

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

Forcierung des Wasserlackeinsatzes durch neue Trocknungsverfahren

Dieter Ondratschek, Matthias Schneider, Harald Vogelsang

Universität Stuttgart
Institut für Industrielle
Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF)

Förderkennzeichen: BWD 99004

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

September 2001

Zusammenfassung

Der Einsatz von umweltfreundlichen Wasserlacksystemen scheitert bei vielen Anwendungen am Trocknungsverhalten der Lackschichten. In vielen kleinen und mittleren Betrieben, z. B. Schreinereien, werden deshalb immer noch Lösemittellacke verarbeitet. Der forcierte Einsatz von Wasserlacken in den unterschiedlichsten Branchen zur deutlichen Reduzierung der VOC-Emissionen ist anzustreben. Jährlich werden in Baden-Württemberg 65.000 Tonnen VOC emittiert. Hiervon können mindestens 60 % durch Einführung umweltfreundlicher Lackierverfahren eingespart werden. Die Trocknung mit thermischer Energie ist kostenintensiv, andererseits dauert die Raumlufttrocknung ohne Energiezufuhr bei Wasserlacken zu lange. Eine Alternative ist die Trocknung mit entfeuchteter Luft. Zur Evaluierung der unterschiedlichen Technologien für die oben genannte Problemstellung wurden theoretische und experimentelle Untersuchungen über das Trocknungsverhalten von Wasserlacken durchgeführt. Aus diesen Untersuchungen sind konkrete Maßnahmen zur Verbesserung bestehender Techniken sowie zum effektiven Praxiseinsatz kostengünstiger Trocknungsverfahren abzuleiten. Für Baden-Württemberg ergeben sich umweltrelevante und wirtschaftliche Vorteile, da es hier zahlreiche kleine und mittlere lackverarbeitende Firmen gibt und ein großes Potenzial an Anlagenherstellern vorhanden ist.

INHALT

1	Einleitung	3
2	Stand der Technik	3
3	Theoretische Grundlagen des Trocknungsvorgangs.....	4
3.1	Begriffe beim Trocknen	4
3.2	Theorie der Trocknung durch erzwungene Konvektion.....	5
4	Experimentelle Versuchsdurchführung.....	8
4.1	Trocknungskanal	8
4.2	Messtechnik für Klima und Luftströmung.....	9
5	Untersuchte Wasserlacke und Substrate.....	10
5.1	Untersuchte Wasserlackssysteme.....	10
5.2	Substrate	10
6	Experimentelle Ergebnisse.....	11
6.1	Abdunstkurven und -zeiten.....	11
6.1.1	Wasserbasislack BASF MB 744	11
6.1.2	Votteler Holzlack.....	12
6.1.3	Beckers Beckqua Hydro-Einschicht-Lack BE 25 9203.....	14
6.2	Restfeuchtegehalt der Lackschichten	16
7	Entfeuchtung der Trocknungsluft	18
7.1	Entfeuchtung durch Kühlung (Kältetrocknung).....	18
7.2	Entfeuchtung durch Absorption	19
8	Energiebetrachtung	19
9	Untersuchung der Blasenbildung im Fall des Einbrenn-Wasserlacks <i>Beckqua Hydro-Einschicht-Lack BE 25 9203</i>	22
10	Am Vorhaben beteiligte Anlagenhersteller, Lack- und Anwenderfirmen.....	26
11	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die industrielle Praxis	28
12	Literatur	30

1 Einleitung

Der Einsatz von umweltfreundlichen Wasserlacksystemen scheitert bei vielen Anwendungen am Trocknungsverhalten der Lackschichten. In vielen kleinen und mittleren Betrieben, z.B. Schreinereien, werden immer noch Lösemittellacke verarbeitet, wobei ein wesentliches Kriterium ist, dass bei den vorhandenen Betriebsbedingungen nur mit diesen Lacksystemen zumutbare und sichere Trocknungszeiten erzielt werden. Diese unzureichende Fertigungssicherheit hat bisher wesentlichen Anteil am relativ geringen Praxiseinsatz der Wasserlacke, deren Stoffqualitäten heute i.a. mit denen der Lösemittellacke vergleichbar sind.

Die Trocknung von wässrigem Lackmaterial ist grundsätzlich schwieriger als bei lösemittelhaltigen Lacksystemen, da Wasser eine vergleichsweise hohe Verdampfungswärme besitzt. Die Trocknungsgeschwindigkeit hängt bei wässrigen Systemen u.a. vom Feuchtegehalt der Trocknungsluft ab. Kommt das System Luft/Wasserdampf in einer thermischen Umlufttrocknungsanlage in den Bereich der Sättigung, kann die Luft kein Wasser mehr aufnehmen. Dadurch ist die thermische Trocknung von Wasserlacken nur eingeschränkt wirksam.

Eine weitere Möglichkeit bietet die Trocknung mit entfeuchteter Luft. Dabei kann die Lufttemperatur für einen funktionierenden Trocknungsprozess durchaus nur im Bereich der Raumtemperatur oder wenig darüber liegen. Wie bei der thermischen Trocknung ist es wichtig, dass die verdampfende Feuchtigkeit durch eine ausreichende Luftströmung abgeführt wird.

In dem vorliegenden Forschungsvorhaben wurde untersucht, ob und unter welchen Prozessbedingungen die Technologie der Wasserlacktrocknung eine kostengünstige und ökologische Alternative zum Einsatz von Lösemittellacken darstellt. Es wurden grundlegende Untersuchungen der physikalischen Vorgänge bei der Wasserlacktrocknung durchgeführt und darauf aufbauend Schlussfolgerungen für die Auswahl und Übertragung der Trocknungsmethoden in die Praxis gezogen.

2 Stand der Technik

Bei der Wasserlacktrocknung kommen unterschiedliche Trocknungsverfahren zum Einsatz, so z.B. die thermische konvektive Trocknung in Umluftöfen, die Trocknung mit IR-Strahlung (elektrische oder gasbeheizte Strahler) oder die Trocknung mit entfeuchteter Luft. Die Trocknung mit entfeuchteter Luft wird bereits in vielen Anwendungen eingesetzt, z.B. bei der Kondensationstrocknung für die Wäschetrocknung ohne Abluft sowie bei einigen Anwendungen der Haftwassertrocknung. Für einzelne Anwendungen wurde die Wasserlacktrocknung mit entfeuchteter Luft bereits realisiert, siehe z.B. BÄUERLE et al. (2000), HELLMANN (2000) und SCHÖNING (1999).

Heute wird bei Trocknungstests mit Wasserlacken jedoch häufig noch empirisch vorgegangen. Da deshalb nur unzureichende Kenntnisse der praxisgerechten Anforderungen an die Voraussetzungen und Umgebungsbedingungen beim Trocknungsprozess vorhanden sind, ist eine Übertragung auf andere Anwendungen ohne systematische Voruntersuchungen nur bedingt möglich.

Zudem finden sich in der Literatur häufig widersprüchliche Aussagen zu den verschiedenen Einflussfaktoren bei der Wasserlacktrocknung. So wird z.B. in den bei DÖREN et al. (1992) vorgestellten Untersuchungen zur Trocknung von Wasserlacken der Luftströmungsgeschwindigkeit im Vergleich zur Luftfeuchtigkeit und -temperatur eine völlig untergeordnete Bedeutung beigemessen. Andere Untersuchungen zeigen, dass die Luftströmungsgeschwindigkeit und die Anströmbedingungen relativ zum zu trocknenden Objekt durchaus einen wichtigen Einfluss auf die Trocknung ausüben (ANSELM & BECHTER (1996); HRUSCHKA (1999)).

Die Untersuchungen des vorliegenden Projekts sollten nicht zuletzt auch zur Klärung dieser Fragen beitragen.

3 Theoretische Grundlagen des Trocknungsvorgangs

3.1 Begriffe beim Trocknen

Mit dem Begriff „Trocknung“ bezeichnet man die Entfernung von Wasser oder Lösemitteln aus feuchten Materialien durch Verdampfen oder Verdunsten. Zum Phasenwechsel der Flüssigkeit in den dampfförmigen Zustand ist Energie erforderlich, die meist in Form von Wärme zugeführt wird. Die in diesem Vorhaben untersuchten Trocknungsvorgänge werden als „Thermisches Trocknen“, im Gegensatz z.B. zur mechanischen Flüssigkeitsabtrennung, bezeichnet.

Mit der Trocknung ist nicht nur der Entzug von Feuchte, sondern oft auch eine Veränderung des Feststoffes verbunden. Lackfilme z.B. schrumpfen während der Trocknung; bei ungleichmäßigem oder zu schnellem Feuchteentzug können die Lackschichten durch entstehende Spannungen reißen. Wegen der gewünschten Qualität des Produktes sind häufig enge Grenzen in der maximalen Temperatur des Produktes während der Trocknung gesetzt. Die Qualität des Produktes bestimmt die Trocknungsbedingungen und die Behandlung des Gutes im Trockner.

Die Trocknungsverfahren lassen sich nach der Art der Wärmezufuhr unterscheiden: Wird die Wärme durch Luft an das Gut übertragen, so spricht man von Konvektionstrocknung. Wird die Wärme durch Wärmestrahlung übertragen (z.B. Infrarotstrahlung), so spricht man von Strahlungstrocknung.

Betrachtet man die zu trocknenden Stoffe genauer, so stellt man fest, dass es sich in der Regel um kolloiddisperse Systeme handelt. Flüssigkeiten (z.B. Lacke) oder Pasten enthalten kolloidale Teilchen, die Durchmesser von 10^{-4} bis 10^{-6} mm besitzen. Solche kolloiddispersen Systeme besitzen große innere Oberflächen. Feuchtigkeit wird an diesen Oberflächen adsorbiert. Bei der Vernetzung von Makromolekülen kann Flüssigkeit im entstehenden Feststoffgerüst

auch mechanisch eingeschlossen werden. Nach Art der Bindung zwischen Feuchtigkeit und Trockenstoff kann man unterscheiden zwischen

- Quellflüssigkeit, die durch osmotische Kräfte im Stoff festgehalten wird,
- Kapillarflüssigkeit, die sich in den Poren und Adern des kapillarporösen Systems befindet und
- Haftflüssigkeit, die einen zusammenhängenden Film auf der Oberfläche bildet.

Bindung der Feuchtigkeit an das Trocknungsgut

Man unterscheidet zwischen freier und gebundener Gutsfeuchte. Die freie Gutsfeuchte unterliegt keinen Bindungskräften an den Feststoff. Dies gilt bei den zunächst flüssigen oder pastösen Trocknungsgütern solange, bis sich eine feste Struktur ausgebildet hat, die zu Bindungskräften führt. Im Fall der freien Gutsfeuchte ist der Dampfdruck über der Flüssigkeitsoberfläche gleich dem Sattdampfdruck der Flüssigkeit bei der jeweiligen Temperatur der Flüssigkeit, die dann identisch ist mit der Temperatur des Gutes.

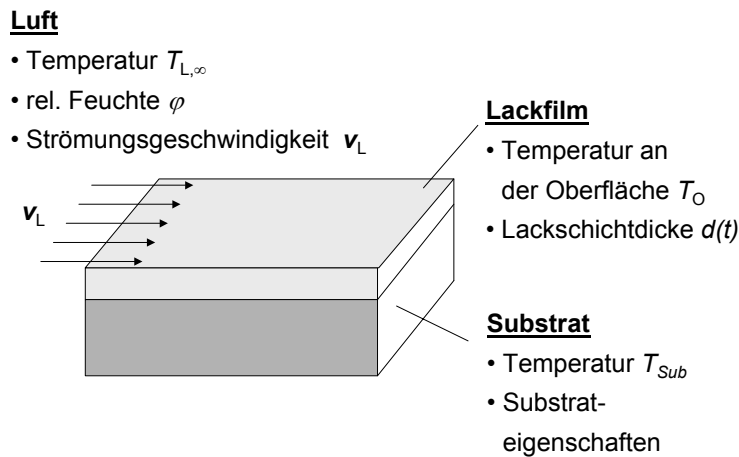
Durch Adsorption gebundene Flüssigkeit: Trocknungsgüter besitzen große innere Oberflächen. Bringt man sie im trockenen Zustand in eine mit Dampf beladene Atmosphäre gleicher Temperatur, so nehmen sie bis zum Eintreten eines Gleichgewichtszustands Dampfmoleküle auf („hygroskopische Gleichgewichtsfeuchte“).

Feuchtigkeitsleitung im Trocknungsgut

Bildet sich in einem Gut ein Feuchtegefälle z.B. dadurch aus, dass an der Oberfläche Feuchte verdunstet, so entsteht im Gut ein Feuchtegefälle und infolgedessen ein Flüssigkeitstransport. Mechanismen des Transports sind die Flüssigkeitsdiffusion, z.B. in den Zwischenräumen von großen Molekülen, und kapillare Flüssigkeitsleitung. Die Feuchteleitung hält die Oberfläche eines Trocknungsgutes solange feucht, bis eine kritische Gutsfeuchte erreicht ist. Maßgeblich ist der Feuchteleitkoeffizient, der jedoch stark von der Feuchte selbst abhängig ist. Mit abnehmender Feuchte geht er gegen Null. Stoffe, in denen während des ganzen Trocknungsvorganges wegen des Fehlens von Kapillaren oder Poren nur Flüssigkeitsbewegung (keine Dampfbewegung) möglich ist, wie z.B. Gelatine oder Kunststoffe, sind deshalb besonders schwer zu trocknende Stoffe, weil der Feuchteleitkoeffizient mit fortschreitender Trocknung immer kleiner wird.

3.2 Theorie der Trocknung durch erzwungene Konvektion

Heißes Gas, meist Luft, wird mit dem zu trocknenden Stoff in Berührung gebracht. Es überströmt das Gut, nimmt Feuchte auf und gibt Wärme ab. Wird Luft als Trocknungsmittel verwendet, sind zu deren Kennzeichnung drei thermodynamische Zustandsgrößen nötig, die die Trocknungsbedingungen beherrschen: Lufttemperatur $T_{L,\infty}$, relative Luftfeuchtigkeit φ und der atmosphärische Gesamtdruck P . Da die Trocknungsgeschwindigkeit auch von der Luftge-



schwindigkeit abhängt, wird außerdem ein vierter Parameter, die relative Geschwindigkeit der Luft v_L in m/s gegen das zu trocknende Material, eingeführt (Abb. 1).

Abb. 1: Einflussparameter bei der konvektiven Trocknung.

Die Besonderheiten des Trocknungsverlaufs kommen in erster Linie in den Trocknungskurven (Gutsfeuchtigkeit aufgetragen gegen die Zeit) zum Ausdruck (vgl. Abb. 4, 6 und 9). Nach einem Anfangsstadium geringer Trocknungsrate (für dünne Proben ist das Anfangsstadium der Erwärmung des Gutes sehr kurz und in den Trocknungskurven nicht feststellbar) folgt ein Abschnitt mit linearer Abnahme der Gutsfeuchtigkeit (erster Trocknungsabschnitt). Ab dem sogenannten ersten kritischen Punkt geht die Gerade in eine Kurve über (zweiter Trocknungsabschnitt), die sich asymptotisch der hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchtigkeit nähert (im Gleichgewichtszustand hört die Feuchtigkeitsabnahme auf). Im zweiten Trocknungsabschnitt ist die Feuchtigkeitsleitung nicht mehr in der Lage, die Feuchte bis an die Oberfläche des Gutes zu ziehen, die Phasenumwandlung von Flüssigkeit in Dampf muss im Innern des Gutes stattfinden. Deshalb sind im zweiten Trocknungsabschnitt – anders als im ersten Trocknungsabschnitt – die Gutseigenschaften von dominierendem Einfluss.

Der Dampfdruck über dem Gut ist unabhängig von dessen Feuchtigkeitsgrad und dem Druck gesättigten Dampfes bei der Gutstemperatur gleich, wenn die Gutsfeuchtigkeit die hygroskopische Feuchtigkeit übersteigt. Der Dampfdruck hängt dann nur von der Temperatur ab. Im Abschnitt konstanter Trocknungsgeschwindigkeit ist die Gutstemperatur konstant und der Temperatur des Nassthermometers gleich.

Im linearen ersten Trocknungsabschnitt verdunstet die Feuchte an der Oberfläche des Gutes. Das Gut verhält sich wie eine freie Flüssigkeitsoberfläche, die Gutseigenschaften spielen im Hinblick auf die Trocknungsgeschwindigkeit keine Rolle. Die verdunstende Flüssigkeit wird durch Flüssigkeitsleitung aus dem Gutsinnern an die Oberfläche gesaugt. An der Oberfläche herrscht der zur Oberflächentemperatur gehörende Gleichgewichts-Sattdampfdruck $p_v^*(T_O)$. T_O ist abhängig von der Lufttemperatur $T_{L,\infty}$ und deren rel. Feuchte φ und wird als Gutsbehandlungstemperatur oder Temperatur des Nassthermometers bezeichnet (GNIELINSKI et al. (1993)).

Die Trocknungsgeschwindigkeit im linearen Trocknungsabschnitt lässt sich aus den Gesetzen des Stoffaustausches berechnen (GNIELINSKI et al. (1993)):

$$dm/dt = (P M_v / R T_m) \beta \ln\{(P - p_{v,\infty}) / (P - p_v^*(T_0))\} \quad (1)$$

Darin ist $P \approx 1$ bar der atmosphärische Gesamtdruck, M_v die Molmasse von Wasser, R die Gaskonstante, T_m die mittlere Temperatur zwischen der Oberfläche und der vorbeiströmenden Luft in Kelvin, β der Stoffübergangskoeffizient und $p_{v,\infty}$ der Wasserdampfpartialdruck in der vorbeiströmenden Luft. Für $P \gg p_v$ gilt für (1) die Näherung

$$dm/dt = (P M_v / R T_m) \beta (p_v^*(T_0) - p_{v,\infty})/P \quad (2)$$

Der Faktor

$$A = (1 / T_m) \ln\{(P - p_{v,\infty}) / (P - p_v^*(T_0))\} \\ \approx (1 / T_m) (p_v^*(T_0) - p_{v,\infty})/P \quad (3)$$

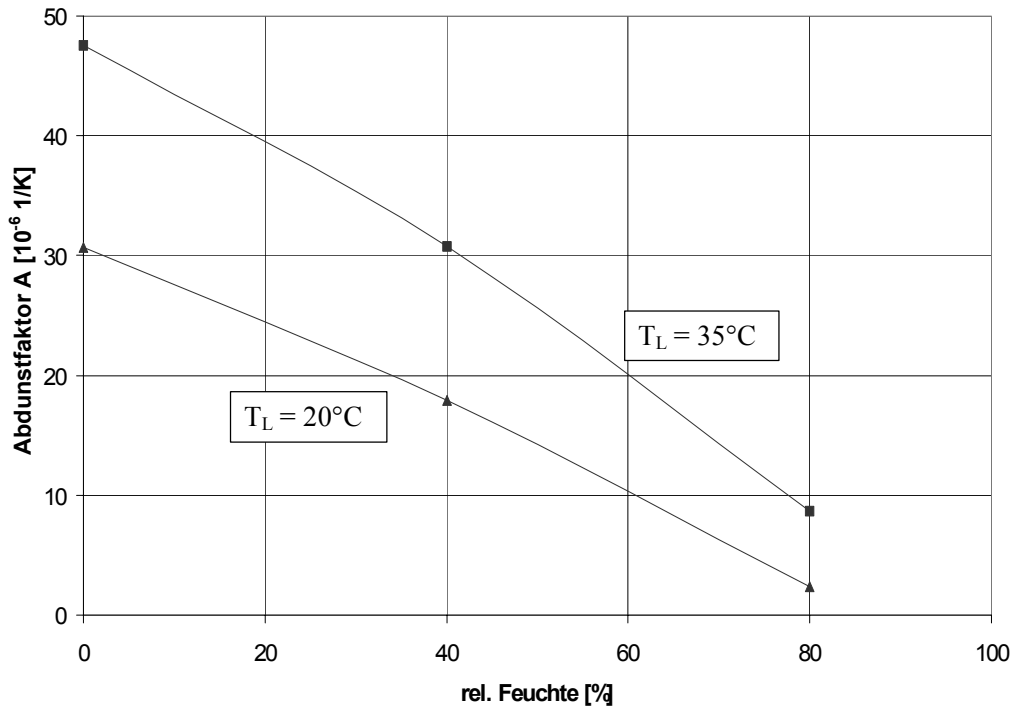
beschreibt im wesentlichen die lineare Abhängigkeit der Trocknungsgeschwindigkeit von der Differenz der Dampfdrücke an der Oberfläche und in der strömenden Luft. In Tab. 1 sind die Gutsbeharrungstemperatur, die Wasserdampfdrücke und der Abdunstfaktor A für unterschiedliche Temperatur- und Feuchtwerte der vorbeiströmenden Luft aufgeführt. Die jeweiligen Werte T_0 für die Gutsbeharrungstemperatur wurden dem Diagramm in Abb. 3.5.5 auf Seite 209 in GNIELINSKI et al. (1993) entnommen.

T_L [°C]	rel. Feuchte ϕ_L [%]	$p_{v,\infty}$ [mbar]	T_0 [°C]	$p_v^*(T_0)$ [mbar]	T_m [K]	A [10^{-6} 1/K] (Gl. (3))
20	0	0	5	8.72	285.7	30.7
20	40	9.35	12.5	14.47	289.45	17.9
20	80	18.66	17	19.33	291.7	2.3
35	0	0	12	14.00	296.7	47.5
35	40	22.53	25	31.60	303.2	30.8
35	80	44.93	32	47.46	306.7	8.6

Tab. 1

Der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit v_L steckt im wesentlichen im Stoffübergangskoeffizienten β , der eine eindeutige Funktion der Reynoldszahl $Re = (v_L L / \gamma)$ ist. L ist eine charakteristische lineare Abmessung der Probenfläche, entlang der die Verdunstung stattfindet (in den vorliegenden Untersuchungen $L = 250$ mm), γ die kinematische Viskosität der Luft. In

den hier vorgestellten Untersuchungen beträgt $Re \approx 15000$ (bei $v_L = 1$ m/s), in diesem Bereich



gilt etwa (LYKOW (1955)):

$$\beta \sim Re^{0.6} \text{ und für } L, \gamma = \text{const: } \beta \sim v_L^{0.6} \quad (4)$$

Abb. 2: Nach Gl. (3) theoretisch errechneter Abdunstfaktor als Funktion von Temperatur und relativer Feuchte der überströmenden Luft (vgl. Tab. 1).

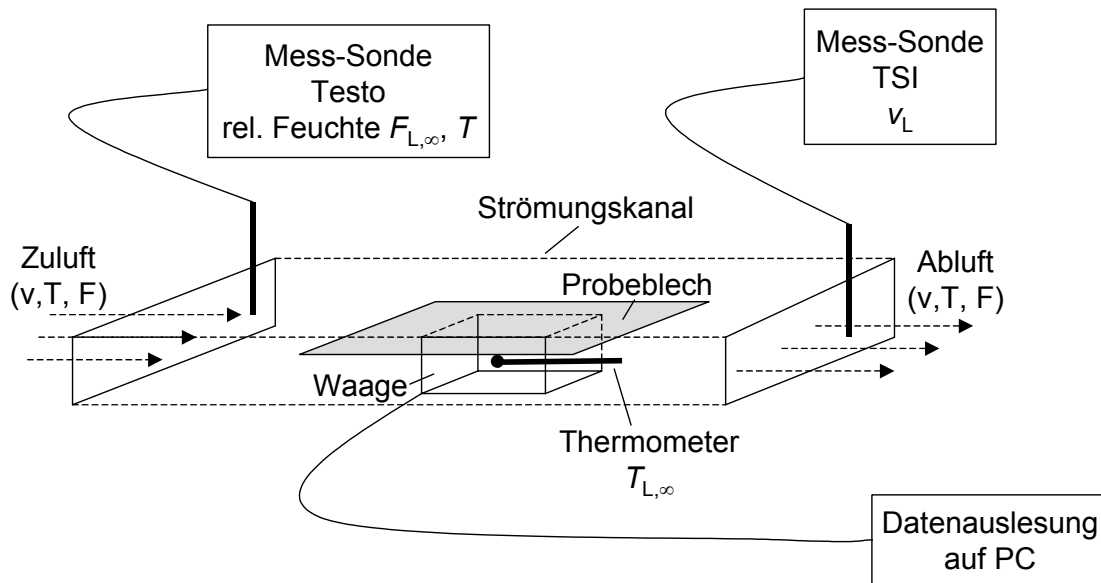
In Abb. 2 ist der Verdunstungsfaktor A (Gl. (3)) für unterschiedliche Temperatur- und Feuchtigkeitswerte der überströmenden Luft gezeigt. Natürlich steigt die Abdunstgeschwindigkeit mit steigender Lufttemperatur und abnehmender relativer Feuchte der überströmenden Luft an. Es ist interessant, festzustellen, dass eine Erhöhung der Temperatur um 15°C bei festgehaltener rel. Feuchte einen mindestens ebenso starken Einfluss auf die Abdunstgeschwindigkeit hat, wie eine deutliche Reduzierung der rel. Feuchte bei festgehaltener Temperatur. So liegen z.B. die Werte für A für die beiden Zustände der Luft ($T_{L,\infty} = 35^\circ\text{C}/40\%$ rel. F.) und ($T_{L,\infty} = 20^\circ\text{C}/0\%$ rel. F.) auf vergleichbarem Niveau. Werte $A > \text{ca. } 30 \cdot 10^{-6}$ 1/K können nur bei Temperaturen größer 20°C erreicht werden.

4 Experimentelle Versuchsdurchführung

In Abdunstexperimenten wurden die Einflüsse der unterschiedlichen Parameter bei der konvektiven Trocknung von Wasserlackschichten unter wohl definierten Versuchsbedingungen unabhängig voneinander ermittelt.

4.1 Trocknungskanal

In Abb. 3 ist der experimentelle Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Die beschichteten



Probebleche wurden in einem Strömungskanal einer Luftströmung mit definiertem relativen

Abb. 3: Experimenteller Versuchsaufbau zur Durchführung der Abdunstversuche.

Feuchtegehalt, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit ausgesetzt. Die Luftströmung wurde mittels eines beheizbaren Lüfters erzeugt. Für die Versuche bei hohen bis mittleren Luftfeuchten befand sich der Versuchsstand in einer Klimakammer im Lackiertechnikum des Fraunhofer IPA. Die Untersuchungen bei rel. Luftfeuchten $< 10\%$ wurden in einer Trocknungskammer durchgeführt, in der die Luft mittels eines Kondensationstrockners der Fa. Harter Oberflächen- und Umwelttechnik GmbH entfeuchtet wurde.

4.2 Messtechnik für Klima und Luftströmung

Die folgende Messtechnik wurde zur Ermittlung der Parameter in den Abdunstversuchen verwendet:

Strömungsmessung: Konstant-Temperatur-Thermisches Anemometer
TSI Velocicalc 8360

Feuchtemessung: Polymer-Widerstandssensor Testo 454

Temperaturmessung: Thermometer (Quecksilber)/Testo 454
 Gewichtsbestimmung: Waage (Mettler/Genauigkeit 10 mg) mit Datenerfassung für die dynamischen Messungen im Trocknungskanal; statische Messungen zur Bestimmung der Anfangs- und Endgewichte mit einer genaueren Waage (Sartorius/Genauigkeit 1 mg).

Die Waagen wurden vor Beginn des Abdunstexperiments ins thermische Gleichgewicht gebracht (ca. 1 h), um Temperatureinflüsse auszuschließen. Veränderungen des Gewichts durch die Luftströmung (mögliche Auf- bzw. Abtriebskräfte) wurden durch Vergleichsmessungen ohne Luftströmung vor Beginn und nach Ende der Abdunstexperimente kompensiert.

Das Strömungsmessgerät TSI Velocicalc zeigt Geschwindigkeiten an, die sich auf Standardbedingungen (21.1°C/101.4 kPa) beziehen. Die tatsächliche Geschwindigkeit errechnet sich nach der Formel

$$v_{\text{aktuell}} = v_{\text{Standard}} (273.1 + T_{\text{aktuell}}) / (273.1 + 21.1) (101.4 / P_{\text{aktuell}}). \quad (5)$$

5 Untersuchte Wasserlacke und Substrate

5.1 Untersuchte Wasserlackssysteme

Bei den modernen Wasserlackssystemen wird unterschieden zwischen rein physikalisch trocknenden Systemen (Einkomponenten (1K)-Lacke), 1K-Lacken, die bei über 100 °C eingebrannt (chemisch vernetzt) werden und durch Härterzugabe chemisch härtenden Systemen (2K-Lacke). In der folgenden Tabelle sind die im vorliegenden Vorhaben untersuchten Lackssysteme aufgeführt.

Lack	BASF MB 744 Wasserbasislack metallic	Beckers Beckqua Hydro-Einschicht-Lack BE 25 9203	Votteler Holzlack 84-100-5-000
Festkörpergehalt	18.5 Gew.-%	50.0 Gew.-%	33.5 Gew.-%
Lacktyp	1K-Wasserbasislack für Karosserielackierung	1K-Einbrennwasserlack für tauchbeschichtete Stahlteile/ Polyester/Melamin-Harz	1K-Wasserlack für Holzbeschichtung/ Acrylat-Dispersion
Standardtrocknung nach Abdunstung	80 °C/5-10 min	140 °C/20 min	lufttrocknend
Applikation	HVLP-Pistole (1.4 mm-Düse), ca. 4 g Nassgewicht	HVLP-Pistole (1.4 mm-Düse), ca. 4 g Nassgewicht	HVLP-Pistole (1.4 mm-Düse), ca. 4 g Nassgewicht
Angewandte Trocknungsbedingungen	30 min eingestelltes Klima; 30 min/90 °C zur Trockengewichtsbestimmung	30 min eingestelltes Klima; 30 min/90 °C zur Trockengewichtsbestimmung	30 min eingestelltes Klima; 30 min/90 °C zur Trockengewichtsbestimmung

Tab. 2

5.2 Substrate

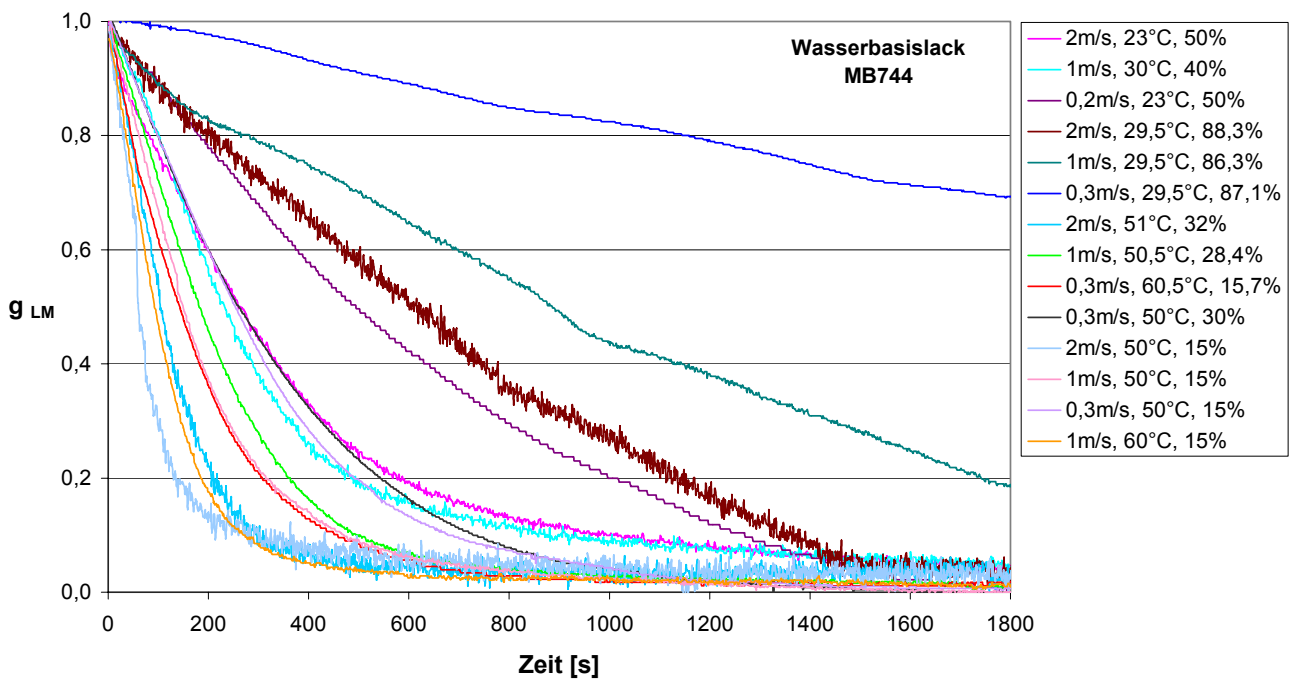
Als Substrate wurden polierte Edelstahlbleche ($L = 250 \text{ mm}$, $B = 150 \text{ mm}$) verwendet. Damit sollte ein Einfluss der Substrateigenschaften auf das Trocknungsverhalten der Lackmaterialien ausgeschlossen werden.

6 Experimentelle Ergebnisse

6.1 Abdunstkurven und -zeiten

6.1.1 Wasserbasislack BASF MB 744

Die wesentlichen Aussagen dieser Untersuchungen wurden aus den durch Wiegen ermittelten Abdunstkurven gewonnen. In Abb. 4 ist am Beispiel des Wasserlacks BASF MB 744 eine Schar solcher Kurven bei unterschiedlichen Abdunstbedingungen gezeigt. Der Feuchtegehalt der Lackschichten ist auf den jeweiligen Gesamtfeuchtegehalt zu Beginn der Abdunstversuche bezogen. Die Kurven zeigen anfangs eine annähernd lineare Abnahme der Schichtfeuchte, bis im zweiten Trocknungsabschnitt eine stetige Abnahme der Abdunstgeschwindigkeit er-



folgt.

Abb. 4: Abdunstkurven für das Lacksystem BASF MB 744. Der Lösemittelgehalt ist jeweils auf den Gesamtlösemittelgehalt ($g_{LM} = 1$) zu Beginn der Abdunsversuche und das Trockengewicht $g_{LM} = 0$ (vgl. Tab. 2) bezogen.

Als Maß für die Abdunstgeschwindigkeit wird im folgenden die Zeit $t_{40\%}$ bis zum Erreichen eines Feuchtegehalts 0.4 herangezogen. Die Kurven weisen bis zu diesem Feuchtegehalt einen annähernd linearen Verlauf auf. $T_{40\%}$ ist damit ungefähr umgekehrt proportional zur Abdunstgeschwindigkeit.

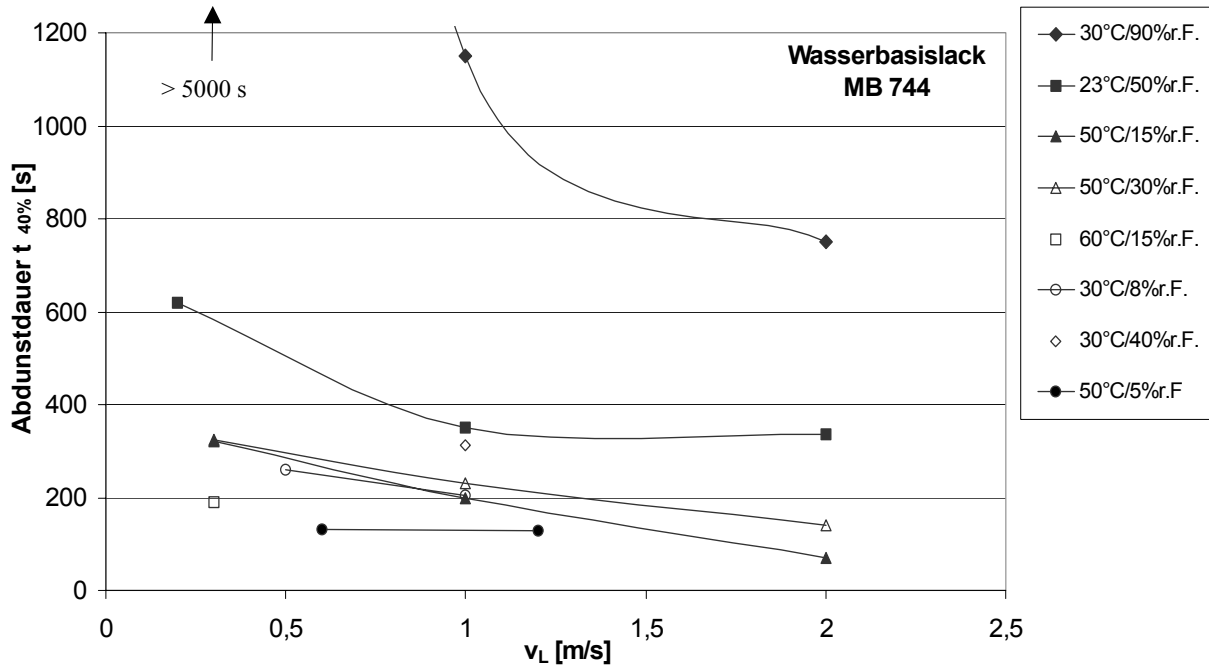


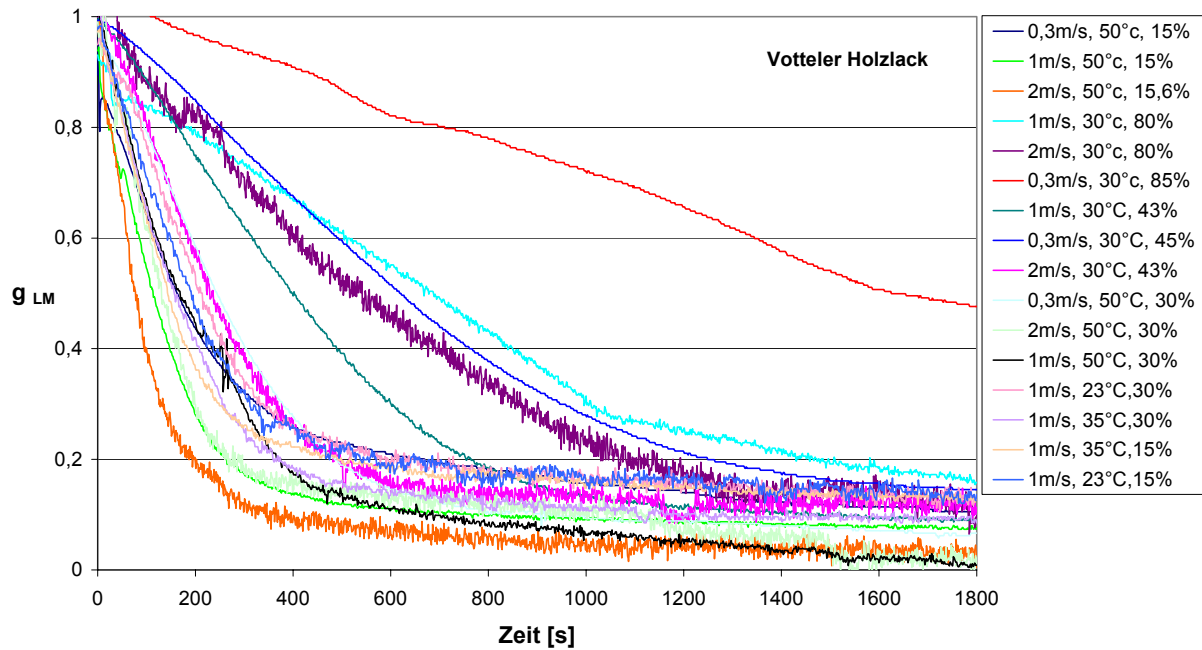
Abb. 5: Abdunstdauer bis zum Erreichen eines Restlösemittelgehaltes $g_{LM} = 0.4$ für das Lacksystem BASF MB 744 als Funktion der Luftströmungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen und rel. Feuchten der überströmenden Luft.

In Abb. 5 sind die Abdunstdauern $t_{40\%}$ für unterschiedliche relative Feuchten, Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten der überströmenden Luft aufgetragen. Die Abdunstdauer weist eine deutliche Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit v_L auf. Nach Gl. (4) verringert eine Verdopplung von v_L die Abdunstdauer etwa um einen Faktor $2^{0.6} = 1.5$. Ein Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit in dieser Größenordnung wird durch die Abdunstversuche bestätigt. Der Einfluss von Lufttemperatur und rel. Feuchte der Luft auf die Abdunstdauer ist aus Abb. 5 ebenso ersichtlich. Bei $T_L = 50$ °C bringt eine Halbierung der rel. Feuchte von 30 auf 15 % eine Reduzierung von $t_{40\%}$ um ca. 50 s. Die kürzesten Abdunstzeiten werden eher bei den höheren Temperaturen erreicht. Diese Aussage wird durch das theoretischen Modell in Abb. 2 bestätigt.

Die Auswertung der Messergebnisse zeigte, dass sich die drei untersuchten Wasserlackssysteme hinsichtlich ihres Trocknungsverhaltens sehr ähnlich verhalten.

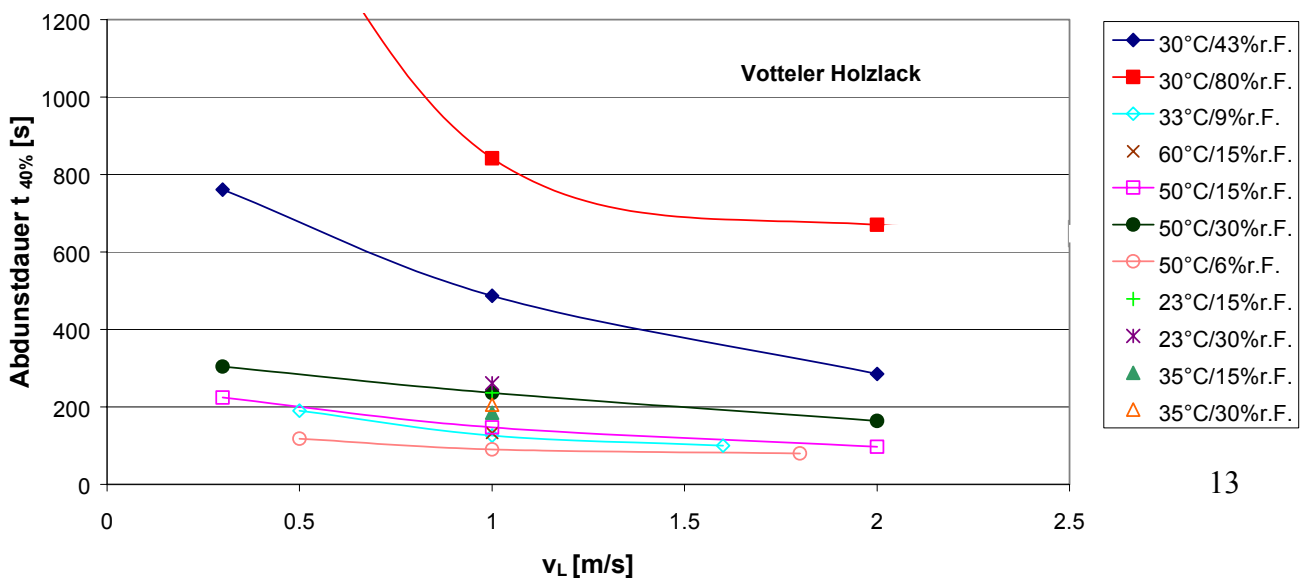
6.1.2 Votteler Holzlack

In Abb. 6 ist für den Votteler Holzlack die Schar der Abdunstkurven bei unterschiedlichen Abdunstbedingungen gezeigt. Für den qualitativen Verlauf der Kurven gilt das in Abschnitt 6.1.1 Gesagte.



In Abb. 7 sind für den Votteler Holzlack die Abdunstdauern $t_{40\%}$ für unterschiedliche relative Feuchten, Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten der überströmenden Luft aufge-

Abb. 6: Abdunstkurven für den Holzlack der Fa. Votteler. Der Lösemittelgehalt ist jeweils



auf den Gesamtlösemittelgehalt ($g_{LM} = 1$) zu Beginn der Abdunnsversuche und das Trockengewicht $g_{LM} = 0$ (vgl. Tab. 2) bezogen.

Abb. 7: Abdunstdauer bis zum Erreichen eines Restlösemittelgehaltes $g_{LM} = 0.4$ für den Holzlack der Fa. Votteler als Funktion der Luftströmungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen und rel. Feuchten der überströmenden Luft.

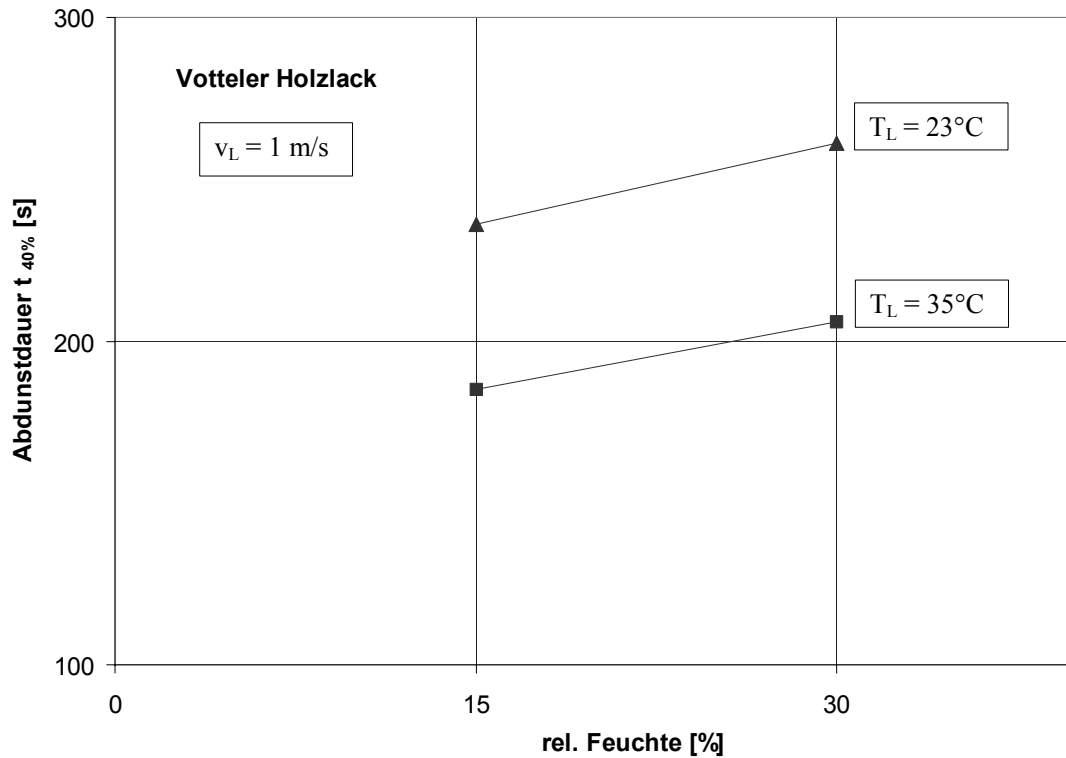


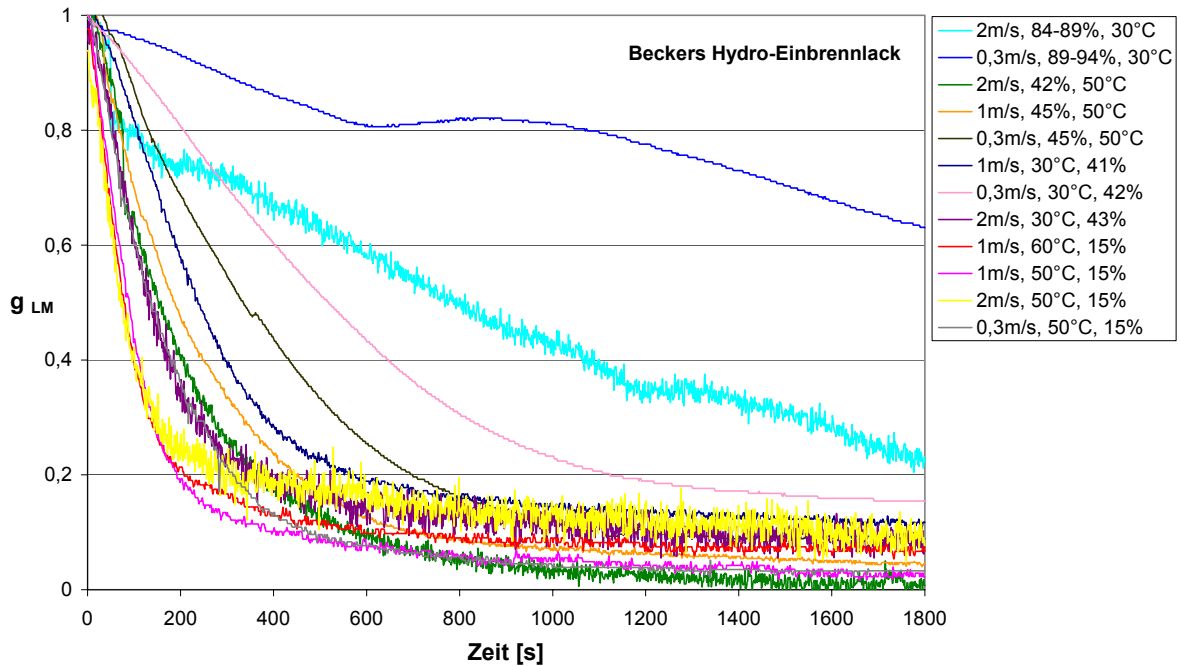
Abb. 8: Experimentell ermittelte Abdunstzeiten bis zum Erreichen eines Restlösemittelgehaltes von 40 % für den Holzlack der Fa. Votteler in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Feuchte der überströmenden Luft.

tragen. Wie für den Wasserlack BASF MB 744 weist auch in diesem Fall die Abdunstdauer eine deutliche Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit v_L auf. Der Einfluss von Lufttemperatur und rel. Feuchte der Luft auf die Abdunstdauer ist aus Abb. 7 ebenso ersichtlich. Die Verhältnisse stimmen weitgehend mit dem überein, was in Abschnitt 6.1.1 gesagt wurde.

In Abb. 8 sind für den Votteler Holzlack die Abdunstzeiten $t_{40\%}$ für vier thermodynamische Zustände der überströmenden Luft bei $v_L = 1$ m/s aufgetragen. Die relativen Einflüsse von Lufttemperatur und –feuchte auf die Abdunstzeit sind in guter Übereinstimmung mit den theoretischen Ergebnissen in Abb. 2. Bei Lufttemperaturen von 35°C ist $t_{40\%}$ bei jeweils festgehaltener Feuchte um ca. 50 s kürzer als bei 23°C . Die Reduzierung der rel. Feuchte von 30 auf 15 % bringt eine Verringerung von $t_{40\%}$ um ca. 25 s.

6.1.3 Beckers Beckqua Hydro-Einschicht-Lack BE 25 9203

Die experimentellen Ergebnisse für den Beckers Beckqua Hydro-Einschicht-Lack BE 25 9203 sind, analog zu den beiden anderen Lacken, in den Abb. 9 und 10 gezeigt. Die Abdunstkurven



in Abb. 9 und die Abhängigkeiten der Trocknungsdauer von der Luftgeschwindigkeit in Abb. 10 zeigen, dass die experimentelle Durchführung und die Messdatenerfassung bei den

Abb. 9: Abdunstkurven für den Hydro-Einbrennlack der Fa. Becker. Der Lösemittelgehalt ist jeweils auf den Gesamtlösemittelgehalt ($g_{LM} = 1$) zu Beginn der Abdunsversuche und das Trockengewicht $g_{LM} = 0$ (vgl. Tab. 2) bezogen.

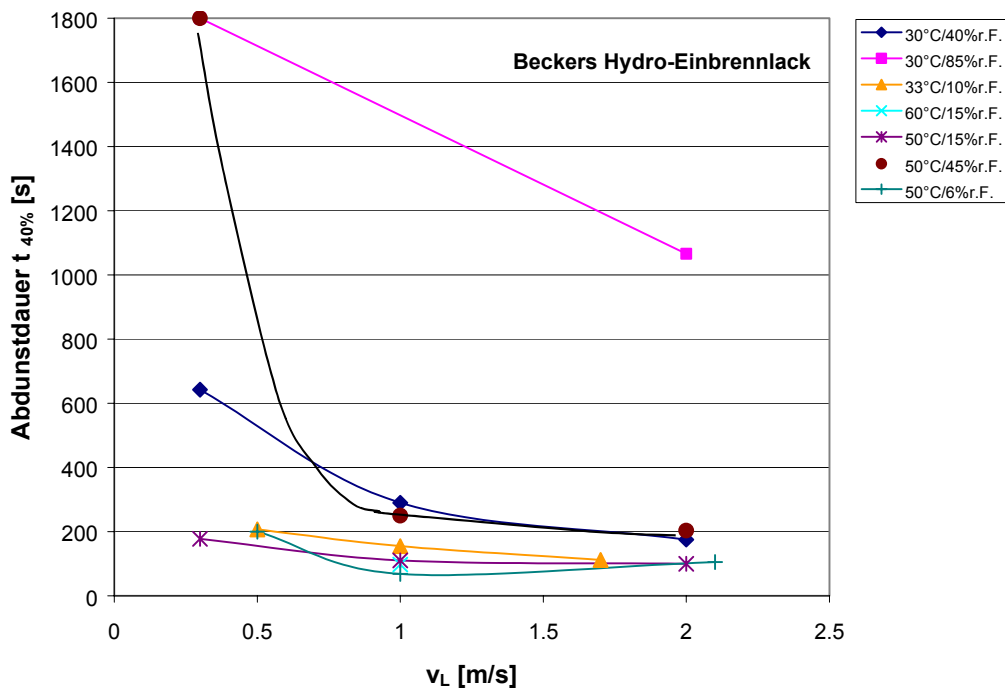


Abb. 10: Abdunstdauer bis zum Erreichen eines Restlösemittelgehaltes $g_{LM} = 0.4$ für den Hydro-Einbrennlack der Fa. Becker als Funktion der Luftströmungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen und rel. Feuchten der überströmenden Luft.

Trocknungsversuchen durchaus mit Schwierigkeiten verbunden sein können (→ Konstanz des Klimas, Wägeprozess).

Qualitativ stimmen die Ergebnisse für den Beckers Beckqua Hydro-Einschicht-Lack jedoch mit denen an den beiden anderen Lacksystemen gewonnenen überein.

6.2 Restfeuchtegehalt der Lackschichten

Beim Trocknen von Gütern mit Luft bestimmten Zustands kann man nicht das gesamte Wasser entfernen, sondern nur bis zur Gleichgewichtsfeuchtigkeit (hygroskopische Feuchtigkeit). In den Abb. 11-13 sind die Restfeuchten nach 30 min Trocknung in Abhängigkeit von den jeweiligen klimatischen Trocknungsbedingungen für die Lackschichten aufgetragen. Der Restfeuchtegehalt $f_R^{30'}$ ist definiert als

$$f_R^{30'} = (G_{30'} - G_\infty) / (G_\infty - G_{\text{Substrat}}) \quad (6)$$

Dabei ist $G_{30'}$ das Gewicht des lackierten Probeblechs (Lackschicht + Blech) nach Ablauf der 30-minütigen Trocknung unter den jeweiligen Trocknungsbedingungen, G_∞ das Gewicht des lackierten Probeblechs nach der abschließenden verschärften Trocknung zur Austreibung des Restlösemittels (weitere 30 min bei 90 °C) und G_{Substrat} das Gewicht des unbeschichteten Substratblechs. Der Restfeuchtegehalt nach 30 min Trocknungsdauer ist also auf das Trockengewicht $G_\infty - G_{\text{Substrat}}$, das die Lackschichten nach der in Tab. 2 angegebenen verschärften Trocknungsphase mit 30 min/90 °C erreichen, bezogen.

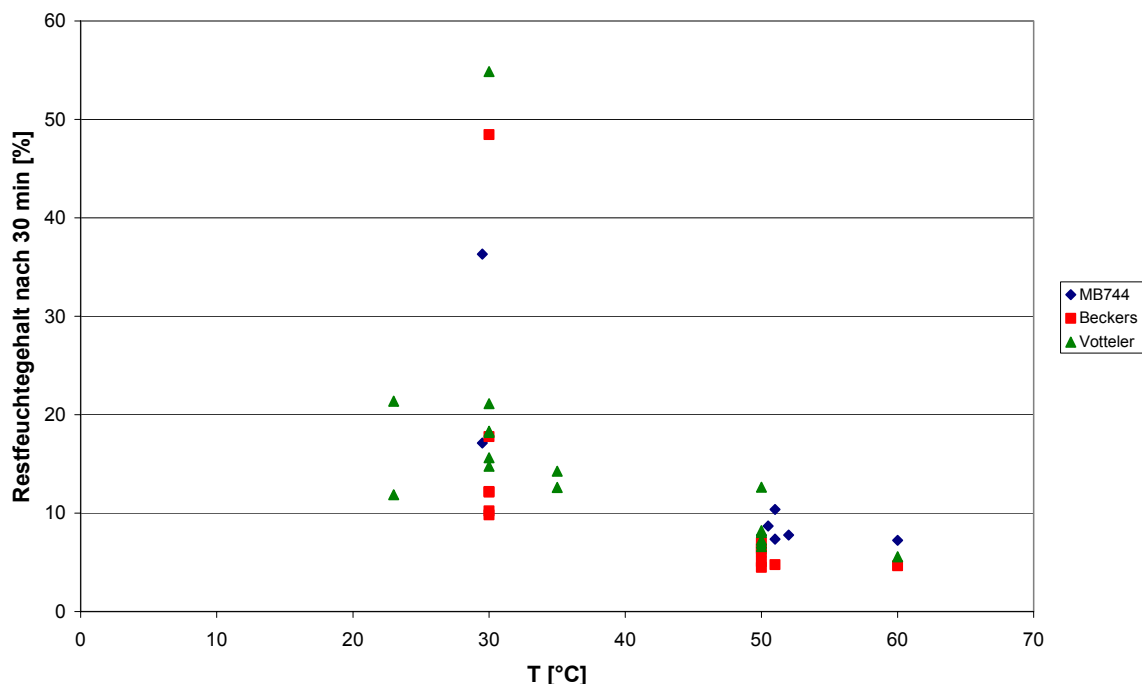
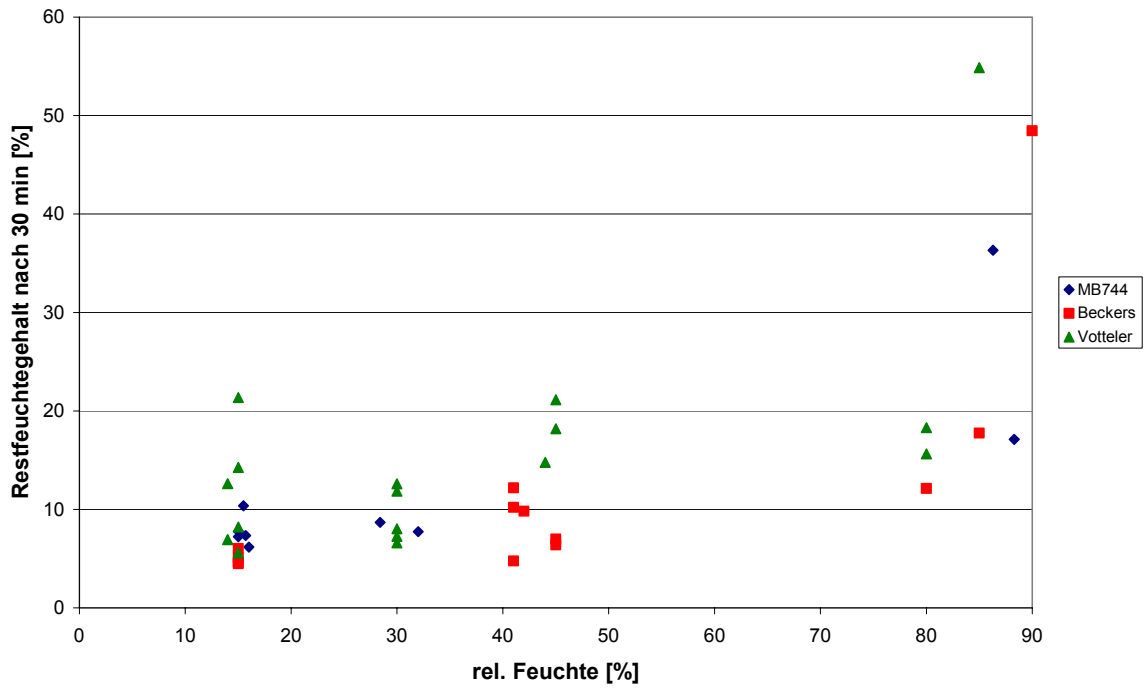


Abb. 11: Restfeuchte der Lackschichten nach Gl. (6) in Abhängigkeit von der Temperatur



der Trocknungsluft.

Abb. 12: Restfeuchte der Lackschichten nach Gl. (6) in Abhängigkeit vom relativen Feuchtegehalt der Trocknungsluft.

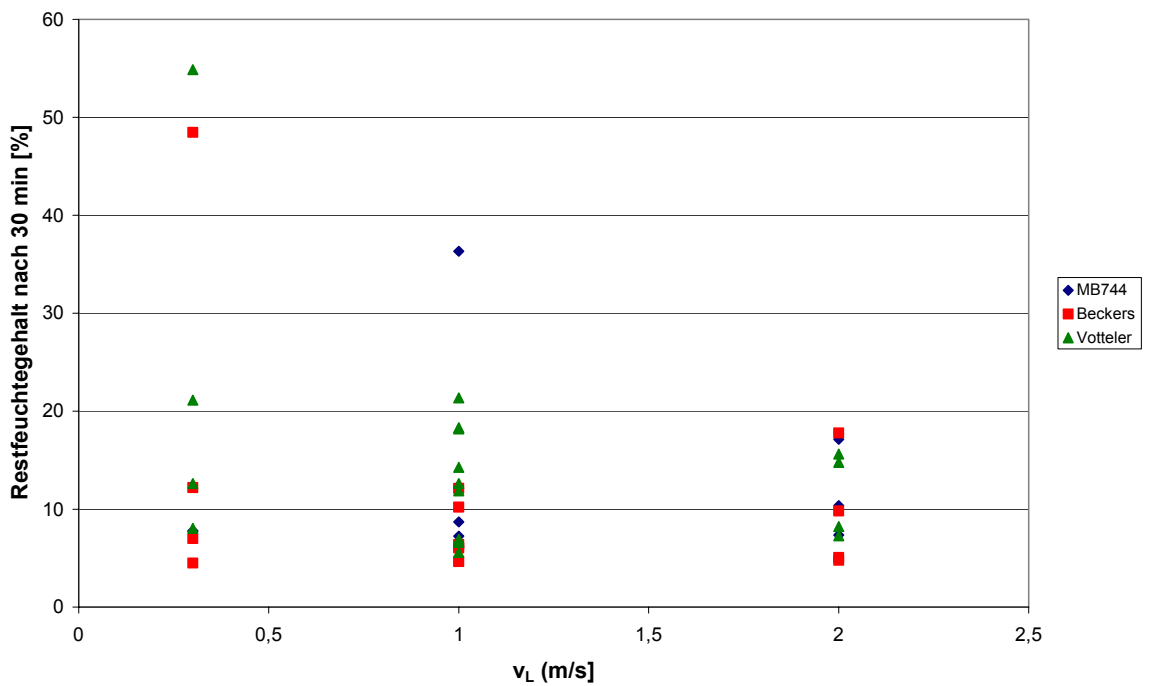


Abb. 13: Restfeuchte der Lackschichten nach Gl. (6) in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit der Trocknungsluft.

Natürlich muss es sich bei den in den Diagrammen gezeigten Werten für $f_R^{30'}$ nicht in jedem Fall um die theoretisch erreichbare hygroskopische Feuchte handeln. Bei den ungünstigeren klimatischen Trocknungsbedingungen liegen die Feuchtegehalte der Lackschichten am Ende der 30-minütigen Trocknungsphase sicher noch oberhalb des Werts für die hygroskopische Feuchte.

Abbildung 11 zeigt, dass Restfeuchten $f_R^{30'} < 10\%$ nur in den Trocknungsversuchen mit Temperaturen $T_L = 50\text{ °C}$ oder höher erreicht werden. Damit spielt die Temperatur der überströmenden Luft für das Erreichen bzw. Unterschreiten einer bestimmten Restfeuchte eine entscheidende Rolle. Dieser Umstand lässt sich auch aus Abb. 2 ableiten, in der die theoretischen Abdunstfaktoren in Abhängigkeit von Lufttemperatur und -feuchte gezeigt sind. Dort ist ersichtlich, dass der Bereich höherer Abdunstgeschwindigkeiten nur durch Temperaturerhöhung, nicht aber durch weiteres Entfeuchten der Luft erreichbar ist.

Abbildung 12 zeigt, dass der Einfluss, den die Feuchte der Trocknungsluft auf die Restfeuchtigkeit der Lackschichten hat, weniger ausgeprägt ist als im Fall der Lufttemperatur. Auch bei relativen Luftfeuchten bis 50 % lassen sich Restfeuchtegehalte $< 10\%$ im Lackfilm erreichen.

Die Geschwindigkeit der Trocknungsluft hat, wie aus Abb. 13 ersichtlich ist, einen relativ geringen Einfluss auf den Restfeuchtegehalt $f_R^{30'}$ der Lackschichten. Im zweiten Trocknungsabschnitt (Phase der abnehmenden Trocknungsgeschwindigkeit) scheint die Luftgeschwindigkeit also nicht mehr einen so großen Einfluss auf die Trocknung auszuüben, wie es im ersten Trocknungsabschnitt der Fall ist (vgl. Abb. 4, 6 und 9).

7 Entfeuchtung der Trocknungsluft

Für die Entziehung von Feuchtigkeit aus der Luft bestehen zwei grundsätzlich verschiedene Methoden:

- Kühlung der Luft mit Wasserausscheidung
- Absorption des Wassers durch Absorptionsstoffe

7.1 Entfeuchtung durch Kühlung (Kältetrocknung)

Bei dieser Art der Lufttrocknung wird die Luft mit einem genügend kalten Kühlmittel so stark gekühlt, dass sich das Wasser aus der Luft ausscheidet. Im i, x -Diagramm lässt sich die Zustandsänderung der Luft leicht verfolgen, da sie jeweils in Richtung nach dem Zustandspunkt gesättigter Luft von der Temperatur der Kühloberfläche erfolgt. Bemerkenswert ist, dass es zur Wasserausscheidung nicht erforderlich ist, die Luft bis zur Erreichung des Taupunktes zu kühlen, wie man oft annimmt. Wesentlich ist nur, dass die Temperatur der Kühloberfläche unterhalb der Taupunkttemperatur der Luft liegt.

Es ist auch nicht erforderlich, dass der Kühler, wie man ebenfalls häufig sich vorstellt, sehr groß sein muss. Denn auch bereits bei einer sehr geringen Abkühlung der Luft findet Wasserausscheidung statt. Beispielsweise kann man bei Betrieb einer Umluftentfeuchtungsanlage die Luft durch Abkühlung und Wiedererwärmung nach und nach immer weiter entfeuchten, bis sie nahezu einen Taupunkt entsprechend der Kühloberflächentemperatur erreicht hat. Nach jeder Kühlung erfolgt eine Nachwärmung der Luft bis auf Anfangstemperatur. Bei Zumischung eines Teils feuchter Außenluft ist die erreichbare Entfeuchtung der Luft natürlich geringer als in einer geschlossenen Umluftanlage.

Für eine wesentliche Wasserausscheidung ist im allgemeinen eine Kältemaschine erforderlich. Die aus dem Raum angesaugte Luft wird in dem Verdampfer (Kühler) gekühlt und zum Teil entfeuchtet und darauf in dem Kondensator wieder nachgewärmt. Das abgeschiedene Wasser wird in einem Behälter gesammelt. Da die Kondensatorleistung größer ist als die Kühlerleistung, tritt eine gewisse Raumerwärmung ein.

7.2 Entfeuchtung durch Absorption

Bei dieser Methode wird die Luft mit hygroskopischen Absorptionsstoffen in Berührung gebracht, die die Eigenschaft haben, Wasserdampf aus der Luft zu absorbieren. Der am meisten für diese Zwecke verwendete Absorptionsstoff ist Kieselgel, auch Silicagel genannt, chemisch reiner *Quarz* (SiO_2), der durch bestimmte Methoden so vorbehandelt ist, dass er eine außerordentlich große Oberfläche hat (300-500 $\text{m}^2/1$ g Kieselgel). Der Wasserdampf haftet durch Absorption an der Oberfläche und wird kondensiert. Die absorbierte Wassermenge hängt von dem Druck des Wasserdampfes ab und ist umso größer, je größer der Wasserdampfdruck ist. Bei der Absorption findet infolge der Kondensation des Wasserdampfes eine Temperaturerhöhung der Luft statt.

Wenn das Kieselgel die maximal aufnehmbare Menge absorbiert hat, ist es gesättigt und nicht mehr in der Lage, weitere Mengen Dampf zu absorbieren. Um es wieder absorptionsfähig zu machen, muss es regeneriert werden, was durch Erhitzen auf etwa 150 bis 200 °C mittels heißer Luft oder überhitzten Dampfes erfolgt. Nach erfolgter Abkühlung ist das Gel wieder verwendungsfähig. Infolge dieser Tatsache arbeiten Luftentfeuchtungsanlagen mit Gel als Absorptionsstoff nur periodisch, oder sie müssen, wenn sie dauernd in Betrieb sein sollen, mit zwei Kieselgelschichten arbeiten, von denen die eine absorbiert, während die andere regeneriert wird.

Bei Luftentfeuchtern, die nach dem *Munters*-Prinzip arbeiten, ist das feste Sorptionsmittel auf einer langsam rotierenden Trommel untergebracht. Das zu trocknende und das regenerierende Gas sind durch Dichtungen voneinander getrennt und durchströmen die Kanäle in dem jeweils dargebotenen Sektor der rotierenden Trommel.

8 Energiebetrachtung

Eine detaillierte Energiebilanzierung, insbesondere der Vergleich des Energieeinsatzes zwischen thermischer Trocknung und Trocknung mit entfeuchteter Luft, kann in einer allgemeinen Art und Weise nur schwer durchgeführt werden, da die produktionstechnischen Randbedingungen wesentlich in eine derartige Betrachtung eingehen. Bei der thermischen Trocknung hängt der Energieeinsatz z.B. stark vom Teilespektrum (Wärmekapazität der Teile) und von den Wärmeverlusten im Ofen ab.

Im Folgenden einige wichtige Punkte, die zwischen thermischer Trocknung und Trocknung mit entfeuchteter Luft zu unterscheiden sind:

- Bei der thermischen Trocknung wird Energie nicht nur für die Erwärmung der Trocknungsluft, sondern auch für das Aufheizen der Teile und des Ofens (Ofenwände, Peripherie usw.) verbraucht.
- In Trocknungsöfen treten in der Regel starke Wärmeverluste auf (z.B. über Schleusen, Abluft, Abgas, Fördereranlage, Teiledurchsatz).
- Bei der Trocknung mit entfeuchteter Luft wird hauptsächlich die Dampfdruckdifferenz zwischen Lackschichtoberfläche und Umgebungsluft als treibende Kraft für die Wasserabdunstung genutzt. Bei hinreichend trockener Luft findet eine ausreichende Abdunstung der Wasserlackschichten schon bei relativ niedrigen Temperaturen statt; das kostspielige Aufheizen der Teile entfällt weitgehend. Zudem ist bei niedrigen Temperaturen die Wahrscheinlichkeit einer vorschnellen Hautbildung, welche die Entfernung des Wassers erschweren kann, oder einer möglichen Voraushärtung des Lackes geringer.
- Auf Grund der obigen Punkte schneiden Trocknungsverfahren unter Nutzung von entfeuchteter Luft in der Praxis hinsichtlich des Energieeinsatzes oft weit günstiger ab als thermische Trocknungsverfahren, insbesondere auch dann, wenn z.B. bei der Kältetrocknung die anfallende Prozesswärme genutzt wird.
- Zu beachten ist jedoch, dass die Unterschreitung einer bestimmten Restfeuchte bzw. die Überschreitung einer bestimmten Abdunstrate nur durch Erhöhung der Temperatur, nicht aber durch weitere Reduzierung der Luftfeuchte erreicht werden kann.

Auf Grund der Schwierigkeiten, durch theoretische Betrachtungen zu einer aussagekräftigen Energiebilanzierung zu kommen, werden im Folgenden Beispiele von energetischen Vergleichen, welche die an diesem Forschungsvorhaben beteiligten Firmen in der Praxis gewonnen haben, präsentiert.

Im ersten Beispiel geht es um die Haftwassertrocknung (V1 (1998)). Die Energiebilanzierung ergibt, dass sich die Energiemengen bei der Heißtrocknung und der Kältetrocknung etwa im Verhältnis 10:1 gestalten. Das hat unterschiedliche Gründe. Zum einen muss bei der Heißtrocknung mit Abluft gefahren werden, um die gesättigte Luft über Dach abzuführen. Dabei wird gleichzeitig ein großer Teil ungesättigter Abluft mit vernichtet. Zusätzlich treten erhebliche Wärmeverluste an den Oberflächen der Anlage, an den Werkstücken, an den Schleusen und den Fördereinrichtungen auf. Dies alles ist bei der Kältetrocknung nicht notwendig. Hier wird der Hauptteil der Energie in Höhe von 67 % für die Spülwassererwärmung verwendet (Tab. 3).

Energieaufteilung in einem Haftwassertrockner	Heißlufttrocknung	Kältetrocknung
	Energie/-anteil	Energie/-anteil
Installierte Leistung	300 kW	30 kW
Zu lackierende Fläche	100 m ² /h	100 m ² /h
Zu entfernende Haftwassermenge	30 l/h	30 l/h
Gesättigte Luft	ca. 10 % / 27 TWE	-
Ungesättigte Abluft	ca. 30 % / 82 TWE	-
Oberflächenverluste	ca. 10 % / 29 TWE	20 % / 5 TWE
Werkstück erwärmung	ca. 19 % / 50 TWE	3 % / 1 TWE
Schleusenverluste	ca. 9 % / 25 TWE	6 % / 1,5 TWE
Fördereinrichtung	ca. 22 % / 60 TWE	4 % / 1 TWE
Spülwassererwärmung	-	67 % / 17 TWE

Tab. 3: Energetischer Vergleich zwischen Heißlufttrocknung und Kältetrocknung bei der Haftwassertrocknung.

Im Fall der Trocknung eines wässrigen Klebstoffsystems mittels Kältetrocknung entfeuchtet das Hygrex-Kälteaggregat die Luft auf 1 bis 4 g/m³ und ermöglicht so bei einer Umluftmenge von 2500 m³ stündlich einen Wasserentzug von 5 bis 8 kg (V1 (1998)). Dabei wird eine Anströmgeschwindigkeit von 2 bis 3 m/s benötigt, um für eine effektive Kältetrocknung zu sorgen. Die installierte Heizleistung, abgesehen von dem Ventilatorenstrom, liegt bei 1 kW pro kg Wasser und Stunde. Zwar liegt die Investition für das reine Kälteaggregat, bezogen auf einen Brenner mit entsprechender Ventilatorenleistung, bei der Kältetrocknung höher, Kosten werden aber schon dadurch eingespart, dass der eigentliche Trocknungstunnel weder Schleusen benötigt noch in A-Form gebaut werden muss oder dass man auch wegen der niedrigen Temperatur auf Isolierung des Kanals völlig verzichten kann.

Das Ergebnis für diesen Fall lautet unter dem Strich: wiederum ca. 90 % des bisherigen Energieverbrauchs konnten eingespart und der Trocknungsprozess um einige Meter verkürzt werden.

Mit dem Kältetrocknungsverfahren AIRGENEX[®] der Fa. Harter GmbH (BÄUERLE et al. (2000)) wird im Gegensatz zu herkömmlichen Trocknern das Energiepotenzial der feuchten Luft vollständig genutzt. Die Trockenluft wird im geschlossenen Kreislauf gefahren. Um nun ein extrem trockenes Klima zu erzielen, wird die feuchte Luft im Bypass ständig entfeuchtet. Die dazu notwendige Energie wird bei diesem Verfahren größtenteils aus dem Energiepotenzial der feuchten Luft entzogen. Der Rest stammt aus der Wärmeabgabe der eingesetzten Ventilatoren, deren Motoren auf Grund der niederen Temperaturen nun im Luftstrom platziert sein können. Durch Trocknungstemperaturen zwischen 30 und 60 °C werden die Abstrahlverluste auf ein Minimum reduziert. Neben der in der Regel deutlich reduzierten Trocknungszeit wird dadurch auch der Energieverbrauch minimiert.

In einem Beispielfall hat die Fa. Harter einen Lacktrockner mit einem Kältetrockner (Airgenex 9500) ausgerüstet. Die Trocknungsstrecke des Lacktrockners wurde von 8 auf 4,8 m verkürzt. Die Taktzeiten betragen anschließend statt 15-25 min lediglich 9-15 min. Ein Energievergleich zeigte, dass mit der neuen Trocknungstechnik im Vergleich zur herkömmlichen etwa 50.000 DM jährlich eingespart werden können. Auch der Platzbedarf ist fast um die Hälfte geringer als mit der konventionellen Trocknungstechnik. Verfahrensbedingt arbeitet der Niedertemperaturtrockner abluftfrei. Somit entfallen weitere bauliche Maßnahmen wie zum Beispiel Abluft-, Zuluft- oder Gasleitungen, und es gibt keine Probleme mit Emissionen.

Im Folgenden eine Gegenüberstellung von vier Praxisbeispielen der Fa. Harter:

Bsp. 1)

	Bei konventioneller Trocknung	Trocknung mittels Airgenex [®]	Reduzierung in %
Anschlussleistung	2 x 20 kW	9,5 kW	76 %
Trocknungszeit	12 min	7 min	42 %
Energievergleich	8 kW x h	1,1 kW x h	86,3%

Bsp. 2)

	Bei konventioneller Trocknung	Trocknung mittels Airgenex [®]	Reduzierung in %
Anschlussleistung	120 kW	27,4 kW	77 %
Trocknungszeit	18 min	12 min	33,3 %
Energievergleich	36 kW x h	5,5 k W x h	84,7 %

Bsp. 3)

	Bei konventioneller Trocknung	Trocknung mittels Airgenex [®]	Reduzierung in %
Anschlussleistung	11 kW	4 kW	63,6 %
Trocknungszeit	19 min	9,5 min	50 %
Energievergleich	3,5 kW x h	0,6 kW x h	74,9 %

Bsp. 4)

	Bei konventioneller Trocknung	Trocknung mittels Airgenex [®]	Reduzierung in %
Anschlussleistung	76 kW	19 kW	75 %
Trocknungszeit	16 min (nicht alle Teile wurden trocken)	16 min (alle Teile wurden trocken)	0 % (qualitativer Vorteil)
Energievergleich	20,3 kW x h	5,1 kW x h	74,9 %

9 Untersuchung der Blasenbildung im Fall des Einbrenn-Wasserlacks *Beckqua Hydro-Einschicht-Lack BE 25 9203*

Trocknungsverhalten von Wasserlackschichten auf Automobilzulieferteilen

Wasserlacke sind bei der Verarbeitung besonders anfällig für bestimmte Arten von Lackfilmenfehlern. Im speziellen besteht bei ihnen – im Gegensatz zu konventionellen lösemittelhaltigen

Lacksystemen – während der Trocknungsphase eine besondere Anfälligkeit zur Ausbildung von Blasen und Kochern. Die Ursache hierfür ist die hohe Verdampfungswärme von Wasser, welche zu einer erschwerten Abdunstung des Wassers aus den Lackschichten führt. Das in den Wasserlackfilmen verbliebene Restwasser kann während der Trocknungs- und Einbrennphase (bei ca. 130-160 °C) zu einer mehr oder weniger starken Entstehung von Lackblasen und -kochern führen. Lackblasenbildung tritt besonders in Bereichen erhöhter Lackschichtdicke auf (z.B. auf Lackläufern oder Lackwülsten an Werkstückkanten).

Das Auftreten der beschriebenen Beschichtungsfehler bei Wasserlacken stellt für Betriebe aus der lackverarbeitenden Industrie ein ernstes Problem dar. Als Beispiel seien Reklamationen von Automobilherstellern gegenüber Zulieferbetrieben genannt.

Bei den Lackherstellern wurden durch Materialoptimierung und Vorgaben zur Lackverarbeitung wichtige Beiträge zur Reduzierung der Lackfilmfehler bei Wasserlacken erbracht. Zum Beispiel kann durch Zugabe von Lackadditiven die Anfälligkeit für Lackfilmfehler deutlich gemindert werden.

Bei nicht optimal eingestellten Prozessparametern ist eine vollständige Verhinderung dieser Beschichtungsfehler jedoch selbst bei einem optimierten Lackmaterial nicht gewährleistet. So fehlen bei Anwenderunternehmen (z.B. Automobilindustrie) heute noch klare Erkenntnisse darüber, wie die Blasenentstehung bei den modernen Wasserlacksystemen von der prozesstechnischen Seite her sicher vermieden werden kann. Besonders auf sich an Werkstückkanten ausbildenden Lackwülsten oder bei Lackläufern und -tropfen, die sich auf im Tauchverfahren beschichteten Teilen bilden, konnte bisher die Entstehung von Lackblasen in vielen Fällen nicht verhindert werden.

Einige Annahmen und Vermutungen, wie die Blasenentstehung durch prozesstechnische Maßnahmen reduziert werden könnte, existieren zwar (z.B. geeignete IR-Vortrocknung der Wasserlackschichten). Auch gibt es Maßnahmen, die eher als Notbehelf zu sehen sind (z.B. Reduzierung der Lackschichtdicke, was sich unter funktionellen Gesichtspunkten u.U. nachteilig auswirken kann → Korrosionsschutz).

Die Fa. Storz (s. Abschnitt 10) beliefert die Automobilindustrie mit Zubehörteilen (Wagenheber, Befestigungselemente usw.). Im Zuge der verschärften Umweltschutzgesetzgebung möchte die Fa. Storz von lösemittelhaltigen Lacken auf Wasserlacke umsteigen.

In dem hier untersuchten Fall ging es um die Tauchlackierung von Metallteilen unter Verwendung des schwarz pigmentierten Einbrenn-Wasserlackes **Beckers Beckqua Hydro-Einsicht-Lack BE 25 9203** der Fa. Becker. Wie oben erwähnt, sind Wasserlacke, zusätzlich zu ihrem erschwerten Trocknungsverhalten, besonders anfällig für Fehler wie

- Blasen (bevorzugt in Bereichen mit erhöhter Lackschichtdicke, z.B. in Lacktropfen und Läufern),
- Nadelstiche und Kocherblasen in Lackwülsten, die sich an Werkstückkanten ausbilden.

Neben der langsameren Verdampfung von Wasser kann bei Wasserlacken eine Neigung zur Hautbildung den Wasseraustritt ebenfalls behindern. Beim Einbrennvorgang (ca. 140-160 °C)

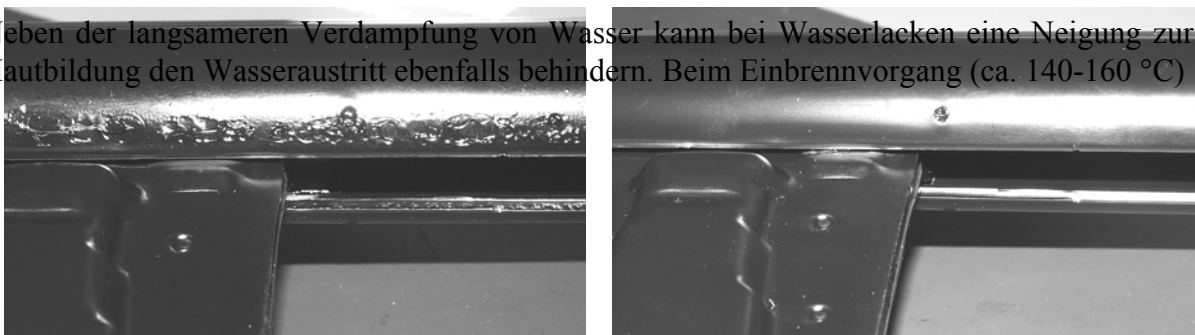


Abb. 14: Erscheinungsbild von Wasserlacktauchlackierungen: starke Blasenbildung unter Standardtrocknungsbedingungen (a); fehlerfreie Beschichtung unter optimierten Trocknungsbedingungen (b).

treten dann die beschriebenen Fehler auf (Kocherbildung durch schlagartiges Verdampfen des Restwassers).

Es wurde untersucht, ob sich durch die Anwendung der Kältetrocknung (entfeuchtete Luft) die Kocherbildung reduzieren lässt.

Abbildung 14a zeigt das Schadensbild mit dem Auftreten von Kochern, wie es bei der Trocknung unter den bisherigen Standardbedingungen resultiert:

- 10 min Ablüften bei 22 °C/60 % rel. Feuchte (damit der Lackfilm verlaufen kann)
- 15 min Ablüften bei 22 °C/25 % rel. Feuchte
- 20 min Einbrennen bei 140 °C

Abbildung 14b zeigt das Erscheinungsbild der Lackierung, wie es unter optimierten Trocknungsbedingungen resultiert:

- 5 min Ablüften bei 22 °C/60 % rel. Feuchte
- 15 min Kältetrockner bei 30 °C/6.4 % rel. Feuchte (2.1 g/m³ Wasser in Luft)
- lineare Heizrampe in 30 min von 30 auf 140 °C
- 10 min Einbrennen bei 140 °C

Die Umlufttrocknung erfolgte in einem elektrisch beheizten Kammertrockner Typ Heraeus NTL 100/150, der zur Einstellung von linearen Temperatur/Zeit-Rampen programmierbar ist.

Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass der effektivste Ansatzpunkt für die Vermeidung der Blasenentstehung bei Wasserlacksystemen in der Heizcharakteristik (→ Temperatur/Zeit-Kurven) während der Trocknungs- und Einbrennphase zu suchen ist. Die Trocknung mit ent-

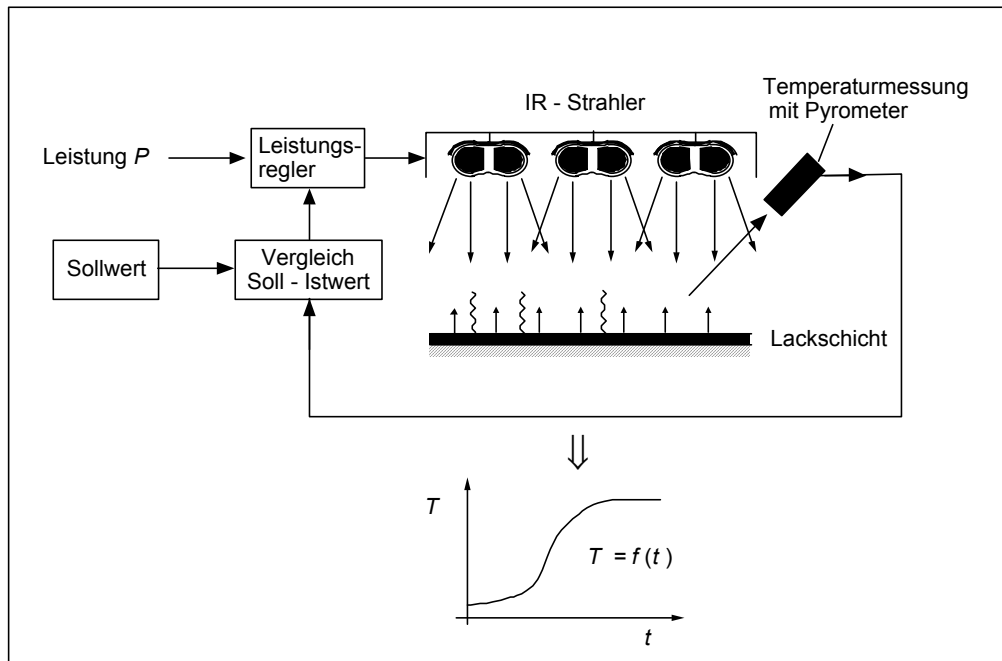


Abb. 15: Regelkreis zur Einstellung beliebiger Temperatur-Zeit-Kurven.

feuchteter Luft hat im zweiten Beispiel (Abb. 14b) einen deutlich untergeordneten Effekt bei der Vermeidung der Blasenbildung gezeigt.

In weiteren Untersuchungen wurde die Trocknung der Wasserlackschichten sowohl mit Um-luft als auch mit IR-Strahlung durchgeführt. In einem IR-Labortrockner (kurz- und mittelwellige IR-Strahler) waren über einen pyrometer- und computergesteuerten Regelkreis nahezu beliebige Temperatur/Zeit-Verläufe einstellbar (Abb. 15).

Die Untersuchungen ergaben, dass die Blasenbildung auch bei kritischen Beschichtungsverhältnissen (\rightarrow z.B. starke Tropfenbildung bei Tauchbeschichtung) praktisch vollständig vermieden werden kann, wenn die Wasserlackschichten mit linearen Temperatur/Zeit-Rampen bei geringen Heizraten (ca. 2-3 °C/min) getrocknet werden. Heizcharakteristiken dieser Art sind für die Produktion jedoch nicht praktikabel, und es muss das Ziel weiterer Forschungsarbeiten sein, aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen die optimierten Heizmethoden an reale Produktionsabläufe anzupassen. Dies kann durch Auswahl bestimmter Heizcharakteristika (z.B. Temperaturrampen, Haltezeiten auf Zwischentemperaturniveaus) geschehen (Abb. 16). Es ist zu vermuten, dass die Zusammenhänge zwischen Trocknungscharakteristik und Blasenbildung bei allen Einbrenn-Wasserlacksystemen ähnlich sind. Graduelle Unterschiede könnte es z.B. wegen unterschiedlicher Tendenz zur Hautbildung auf den Wasserlackschichten geben.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnte jedoch noch kein abschließendes Ergebnis bezüglich dieser Problemstellung erzielt werden. Das Ziel weiterer Forschungsarbeiten sollte sein, die vorläufigen Untersuchungen systematisch weiterzuführen und über eine Optimierung

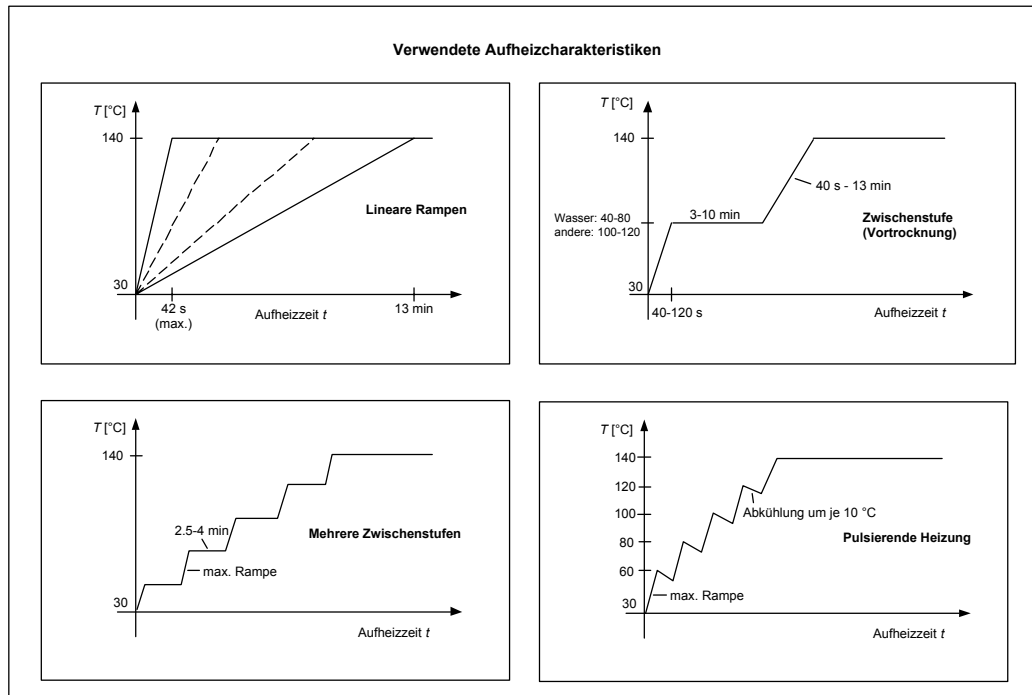


Abb. 16: Mögliche Temperatur-Zeit-Kurven zur Optimierung des Trocknungsprozesses.

der Trocknungsprozesse die Entstehung von Lackfilmfehlern weitgehend zu vermeiden. Als Ergebnis sollte, in Zusammenarbeit und unter Einbeziehung des *know-how* von Lackherstellern, eine Methode zur optimierten Auslegung der Prozessführung bei der Verarbeitung von Wasserlacken für die lackverarbeitende Industrie vorgelegt werden.

10 Am Vorhaben beteiligte Anlagenhersteller, Lack- und Anwenderfirmen

Die Untersuchungen des vorliegenden Projekts wurden in enger Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie durchgeführt. Diese Praxisnähe war für die geplante Umsetzung der Ergebnisse wichtig.

Folgende namhafte Firmen aus dem Bereich der industriellen Lackiertechnik waren in das Projekt eingebunden:

Anlagenhersteller: Fa. AB Anlagenplanung GmbH, 28832 Achim
Hersteller von Trocknungsanlagen

Fa. Harter Oberflächen- und Umwelttechnik GmbH

88145 Opfenbach
Hersteller von Trocknungsanlagen (Kältetrocknung nach dem AIRGENEX[®]-Verfahren)

Fa. HYGREX Luft- und Klimatechnik GmbH
22848 Norderstedt
Hersteller von Kältetrocknern

Lacklieferant: Fa. Wilh. Becker Industrielack GmbH
41539 Dormagen

Anwenderfirma: E. A. Storz GmbH & Co. KG
Fahrzeugsysteme & Hydrauliksysteme
78573 Wurmlingen
Automobilzulieferer

Die Firmen AB, Harter und HYGREX stellten für die Untersuchungen verschiedene Kältetrockner zur Verfügung. Die Kältetrockner wurden im Lackiertechnikum des Fraunhofer IPA aufgebaut und in Betrieb genommen (Abb. 17). Ein Sorptionstrockner wurde dem Fraunhofer IPA zur Durchführung von weiteren Experimenten zunächst in Aussicht gestellt, konnte aber dann doch nicht rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden.

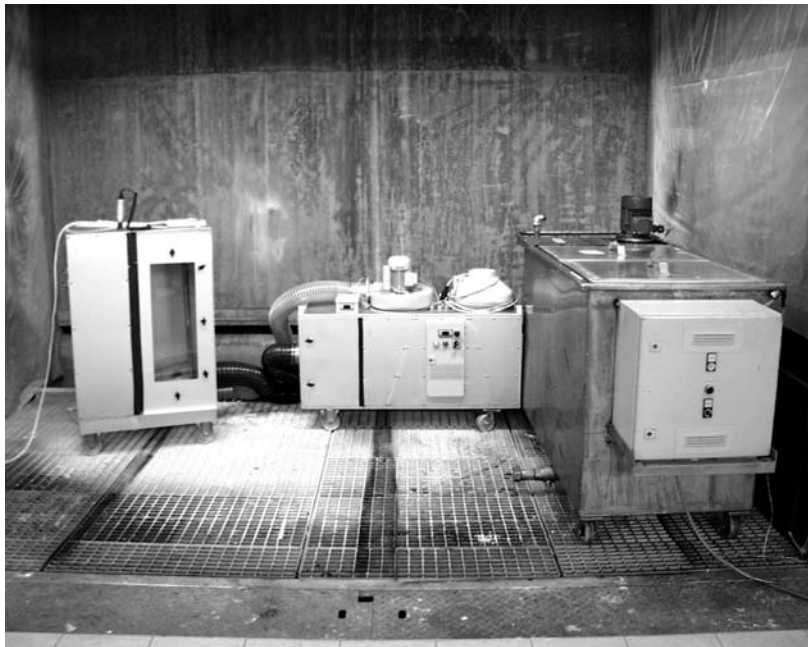


Abb. 17: Kältetrockner der Fa. HYGREX (li. u. mi.) und Tauchbecken für die Tauchversuche mit dem Hydro-Einbrennlack der Fa. Becker (rechts) im Oberflächentechnikum des Fraunhofer IPA.

11 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die industrielle Praxis

Bei der Konvektionstrocknung ist die Trocknungsgeschwindigkeit abhängig vom relativen Feuchtegehalt, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit der über die zu trocknende Lack-schicht strömenden Luft. In theoretischen und experimentellen Untersuchungen wurden die quantitativen Abhängigkeiten und die relativen Einflüsse der unterschiedlichen Faktoren bei der Trocknung von Wasserlackschichten ermittelt. Bei der praktischen Bewertung der Ergebnisse zeigt sich, dass eine differenzierte Betrachtung für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche vorzunehmen ist.

Die Geschwindigkeit der Luftströmung hat einen wesentlichen Einfluss auf das Abdunstverhalten der Lackfilme. Selbst bei ungünstigen klimatischen Verhältnissen lässt sich die Abdunstdauer durch Auferlegung einer Luftströmung deutlich reduzieren (z.B. um ca. 60 min für den Fall 30°C/90% rel. F. in Abb. 5). In Kleinbetrieben (z.B. Schreinereien und Kfz-Reparaturwerkstätten) ließe sich somit ein einfaches und kostengünstiges Verfahren zur Trocknung von Wasserlacken durch den Einsatz von belüfteten Hordenwagen (Abb. 18) oder Trockenblaspistolen (Abb. 19) realisieren (HRUSCHKA, R. (1999); V5 und V6). Mit Hilfe solcher Trocknungsgeräte lassen sich innerhalb eines relativ großen Prozessfensters (20-50 °C Zulufttemperatur, rel. Luftfeuchte < ca. 70 %, Strömungsgeschwindigkeit der Luft an der Lackoberfläche 0.5-2 m/s) befriedigende Trocknungsergebnisse mit akzeptablen Trocknungszeiten erzielen (vgl. Abb. 5). Die Luft sollte wenn möglich entlang der kürzeren Abmessung der lackierten Werkstücke strömen. Es ist darauf zu achten, dass bei zu hoher Luftgeschwindigkeit keine Rissbildung in den Lackfilmen auftritt.

Wie die Abb. 5, 7 und 10 zeigen, hat der relative Feuchtegehalt der Trocknungsluft ebenfalls einen großen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit. Die Trocknung mit entfeuchteter Luft kann sich für den industriellen Bereich lohnen, wenn z.B. bei wärmeempfindlichen Teilen oder bei Werkstücken mit hoher Wärmekapazität eine effiziente und schonende Trocknung bei relativ niedrigen Temperaturen realisiert werden soll (BÄUERLE et al. (2000), HELLMANN (2000), SCHÖNING (1999)). Durch Nutzung der anfallenden Prozesswärme lassen sich



Abb. 18: Belüfteter Hordenwagen zur Trocknung von wasserlackbeschichteten Flachteilen mittels strömender Luft (Prototyp Fraunhofer IPA)



Abb. 19:
Trockenblaspistolen für
Wasserlacke (SATA Dry-
Jet)

Trocknungsprozesse mit entfeuchteter Luft kostengünstig realisieren (Kondensations- oder Sorptionstrockner). Aus Abb. 5 zum Beispiel lässt sich darüber hinaus schließen, dass sich eine zusätzliche Entfeuchtung der strömenden Luft auf Werte $< 10-15\%$ rel. Feuchte durchaus lohnen kann, wenn dadurch über die Verkürzung der Abdunstdauer um weitere 30-60 sec die Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses (\rightarrow höherer Teiledurchsatz, reduzierter Staubbefall usw.) gesteigert wird. Bei der Trocknung mit entfeuchteter Luft ist allerdings zu beachten, dass selbst bei extremer Entfeuchtung der Trocknungsluft die Abdunstgeschwindigkeit bei festgehaltener Temperatur einen bestimmten Wert nicht überschreiten kann; eine weitere Steigerung der Trocknungsrate ist nur durch Temperaturerhöhung möglich (vgl. Abb. 2). Darüber hinaus wird die Verdunstung der organischen Restlösungsmittel im Wasserlack durch Einsatz der entfeuchteten Luft nicht beschleunigt.

Letztendlich wird eine Kombination aus Trocknungsverfahren mit entfeuchteter Luft und leichter Erwärmung der Trocknungszone ($30-40\text{ °C}/10-20\%$ rel. Feuchte) sowie ausreichender Luftbewegung ($0.5-2\text{ m/s}$) sicher eine der Möglichkeiten sein, um eine möglichst effiziente Trocknung der Lackschichten zu erreichen. Die Ergebnisse dieses Vorhabens können dabei als eine Grundlage für die Optimierung der technischen Parameter bei der Auslegung von Trocknungsprozessen dienen. Bei der Produktionsplanung und für die Erstellung von Energie- und Kostenbilanzen sind darüber hinaus die jeweiligen betrieblichen Gegebenheiten (\rightarrow Teilespektrum, angestrebte Prozesszeiten, Räumlichkeiten usw.) mit in Betracht zu ziehen.

12 Literatur

ANSELM, D., BECHTER, F. (1996): Die Reparaturlackierung mit Wasserbasislack: Technologie, Verarbeitung, Lackierzeit, Materialverbrauch. In: SCHWACKE/AZT: Wasserbasislacke. Sonderdruck. Eurotax (International) AG, Freienbach (Schweiz).

BÄUERLE, A., SCHAAL, E., UITZ, K. (2000): Wasserlack-Trocknung par excellence. JOT 3 (2000), S. 42.

DÖREN, K., FREITAG, W., STOYE, D. (1992): Wasserlacke: Umweltschonende Alternative für Beschichtungen. Kap. 14: Trocknung von Wasserlacken. S. 177. - Technische Akademie Wuppertal. Verlag TÜV Rheinland, Köln.

GNIELINSKI, V., MERSMANN, A., THURNER, F. (1993): Verdampfung, Kristallisation, Trocknung. Vieweg, Braunschweig, 1993.

HELLMANN, C. (2000): Niedertemperatur-Trocknung in der Automobilindustrie. JOT 9 (2000), S. 56.

HRUSCHKA, R. (1999): In: Nutzbarmachung des VOC-Minderungspotenzials im Schreinerhandwerk. Forschungsbericht. Umweltzentrum für Handwerk und Mittelstand e.V. Freiburg.

LYKOW, A. W. (1955): Experimentelle und theoretische Grundlagen der Trocknung. VEB Verlag Technik, Berlin, 1955.

SCHÖNING, T. (1999): Trockene Luft als Alternative zur Konvektionstrocknung bei der Verwendung von Wasserlacken. - I-Lack 9. S. 472 ff.

V1 (1998): „Kälte trocknet besser“; Beitrag zum Thema Wasserlacktrocknung; I-Lack 4 (1998), S. 232.

V2 (2000): Verschiedene Beiträge im Tagungsband „Maßnahmen zur Prozessoptimierung bei der Lacktrocknung und -härtung“; „Praxis-Forum“ Lackiertechnik 6/2000; Technik + Kommunikation Verlags GmbH, Berlin, 2000.

V3 (2000): „Belüfteter Hordenwagen trocknet Wasserlacke schneller“; Artikel in: besser lackieren! 11 (2000), S. 16.

V4 (2000): Projektbericht „Förderung des Wasserlackeinsatzes im Schreinerhandwerk durch optimierte Trocknungssysteme“; Umweltzentrum für Handwerk und Mittelstand e.V., Freiburg, März 2000.

V5: SATA Dry-Jet: Trockenblaspistole für Wasserlacke; Firmenschrift SATA, Kornwestheim.

V6 (2000): „Leistungsstarkes Trockenblassystem für Wasserlackmaterialien“; ITW Oberflächentechnik GmbH, Dietzenbach; Artikel in: besser lackieren! 21 (2000), S. 5.