.: <i>Der Zerstäubungsvorgang beim Lackspritzen</i> . Industrie- Lackier-Betrieb, Bd. 28, 07/1960, S. 207-216
/66/	Baumann, M.: <i>Übersichtsvortrag zu Glockentellergeometrien.</i> Vortragsmanuskript zur DFO-Automobiltagung, Stuttgart, 1996

Anhang

Randbedingungen bei rheologischen Messungen

Messung /		Abb 26	Abb. 3.7	
Vorgabe	ADD. 3.4	ADD. 3.0		
Meßgeometrie	MK 50 mm, 2°	MK 50 mm, 2°	MK 50 mm, 2°	
Meßspalt [mm]	-	-	-	
Amplitude [-]	-	0,001-1	0,01	
Frequenz [1/s]	-	-	60–0,05	
Scherrate [1/s]	-	-	-	
Meßablauf,	1 min Wartezeit,	Frequenz 2 Hz	Vorscherung	
Sonstige Größen	Belastung 400 s,		1 min bei 100 1/s	
	τ = 0,5 Pa;			
	Entlastung 100 s			
Messung	Abb. 4.1	Abb. 4.2	Abb. 4.3	
Messgeometrie	MK 50 mm, 2°	MK 50 mm, 2°	MK 50 mm, 2°	
Messspalt [mm]	-	-	-	
Amplitude [-]	-	0,001-1	0,01	
Frequenz [1/s]	-	-	60–0,05	
Scherrate [1/s]	0,1 - x	-	-	
Messablauf,	x = 1500 (PS)	Vorscherung	Vorscherung	
Sonstige Größen	x = 3000 (WBL)	1 min bei 100 1/s,	1 min bei 100 1/s	
	x = 1000 (2K-CC)	Frequenz 2 Hz		
Messung	Abb. 5.4	Abb. 5.5	Abb. 5.6	
Messgeometrie	variiert	s.u.	MP 75 mm, 0°	
Messspalt [mm]	-	variiert	0,2	
Messablauf,	Siehe Legende in Abb.	Scherrate < 30.000 1/s		
Sonstige Größen	5.4	MP 303 (25 mm);		
		Scherrate > 30.000 1/s		
		MP 313 (50 mm)		

Messung /	Abb 6.9	Abb. 6.9	Abb. 6.10	Abb. 6.11	
Vorgabe	ADD. 0.0			1. Abschnitt	
Messgeometrie	MP 75 mm, 0°	MP 75 mm, 0°	MP 50 mm, 0°	MP 50 mm, 0°	
Messspalt [mm]	0,1	0,1	0,05	0,05	
Amplitude [-]	0,008	0,008	0,0005–10	0,008	
Frequenz [Hz]	5	5	5	5	
Scherrate [1/s]	-	-	-	-	
Messablauf,	-	-	Vorscherung 30 s	-	
Sonstige Größen			bei 100 1/s,		
Messung	Abb. 6.11	Abb 612	Abb 613	Abb 614	
	2. Abschnitt		A00: 0.10		
Messgeometrie	MP 50 mm, 0°	MP 50 mm, 0°	MP 50 mm, 0°	MP 75mm, 0°	
Messspalt [mm]	0,05	0,05	0,05	0,2	
Amplitude [-]	-	-	-	0,005	
Frequenz [Hz]	-	-	-	5	
Scherrate [1/s]	100	-	-	100 / 6000	
Messablauf,		Schubspannung	Schubspannung	Scherung 20 s,	
Sonstige Größen		0,5 – 100 Pa, log	0,05 (0,5) - 100 Pa,	(100 1/s);	
			log	Scherung 20 s,	
				(6.000 1/s);	
				Oszillation 370 s,	

Nach Vorscherung folgt eine Regenerationsphase von 30 s.