

Klima schützen – Kosten senken Energieeinsparung in Lackierbetrieben – Langfassung



Fraunhofer Institut
Produktionstechnik und
Automatisierung



**Bayerisches Landesamt
für Umwelt**

Augsburg, 2006

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg
Tel.: (0821) 90 71 - 0
Fax: (0821) 90 71 - 55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

Projektbearbeitung :
IPA – Fraunhofer Institut – Produktionstechnik und Automatisierung

Zitiervorschlag:
Bayer. Landesamt für Umwelt (Hrsg.)
Energieeinsparung in Lackierbetrieben – Langfassung, Augsburg, 2006

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des
Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV).

© Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2006

Gedruckt auf Recyclingpapier

Inhaltsverzeichnis

1	Energierrelevanz von Lackierprozessen	3
2	Betrachtete Lackieranlagen	5
	2.1 Angewandte Lackierverfahren in den Branchen Metall, Kunststoff und Holz	5
	2.2 Modell-Lackieranlagen für energetische Betrachtungen	6
3	Erfassung der Energieverbraucher in Lackieranlagen	13
4	Ermittlung von betrieblichen Energiekennzahlen	13
5	Vorbehandlungsanlagen	14
	5.1 Anlagenarten	14
	5.2 Energiebilanz	15
	5.3 Potenziale für Energiesparmöglichkeiten	17
	5.4 Maßnahmen zur Energieeinsparung	18
	5.4.1 Heizkesselanlage	18
	5.4.2 Spritzvorbehandlungsanlage	18
6	Haftwassertrockner	20
	6.1 Energiebilanz	20
	6.2 Einflussgrößen auf den Energieverbrauch	21
	6.3 Maßnahmen zur Energieeinsparung	22
7	Lackierkabinen	25
	7.1 Energiebilanz	25
	7.2 Potenziale für Energiesparmöglichkeiten	26
	7.2.1 Rückgewinnung der Wärme durch Umluftbetrieb	26
	7.2.2 Rückgewinnung der Wärme aus der Kabinenabluft mit Wärmetauschern	28
	7.3 Maßnahmen zur Energieeinsparung	29
8	Tauchlackierung - KTL	30
	8.1 Energiebilanz	30
	8.2 Potenziale für Energiesparmöglichkeiten	30
	8.3 Maßnahmen zur Energieeinsparung	31
9	Abdunstzonen	32
	9.1 Einflussgrößen auf den Energieverbrauch	32
	9.2 Potenziale für Energiesparmöglichkeiten	32
	9.3 Maßnahmen zur Energieeinsparung	33
10	Lackaushärtung	33
	10.1 Umluft	33
	10.1.1 Energiebilanz	34
	10.1.2 Einflussgrößen auf den Energieverbrauch	34
	10.2 Härtung mit IR-Strahlen	35
	10.3 Härtung mit UV-Strahlen	36
	10.4 Trocknung mit Mikrowellen	38
	10.5 Trocknung mit entfeuchteter Luft	39
	10.6 Trocknung durch Induktion	42
	10.7 Energieeinsparpotenziale bei Trocknung und Härtung	44

11	Abluftreinigung	46
11.1	Praxisverfahren	46
11.2	Energiesparmöglichkeiten	48
11.3	Praxisbeispiel	48
12	Praxisbeispiel Kunststofflackieranlage	49
13	Tipps bei der Planung und beim Betrieb von Lackieranlagen	52
13.1	Energieeffizientes Anlagenkonzept	52
13.2	Anlagenkapazität	52
13.3	Energieeffiziente Anlagenkomponenten	53
13.4	Wirkungsgradverbesserung von Ventilatoren	54
13.5	Planungsprojekte zur Reduzierung des Energieverbrauchs	54
14	Energieeffiziente Zukunftskonzepte	55
Anhang:	tabellarische Zusammenstellung von Energieverbrauchern in Lackieranlagen	57

1 Energierelevanz von Lackierprozessen

Das Lackieren stellt in vielen Betrieben aller Größenordnungen einen unverzichtbaren Fertigungsschritt dar. Häufig erfordert das Lackieren über die Hälfte des gesamten Energieeinsatzes zur Herstellung der Produkte aus Halbzeugen, z.B. Blechbändern. Die Energiekosten bezogen auf die Lackierprozesse haben einen Anteil von immerhin 5 –15 %. Die Lackierung zählt damit zu den besonders energieintensiven Produktionsprozessen. Angesichts steigender Energiepreise sind Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in diesem Bereich besonders lohnend.

Energierelevant ist derzeit in vielen Lackierbetrieben auch die aufgrund der 31. BImSchV (Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen) durchgeführte Umstellung auf die nahezu lösemittelfreie Wasserlacktechnologie. Wasserlacke benötigen im Gegensatz zu den bisher eingesetzten Lösemittellacken oft eine Befeuchtung der Spritzkabinen-Zuluft. Deswegen wird die Reduzierung der Lösemittellemissionen in der Regel mit einem höheren Energieeinsatz erkaufte, sofern nicht zusätzliche technische Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz getroffen werden, z.B. die Wärmerückgewinnung aus der Spritzkabinenabluft. An diesem Beispiel zeigt sich auch, dass technische Energiespar-Maßnahmen mit Investitionen verbunden sind, die einer betriebswirtschaftlichen Bewertung standhalten müssen. Die Umstellung auf Pulverlackbeschichtung zum Beispiel erfüllt grundsätzlich die Lösemittelverordnung und verbraucht durch den Umluftbetrieb in der Pulversprühkabine auch deutlich weniger Energie.

Allerdings dürfen Maßnahmen zur Energieeinsparung nicht den Arbeitsschutz, die Prozesssicherheit und die Produktqualität gefährden. So ließe sich beispielsweise durch die Reduzierung des Luftdurchsatzes in Spritzkabinen oder durch die Absenkung von Prozesstemperaturen in Vorbehandlungsbädern und Öfen theoretisch viel Energie sparen. Solche Maßnahmen stoßen jedoch in der Praxis durch Vorgaben zum Explosions- und Arbeitsschutz sowie zur Beschichtungsqualität schnell an Grenzen. Zudem sind Kosteneinsparungen durch geringeren Energieverbrauch wirtschaftlich uninteressant, wenn sie die Ausschuss- und Nacharbeitsquote erhöhen.

Vor diesem Hintergrund sollen im vorliegenden Leitfaden anhand von Praxisbeispielen realistische Energie- bzw. Kosteneinsparungspotenziale und geeignete Maßnahmen bei den einzelnen Prozessschritten in Lackieranlagen aufgezeigt werden. Dabei wird zwischen verschiedenen Maßnahmenarten unterschieden:

- Technische und organisatorische Maßnahmen, die in bestehenden Anlagen kurzfristig ohne hohe Investitionen umgesetzt werden können.
- Maßnahmen, die mit höherem Aufwand und Eingriffen in die vorhandene Anlagen- und Verfahrenstechnik im Rahmen von Anlagenmodernisierungen verbunden sind. Solche Maßnahmen können auch bei Anlagen-Neuplanungen zum Tragen kommen.
- Maßnahmen in Verbindung mit alternativen Fertigungskonzepten, die substanzielle Änderungen gegenüber den bisher eingesetzten bzw. bisher üblichen Prozessen, Anlagen und Materialien erfordern. Solche Maßnahmen müssen hinsichtlich der Prozesssicherheit im Vorfeld in enger Zusammenarbeit mit den Anlagen- und Materiallieferanten sowie ggf. durch Hinzuziehen neutraler Experten abgesichert werden.

Für das Lackieren ist in vielen Fällen ein hoher Wärmeenergieaufwand notwendig, der zur mehrfachen Aufheizung der Werkstücke beim Durchlaufen des Beschichtungsprozesses erforderlich ist. Bei einer typischen Lackieranlage für Metallteile ist dies im Einzelnen

- Erwärmung in der Vorbehandlungsanlage (bis zu 70 °C)

- Aufheizung im Haftwassertrockner (80 - 120°C) zur Entfernung von Wasserresten
- Aufheizung der Werkstücke im Trockner nach der Lackapplikation (80 – 200°C), um die Lackschicht zu trocknen bzw. chemisch zu vernetzen. Je nach Anzahl der Lackschichten findet dieser Prozessschritt einmal oder mehrmals statt.

Bereits kleinere Lackieranlagen benötigen für diese Prozesse Heizleistungen im Bereich von 200 bis 500 kW.

Die Spritzkabinen stellen in den weit verbreiteten Spritzlackieranlagen, in denen manuell lackiert wird, große Energieverbraucher dar. Sie werden mit Frischluft durchströmt, die über weite Teile des Jahres erwärmt und - insbesondere beim Einsatz von Wasserlacken - befeuchtet werden muss. Bei der heutigen Anlagentechnik ist hierzu pro m² durchströmter Kabinenfläche ein jährlicher Wärmeenergiebedarf von ca. 50.000 kWh erforderlich. Dies entspricht dem jährlichen Energiebedarf zur Beheizung von mehreren Einfamilienhäusern.

In Abb. 1 wird der Energieverbrauch einer typischen Lackieranlage zur Wasserlackbeschichtung von Metall-Büromöbel, die auch im Leitfaden als Modellbeispiel verwendet wird, dargestellt. Ein Vergleich mit einer energieoptimierten Anlage zeigt, dass durch Optimierung des Energieverbrauchs der Jahresenergieverbrauch z.T. erheblich gesenkt werden kann.

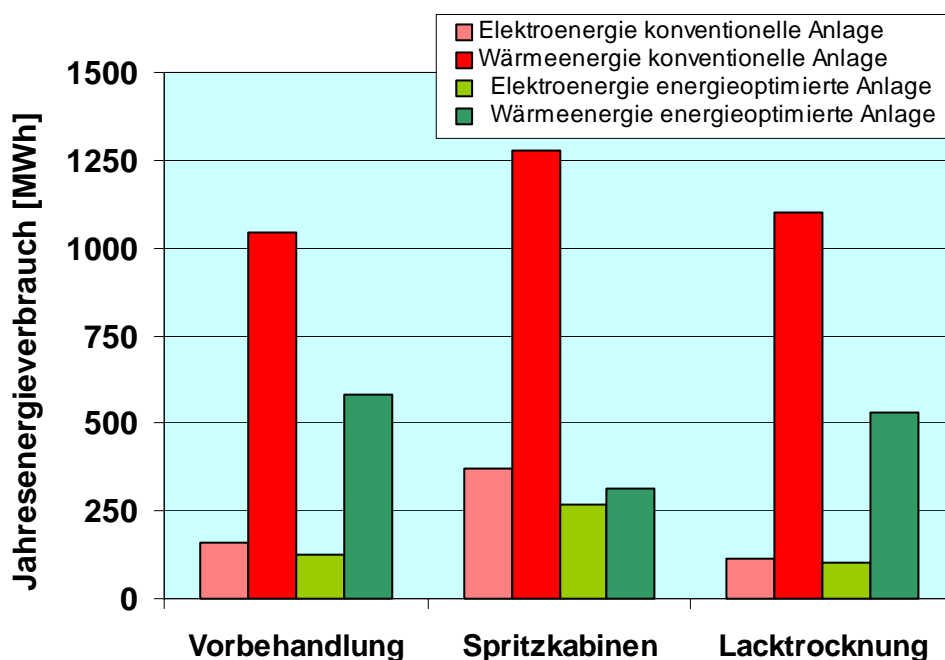


Abb. 1: Energieverbrauch in einer typischen Metalllackieranlage (Modellanlage für die manuelle Wasserlackbeschichtung von Metall-Büromöbeln im Vergleich zu einer energieoptimierten Anlage)

2 Betrachtete Lackieranlagen

2.1 Angewandte Lackierverfahren in den Branchen Metall, Kunststoff und Holz

Die Lackierverfahren für unterschiedliche Werkstoffe sind im Wesentlichen abhängig von

- der Teiledurchsatzmenge
- der Teilegeometrie
- den Qualitätsanforderungen an die Lackschicht und
- den vorgegebenen Lackierkosten

Um das jeweilige Lackmaterial auftragen zu können, müssen Lösemittel (VOC = volatile organic compounds) zugefügt werden, die sich nach dem Lackauftrag verflüchtigen und klimarelevant sind. Aufgrund der 31. BImSchV werden zunehmend lösemittelarme oder lösemittelfreie Lacke eingesetzt oder alternativ die lösemittelhaltige Abluft gereinigt.

Metallteilelackierung:

Bei der Lackierung von Metallen dient die Lackierung meist zur Verbesserung des Korrosionsschutzes sowie der optischen Aufwertung. Vor Auswahl des Lackmaterials und des Lackierprozesses ist ein genaues Anforderungsprofil zu erstellen.

Die Qualität einer Beschichtung auf einem metallischen Untergrund ist nicht nur von der Lackierung abhängig, sondern auch von der Beschaffenheit der Metalloberfläche zum Zeitpunkt der Lackierung. Voraussetzung ist eine gereinigte Oberfläche und häufig eine geeignete Konversionsschicht. Für die technisch wichtigen Metalle besteht die Konversionsschicht aus einer Phosphatierung oder einer (heute meist chromfreie) Passivierung. In vielen Fällen wird auch eine mechanische Oberflächenvorbehandlung wie Strahlen oder Schleifen angewandt.

Für den Lackierprozess steht eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung. Dies sind im Wesentlichen:

- Spritzlackierverfahren mit und ohne Elektrostatik
- Konventionelle Tauchlackierung
- KTL-(kathodischer Tauchlack), ATL-(anodischer Tauchlack)-Technologie
- Walzen, Gießen
- Elektrostatische Pulverlackbeschichtung
- Coil- und Pre-Coating

Welches Lackierverfahren zum Einsatz kommt, ist in der Metallbranche abhängig von den Qualitätsanforderungen, den Lackmaterialien, der Farbtonvielfalt und der Art und Form der zu lackierenden Werkstücken. Weitere Kriterien sind Schichtdicke, Schichtdickengenauigkeit, Glanz, Verlauf und Farbton.

Holzlackierung:

Holz ist als natürlicher Rohstoff ein inhomogener Werkstoff. Am weitesten verbreitet ist hier die Spritzlackierung.

- Die Spritzlackierung verursacht systembedingt hohe Lackmaterialverluste, Umweltbelastungen und Anlagenbetriebskosten. Meist ist die Druckluftzerstäubung im Hochdruckverfahren und Airlesszerstäubung mit und ohne Luftunterstützung im Einsatz.

- Flachteile lassen sich wirtschaftlich und schnell durch Walzen und Gießen gleichmäßig beschichten.
- Für Massivholzprofile (Fensterrahmen) werden Tauch- und Flutverfahren eingesetzt.
- Neue Wege sind in erster Linie Maßnahmen zur Reduzierung der Anzahl von Lackschichten und Zwischenschliffen und der Lackmaterialverluste (z.B. durch Optimierung des Lackauftrags, elektrostatisches Lackieren, Lackoversprayrecycling).
- Bisher wurden elektrostatische Lackierverfahren nur in Einzelfällen eingesetzt, da Holzwerkstoffe häufig eine ungleichmäßige elektrische Leitfähigkeit besitzen und Maßnahmen zur Erhöhung der Fertigungssicherheit nicht ausreichend erprobt sind.

Durch elektrostatische Lackierverfahren lässt sich der Lackauftragswirkungsgrad von z.B. 30 % auf ca. 70 % erhöhen und die Nachbesserungsquote halbieren. Eine Holzfeuchte von 8 % reicht für die Leitfähigkeit in der Regel aus.

Im Zusammenhang mit dem derzeitigen Trend zum Wasserlackeinsatz in der Holzindustrie werden zunehmend Lackoverspray-Recyclingtechnologien realisiert.

Die Beschichtung von Holz und Holzwerkstoffen mit Pulverlacken wurde bisher erst in wenigen Serienanwendungen realisiert (z.B. MDF-Platten mit pigmentierten Strukturpulvern).

Lackierung von Kunststoffteilen:

Die Lackierung von Kunststoffteilen ist charakterisiert durch folgende Aspekte:

- geringere Temperaturbeständigkeit der Kunststoffteile, d.h. der Einsatz von Einbrenn- und Pulverlacken ist nicht bei allen Werkstoffen möglich
- die Lackierung der meistens komplexen Werkstücksgeometrien erfordert eine speziell an die Form angepasste Auftragstechnik,
- die nicht vorhandene elektrische Leitfähigkeit der Kunststoff-Werkstücke, d.h. elektrostatische Auftragstechniken zur Minimierung von Overspray-Verlusten können nur durch unterstützende Maßnahmen realisiert werden.

Vor allem aufgrund der komplexen Werkstoffgeometrien werden in der Kunststofflackierbranche – bis auf wenige Einzelfälle – Spritzlackierverfahren eingesetzt. Die verwendeten Lackierpistolen arbeiten überwiegend als Druckluftzerstäuber im Hochdruckverfahren. Die Spritzlackierung ist durch meist geringe Lackmaterialnutzungsgrade von 20 bis 40% allerdings kostenintensiv.

Sehr hohe Lackmaterialeinsparungen (bis zu 50 %) sind mit elektrostatischen Hochrotationsglocken zu erreichen. Der Einsatz der elektrostatischen Lackierverfahren setzt voraus, dass Werkstücke zum hochspannungsführenden Sprühorgan einen elektrischen Gegenpol bilden.

2.2 Modell-Lackieranlagen für energetische Betrachtungen

Generell sollen in diesem Leitfaden solche Lackieranlagen betrachtet werden, die den größten Bereich der industriellen und handwerklichen Lackiertechnik abdecken. Dies sind Spritz- Lackieranlagen für flüssige Lacke sowie elektrostatische Pulversprühanlagen. Anlagentechnische Unterschiede bezüglich der Betriebsart, des Warentransports und des Beschichtungsprozesses ergeben sich außer durch das Lackmaterial, die Werkstücksformen und den Substratwerkstoff (Metall, Kunststoff, Holz etc.) auch durch die zu lackierenden Stückzahlen, die Farbtonvielfalt sowie die geforderte Beschichtungsqualität. Die Auslegungsdaten für die betrachteten Modellanlagen sind in Tab. 1 beschrieben.

Die im Leitfaden dargestellten Energiebilanzierungen, Schwachstellenbewertungen und Maßnahmen zur Energieeinsparung basieren zum einen auf Berechnungsgrundlagen von repräsentativen Anlagenherstellern, zum anderen auf Datenerfassungen und Erfahrungen des Fraunhofer IPA im Rahmen von Planungs- und Optimierungsprojekten bei Kleinanlagen und mittleren Anlagen aus den Bereichen Metall-, Holz- und Kunststofflackierung.

Werkstücke	Metall-Büromöbel	Kunststoffteile	Alu-Fenster- und Türprofile	Holz-Fensterrahmen
Lacke / Beschichtungsverfahren	Wasserlack / Spritzlackieren (Grundierung + Decklackierung); manuell; Frisch-/ Abluftbetrieb ohne Wärmerückgewinnung	Lösemittellacke / Spritzlackieren (Grundierung + Decklackierung); manuell;	Pulverlack / Elektrostatisches Pulversprühen (Einschicht); automatisch	Wasserlack Tauch-/ Flutlackieren der Grundierung; Manuelle Spritzlackierung des Decklacks
	Pulverlack / Elektrostatisches Pulversprühen (Einschicht); automatisch + manuell	Frisch-/ Abluftbetrieb ohne Wärmerückgewinnung		Frisch-/ Abluftbetrieb ohne Wärmerückgewinnung
Werkstoffe	Stahlblech, Grauguss, Aluminium	Polyurethan	Aluminium	Massiv-Holzprofile
Werkstück- bzw. Warenträgerabmessungen	Breite 800 mm Höhe 1000 mm Länge 1500 mm	Breite 800 mm Höhe 1000 mm Länge 800 mm	Breite 500 mm Höhe 1000 mm Länge 6000 mm	Breite 300 mm Höhe 1200 mm Länge 1500 mm
Durchfahrtsquerschnitt	Breite 1000 mm Höhe 1200 mm	Breite 1000 mm Höhe 1200 mm	Breite 700 mm Höhe 1200 mm	Breite 500 mm Höhe 1400 mm
Warenträgergewicht mit Teilen	40 kg	5 kg	200 kg	50 kg
Oberflächendurchsatz	25 - 300 m ² /h je nach Anlagengröße	50 - 300 m ² /h je nach Anlagengröße	50 - 300 m ² /h je nach Anlagengröße	25 - 100 m ² /h je nach Anlagengröße
Fördergeschwindigkeit	0,8 – 5,0 m/min	0,8 – 5,0 m/min	0,8 – 5,0 m/min	0,8 – 5,0 m/min

Tab. 1: Auslegungsdaten der berechneten Modell-Lackieranlagen.

Modell-Lackieranlage für Metall-Büromöbel

Für Büromöbel aus Metall eignen sich sowohl Flüssig- als auch Pulverlacke zur Erfüllung der dekorativen und funktionellen Lackschichteigenschaften, u.a. eine ansprechende Oberfläche mit hoher Beständigkeit gegenüber Reinigungsmitteln. Bei der Flüssiglackierung werden heute möglichst lösemittelarme bzw. -freie Lacke eingesetzt. In der modellhaften Anlage für Stahlmöbel kommen Wasserlacke zum Einsatz. Die Beschichtung besteht aus einer Grundierung und einer Decklackschicht, so dass nach der Vorbehandlung und Haftwassertrocknung zwei Applikations- und zwei Trocknungsprozesse erforderlich sind (Tab. 2). Die alternative Pulverlackbeschichtung erfordert lediglich einen einzigen Applikations- und Einbrennprozess (Tab. 3).

Prozessschritte	Prozessbedingungen
Entfetten und Phosphatieren	3 min bei 60 °C
Spülen 1	1 min bei RT
Spülen 2	1 min bei RT
Abblasen	0,5 min bei RT
Haftwassertrocknen	10 min bei 120 °C
Kühlen im Raum	20 min bei RT
Grundieren	RT, 50 % rel. Feuchte
Abdunsten	5 min bei RT
Zwischentrocknen	10 min bei 100 °C
Decklackieren	RT, 50 % rel. Feuchte
Temperiertes Abdunsten	10 min bei 60 °C
Aushärten	15 min bei 160 °C
Kühlen im Raum	30 min bei RT

Tab. 2: Prozessablauf in der Modell-Lackieranlage für Metall-Büromöbel (Wasserlackbeschichtung).

Prozessschritte	Prozessbedingungen
Entfetten und Phosphatieren	3 min bei 60 °C
Spülen 1	1 min bei RT
Spülen 2	1 min bei RT
Abblasen	0,5 min bei RT
Haftwassertrocknen	10 min bei 10 °C
Kühlen im Raum	20 min bei RT
Pulverbeschichten	RT
Aushärten	30 min bei 220 °C
Kühlen im Raum	30 min bei RT

Tab. 3: Prozessablauf in der Modell-Lackieranlage für Metall-Büromöbel (Pulverlackbeschichtung).

Die Domäne der Pulverlackierung ist bisher die Metallbeschichtung. Aufgrund der bisher erforderlichen hohen Einbrenntemperaturen der Pulverlacke und der erforderlichen elektrischen Leitfähigkeit des Substrates steckt die Pulverbeschichtung von wärmeempfindlichen und elektrisch isolierenden Substraten wie Holzwerkstoffen und Kunststoffen erst in den Anfängen.

In Tabelle 4 werden Pulverbeschichtung und Flüssiglackierung verglichen.

Kriterien	Pulverlackierung	Lackierung mit Flüssiglack
Lösemittelverordnung	+ +	- / +
Mechanische und chemische Beständigkeit	+	- / +
Weiterverarbeitung nach Aushärtung	+	- / +
Wiederverwendbarkeit von Overspray	+ +	- / +
Entsorgung von Lackabfällen	+	-
Hohe Schichtdicken mit einem Auftrag	+	- / +
Automatisierbarkeit der Beschichtung	+	- / +
Schneller Farbwechsel	-	+
Lackierung temperaturempfindlicher Werkstücke	- / +	+ +

Bewertung: + + sehr vorteilhaft + vorteilhaft - nachteilig

Tab.: 4: Vor- und Nachteile von Beschichtungen mit Pulverlack und Flüssiglack

Modell-Lackieranlage für Kunststoffteile

In der Modellanlage für Polyurethan-Kunststoffteile (z.B. Verkleidungen, Gehäuse, Funktionsteile) kommen Lösemittellacke zum Einsatz. Die Teile werden zunächst in einer Powerwash-Anlage nasschemisch gereinigt, anschließend erfolgt die Grundierung und die Decklackierung jeweils manuell mittels konventioneller Druckluft-Spritzpistolen (Tab. 5).

Prozessschritte	Prozessbedingungen
Powerwash-Reinigung	2,5 min bei 60 °C
Spülen 1	1 min bei RT
Spülen 2	1 min bei RT
Abblasen	1 min bei RT
Trocknen von Haftwasser	30 min bei 80 °C
Kühlen	25 min bei RT
Grundieren	RT
Abdunsten	10 min bei RT
Decklackieren	RT
Abdunsten	10 min bei RT
Aushärten	40 min bei 80 °C
Kühlen	30 min bei RT

Tab. 5: Prozessablauf in der Modell-Lackieranlage für Kunststoffteile.

Modell-Lackieranlage für Alu-Fenster- und Türprofile

In der Pulverbeschichtungsanlage werden die Aluminiumprofile in einer 7-Zonen-Anlage vorbe-handelt und anschließend elektrostatisch automatisch pulverbeschichtet (Tab. 6). Die Alumini-umprofile sind dabei horizontal auf den Wareträgern angeordnet. Anlagen dieser Art sind weit verbreitet und arbeiten bei Durchsatzmengen bis ca. 500 m²/h.

Prozessschritte	Prozessbedingungen
Entfetten	2,5 min bei 60 °C
Spülen	0,8 min bei RT
Spülen	0,8 min bei RT
VE-Spülen	0,5 min bei RT
Beizen	1,5 min bei 60 °C
Spülen	0,8 min bei RT
Spülen	0,8 min bei RT
VE-Spülen	0,5 min bei RT
Konversionsschicht (CrVI-frei)	1 min bei RT
Abblasen	0,5 bei RT
Haftwassertrocknen	10 min bei 120 °C
Kühlen im Raum	5 min bei RT
Pulverbeschichten	RT
Aushärten	15 min bei 180 °C
Kühlen im Raum	10 min bei RT

Tab. 6: Prozessablauf in der modellhaften Pulverbeschichtungsanlage für Aluminiumprofile.

Modell-Lackieranlage für Holzteile

In der Holzbeschichtungsanlage werden z.B. Fensterrahmen in einer Flut- oder Tauchanlage grundiert und nach einem Zwischenschliff anschließend mit pigmentierten oder offenporigen Decklacken nasslackiert (Tab. 7). Der Transport der Fensterrahmen erfolgt häufig mit einem Power und Free Förderer. Üblich in dieser Branche ist heute die Verwendung von Wasserlacken.

Prozessschritte	Prozessbedingungen
Schleifen	RT
Abblasen	RT
Grundieren durch Tauchen/Fluten	RT
Abdunsten	20 min bei RT
Trocknen	90 mit bei 40 °C
Zwischenschleifen	RT
Abblasen	RT
Decklackieren	RT
Abdunsten	RT, teils 50 % rel. Feuchte
Trocknen	90 min bei 40 °C

Tab. 7: Prozessablauf in der modellhaften Holzlackieranlage für Fensterrahmen.

3 Energiearten und -erfassung in Lackieranlagen

Thermische Energie wird meist aus fossilen Brennstoffen wie Gas oder Öl erzeugt und zur Erwärmung flüssiger Medien, z.B. in der Vorbehandlung, zur Erwärmung der Zuluft für Spritzkabinen, zur Luftherhitzung in Umlufttrocknern sowie zur Verbrennung von Lösemitteln in einer thermischen Abluftreinigung verwendet.

Elektrische Energie wird in Lackierereien vor allem für Antriebe von Ventilatoren, Pumpen und Druckluftkompressoren, zur Beleuchtung sowie in untergeordneter Weise zum Betrieb diverser Geräte wie Steuerungen u.ä. eingesetzt. Bei der Elektrotauchlackierung (ATL, KTL) wird elektrische Energie für die Lackabscheidung benötigt. Mengenmäßig liegt der Verbrauch an Elektroenergie in typischen Lackieranlagen bei 15 bis 30 % des Wärmeenergieverbrauchs.

Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades bzw. der CO₂-Emission bei der Stromerzeugung sowie des Kostenverhältnisses zwischen Strom und Gas bzw. Heizöl schlägt der Stromverbrauch umwelt- und kostenbezogen aber überproportional zu Buche.

In der Tabelle in Anhang 1 werden sämtliche Energieverbraucher unterschiedlicher Lackieranlagen einschließlich Vorbehandlung und sekundärer Prozesse wie Abluft- und Abwasserbehandlung bezüglich der erforderlichen Energieart, der Größenordnung des Energieverbrauchs sowie wichtiger Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch charakterisiert. Die angegebenen Leistungen entsprechen Anlagen und Prozessen von Kleinanlagen bis hin zu mittleren Systemen, wie sie in Industriebetrieben unterschiedlicher Branchen vorhanden sind. Großanlagen wie in der Automobilindustrie sind nicht berücksichtigt.

Nur wer seinen Energieverbrauch kennt, kann auch Energie sparen. Häufig können Lackieranlagenbetreiber keine oder nur unzureichende Angaben zum Energieverbrauch machen. Oft erscheint er im Betriebsabrechnungsbogen nur als Umlage. Zur Nutzung der vorhandenen Einsparpotenziale sollten deshalb auch die notwendigen organisatorischen Maßnahmen ergriffen werden, um die Basis für die Einführung einer definierten Kostenrechnung zu schaffen. Die Kenntnis des Energieverbrauchs einzelner Anlagenkomponenten ist auch die Voraussetzung für eine bessere Prozessüberwachung und eine verursacherspezifische Kostenzuordnung.

Aus dem betrieblichen Controlling lässt sich häufig ein erster Überblick über eingekaufte Energiemengen beschaffen. In einigen Fällen sind die Energieverbrauchswerte der Lackiererei bereits zugeordnet. Die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs des Gesamtenergiebedarfs mit der jeweiligen Zuordnung lässt sich mittels Stromzählern, Gaszählern, Wassermengenzählern, Betriebsstundenzählern, Protokollen von Schornsteinfegern sowie Messprotokollen von Messfirmen im Rahmen von behördlichen Untersuchungen durchführen. Weitere Energieverbrauchsdaten können auch über Nennleistungen (Typenschilder von Elektromotoren), Durchschnittsleistungen und Betriebszeiten abgeschätzt werden.

4 Ermittlung von betrieblichen Energiekennzahlen

Spezifische Kennzahlen ermöglichen die Dokumentation der Entwicklung der innerbetrieblichen Energieeffizienz sowie den Vergleich der Energieeffizienz des eigenen Betriebes mit der anderer Betriebe. Daraus lassen sich vorhandene Einsparpotenziale abschätzen. Die spezifischen Energiekennzahlen sollen sich auf charakteristische Leistungen des Lackierbetriebes bzw. die Durchsatzmenge lackierter Teileoberfläche, angegeben in m²/h, beziehen.

Die Abbildungen 2 - 5 zeigen am Beispiel von Modell-Lackieranlagen jeweils für Metall-Büromöbel, Kunststoffteile, Aluminiumprofile und Holzfenster die Energiekennzahlen für unterschiedliche Anlagenkapazitäten.

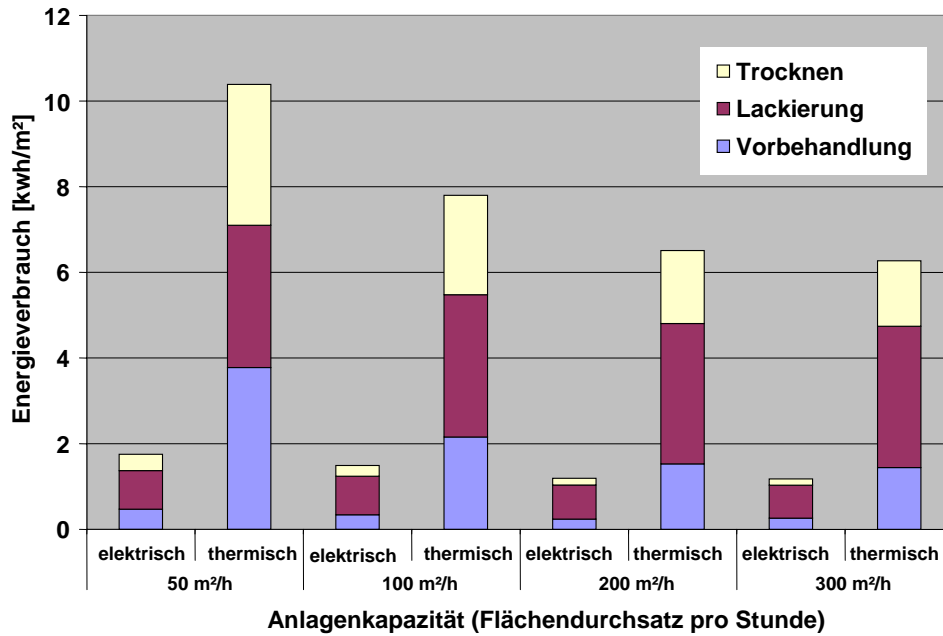


Abb. 2: Energieverbrauch von Metalllackieranlagen (Wasserlack) unterschiedlicher Kapazität in Abhängigkeit vom Flächendurchsatz

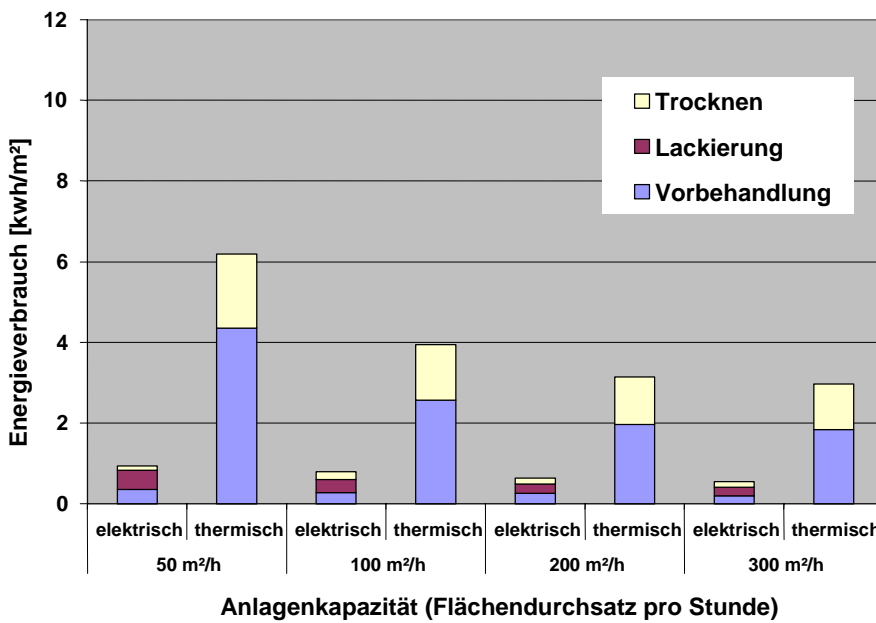


Abb. 3: Energieverbrauch von Modellanlagen für Kunststoffteile unterschiedlicher Kapazität (Lösemittel-lack) in Abhängigkeit vom Flächendurchsatz

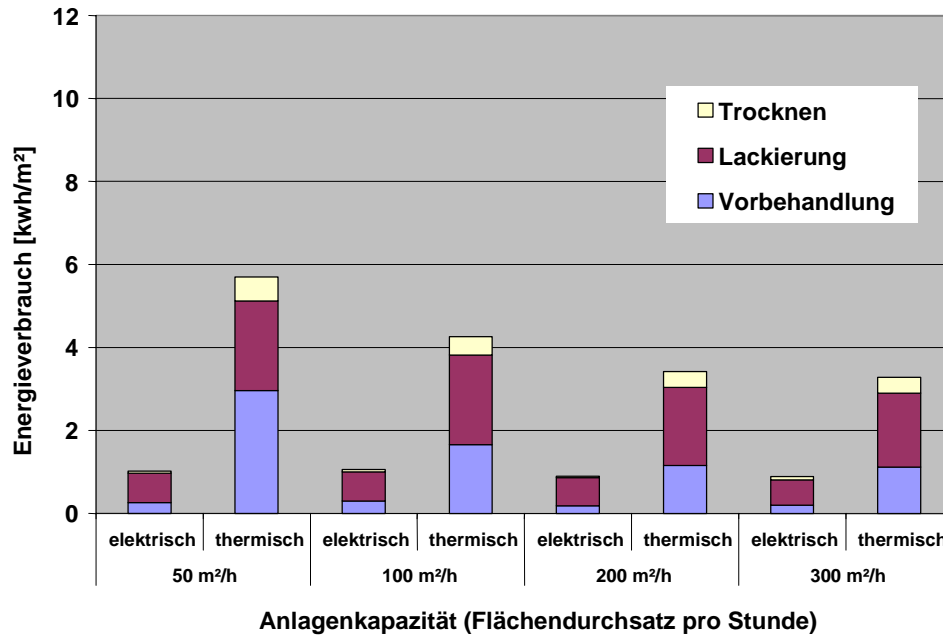


Abb. 4: Energieverbrauch von Modellanlagen für Aluminiumprofile (Pulverlack) unterschiedlicher Kapazität in Abhängigkeit vom Flächendurchsatz

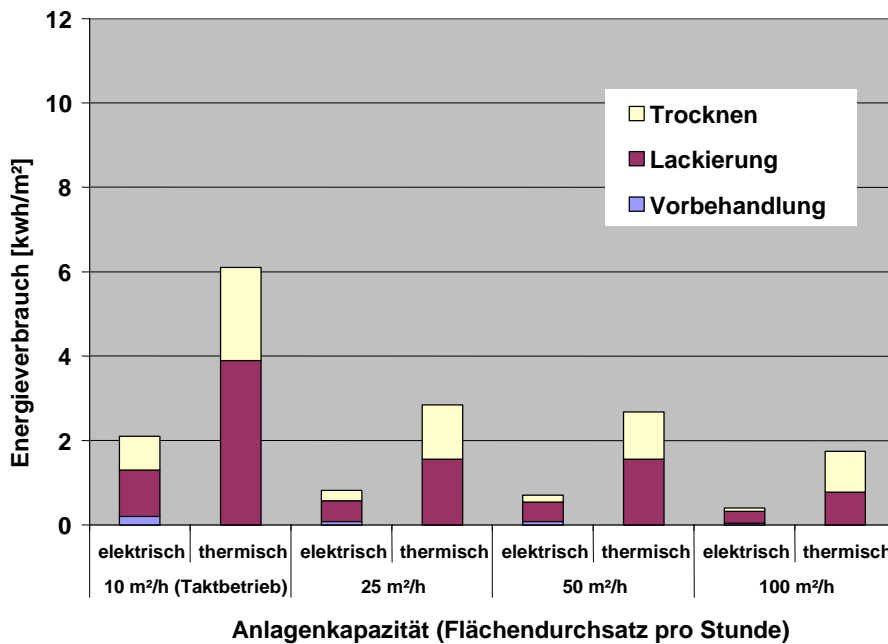


Abb. 5: Energieverbrauch von Modelllackieranlagen für Holzfenster (Wasserlack) unterschiedlicher Kapazität für in Abhängigkeit vom Flächendurchsatz

Große Anlagen sind generell energieeffizienter als kleine Anlagen. Da die Kennzahlen nur auf die lackierte Flächen bezogen sind, können bei individuell abweichenden Teilegeometrien (Materialdicken, Dopplungen usw.) andere Energieverbräuche gemessen werden.

Besonders bei Taktanlagen wirken sich die im Vergleich zu Durchlaufanlagen längeren Transportzeiten der Teile in der Kabine sowie die erforderliche Mindestgröße der Spritzkabine ungünstig auf die Anlagenkapazität und auf den Flächendurchsatz-bezogenen Gesamt-Energieverbrauch aus.

In den nachfolgenden Abschnitten werden einzelne Anlagenteile anhand der modellhaften Lackieranlage für Büromöbel beschrieben. Die sich aus Energiebilanzen ergebende Potenziale zur Energiereduzierung und die daraus resultierenden Kosteneinsparungen beziehen sich auf folgende Energiepreise:

Erdgas: 0,05 €/kWh,
El. Strom 0,08 €/kWh

5 Vorbehandlungsanlagen

5.1 Anlagenarten

Zur Vorbehandlung sind aufgrund der Umweltgesetzgebung vorwiegend wässrige Verfahren im Einsatz. Abhängig von der Werkstückform finden Spritz- und Tauchanlagen Anwendung. Grundsätzlich muss sichergestellt sein, dass sich in den Werkstücken keine schöpfenden Stellen bilden. Die qualitativen Unterschiede zwischen Tauch- und Spritzanlagen sind in Tabelle 8 beschrieben.

Kriterien	Spritz-Vorbehandlungsanlage	Tauch-Vorbehandlungsanlage
Behandlung von Innenflächen	-	++
Behandlung schwer erreichbarer Flächen	-	+
Behandlung von aufschwimmenden Werkstücken	+	- / +
Investitionskosten	+	- / +
Platzbedarf	-	+
Energieverbrauch	-	++
Taktbetrieb	+	- / +
Erforderliche Behandlungszeit	++	-
Prozesstemperatur	55-60 °C	70-75 °C

Bewertung: ++ sehr vorteilhaft + vorteilhaft - nachteilig

Tab.: 8: Vor- und Nachteile der Vorbehandlung mit Spritz- und Tauchanlagen

In Abb. 6 ist eine Tauchanlage mit Beschickungseinrichtung und in Abb. 7 eine Spritzanlage mit Kreisförderer zu sehen.



Abb. 6: Tauchvorbehandlungsanlage (Quelle: Eisenmann)



Abb. 7: Spritzvorbehandlungsanlage

5.2 Energiebilanz

Um den Wärmebedarf für die Beheizung von Vorbehandlungsbädern zu ermitteln, werden die Wärmeverluste durch

- Verdunstung über die Badoberfläche
 - Aufheizung des Ergänzungswassers
 - Aufheizung der Werkstücke
 - Verdunstungsverlust bei der Verdüsung
- gemessen bzw. berechnet.

Abb. 8 zeigt die Energieströme in einer Spritzvorbehandlung.

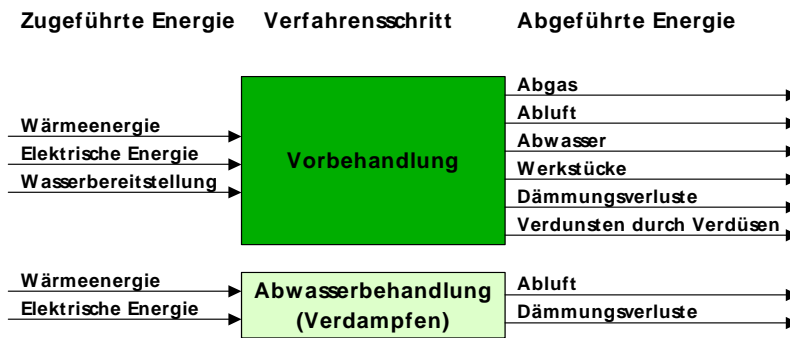


Abb. 8: Energieströme in einer Vorbehandlungsanlage mit Abwasserbehandlung

In Tauch- und Spritzvorbehandlungsanlagen verteilt sich der Energieverlust jeweils unterschiedlich (Abb. 9).

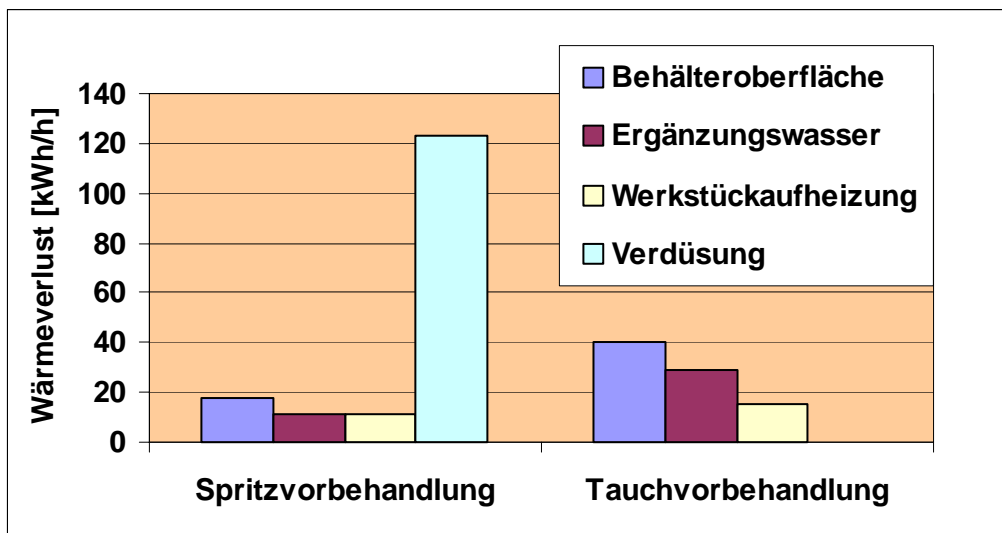


Abb. 9: Wärmeverluste in Spritz- und Tauchvorbehandlungsanlage (Modellanlage für Metall-Büromöbel).

In Spritzvorbehandlungsanlagen entsteht der weitaus größte Energieverlust beim Verdüsen des beheizten Behandlungsmediums – ein großer Teil der zugeführten Energie wandert von den beheizten Zonen in die kälteren Spülbäder durch die Luftzirkulation in den neutralen Zonen. Dieser Verlust an Wärmeenergie ist vom Tunnelquerschnitt und der Temperaturdifferenz zwischen den Zonen abhängig. Weitere Verluste entstehen durch die Schwadenabsaugung im Ein- und Auslauf der Vorbehandlungsanlage.

Deutlich weniger Energie geht in einer Tauchvorbehandlungsanlage verloren, hier hauptsächlich über die Behälteroberfläche. Abb.10 zeigt für die modellhafte Anlage den Gesamtenergieverbrauch von Spritz- und Tauchvorbehandlung im Vergleich. Für eine Spritz-Vorbehandlung wird ca. 20 % des gesamten Energieverbrauches in der Lackieranlage verbraucht.

In die Energiebetrachtung mit einzubeziehen ist auch die Abwasseraufbereitung. Die konventionelle Chargenabwasseranlage wird durch Schmutzwassereindampfanlagen ersetzt, u.a. um die Beantragung einer Wassereinleitung zu vermeiden. Ausgehend von einem Abwasseranfall von ca. 2 Litern je m² lackierter Fläche, fallen täglich in der Modellanlage ca. 5.100 Liter Abwasser an. Während für die Behandlung in einer Chargen-Abwasseranlage dafür nur ca. 10 kW elektrische Leistung erforderlich sind, werden in einer Eindampfanlage mit einer typischen Leistung von 200 l/h zusätzlich noch ca. 180 kW Wärmeleistung zur Verdampfung benötigt. Dies ist ebenso viel wie zum Beheizen des Entfettungs- und Phospatierungsbades notwendig ist.

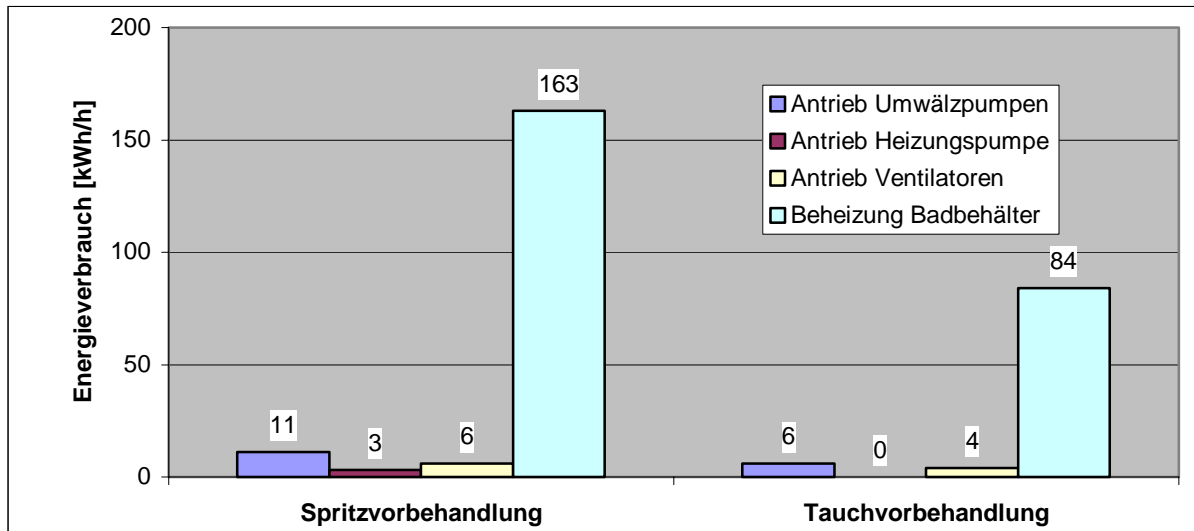


Abb. 10: Gesamter elektrischer und thermischer Energieverbrauch bei Tauch- und Spritzvorbehandlungsanlagen (Modellanlage für Metall-Büromöbel, ohne Abwasserentsorgung).

5.3 Potenziale für Energiesparmöglichkeiten

Bei Vorbehandlungsanlagen wird die meiste Energie zur Aufheizung von Prozessbädern benötigt. Hier sind auch Schwachstellen zu finden, die zu unnötigem Energieverbrauch führen. Die Prozessbäder werden häufig mit Warmwasser oder Dampf aus öl- oder gasbeheizten Kesselanlagen erwärmt. Zu berücksichtigen sind der feuerungstechnische Wirkungsgrad sowie die Leitungsverluste im Vor- und Rücklauf. Entscheidend ist, dass der Heizkessel dem Stand der Technik und den geltenden gesetzlichen Vorschriften entspricht sowie räumlich möglichst nahe an der Vorbehandlungsanlage steht.

Aufgrund des hohen Anteils der Verdünnungsverluste sind Spritzvorbehandlungsanlagen hinsichtlich des Wärmeenergieverbrauchs zur Beheizung der Badbehälter besonders kritisch. Die Nutzung von Abwärme aus anderen Fertigungsbereichen, z.B. einer Gießerei, oder aus einer thermischen Nachverbrennungsanlage (TNV), ist hier unbedingt anzustreben. Die Abwärme wird meist in den Rücklauf eingespeist und sollte über dem Temperaturniveau des Rücklaufs liegen. Mit einer solchen Wärmekaskade (siehe Abschnitt 12) ist im Idealfall die weitgehende Einsparung zusätzlicher Gas- bzw. Ölmengen zur Beheizung der Badbehälter möglich.

Wenn für die Beheizung der Vorbehandlung Heißwasser benötigt wird, kann eine Erwärmung des Rücklaufs auch über eine Solaranlage erfolgen.

Bei Tauchvorbehandlungsanlagen verlässt der Hauptteil der Energie die Anlage mit der Abluft. Hier kommt der Optimierung des Zu- und Abluftsystems besondere Bedeutung zu (siehe hierzu Broschüre *Effiziente Energienutzung in der Galvanikindustrie* des BayLfU).

5.4 Maßnahmen zur Energieeinsparung

5.4.1 Heizkesselanlage

Eine wichtige Maßnahme ist die Überprüfung der Kesselanlage sowie der Warmwasservor- und -rücklaufleitungen durch Messung folgender Größen:

- Abgastemperatur
- Leitungsquerschnitt der Heizungsrohrleitungen
- Durchflussmenge und Temperaturdifferenz in den Heizungsrohrleitungen

Die Messungen sollten zusammen mit dem Heizungsbauer durchgeführt und bewertet werden, woraus sich eventuell erforderliche Maßnahmen wie

- Einstellen oder Erneuern des Heizkessels
- Anpassung von Leitungsquerschnitten
- Dämmung nach dem Stand der Technik

ableiten. Faktoren, die sich auf die Rohrleitungsverluste auswirken, sind:

- Oberfläche,
- Dicke und Wärmeleitfähigkeit der Dämmung,
- Temperaturdifferenz
- Verluste durch Wärmebrücken (Durchführungen) und Lecks

5.4.2 Spritzvorbehandlungsanlage

Das Verdüsen von Behandlungsmedien in einer Spritzvorbehandlungsanlage bewirkt eine Oberflächenvergrößerung der Badflüssigkeiten um ein Vielfaches. Dadurch erhöht sich auch der Wärmeübergang der Flüssigkeiten an die Umgebungsluft, die als Dampfschwaden abgesaugt werden. Aufgrund größerer Transportlücken durch Farbwechsel und Fördererstillstände sind mit Stillstandszeiten von im Schnitt 10 % zu rechnen. Schaltet man die Spritzpumpen während der Stillstandszeiten ab, beträgt das Einsparpotenzial beim Verdüsenverlust und beim Stromverbrauch für die Pumpen ebenfalls ca. 10 %.

Der Spritzdruck in der Vorbehandlungsanlage wird oft mit Drosselklappen eingestellt, was einer Energievernichtung beim Betrieb des elektrischen Pumpenantriebs gleich kommt. Wird der Förderstrom über die Drehzahl der Pumpe eingestellt, wird eine geringere Motorleistung benötigt (Abb. 11).

Zu variablen Einstellwerten des Spritzdrucks kann mit einem Frequenzumrichter die Motordrehzahl stufenlos verändert werden, wobei der ganze Antriebsstrang auch sanft beschleunigt und gebremst werden kann (weniger Verschleiß). Bei 2000 Betriebsstunden pro Jahr macht sich ein Motor mit Frequenzumrichter in etwa 4 Jahren bezahlt. Ebenfalls nach wenigen Jahren amortisiert sich der Einsatz von hocheffizienten Elektromotoren (siehe hierzu *Leitfaden für effiziente Energienutzung in Industrie und Gewerbe des LfU*).

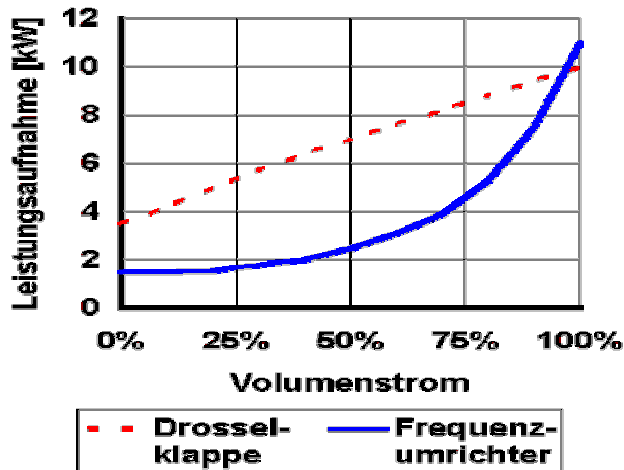


Abb. 11: Leistungsvergleich für eine Volumenstromreduktion mit Drosselklappe und drehzahlvariablem Motor.

(Quelle: GLOOR Engineering)

Durch den Einbau von Abschottblechen zwischen beheizten und unbeheizten Zonen, die nur die notwendige Materialöffnung (Anlagenquerschnitt) freilassen, wird der Luftaustausch reduziert.

In vielen Vorbehandlungsanlagen vermisst man eine ausreichende Dämmung, da die Anlagen dadurch in ihren Anschaffungskosten billiger sind. Aufgrund der langjährigen Nutzungsdauer ist aber gerade eine gute Wärmedämmung besonders rentabel.

Maßnahmen für die Spritzvorbehandlung der Modellanlage	Einsparpotenzial in kWh/h	Kosteneinsparung/a	Investitionskosten
Kurzfristig umsetzbare technische und organisatorische Maßnahmen (ohne hohe Investitionen)			
Abschalten der Spritzpumpen in Pausen, während Transportlücken und bei Fördererstillstand; das Verdüsen verbraucht die meiste Wärmeenergie	12 (thermisch)	2.300 €	5.000 €
Einsatz von Reinigungschemikalien, die eine Vorbehandlung bei niedrigeren Prozesstemperaturen ermöglichen (Reduktion um 10°C)	40 (therm.)	7.700 €	Mehrkosten für Material/a 2500 €
Druckminderung der Umwälzpumpen durch Frequenzregelung anstelle von Drosselklappen in den Rohrleitungen	8 (elektrisch)	2.500 €	7.500 €
Maßnahmen bei Anlagenmodernisierungen			
Abschottbleche zwischen beheizten und unbeheizten Zonen als „Wärmefalle“ einbauen (Reduktion des Luftaustausches)	3 (therm.)	600 €	2.000 €

Maßnahmen für die Spritzvorbehandlung der Modellanlage	Einsparpotenzial in kWh/h	Kosteneinsparung/a	Investitionskosten
Dämmung von Gehäuse, Badbehälter, Wärmetauscher und Rohrleitungen von beheizten Zonen	12 (therm.)	2.300 €	6.000 €
Verlängerung der Einlaufzonen um 1-2 Meter	9 (therm.)	1.700 €	3.000 €
Ablufffreier Betrieb durch Einbau eines Kondensationsaggregats mit Wärmerückgewinnung	36 (therm.)	6.900 €	25.000 €
direkte Abwärmenutzung des Einbrennofens bzw. des Haftwassertrockners	3 (therm.)	600 €	8.000 €
Alternative Fertigungskonzepte			
Anlagenkonzept mit Tauchbädern	18 (el.) 95 (therm.)	24.000 €	200.000 €
Verzicht auf nasschemische Vorbehandlung, z.B. in Verbindung mit Minimalbeölung und Strahlen (Anwendbarkeit beachten!)	163 (therm.)	31.000 €	Einsparung 200.000 €

Tab. 9: Maßnahmen zur Energieeinsparung in einer Vorbehandlungsanlage

Da die erste Zone (Entfettung) meist beheizt ist, kann man mit einer um ein bis zwei Meter verlängerten Einlaufzone die abzusaugende Schwadenablufte verringern, so dass weniger Dampfschwaden austreten. Eine Rückführung der Schwadenablufte in den Raum nach vorheriger Kondensation der Dampfschwaden reduziert die Nachführung der erforderlichen Frischluftmenge in den Raum (kleinere Zuluftanlage ausreichend).

Aus der Trocknerablufte kann über Wärmetauscher Warmwasser erzeugt werden. Allerdings ist zu prüfen, ob zur Überwindung der Druckdifferenz die Installation eines Abluftventilators erforderlich ist.

6 Haftwassertrockner

6.1 Energiebilanz

Zur Trocknung der Werkstücke aus der Vorbehandlung werden in der Praxis verschiedene Systeme von der einfachen Warmblaszone bis zum Düsentrockner verwendet. In der Modellanlage zur Metalllackierung ist ein Haftwassertrockner eingesetzt. Die Trocknungstemperatur beeinflusst den Energieverbrauch direkt. Niedrige Trocknungstemperaturen z.B. von chromatierten Teilen bis 90 °C erfordern lange Verweilzeiten und entsprechend lange Trocknungsanlagen. Der Energieverbrauch durch die Abluftmenge ist durch die Einstellung auf die durchgesetzte Wassermenge vorgegeben (Siehe Abb. 12).

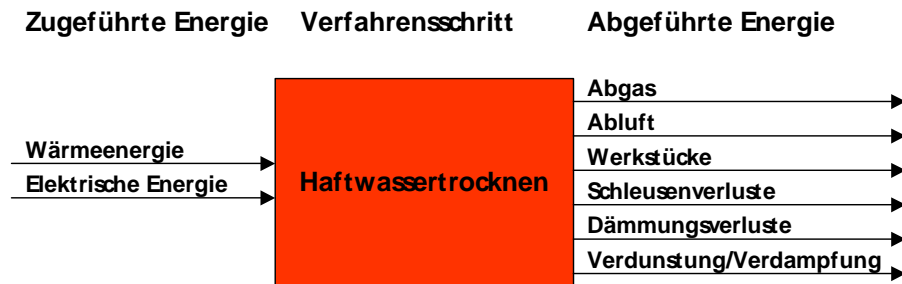


Abb. 12: Energieströme in einem Haftwassertrockner

6.2 Einflussgrößen auf den Energieverbrauch

Wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch hat die Konstruktion der Werkstücköffnungen. Übliche Ausführungen sind:

- Ausblasen eines Teilstroms der Umluft an den Werkstücköffnungen (Sparschleuse),
- Umluftbetriebene Luftschleusen,
- A-Schleusen (Warenein- und austritt von/nach unten) und
- Schiebetore

Die Sparschleuse an den Trocknerenden eignet sich nur für niedrige Trocknertemperaturen und kleine Materialdurchlässe. Zum Ausgleich des thermischen Druckes muss der Unterdruck im Trocknerkanal relativ hoch sein. Dazu muss die Abluftklappe entsprechend geöffnet sein, wodurch Energieverluste durch eine hohe Abluftmenge entstehen.

Wirksamer sind umluftbetriebene Luftschleusen, da die Warmluft besser zurückgehalten werden kann. A-Schleusen (Abb. 13) sind für den kontinuierlichen Betrieb aus energetischen Gründen die beste Lösung, setzen aber eine ausreichende Raumhöhe voraus.



Abb. 13: Trockner mit A-Schleuse (Quelle: Eisenmann)

Die Wärmeverluste von modernen Trocknungsanlagen über die Gehäusewand sind vergleichsweise gering. Durch die Umstellung von gasbeheizten Trocknern von indirekter auf direkte Beheizung (Führung der Umluft direkt über die Gasflamme) lassen sich 10 bis 15 % Heizenergie einsparen, die sonst im Wärmetauscher (bei indirekter Beheizung) verloren gehen. Bei der modellhaften Anlage wurde die direkte Beheizung gewählt. Die Wärmeverluste eines Haftwassertrockners verteilen sich wie in Abb. 14 dargestellt:

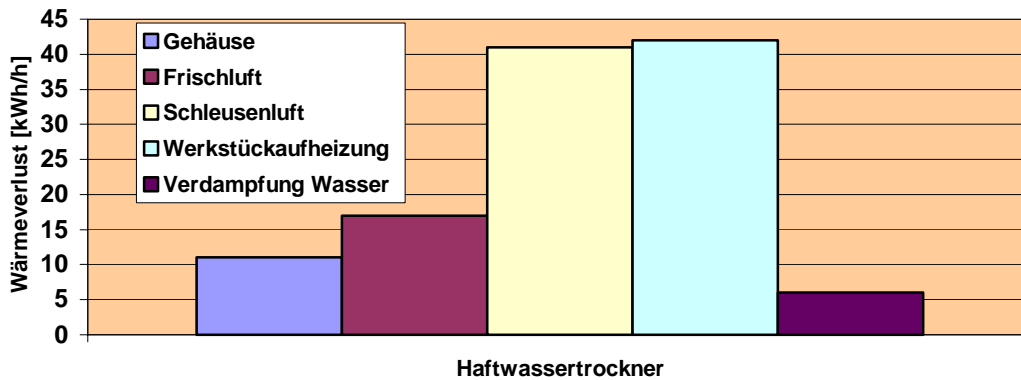


Abb. 14: Wärmeverluste in einem Haftwassertrockner (Modellanlage für Metallbüromöbel)

6.3 Maßnahmen zur Energieeinsparung

Das Verschließen von Trockneröffnungen für die Werkstücke mit Toren macht nur Sinn, wenn zwischen den ein- und ausfahrenden Werkstücken ein zeitlicher Abstand besteht. Bei Kreisförderern mit kontinuierlicher Fahrweise, die bei effizienter Nutzung der Anlage möglichst voll bestückt sein sollen, sind Schiebetore nicht geeignet. Bei Kreisförderern mit Taktbetrieb, Power und Free Förderern sowie Elektrohängebahnen sind Schiebetore bei ausreichenden zeitlichen Abständen möglich und sinnvoll. Der energetische Vorteil von Schiebetoren ist vom Verhältnis der Zeiten für „Offen“ und „Geschlossen“ abhängig. Entscheidend ist die Taktzeit und die Transportgeschwindigkeit beim Taktfahren.

Die Möglichkeit des Stapelns von Warenträgern erlaubt in Anlagen mit Power und Free Förderern Trockner mit kleiner Grundfläche zu verwenden. Zum Vorteil der besseren Flächennutzung reduziert sich noch geringfügig der Energieverlust durch Trocknerwände.

Nach Abb. 14 verursacht der Schleusenverlust den zweithöchsten Energieaufwand. Häufig beobachtet man jedoch Werkstücköffnungen, die für maximale Teilegrößen geplant wurden, die nicht mehr im Produktionsprogramm sind. Durch eine Verkleinerung der Querschnittsfläche auf das notwendige Minimum kann mit geringem Aufwand viel Energie gespart werden.

Klappen zur Regulierung des Abluftstroms werden einmalig bei Inbetriebnahme eingestellt. Da die Abluftmenge im Betrieb aber manchmal höher als notwendig ist, sollte die Klappenstellung im Rahmen von Wartungsarbeiten durch Fachpersonal regelmäßig überprüft und – unter Berücksichtigung der vorgeschriebenen Grenzwerte nach dem Typenschild - angepasst werden.

Ob bei gasbeheizten Trocknern eine direkte oder eine indirekte Heizung (mit Wärmetauscher) zur Verwendung kommt, ist von der geforderten Beschichtungsqualität abhängig. Das bei der direkten Beheizung in der Umluft befindliche Rauchgas von der Erdgasverbrennung hat möglicherweise einen ungünstigen Einfluss auf die Lackhaftung.

Falls Risiken wegen hoher Qualitätsanforderungen befürchtet werden, sind vorher Qualitätsabprüfungen durchzuführen. Eine nachträgliche Umrüstung auf direkte Beheizung ist fast immer problemlos möglich. Ölbeheizte Trockner werden nur mit indirekten Heizungen versehen, da die Rauchgase von der Ölverbrennung zu Haftungsstörungen bei der nachfolgenden Lackierung führen.

In Haftwassertrocknern sind aus Investitionskostengründen oft keine umluftbetriebenen Luftschleusen oder A-Schleusen vorhanden. Die Schleusenwirkung wird dann durch Einblasen eines Teils der Umluft am Ein- und Auslauf erzeugt. Bei großen Öffnungsquerschnitten und hohen Umlufttemperaturen sind die Schleusenverluste dann hoch. Durch den Einbau unterschiedlicher Trocknerschleusen können Wärmeverluste nennenswert reduziert werden.

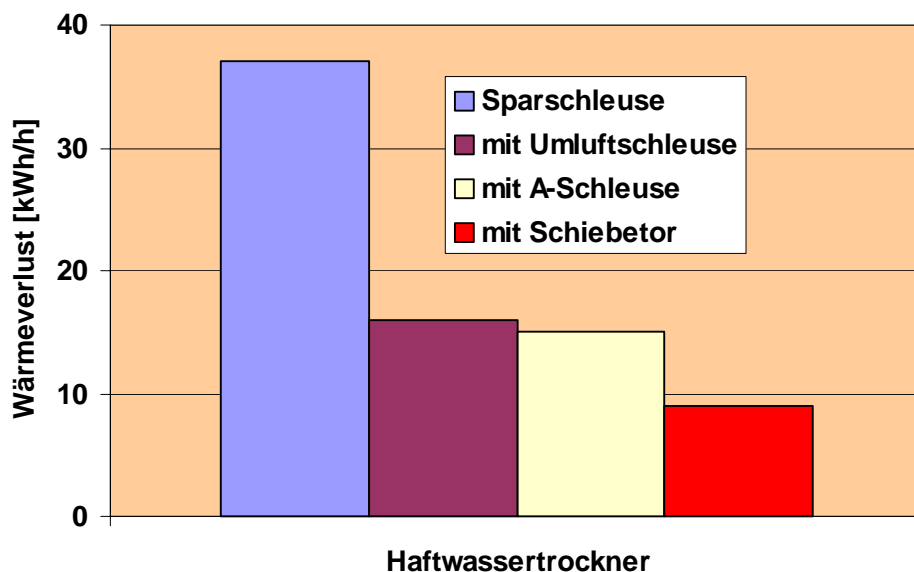


Abb. 15: Vergleich der Wärmeverluste verschiedener Trocknerabschlüsse am Haftwassertrockner

In Verbindung mit einer Entfeuchtung der Umluft (durch Kälte- oder Sorptionstrocknung, siehe Abschnitt 10.4) kann die Trocknungstemperatur bei gleicher Trocknungswirkung reduziert werden, was besonders für temperaturempfindliche Werkstücke geeignet ist. Durch die niedrige Trocknungstemperatur wird Heizenergie eingespart. Da für die Trocknungswirkung mit trockener Luft ausreichende Luftgeschwindigkeiten relativ zur Werkstückoberfläche notwendig sind, eignet sich dieses Verfahren weniger für komplizierte Teile mit Hinterschneidungen, Zwischenwänden und Vertiefungen.

Im Rahmen der Neuplanung einer Lackieranlage sollte darauf geachtet werden, dass die geplanten Trockner als Blocktrockner zusammengebaut werden. Man spart Wände zwischen den Trocknern und reduziert zudem den Wärmeverlust über das Gehäuse.

Sofern es die Qualitätsansprüche (Lackhaftung) zulassen, kann die Abluft aus dem Lack-/ Pulvertrockner als Frischluftergänzung in den Haftwassertrockner eingeleitet werden. Wärmeverluste für die Frischluftaufheizung können somit deutlich verringert werden.

Wenn auf eine wässrige Vorbehandlung verzichtet werden kann, z.B. durch

- Verwendung von Lacken, die keine Reinigung benötigen,
- Einhalten von Sauberkeitskonzepten bei der Produktion,
- alternative Verwendung einer Strahlanlage,

ist auch kein Haftwassertrockner mehr erforderlich.

Maßnahmen für den Haftwassertrockner der Modellanlage	Einsparpotenzial in kWh/h	Kosteneinsparung/a	Investitionskosten
Kurzfristig umsetzbare technische Maßnahmen (ohne hohe Investitionen)			
Abdeckung von zu großen Werkstückein- und -ausläufen	2 (thermisch)	400 €	200 €
Einstellen der Trocknerabluft auf die zur Abführung der Feuchtigkeit notwendige Mindestabluft (regelmäßige Einstellung bei Wartungsarbeiten)	2 (therm.)	400 €	200 €
Maßnahmen bei Anlagenmodernisierungen			
Indirekte Beheizung der Umluft über Luftheritzer: wenn möglich, Umrüstung auf eine direkte Beheizung; nachträglich möglich (Lackhaftung beachten, Qualitätsprüfung sinnvoll)	16 (therm.)	3.100 €	15.000 €
Nachrüstung von umluftbetriebenen Luftschleusen, wenn räumlich möglich, besser A-Schleusen (Ein- und Ausbringung der Werkstücke von unten)	20 (therm.)	3.800 €	15.000 €
Neubau: Temperaturreduzierung im Zusammenhang mit einer Entfeuchtung der Umluft (Abschnitt 10.5, Kälte- oder Sorptionstrocknung der Umluft)	60 (therm.)	11.500 €	30.000 €
Neubau: Ausführung mehrerer Trockner als Blocktrockner (eine Seitenwand wird eingespart)	3 (therm.)	600 €	Einsparung 2.000 €
direkte Beheizung durch Abluft aus dem Lacktrockner	12 (therm.)	2.300 €	Umbau: 10.000 € Neubau: 6.000 €
Alternative Fertigungskonzepte			
Verzicht auf nasschemische Vorbehandlung: z.B. Lacke, die keine Reinigung benötigen oder das Einhalten von Sauberheitskonzepten bei der Produktion, alternativ die Verwendung einer Strahlanlage oder eine Minimalbeölung - Anwendbarkeit beachten!	108 (therm.)	12.400 €	Einsparung 120.000 €

Tab. 10: Maßnahmen zur Energieeinsparung für Haftwassertrockner

7 Lackierkabinen

7.1 Energiebilanz

Um die Lackierer vor Aerosolen und Lösemitteldämpfen zu schützen und aus Gründen des Explosionsschutzes ist es notwendig die Kabineninnenräume mit beheizten und teilweise befeuchteten großen Luftmengen zu durchströmen. Dabei werden Luftsinkgeschwindigkeiten zwischen ca. 0,3 und 0,6 m/s eingestellt. Für die Beheizung der Luft von 9°C durchschnittlicher Jahres-Außentemperatur auf 22°C Arbeitstemperatur werden je 0,1 m/s Luftsinkgeschwindigkeit etwa 1,7 kW Wärmeenergie für 1 m² Kabinenfläche benötigt. Soll die Luft zusätzlich noch auf ca. 60 % relative Luftfeuchte gebracht werden, steigt der Energieverbrauch auf rund 3,0 kW an. Für die Belüftung von 1 m² Kabinenfläche mit erwärmter und befeuchteter Luft ist im Schnitt eine Wärmeenergie von ca. 53 000 kWh pro Jahr notwendig.

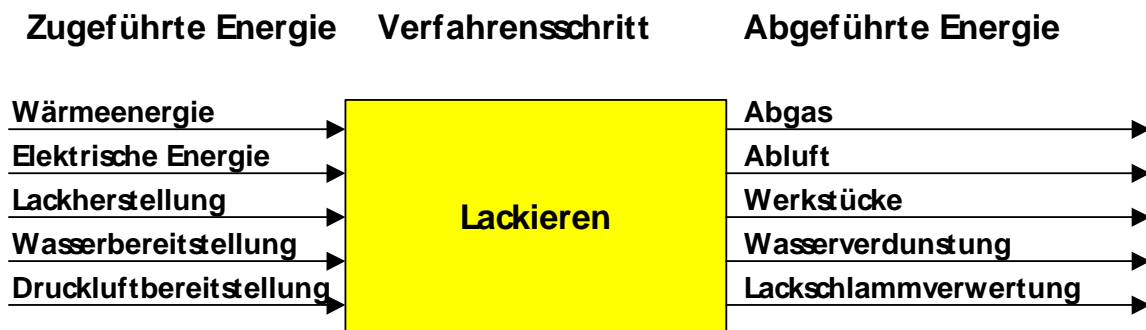


Abb. 16: Energieströme in einer Spritzlackierkabine.

In der Modell-Lackieranlage gehen ca. 45 % des gesamten Wärmeenergieverbrauchs über die Abluft der Spritzkabinen verloren, der übrige Anteil wird in Vorbehandlung, Trockner usw. verbraucht. Bei der Spritzapplikation sind für die Zuluft der Spritzkabine Temperaturen von 23 °C und eine relative Luftfeuchte je nach Lacksystem von 55 – 70 % erforderlich. In der Belüftungsanlage wird die Außenluft vorerwärmt, im Wäscher befeuchtet und dabei adiabatisch abgekühlt. Im Nacherhitzer erfolgt die Nachwärmung auf den gewünschten Zustandspunkt.

Abb. 16 zeigt die Energiebilanz in einer Lackierkabine.

Lackierkabinen sind lüftungstechnisch zu unterscheiden in

- Hand-Spritzkabinen und Spritzstände mit reinem Frisch-Abluft-Betrieb,
- Automatik-Spritzkabinen mit je einem Teilstrom im Frisch-Abluft- und im Umluft-Betrieb
- Automatik-Pulversprühkabinen mit reinem Umluftbetrieb.

In Abb. 17 sind die Energieverluste dieser Kabinensysteme verglichen.

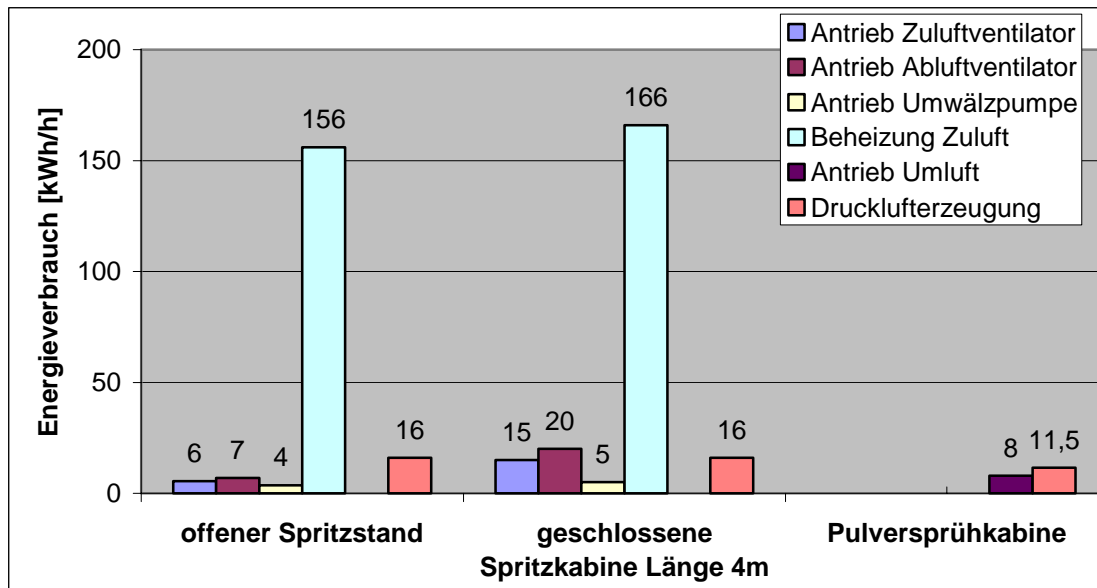


Abb. 17: Vergleich des Energieverbrauchs verschiedener Lackierkabine systems (Modellanlage für Metall-Büromöbel)

Pulverbeschichtungskabinen müssen keine lösemittelhaltige Luft abführen, sondern haben die Funktion eines großen „Staubsaugers“, der verhindern soll, dass vagabundierendes Pulver in die Umgebung, z.B. die Werkhalle, gelangt. Die Kabinen sind für das größte zu beschichtende Teil ausgelegt. Die Öffnungen der Vorbehandlungsanlage und des Ofens sind für den Normalbetrieb meist zu groß. Mit Blechelementen und automatischen Türen können die Durchlauföffnungen der Teilegröße angepasst werden.

Die Abluftmenge der Beschichtungskabine ist so einzustellen, dass durch die Kabinenöffnungen kein Pulver austritt. Mit Führungsblenden kann die dazu erforderliche Luftgeschwindigkeit reduziert werden. Zusätzlich können die Kabinenöffnungsflächen verkleinert werden (die Anforderungen an den Explosionsschutz sind zu beachten).

7.2 Potenziale für Energiesparmöglichkeiten

7.2.1 Rückgewinnung der Wärme durch Umluftbetrieb

Das größte Energieeinsparpotenzial liegt für Flüssiglack-Spritzlackierkabinen in der Kreislauf-führung der Kabinenabluft, wie es bei Pulverlackierkabinen aufgrund des Wegfalls von Lö-sungsmitteln seit langem üblich ist. Bei reinen Automatik-kabinen können - unter Berücksichti-gung der Explosionsschutzanforderungen – bis zu 90% des Luftvolumenstroms im Kreislauf gefahren und dadurch bei einer Nassauswaschung ca. 50 % und bei einer Trockenabscheidung des Lacknebels maximal 90 % der Wärmeenergie eingespart werden.

Spritzlackierkabinen für manuelle Lackierung, z.B. Autoreparaturkabinen, erfordern in der Regel 100% Frischluftbetrieb bei gleichzeitig relativ hohen Luftströmungsgeschwindigkeiten und damit hohen Luftvolumenströmen. Energieeinsparpotenziale liegen hier in folgenden Ansätzen:

- *Rückgewinnung der Wärme aus der Kabinenabluft mittels Wärmetauscher; moderne Wärmetauschersysteme ermöglichen eine Einsparung an Heizenergie zwischen 50 % (Luft-/Luft-Wärmetauscher) und 75 % (Wärmeräder).*

- Verzicht auf eine Vollklimatisierung der Kabinenzuluft; stattdessen Zuluftkühlung mittels Befeuchtung innerhalb des klimatischen Prozessfensters.
- Der Einsatz von Ventilatoren mit verbessertem Wirkungsgrad ermöglicht eine bis zu 20 % höhere Luftleistung bei gleichem Energieeinsatz.
- Der Einsatz von Ventilatormotoren mit Frequenzumrichtern ermöglicht eine Anpassung der Luftleistung an den tatsächlichen Bedarf, insbesondere eine Minimierung der Luftmenge in Betriebszeiten ohne Lackiervorgänge. Je nach Anlagennutzungsgrad sind damit jährliche Energieeinsparungen bis über 30 % möglich.
- Die Mehrkosten für hocheffiziente Elektromotoren (Energieeffizienzklasse eff 1) amortisieren sich oft schon nach einem Jahr.

Ein wesentlicher Faktor für den Energieverbrauch ist die Menge der Kabinenabluft, welche direkt von der Grundfläche der Spritzkabine und der erforderlichen Luftsinkgeschwindigkeit abhängt. Aus funktionellen Gründen benötigt die zu belüftende Kabinengrundfläche eine bestimmte Mindestgröße; die Luftsinkgeschwindigkeit ist abhängig vom jeweils eingesetzten Applikationssystem.

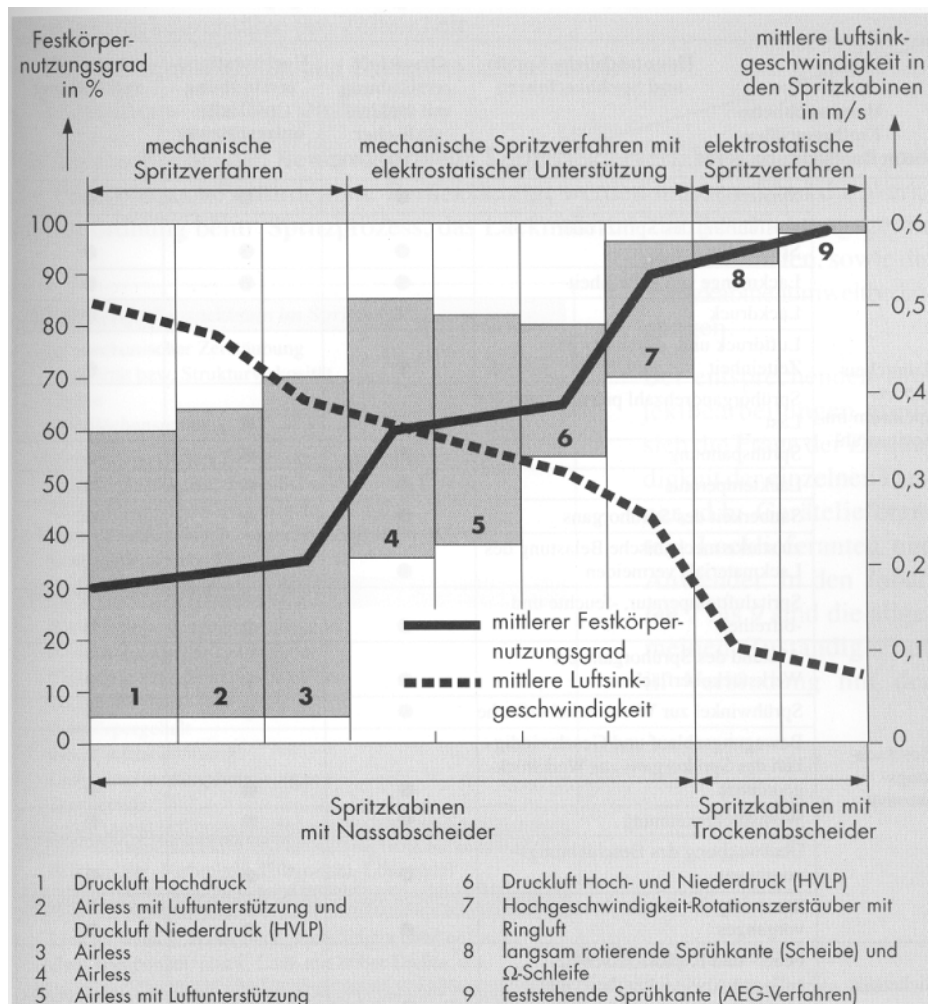


Abb. 18: Zusammenhang zwischen Festkörperrnutzungsgrad (Auftragswirkungsgrad) und Luftsinkgeschwindigkeit in Spritzkabinen für verschiedene Applikationssysteme (Der Festkörperanteil im Lack ist nicht berücksichtigt).

Abb. 18 zeigt, dass Lackapplikationssysteme mit höheren Festkörpernutzungsgraden geringere Luftsinkgeschwindigkeiten benötigen. Die mittlere Luftsinkgeschwindigkeit für manuelle Beschichtung in Spritzkabinen kann nach der EN 12215 auf 0,3 m/s als Mindestwert reduziert werden. Luftsinkgeschwindigkeiten unter 0,3 m/s sind unter Berücksichtigung der europäischen Sicherheitsnormen nur noch mit automatischer Lackierung realisierbar.

7.2.2 Rückgewinnung der Wärme aus der Kabinenabluft mit Wärmetauschern

Bei allen Wärmerückgewinnungssystemen auf der Basis von Wärmetauschern muss berücksichtigt werden, dass die in der Abluft befindlichen Lackpartikel nach dem Stand der Technik entweder vorher herausgefiltert werden oder entsprechende Reinigungsmöglichkeiten (z.B. Reinigungsintervalle für Wärmetauscher, direkte Reinigung beim Betrieb von Wärmerädern) vorzusehen sind.

Regenerative Wärmeübertragung durch rotierende Wärmeaustauscher (Wärmerad)

In der Spritzkabine wird die Zuluft mit Lackoverspray beaufschlagt, das im Auswaschsystem vom Kabinenwasser aufgenommen wird. Die Abluft wird mit Feuchte angereichert und durch Entzug der Verdunstungswärme abgekühlt. Diese hinsichtlich Temperatur und Feuchte energie-reiche Abluft wird in herkömmlichen Lackieranlagen an die Umwelt abgegeben.

Bei einer rekuperativen Wärmeübertragung mit Plattenwärmetauscher ist keine Rückgewinnung der Feuchte möglich, während die in Wärmerädern enthaltene Speichermasse hygroscopisch beschichtet ist und neben der Wärmeübertragung zusätzlich eine Rückgewinnung der Feuchte durch Sorption stattfindet.

Die für die Lufterwärmung und Befeuchtung erforderliche Leistung wird jeweils um ca. 75 % reduziert. Bei Investitionskosten von ca. € 50.000,- und Wärmeenergiekosten von 0,05 €/kWh ergibt sich für die Abluftmenge der Spritzkabinen von 55.000 m³/h bei der modellhaften Lackier-anlage für Büromöbel eine Einsparung von ca. 49.000 €/a (2-Schichtbetrieb), bzw. eine Amorti-sationszeit von weniger als 1 Jahr.

Rekuperative Wärmeübertragung durch Plattenwärmetauscher

Für den Einsatz einer Rückgewinnung mit Plattenwärmetauschern liegen konkrete Zahlen aus Erfahrungen mit einer kombinierten Lackier- und Trocknungsanlage mit einem Luftdurchsatz von 25.000 m³/h aus einer Kfz-Reparatur-Lackierung vor.

Durch die Nachrüstung eines Wärmetauschers konnten die Energiekosten von vormals 17.500 €/a auf 15.000 €/a gesenkt werden. Die Investition des Wärmetauschers betrug ca. 5.000 €, die Amortisationszeit somit ca. 2 Jahre.

7.3 Maßnahmen zur Energieeinsparung

Nachstehende Tab. 11 fasst die Maßnahmen zur Energieeinsparung zusammen:

Maßnahmen für die Spritzlackierkabine der Modellanlage	Einsparpotenzial in kWh/h	Kosteneinsparung/a	Investitionskosten
Kurzfristig umsetzbare technische und organisatorische Maßnahmen			
Abschalten der Spritzkabine während Arbeitspausen unter Berücksichtigung des Nachlaufs für die technische Lüftung	34 (thermisch)	6.500 €	5.000 €
Reduzierung der Luftsinkgeschwindigkeit von 0,5 auf 0,4 m/s durch Reduzierung des Oversprays, z.B. durch HVLP-Zerstäuber (nicht bei Spritzständen)	61 (therm.) 17 (elektrisch)	17.000 €	10.000 €
Reduzierung der Luftsinkgeschwindigkeit von 0,5 auf 0,3 m/s durch Reduzierung des Oversprays bei automatischer Lackierung, z.B. durch elektrostatische Hochrotationsglocken	132 (therm.) 35 (el.)	36.000 €	100.000 €
Verarbeiten von Wasserlacken, bei denen keine Befeuchtung der Kabinenluft notwendig ist (für geringe Qualitätsanforderungen bereits realisiert, ansonsten ist die Lackentwicklung abzuwarten)	116 (therm.)	22.300 €	-
Maßnahmen bei Anlagenmodernisierungen			
Bestehende Anlage, manuelle Beschichtung: Wärmerückgewinnung aus der Abluft über einen Wärmetauscher, z.B. Zuluftvorheizung durch Wärmerad (Amortisation innerhalb von 2 Jahren)	250 (therm.)	48.000 €	50.000 €
Neuplanung, nur für automatische Lackierung: Umstellen auf Umluftbetrieb mit Teilstrom Frisch-/Abluft	268 (therm.)	51.500 €	150.000 €
Einsatz von Ventilatormotoren mit Frequenzumrichtern	14 (el.)	4.300 €	14.000 €
Alternative Fertigungskonzepte			
Verlagerung von geeigneten Lackieraufgaben (z.B. Kleinteile) in kleine Spritzstände mit geringem Luftdurchsatz: individuelle Planung für den einzelnen Betrieb	23 (el.) 10 (therm.)	9.000 €	
Reduzierung der Lackschichtanzahl und damit des Lackierumfangs (z.B. Verwendung vorbeschichteter Coils): notwendig ist die Erprobung eines geänderten Produktionsprozesses	53 (el.) 361 (therm.)	86.000 €	
Umstellung des Lackierprozesses auf Pulverlack, wenn es aufgrund der Temperaturbelastung der Werkstücke möglich ist	siehe Abschnitt 13.5		

Tab. 11: Maßnahmen zur Energieeinsparung in einer Spritzlackierkabine

8 Kathodische Elektrottauchlackierung (KTL)

8.1 Energiebilanz

Anwendungen der KTL sind neben der Karosseriegrundierung zum einen kostengünstige Einschichtlackierungen bei hohen Durchsatzmengen (z.B. Gehäuse für Leuchtstofflampen) und zum anderen Grundierungen bei hochwertigen Zweischichtlackierungen, oft in Verbindung mit einer Pulverbeschichtung (z.B. Heizkörper).

Energieverbraucher beim Elektrottauchlackieren sind neben den Heizungen für Vorbehandlung und Lacktrockner vor allem die elektrische Lackabscheidung, die Antriebe für die Pumpen der einzelnen Kreisläufe sowie die Lackkühlung. Bei der Einschätzung der Verbrauchszahlen ist zu beachten, dass diese Antriebe rund um die Uhr betrieben werden müssen, auch wenn keine Produktion läuft. Dies ist zwingend notwendig, um den Lack sowie bestimmte Bauteile wie die Ultrafiltrationsmodule nicht zu beschädigen. Je nach Anlagentyp bzw. -größe sind eine oder mehrere Umwälzpumpen vorhanden. Hinzu kommen noch die, mit den Verhältnissen bei der Vorbehandlung vergleichbaren Pumpleistungen der UF-(Ultrafiltration) Spülen. Bei einer mittleren Anlagengröße (z.B. Automobilzulieferer) kann insgesamt von installierten Leistungen von ca. 20 kW für die Lackkreisläufe, 7 kW für die Ultrafiltrationsanlage und etwa 15 kW bei zwei UF- Spülen ausgegangen werden.

Die Energie für die elektrische Lackabscheidung dagegen ergibt sich aus den durchgesetzten und beschichteten Flächen, den Lackschichtdicken und dem Abscheideäquivalent. Dieser Parameter sagt aus, welche Strommenge (el. Ladung) fließen muss, um eine bestimmte Lackmenge abzuscheiden. Diese für den Energieverbrauch einer KTL-Anlage maßgebliche Größe wird neben dem Lacktyp auch von den bei der Beschichtung herrschenden Betriebsbedingungen (Temperatur, Spannung, Stromdichte etc.) beeinflusst. Als Richtwert für diese komplexe Größe kann ein Stromfluss von etwa 100 C pro Gramm abgeschiedenen Lack (Trockenschicht) angesetzt werden.

Eine Lackkühlung ist zwingend erforderlich, um die Lacktemperatur innerhalb vorgegebener Grenzen zu halten. Ursache der Lackaufheizung ist zum einen die Verlustleistung während der Lackabscheidung (siehe oben), aber auch der Energieeintrag durch die ständig laufenden Umwälzpumpen. Die Kühlung erfolgt geregelt über einen Wärmetauscher, wobei i.d.R. ein Kühlagregat eingesetzt wird.

8.2 Potenziale für Energiesparmöglichkeiten

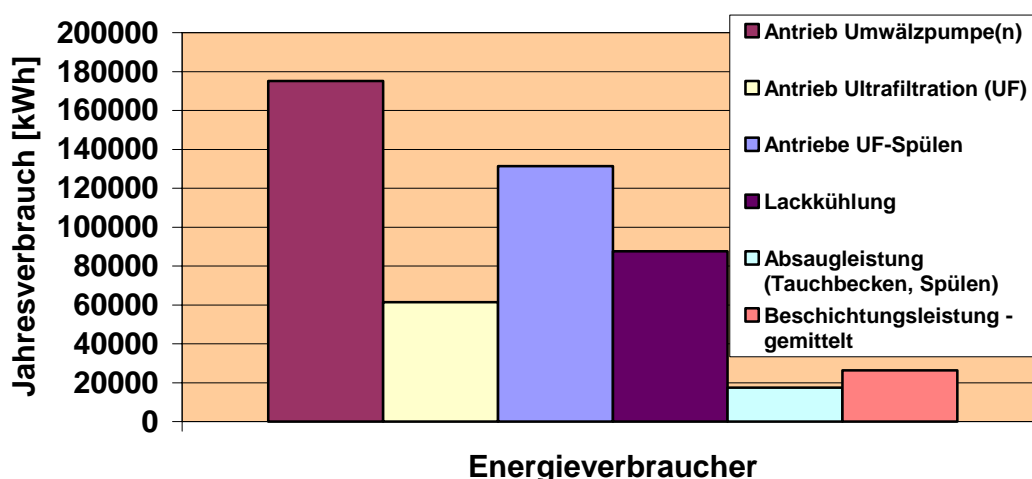


Abb. 19: Energieverbraucher einer KTL-Anlage für die Applikation

Um die einzelnen Energieverbraucher gegenüberzustellen und miteinander vergleichen zu können, muss die Leistung für die Lackabscheidung über das ganze Jahr gemittelt werden (Abb. 19). Als Resultat bleibt ein relativ geringer Beitrag dieser betriebs- und durchsatzbedingten Größe übrig. Gegenüber den Antriebsleistungen der ständig laufenden Pumpen für Lackumwälzung und Ultrafiltration ist der Beitrag fast zu vernachlässigen, zumindest werden Maßnahmen, die hierbei greifen, keinen wesentlichen Beitrag für Energieeinsparungen bringen.

Deutliche Einsparungen können bei KTL- Anlagen deshalb nur erzielt werden, wenn die erforderlichen Leistungen der ständig laufenden Antriebe minimiert werden.

- Einsatz von hocheffizienten Elektromotoren (Energieeffizienzklasse eff 1) und Pumpen.
- Anstelle eines Kühlaggregats kann eine Kühlung mit Grundwasser eingesetzt werden.
- Optimale Gestaltung der Lackkreisläufe, Minimierung der leitungsbedingten Druckabfälle.
- Optimierung des Prozessablaufs , z.B.:
 - Umwälzung von Ultrafiltrations-Spülen nur während des Produktionsbetriebs,
 - Umgehung von Lackfiltern außerhalb von Produktionszeiten.

8.3 Maßnahmen zur Energieeinsparung

Möglichkeiten für eine Energieeinsparung beim Betrieb von KTL- Anlagen bestehen nur sehr bedingt. Hauptenergieverbraucher sind die Pumpenantriebe für die Badumwälzung und die Kreislaufsysteme (Tab. 12). Diese Aggregate müssen ständig betrieben werden, unabhängig, ob produziert wird oder nicht. Organisatorische Maßnahmen zur Optimierung können deshalb hier nicht greifen. Jede technische Maßnahme dagegen, die eine Verminderung der erforderlichen Antriebsleistungen ermöglicht, kann aber deutliche Einspareffekte vor allem deshalb bringen, weil mit Ausnahme des Gleichrichters für die Beschichtung sämtliche Energieverbraucher Elektromotoren sind - dies sind etwa 95 % des Gesamtenergieverbrauchs.

Zusammenfassung der Energiespartipps für die beschriebene KTL-Anlage:	Einsparpotenzial in kWh/h	Kosteneinsparung/a ca. (16 h/240d)	Investitionskosten
Kurzfristig umsetzbare technische und organisatorische Maßnahmen ohne hohe Investitionen			
Einsatz hocheffizienter Antriebe	6 (elektrisch)	1.800 €	5.000 €
Optimierung des Prozessablaufs, UF-Antriebe laufen nur während der Produktion	1 (el.)	300€	500 €
Gestaltung der Kreisläufe, Umgehung der Lackfilter außerhalb der Produktion	4 (el.)	1.200 €	3.000 €

Tab. 12: Maßnahmen zur Energieeinsparung für die beschriebene KTL-Anlage

9 Abdunstzonen

9.1 Einflussgrößen auf den Energieverbrauch

Beim Einsatz von lösemittelhaltigen Lacksystemen wird in Abdunstzonen in der Regel ausschließlich elektrische Antriebsenergie für Belüftungsventilatoren benötigt. Das Abdunsten erfolgt hier meistens bei Umgebungstemperatur, so dass eine zusätzliche Beheizung nicht erforderlich ist.

Für Wasserlacke ist ein höherer Energieeinsatz zum Abdunsten erforderlich. Die Abdunstrate steigt mit zunehmender Temperatur und abnehmender relativer Feuchtigkeit in der Abdunstzone sowie mit zunehmender Luftströmungsgeschwindigkeit im Abdunstbereich. Um den Energieeinsatz für die Abdunstzone zu minimieren, sollte im Vorfeld unter verschiedenen klimatischen Bedingungen experimentell der maximal zulässige Restwassergehalt in der Lackschicht ermittelt werden, bei dem im Trockner eine Kocherbildung (Bläschen in der Lackschicht infolge zu starker Wasserdampfbildung) sicher vermieden wird.

9.2 Potenziale für Energiesparmöglichkeiten

Qualitätsprobleme bei Wasserlackbeschichtungen sind häufig auf eine unzureichende Abdunstphase zurückzuführen, so dass auf energierelevante Ansätze zurückgegriffen werden muss, d.h. eine Erhöhung der Temperatur bzw. der Luftströmung oder der zusätzliche Einsatz eines Kältetrocknungs- bzw. Sorptions-Entfeuchtungssystems. In diesem Zusammenhang sind folgende Ansätze zur Minimierung des Energieeinsatzes zu prüfen:

- Einblasen eines Umluft-Teilstromes aus dem Lacktrockner in die Abdunstzone, d.h. der Umluftstrom im nachfolgenden Trockner wird angezapft, in die Abdunstzone geleitet und über die Materialöffnung vom Trockner wieder angesaugt,
- indirekte Abwärmenutzung aus dem Lacktrockner durch Förderung der warmen, aus dem Trockner kommenden Werkstücke durch die Ablüftzone (Übertragung der Wärme von den heißen Werkstücken zu den frisch lackierten, d.h. die Abdunstzone wirkt gleichzeitig als Kühlzone),
- Nutzung von Prozesswärme, z.B. aus der TNV (Abschnitt 13) zur Beheizung der Abdunstzone bzw. zur Regenerierung eines Sorptionstrockners (bei 60°C).

Im Übrigen gelten für Abdunstzonen bezüglich der Ventilatorsysteme die gleichen Ansätze zur Energieeinsparung wie bei den Spritzkabinen (siehe Abschn. 8.2), d.h.

- Ventilatoren mit verbessertem Wirkungsgrad,
- Ventilatormotoren mit Frequenzumrichtern zur Anpassung der Luftleistung sowie
- hocheffiziente Elektromotoren (Energieeffizienzklasse eff 1).

Eine Vereinfachung von Lackierprozessen lässt sich durch Verwendung vorbeschichteter Werkstücke wie

- verzinkte Bleche,
- vorbeschichtete Materialien (Coils)

erreichen. Diese Schichten dienen als Ersatz für die Grundierung, so dass der Lackierprozess nur noch aus der Decklackbeschichtung besteht.

9.3 Maßnahmen zur Energieeinsparung

Nachstehende Tab. 13 fasst die Maßnahmen zur Energieeinsparung zusammen:

Maßnahmen für die beheizte Abdunstzone der Modellanlage	Einsparpotenzial in kWh/h	Kosteneinsparung/a	Investitionskosten
Kurzfristig umsetzbare organisatorische Maßnahmen (ohne hohe Investitionen)			
Anpassung der Luftleistung an den tatsächlichen Bedarf, z.B. Abschalten der Abdunstzone während Arbeitspausen/ Leerlauf	2 (thermisch)	400 €	500 €
Maßnahmen bei Anlagenmodernisierungen			
Indirekte Abwärmenutzung aus dem nachfolgenden Lacktrockner (für eine Beheizung wird der Umluftstrom des Trockners angezapft)	4 (therm.)	800 €	2.500 €
Förderung der warmen, aus dem Trockner kommenden Werkstücke durch die Ablüftzone (Anlagenplanung)	6 (therm.)	1.100 €	
Alternative Fertigungskonzepte			
Reduzierung der Lackschichtanzahl und damit des Lackierumfangs (z.B. Verwendung vorbeschichteter Coils): Erprobung eines geänderten Produktionsprozesses notwendig	5 (elektrisch) 86 (therm.)	18.000 €	

Tab. 13: Maßnahmen zur Energieeinsparung für beheizte Abdunstzonen (Zwischentrocknung)

10 Lacktrocknung/ -aushärtung

Am Ende des Verfahrensablaufs einer Lackierung steht das Trocknen oder Aushärten der Lackschicht. Man unterscheidet in

- Trocknen: Austreiben von Lösemitteln durch Verdunsten (physikalischer Prozess)
- Härten: Vergrößerung der Moleküle des Bindemittels durch chemische Reaktion (chemischer Prozess). Bei Pulverlacken erfolgt das Härten nach vorherigem Schmelzen. Je nach Reaktion wird unterschieden in Polymerisation, Polykondensation, Polyaddition und oxidativer Härtung.

Es gibt Beschichtungen, die nur getrocknet (physikalischer Vorgang) oder nur gehärtet (chemische Reaktion zweier Komponenten) werden, bei den meisten folgt auf einen Trocknungsprozess ein Härtingsprozess. Beim Trocknen und Härten wird jeweils dem Lackfilm Energie (Wärme, Strahlung) zugeführt.

10.1 Umluft

Bei der Umlufttrocknung überträgt ein zirkulierender Heißluftstrom die Wärme auf das Werkstück.

Wegen der Umwandlungsverluste bei der Stromerzeugung sind der erforderliche Primärenergieeinsatz sowie die resultierenden CO₂-Emissionen, bezogen auf den Endenergieverbrauch, um den Faktor 2 – 3 (dt. Strommix) höher als für Wärmeerzeugung aus Gas bzw. Öl.

10.1.1 Energiebilanz

Für Lacktrockner gelten bezüglich des Energieverbrauchs prinzipiell die gleichen Beziehungen und Überlegungen wie für Haftwassertrockner (siehe Kap. 7). Der Energiebedarf zur Verdunstung bzw. Verdampfung des Lösemittels (Wasser) ist gering und wird daher in der Bilanzierung meist nicht berücksichtigt (Abb. 20).

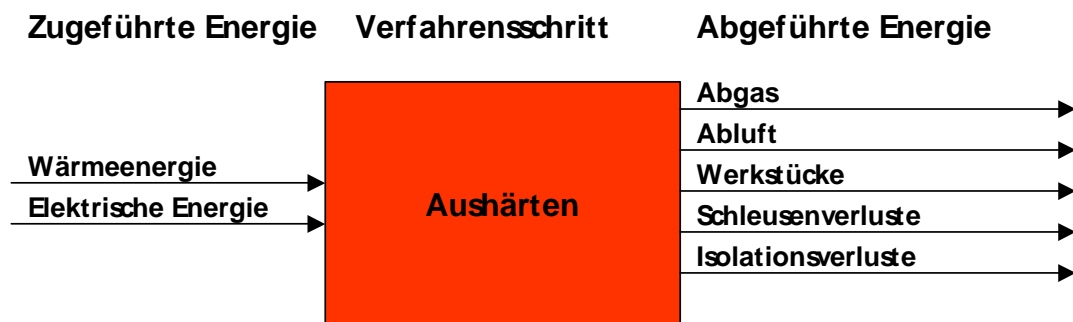


Abb. 20: Energieströme in einem Umlufttrockner.

10.1.2 Einflussgrößen auf den Energieverbrauch

Auch beim Lacktrockner ist die Konstruktion der Trocknerabschlüsse (Materialöffnungen) energierelevant:

- Das Ausblasen eines Teilstrom der Umluft an den Werkstücköffnungen (Sparschleuse) eignet sich nur für niedrige Trocknertemperaturen und kleine Materialöffnungen und ist mit hohen Energieverlusten verbunden.
- Umluftbetriebene Luftschleusen halten die Warmluft besser zurück und weisen einen geringeren Energieverlust auf.
- A-Schleusen sind bei ausreichender Raumhöhe energetisch gesehen die beste Lösung.
- Schiebetore sind bei Taktbetrieb ebenfalls eine energetisch sinnvolle Lösung.

Nahezu die Hälfte der Wärmeenergie in Umlufttrocknern wird für die Werkstückaufheizung benötigt, wobei die Betriebstemperatur des Trockners den Energieverbrauch erheblich beeinflusst. Zum Werkstückdurchsatz sind noch die Massen an Werkstückträger und Aufhängungen hinzuzurechnen, deren Aufheizenergie, insbesondere bei Kunststoffteilen, weit höher als für die Werkstücke selbst sein kann.

Die Einsparpotentiale für den Umlufttrockner sind in Kapitel 10.7 beschrieben.

10.2 Härtung mit IR-Strahlen

Es gibt eine Vielzahl von Anwendungen, in denen die Infrarot-Technologie bei der Trocknung und Härtung von Lacken eingesetzt wird, so z.B. in der industriellen Fahrzeugfertigung (Pkw, Lkw, Busse, Motorräder, Fahrräder usw.) bei der Vortrocknung von Basislack- und Wasserlack-schichten oder in der Reparaturlackierung. Weitere Anwendungsbereiche für die IR-Strahlungstrocknung sind z.B. ebene Werkstücke wie Coils, Folien, Holzplatten.

Die Bauart von IR-Trocknern entspricht, soweit es sich um Durchlauföfen handelt, in etwa der von Konvektionsöfen. Häufig wird die IR-Trocknung auch in Kombination mit konvektiver Trocknung eingesetzt.

Einsatz in der Automobilindustrie:

- Bei der Vortrocknung von Wasserbasislacken werden Karosserien innerhalb von 1-2 Minuten durch IR-Strahlung auf 60 bis 80 °C erwärmt.
- Bei Reparaturen in der Kfz-Werkstatt ist die IR-Trocknung wirtschaftlich einzusetzen. Durch die Verwendung der IR-Strahlung kann beim Grundieren, Füllern und Spachteln schneller geschliffen und lackiert werden. Es gibt für diesen Zweck eine Vielzahl von dreidimensional verstellbaren IR-Strahlersystemen.

Bei der Trocknung von Beschichtungen auf dickwandigen oder massiven Objekten (z.B. Stahlrohre, Elektromotorengehäuse aus Metall) lässt sich die IR-Wärmetechnik besonders effizient einsetzen. Die Umlufttrocknung von beschichteten Halbzeugprodukten in der Stahlindustrie erfordert üblicherweise für die Wärmeübertragung sowie für die Umwälzung des Wärmeträgers Luft großvolumige Anlagen. Im Fall der IR-Trocknung ist der Wärmeübergang hingegen um ein Vielfaches höher, wodurch der Anlagenumfang deutlich reduziert werden kann. So lassen sich z.B. Lackschichten von ca. 20 µm auf Stahlrohren durch IR-Strahlung bei hoher Strahlungsleistungsdichte gezielt erwärmen.

Die bei der Konvektionstrocknung erforderliche Erwärmung der Umluft und des gesamten Ofenraumes sowie die mehr oder weniger starke Durchwärmung der Stahlrohre entfällt. Ebenso fallen bei der IR-Trocknung Wärmeverluste weg, die auf Grund der erforderlichen großen Austrittsöffnungen für die Rohre bei der konvektiven Ofentrocknung entstehen.

Trotz höherer spezifischer Kosten des Energieträgers Strom von elektrisch betriebenen IR-Strahlern liegen die Energiekosten für die IR-Trocknung um 40% niedriger als die einer Umlufttrocknung. Der erheblich geringere Energieverbrauch, die niedrigeren Kapitalkosten und hohe Produktionsleistungen auf der anderen Seite führen jedoch zu betriebswirtschaftlichen Vorteilen einer IR-Anlage (Tab. 14).

	IR-Strahlungstrockner	Umlufttrockner
Benötigte Grundfläche in m ²	10	200
Trocknervolumen in m ³	20	600
Energieverbrauch in kWh/t	7,3 (el.)	21 (therm.)
Energiekosten €/t	0,58	1,05

Tab. 14: Vergleich von IR-Strahlungstrockner und Umlufttrockner: Aushärtung von lackierten Stahlrohren

10.3 Härtung mit UV-Strahlen

Bei UV-härtenden Lacksystemen werden die Polymerisationsprozesse durch die Absorption von UV-Strahlung in Photoinitiatoren eingeleitet. Die Lackschicht vernetzt wesentlich schneller und bei geringeren Temperaturen als bei der herkömmlichen thermisch angeregten Härtung in Einbrennöfen. Dabei wird eine hohe Vernetzungsdichte erreicht.

Allerdings ist die Härtung mit UV-Strahlen nur für bestimmte Anwendungen einsetzbar: Die Anwendung der UV-Härtung hat die nachstehend beschriebenen Vorteile, die im Wesentlichen zu einer Reduzierung der Lackierkosten führt:

- Hohe Produktqualität (z.B. Abriebfestigkeit, Chemikalienbeständigkeit, Härte).
- Reduzierung der Prozesszeiten und damit höherer Teiledurchsatz
- platzsparende Anlagentechnik
- Reduzierung des Energieverbrauchs, wenn auch nicht der Energiekosten
- schnellere Staubtrockenheit und damit Reduzierung von Nacharbeit
- schnellere Lagerfähigkeit und Weiterverarbeitbarkeit der Werkstücke
- Einsatz recyclingfähiger Lacke
- Lackierbarkeit von wärmeempfindlichen Teilen
- Formulierung emissionsfreier Lacke möglich

Nachteile sind:

- einzelne Farbtöne sind für die UV-Härtung problematisch, z.B. gelb
- keine Aushärtung an unterbelichteten Stellen bei dreidimensionalen Werkstücken
- Verschmutzung durch nicht ausgehärtetes Overspray in Lackieranlagen

Die Anwendungen für fotopolymerisierbare Beschichtungssysteme reichen von Grundierungen bis zu Decklacken und von dicken Schichten (Polierlacke auf Holz) bis zu dünnsten Schichten (z.B. Drucklacke und Druckfarben auf Papier, Karton, Metall).

Das größte Anwendungsgebiet für UV-Beschichtungsmaterialien findet sich in der Holzveredelungs- und Möbelindustrie, wo diese Produkte vorwiegend bei Möbeln aus Holz und Holzwerkstoffen sowie bei Holzfußböden zum Einsatz kommen.

Eine neue Herausforderung an die UV-Technologie stellt die Nachfrage nach Beschichtungen für dreidimensionale Teile dar, wie sie z.B. in metall- und kunststoffverarbeitenden Branchen üblich sind. Die realen Teilegeometrien mit ihren Unsymmetrien, Hinterschneidungen und Vertiefungen stehen in Widerspruch zu den geforderten definierten Bestrahlungsverhältnissen. Mögliche Folgen sind unvollständig vernetzte Beschichtungen bzw. ineffektiv arbeitende Anlagen, die den erwarteten Teiledurchsatz nicht oder nur mit einer unverhältnismäßig hohen Anzahl von Strahlern gewährleisten. Eine nicht ausreichend durchgehärtete Beschichtung ist nicht nur aus funktionellen Gründen, sondern auch aufgrund der freiwerdenden, zum Teil für die Gesundheit bedenklichen Lackbestandteile, kritisch.

Während in einer konventionellen Trocknungsanlage für dreidimensionale Objekte praktisch beliebige Geometrien durchsetzbar sind, müssen in der UV-Anlage die Strahler an jede Oberflächengeometrie angepasst werden. Zur Erzielung der optimalen Eigenschaften der Lackschicht ist eine definierte, gleichmäßige Bestrahlung aller beschichteten Bereiche der Werkstücke wichtig. Bei komplizierten Geometrien sind dazu in der Regel umfangreiche Produktionsversuche er-

forderlich, um die Anzahl der benötigten Strahler, deren Anordnung sowie die notwendige Transportgeschwindigkeit zu ermitteln.

Eine Lösungsmöglichkeit für die Aushärtungsproblematik bei dreidimensionalen Objekten ist der Einsatz von sogenannten Dualcure-Lacken. Diese härten schnell durch UV-Strahlung und langsam durch chemische Härtungsmechanismen (in Schattenbereichen). Durch den chemischen Härterzusatz haben die Dualcure-Lacke nicht mehr die hohe Kratzbeständigkeit, stellen daher bezüglich ihrer Eigenschaften einen Kompromiss dar.

Die Anwendung von UV-härtenden Lacken, z.B. in der Automobilzulieferindustrie befindet sich derzeit zum Teil in Serie, ist zum großen Teil aber noch Sonderanwendung.

Bereits serienmäßig angewandt wird die

- die UV-Grundlackbeschichtung von Scheinwerfer-Reflektoren aus Kunststoff vor der Metallisierung
- die Beschichtung von Scheinwerfer-Streuscheiben aus Polycarbonat mit UV-härtendem Klarlack.

Als Sonderanwendungen zu nennen sind beispielsweise:

- UV-Klarlackbeschichtungen auf Automobil-Karosserieteilen aus Metall und Kunststoff, z.B. Motorhauben, Türen, Heckklappen usw.
- UV-Klarlackbeschichtung von Kfz-Radzierkappen, Spiegelgehäusen, Kühlergrills usw. zur Verbesserung der Wetterbeständigkeit, Steinschlag- und Kratzfestigkeit
- pigmentierte UV-Einschichtlackierung von Rammschutzleisten, Airbag-Abdeckungen und Stoßfängerteilen aus TPO (thermoplastisches Olefin) mit dem Ziel, auf einen zusätzlichen Haftprimer zu verzichten
- UV-Klarlackbeschichtung von Rückleuchten-Scheiben aus Acrylat zur Verbesserung der dekorativen und funktionellen Eigenschaften.

Besonders die Streuscheibenbeschichtung stellt einen stark wachsenden Markt dar, da sich die immer komplizierteren Streuscheibengeometrien, bedingt durch modernes Automobil-Design, oft nicht mehr aus Glas anfertigen lassen. Ein weiterer Vorteil der Kunststoff-Streuscheiben ist ihr geringeres Gewicht.

Ob für die Streuscheibenbeschichtung konventionell härtende oder UV-härtende Lacksysteme sinnvoller sind, ist anwenderspezifisch zu entscheiden. Konventionell härtende Lacke werden heute bei der Streuscheibenbeschichtung überwiegend in Form eines Zweischichtaufbaus eingesetzt, wobei die längeren Abdunst- und Trocknungszeiten einen mehrfach höheren Flächenbedarf für die Anlage gegenüber der Einschicht-UV-Anlage erfordern. Bezogen auf übliche Abschreibungsbedingungen ergeben sich daraus erheblich höhere stückbezogene Investitionskosten. Ein Vergleich der Gesamt-Energiekosten in Tab. 15 ergibt für diese Anlage keinen wesentlichen Unterschied zwischen den beiden Verfahren.

		UV- härtendes Lacksystem		Thermisch härtendes Lacksystem	
Durchsatz		300 Teile/h		420 Teile/h	
Schichtaufbau		Einschicht		Zweischicht	
Investition Anlage		1.000.000 €		2.300.000 €	
Investition Gebäude		192.000 €		1.440.000 €	
Summe Investitionen		1.192.000 €		3.740.000 €	
Abschreibung (AfA 8 Jahre)		149.000 €		467.500 €	
Zinsen pro Jahr (5%)		29.800 €		93.500 €	
Kapitalkosten pro Jahr		178.800 €		561.000 €	
Kapitalkosten bezogen auf 300 Teile/h		178.800 €		400.800 €	
Energiekosten	Kosten pro Einheit	Verbrauch	Kosten pro Stunde	Verbrauch	Kosten pro Stunde
El. Strom	0,08 €/kWh	110 kWh/h	8,80 €	120 kWh/h	9,60 €
Erdgas	0,05 €/kWh	50 kWh/h	2,50 €	280 kWh/h	14,00 €
Warmwasser	0,05 €/kWh	80 kWh/h	4,00 €	80 kWh/h	4,00 €
Kühlung	0,05 €/kWh	50 kWh/h	2,50 €	60 kWh/h	3,00 €
Druckluft	0,03 €/m ³ _N	200 m ³ _N /h	6,00 €	200 m ³ _N /h	6,00 €
Energiekosten/h, bezogen auf 300 Teile/h		24,50 €		26,14 €	

Tab. 15: Kapital- und Energiekostenvergleich zwischen einer Anlage zur Verarbeitung eines UV-härtenden Lacks gegenüber einer Anlage für thermisch härtende Lacke

10.4 Trocknung mit Mikrowellen

Die Verdampfungsenergie von Wasser ist größer als die von organischen Lösemitteln. Zur Trocknung von Wasserlacken muss daher auch deutlich mehr Energie aufgebracht werden als bei konventionellen Lacken, um die Lösemittel aus dem Lackfilm zu entfernen.

Das Wirkprinzip bei der Mikrowellentrocknung ist eine Wechselwirkung mit polaren Molekülen sowie elektrischen Ladungsträgern (Elektronen, Ionen), die im Takt des hochfrequenten Wechselfeldes bewegt werden. Es wird somit Energie des Wechselfeldes absorbiert und in Wärmeenergie umgesetzt. Im Vergleich zu anderen Trocknungsverfahren ist die Eindringtiefe bei der Mikrowellentrocknung wesentlich höher.

Neue Verfahren zur Mikrowellentrocknung von Wasserlackschichten beruhen darauf, dass Mikrowellenstrahlung in verschiedenen Frequenzen erzeugt und gleichzeitig oder auch zeitweise versetzt eingestrahlt werden können. Durch eine entsprechende Regelung wird nur der Wasseranteil erwärmt und verdampft ohne die Erwärmung des Substrates. Die Trocknungszeiten können im Vergleich zu konvektiven Verfahren um bis zu 80 % verkürzt werden, ohne dass die wasserverdünnten Lackschichten zur Kocherbildung neigen.

Durch den geringeren Aufwand für Beheizung und Kühlung von Werkstücken sind Energieeinsparungen von bis zu 60 % gegenüber konvektiven Verfahren möglich. Bei der Lackierung von

Holzteilen, wie Paneelen, Profilleisten sowie Fenster und Türen sind Anlagen mit Mikrowellentrocknern ausgestattet.

Für das nachstehende Beispiel in Tab. 16 wird die Reduktion der Trocknungszeit und der Energiekosten durch Einsatz eines Mikrowellentrockners gezeigt.

	Trocknung mit Umlufttrockner	Umlufttrocknung mit integrierter Mikrowellentrocknung	
	beliebiger Lack	Klarlack	Lack pigmentiert
Energieverbrauch Mikrowellentrockner in kWh/h		12 (el.)	12 (el.)
Energieverbrauch Umlufttrockner in kWh/h	160 (therm.) 20 (el.)	50 (therm.) 10 (el.)	90 (therm.) 10 (el.)
Prozesszeit für Umlufttrocknung in s	360	90	180
Energiekosten €/a	37.000	12.700	20.400
Einsparung €/a	-	24.300	16.600

Tab. 16: Vergleich von Prozesszeiten und Energiekosten einer Lackieranlage mit integrierter Mikrowellentrocknung und einer Anlage mit Umlufttrockner.

10.5 Trocknung mit entfeuchteter Luft

Mit dem Begriff „Trocknung“ bezeichnet man die Entfernung von Wasser oder Lösemitteln aus feuchten Materialien durch Verdampfen oder Verdunsten. Der relative Feuchtegehalt der Trocknungsluft hat 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.

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 von Werkstücken im Trockner.

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

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

Für die Trocknung mit entfeuchteter Luft (Kältetrocknung) ist im Vergleich zur Warmlufttrocknung ein deutlich geringerer Energiebedarf notwendig. Das hat unterschiedliche Gründe. Zum

einen muss bei der Warmlufttrocknung mit Abluft gefahren werden, um die gesättigte Luft über Dach abzuführen. Dabei wird gleichzeitig ein großer Teil ungesättigter Abluft ungenutzt abgeführt. 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.

Mit der Kältetrocknung wird im Gegensatz zu herkömmlichen Konvektionstrocknern 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 Abstrahlungsverluste auf ein Minimum reduziert. Neben der in der Regel deutlich reduzierten Trocknungszeit wird damit auch der Energieverbrauch minimiert.

Im vorliegenden Beispiel für die Haftwassertrocknung (Tab. 17) konnte mit einem Lacktrockner für Fensterbeschläge mit Kältetrockner die Trocknungszeit von 3 Takten auf 2 Takte verkürzt werden. Die Amortisation der Investitionsmehrkosten wurde in weniger als 1 Jahr erreicht.

	Umlufttrocknung	Trocknung mittels entfeuchteter Luft	Kosten/a
Anschlussleistung el.	9 kW	27 kW	Mehrkosten 6.000 €
Anschlussleistung (therm./Heißwasser)	150 kW	30 kW	Einsparung 23.000 €
Trocknungszeit	3 Takte je 3 min	2 Takte je 3 min	
Einsparung gesamt			18.000 €

Tab. 17: Vergleich von Prozesszeiten und Energiekosten zwischen einer Trocknungsanlage mit entfeuchteter Luft und einer Anlage mit Umluft.

Bei der Konvektionstrocknung ist die Trocknungsgeschwindigkeit abhängig vom relativen Feuchtigkeitsgehalt sowie von der Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit der über die zu trocknende Lackschicht strömenden Luft.

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. In Kleinbetrieben wie Schreinerereien lässt sich somit ein einfaches und kostengünstiges Verfahren zur Trocknung von Wasserlacken durch den Einsatz von belüfteten Hordenwagen (Abb. 22)



Abb. 22: Belüfteter Hordenwagen zur Trocknung von wasserlackbeschichteten Flachteilen mittels strömender Luft (Prototyp Fraunhofer IPA)

oder Trockenblaspistolen auf Druckluftbasis (Abb. 23) realisieren. 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 $v = 0.5-2$ m/s) befriedigende Trocknungsergebnisse mit akzeptablen Trocknungszeiten erzielen. 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. Zu bedenken ist allerdings, dass mit dem Einsatz von Druckluft ein erheblicher Energieaufwand verbunden ist

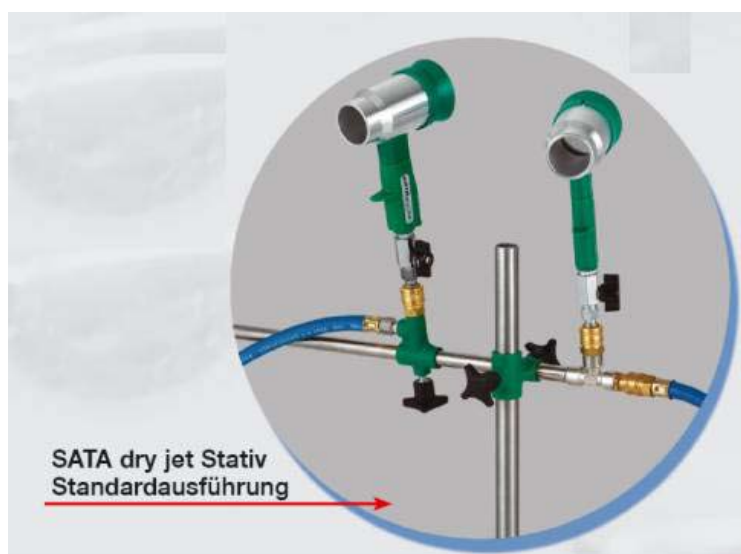


Abb. 23: Trockenblaspistolen für Wasserlacke (Quelle SATA)

Durch Nutzung der anfallenden Prozesswärme lassen sich Trocknungsprozesse mit entfeuchteter Luft kostengünstig realisieren (Kondensations- oder Sorptionstrockner). Eine zusätzliche Entfeuchtung der strömenden Luft auf Werte $< 10-15\%$ rel. Feuchte kann sich durchaus lohnen, 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. 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 auf $30-40\text{ °C}$ bei $10-20\%$ rel. Feuchte, sowie ausreichender Luftbewegung von $v = 0.5-2\text{ m/s}$ eine der Möglichkeiten sein, um eine möglichst effiziente Trocknung der Lackschichten zu erreichen. 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.

10.6 Trocknung durch Induktion

Die induktive Trocknung nutzt die Wärmeentwicklung an der Oberfläche von metallischen Werkstücken; in einem Magnetfeld werden Wirbelströme an dem metallischen Werkstück induziert, die durch den ohmschen Widerstand Wärme erzeugen.

Interessant für die Trocknung und Aushärtung von Lackschichten ist vor allem, dass die Wärmeentwicklung unmittelbar an der Substratoberfläche erfolgt. Für organische Materialien ist in erster Linie das Aushärten von Klebern sowie die Trocknung von Beschichtungen mit dieser Technik bekannt.

Bei Nasslacken beginnt die Erwärmung und somit auch die Lackaushärtung von der Substratoberfläche her, wodurch eine Hautbildung verhindert und damit verbundene Beschichtungsfehler wie "Aufkocher" oder "Nadelstiche" vermieden werden. Bei der Beschichtung von porösen Werkstoffen, wie Aluminiumguss, kann die eingeschlossene Luft ausgasen, bevor sich die aushärtende Lackfilmoberfläche schließt. Dadurch sind erhebliche Fehlerreduzierungen insbesondere bei Pulverlack möglich.

Eine spezielle Anwendung der Induktionstrocknung stellt die Behandlung von Verbundteilen, (z.B. Gummi-Metall) dar, bei denen nur eine partielle Erwärmung des beschichteten Metalls erfolgen soll und der Gummibestandteil möglichst wenig aufgeheizt werden darf. Auch für hochbeanspruchte Teile, z.B. Radlager, erlaubt die begrenzte Erwärmung eine qualitativ hochwertige Beschichtung aufzubringen und auszuhärten. Das Bauteil wird dadurch nur gering thermisch beansprucht, so dass es seine metallurgischen Eigenschaften nicht verliert.

Vorteil:

- präzise Regelbarkeit des Erwärmungs- und Trocknungsprozesses. Da die Wärmeentwicklung unmittelbar an der Werkstücksoberfläche induziert wird, kann diese durch eine einfache Leistungssteuerung des Umrichters direkt beeinflusst und exakt den Erfordernissen angepasst werden.
- geringerer Platzbedarf
- geringerer Energiebedarf im Vergleich zur Umlufttrocknung

Nachteil:

- Es lässt sich keine Teilevielfalt mit Induktion trocknen, da die Induktorspulen sorgfältig auf die Werkstücke ausgerichtet sein müssen, um gute Wirkungsgrade zu erzielen. Eine ausreichende Energieankopplung ist jedoch nur im unmittelbaren Bereich der Induktorspulen gegeben.

Abbildung 24 zeigt ist eine Induktions- Trocknungsanlage zur Bearbeitung von PKW- Brems-scheiben. (Einlauf der lackierten Bremsscheiben in die Induktionszone der Anlage). Knapp oberhalb der durchlaufenden Werkstücke sind die als Induktorspule wirkenden Kupferschienen angebracht. In Tab. 18 sind die Energiekosten unterschiedlicher Trocknungsverfahren mit der Induktionstrocknung verglichen.

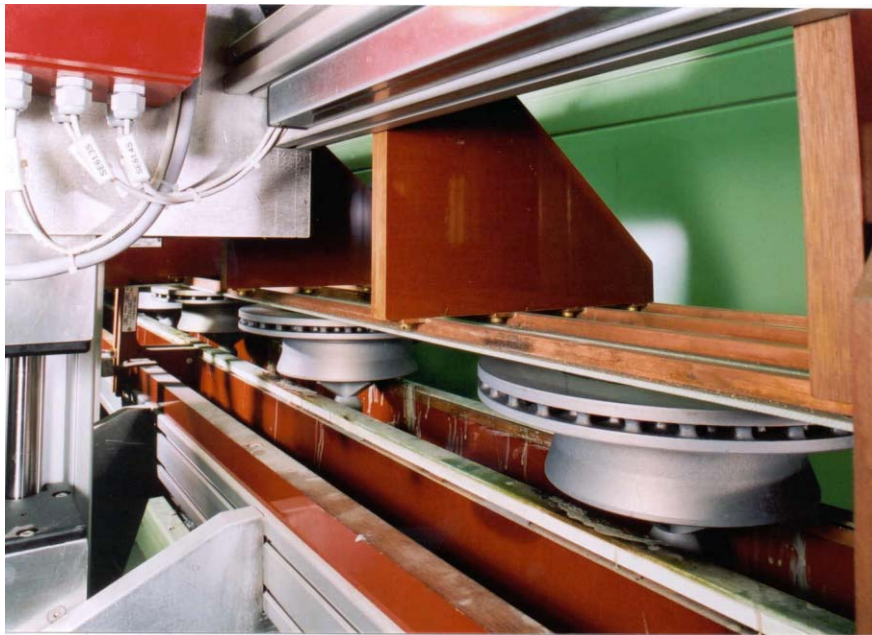


Abb. 24: Induktive Trocknung – Einlauf von Bremsscheiben in die Induktionsschleife (Werkbild DaimlerChrysler, Werk Mettingen)

Beispiel:

Härtungsverfahren	Induktion	IR-Strahlung	Umluft
Trockenzeit in s	25-40	80	600
Platzbedarf in m ³	6	16,5	80
Energieverbrauch in kWh/h	40 (el.)	85 (el.)	150 (therm.) 10 (el.)
Energiekosten €/h	3,20	6,80	8,30

Tab. 18: Vergleich von Prozesszeiten, Platzbedarf und Energiekosten zwischen Trocknungsanlagen mit Induktion, IR-Strahlung und Umluft.

10.7 Energieeinsparpotenziale bei Trocknung und Härtung

Für Lacktrockner sind nahezu alle Energiesparmaßnahmen anwendbar, die auch für Haftwassertrockner gelten:

Abb. 26 zeigt deutlich, dass sich bei Konvektionstrocknern die Umlufttemperatur entscheidend auf den Energiebedarf auswirkt. Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen der Trocknertemperatur und der Umgebung ist, desto weniger Heizleistung wird benötigt. Bei Verwendung eines 2-Komponenten-Lackes genügt meist eine forcierte Trocknung (beschleunigte Lufttrocknung bis ca. 80 °C).

2K-Lacke erfordern allerdings einen höheren Aufwand für die Applikation, (z.B. 2K-Dosier- und Mischanlagen) und können zudem nicht zurückgewonnen werden, forciert trocknende 1K-Lacke erreichen hingegen häufig nicht die gleichen Qualitätseigenschaften, z.B. chemische Beständigkeit, Kratzfestigkeit .

Eine Abschaltung des Ofens während einer Produktionsunterbrechung ist sinnvoll, weil seine Temperatur nur langsam fällt. Bei der Fortsetzung der Produktion muss der Ofen spätestens beim ersten Teil wieder die Nenntemperatur erreichen. Mit einer geeigneten Ofensteuerung, über eine Teileerkennung z.B. mit einer Lichtschranke, kann dieser Prozess gesteuert werden.

Bei Pulverlack-Aushärtungsöfen kann die Aushärtungszeit durch Vorschalten einer Infrarotzone vor den Umluftofen verkürzt werden. Aus ökologischen Gründen sowie aufgrund der geringeren Energiekosten sollten hierbei gasbetriebene Infrarotstrahler eingesetzt werden.

Im Vorfeld ist zusammen mit dem Anlagenhersteller zu untersuchen, welche tatsächliche Energieeinsparung zu erwarten ist.

Einen vollständigen Vergleich des thermischen und elektrischen Energieverbrauchs zwischen einem Pulver- und Flüssiglacktrockner zeigt Abb. 27.

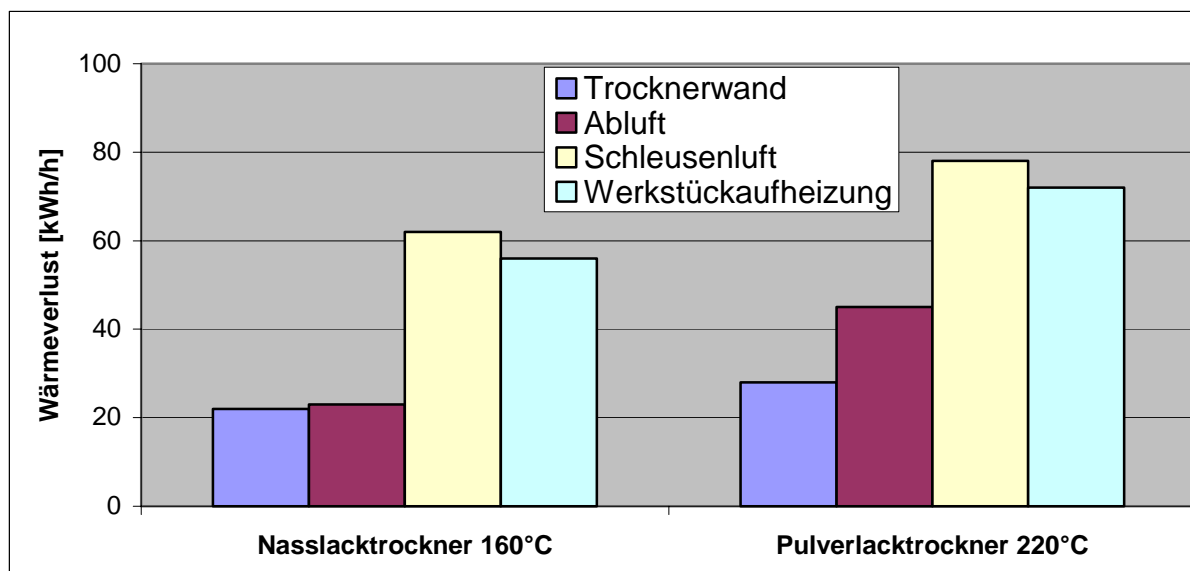


Abb. 26: Vergleich der Wärmeverluste in einem Flüssiglack- und Pulverlack-Konvektionsofen (Modellanlage für Metalllackierung)

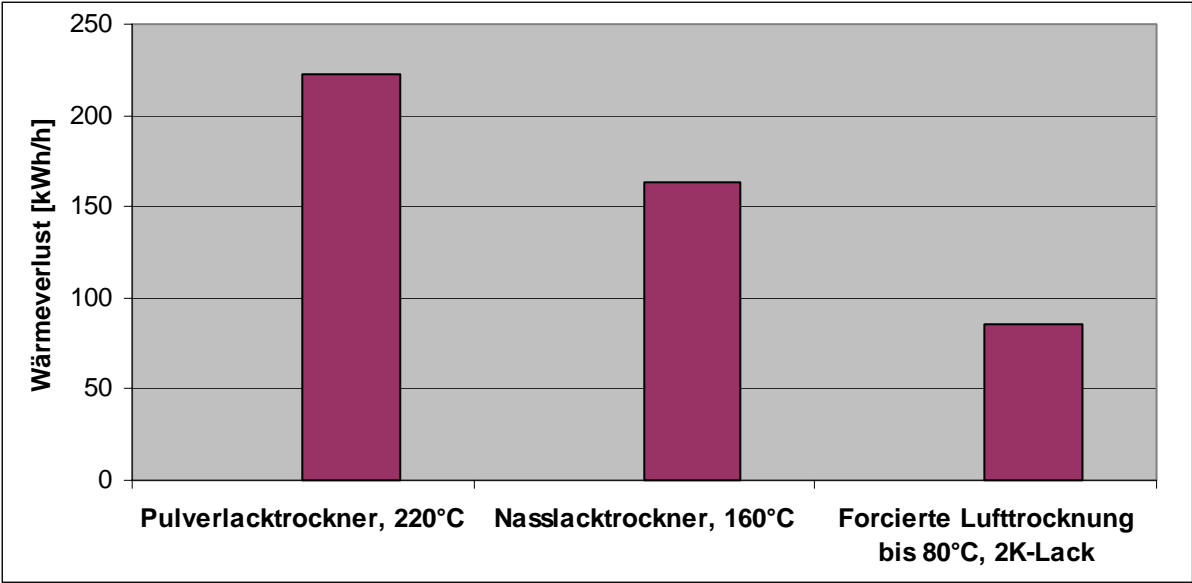


Abb. 27: Einfluss der Trocknungstemperatur auf den Wärmeverlust von Umlufttrocknern

Die Umlufttemperatur von Konvektionstrocknern wirkt sich entscheidend auf den Energiebedarf aus. Die notwendige Heizleistung steigt mit der Temperatur (siehe Abb. 27).

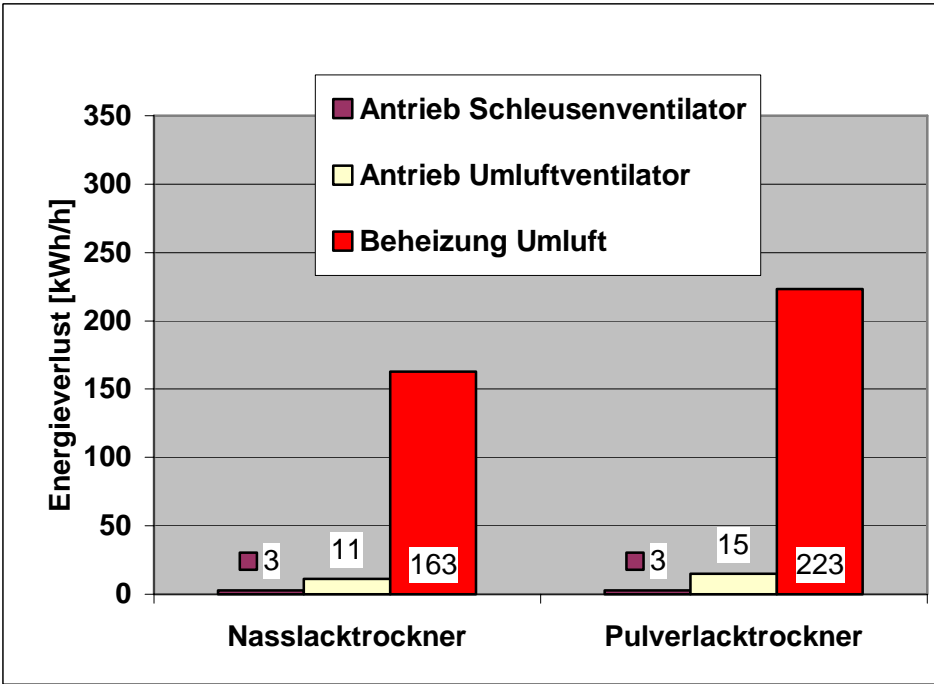


Abb. 28: Vergleich des elektrischen und thermischen Energieverbrauchs im Flüssiglack- und Pulverlack-Konvektionsofen (Modellanlage für Metall-Büromöbel).

Nachstehende Tab. 19 fasst die Maßnahmen zur Energieeinsparung zusammen:

Maßnahmen für den Umluftlacktrockner der Modellanlage	Einsparpotenzial in kWh/h	Kosteneinsparung/a	Investitionskosten
Kurzfristig umsetzbare technische und organisatorische Maßnahmen			
Abschalten des Brenners bei Produktionsunterbrechungen (Teilerkennung, z.B. Lichtschranke)	4 (thermisch)	800 €	500 €
Verwendung von Lacken mit geringerer Aushärtungstemperatur, z.B. 2-Komponentensysteme (beschleunigte Härtung bis ca. 80 °C) Hinweis: 2K-Lacke erfordern einen höheren Aufwand bei der Applikation, (z.B. 2K-Dosier- und Mischanlagen) und können nicht zurückgewonnen werden.	77 (therm.)	14.800 €	40.000 €
Maßnahmen bei Anlagenmodernisierungen			
Umrüstung, wenn möglich, von indirekter (Lufterhitzer) auf direkte Beheizung der Umluft	16 (therm.)	3.100 €	Nachrüstung: 15.000 € Neubau: 10.000 €
Einbau eines Abluftwärmetauschers	6 (therm.)	1.100 €	5.000 €
Neubau: Bei wasserlöslichen Lacken Reduzierung der Trocknertemperatur im Zusammenhang mit einer Entfeuchtung der Umluft (z.B. auf 60 °C, nur bei Wasserlacken)	126 (therm.)	24.200 €	40.000 €
Verkürzung der Einbrennzeit über Abgasrückführung durch doppelwandige Innenverkleidung (Wärmeabstrahlung)	20 (therm.)	3.800 €	10.000 €

Tab. 19: Maßnahmen zur Energieeinsparung für den Lacktrockner der Modellanlage

11 Abluftreinigung

Überschreitet die Konzentration an VOC (volatile organic compounds, d.h. flüchtige organische Verbindungen) in der Abluft die Grenzwerte der 31. BImSchV und ist ein Reduzierungsplan nicht anwendbar, so sind Maßnahmen zur Abluftbehandlung erforderlich.

11.1 Praxisverfahren

Das am weitesten häufigsten angewandte Verfahren ist die Thermische Nachverbrennung (TNV), bei der die mit Schadstoffen belastete Abluft auf 700 – 800°C aufgeheizt wird. Hierfür sind erhebliche Energiemengen erforderlich. Abluftreinigungsanlagen sind deshalb nur im Energieverbund mit anderen Verbrauchern wirtschaftlich einzusetzen. Sinnvoll ist es, das heiße Reingas nacheinander durch mehrere Wärmetauscher zu leiten, um die darin enthaltene Wärmeenergie zu entziehen. Sie wird zur Trocknerbeheizung, Zulufterwärmung und Warmwasserbeheizung verwendet (vgl. Abb. 29: Wärmekaskade). Alternativ können die Lösemittel soweit aufkonzentriert werden, dass diese ohne Zusatzenergie verbrennen.

Die Regenerative Nachverbrennung (RNV), eine Standardtechnologie für große Abluftströme mit geringer Schadstoffbelastung, findet oft Anwendung, wenn keine zeitgleichen Wärmeabnehmer vorhanden sind. Sie benötigt deutlich weniger Zusatzenergie und verursacht geringere Betriebskosten. Allerdings ist sie störanfälliger als eine TNV. Ab ca. 1 g/m³_N ist die Verbrennung autotherm.

Über die genannten Verfahren hinaus gibt noch weitere Verfahren, wie z.B. die katalytische Nachverbrennung und oxidative Verfahren, deren Einsatz im Einzelfall sinnvoll sein kann.

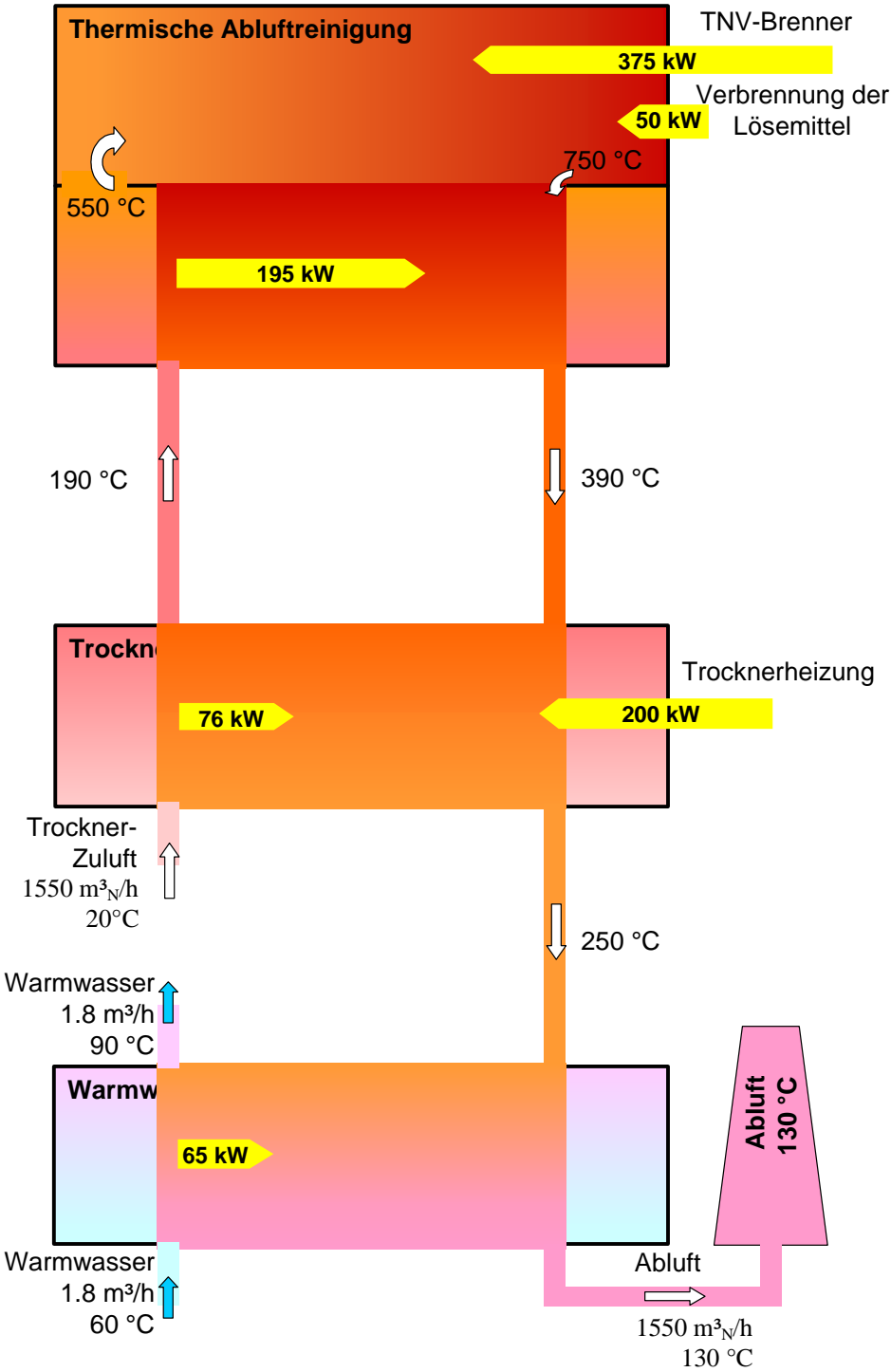


Abb. 29: Beispiel einer Wärmekaskade

11.2 Energiesparmöglichkeiten

- Vermeidung von überflüssigen Lösemittlemissionen, so dass keine Abluftreinigung erforderlich ist, z.B.:
 - Verwendung von High-Solid-Lacken
 - Beschichtung mit Pulverlacken
 - Geschlossene Spritzgeräte-Reinigungsanlagen (Wiederverwendung der Lösungsmittel für die Reinigung möglich)
- Aufkonzentrierung der Lösemittel in der Abluft (Umluftführung, Adsorption). Diese Maßnahme hat einen doppelten Effekt: Zum einen wird der Abluftstrom verringert und damit die erforderliche Heizenergie, zum anderen wirken die Lösemittel als Heizmittel und verringern die notwendige Energiezufuhr umso mehr, je höher die Konzentration in der Abluft ist (bei Lösemittelkonzentrationen größer als ca. 7 g/Nm³ ist keine Energiezufuhr mehr für eine TNV notwendig).
- Aufbau von Energieverbundsystemen mit dem Ziel, eine möglichst kontinuierliche Abnahme der Energie zu gewährleisten (siehe Abb. 28). So kann ein Teil der höheren Betriebskosten für die notwendige Abluftreinigung ausgeglichen werden.

11.3 Praxisbeispiel

Folgendes Beispiel zeigt die umgebauten Anlagen eines Kfz-Zulieferers zur Lackierung von Kunststoffteilen, z.B. Außenspiegel mit Lösemittellack. Grund des Umbaus war in erster Linie die Forderung der örtlichen Behörden nach Maßnahmen zur Einhaltung der TA-Luft. Die gleichzeitige Umrüstung auf Umluftbetrieb der Spritzkabinen bewirkte eine Energieeinsparung bei der Frischluftaufheizung.

Vor dem Umbau wurden 11 Automatik-Spritzkabinen mit Frisch-/ Abluft betrieben. Durch folgende Maßnahmen wurden die Spritzkabinen, wie in Abb. 30 schematisch dargestellt, auf Teilströme Frisch-/Abluft und Umluft umgerüstet:

1. Einbau eines Elektro-Nass-Abscheiders zur Filterung der in der Spritzkabinenabluft befindlichen Lackpartikel
2. Reduzierung des Frischluftstroms von 118.000 m³/h auf 38.500 m³/h und Rückführung von 79.500 m³/h (Umluft)
3. Einbau eines Adsorptionsrads für die Abluftmenge von 38.500 m³/h zur Aufkonzentrierung der Lösemittel in der Abluft und einen Desorptionsluftstrom von 5.000 m³/h.
4. Einbau einer TNV für 5.000 m³/h zur Verbrennung des Desorptionsluftstroms.
5. Einbau einer Wärmerückgewinnung (Abhitzekeessel) zur Erzeugung von Warmwasser aus dem Reingas.

Investitionskosten:	1,25 Mio €
jährliche Kapitalkosten:	ca. 190.000 €
jährliche Wartungskosten	ca. 63.000 €

Einsparung an Wärmeenergie:	358 kWh/ h	(3-Schichtbetrieb)
jährliche Energiekosteneinsparnis	ca. 90.000 €/a	
Umluftanlage:	50kW	(erforderliche Mehrleistung)
jährliche Energiemehrkosten	ca. 25.000 €/a	
jährliche Gesamtenergiekosteneinsparung	ca. 65.000 €/a	

Die Kapital- und Betriebskosten für die Anlage übersteigen die jährliche Energiekosteneinsparung von 65.000 € deutlich. Vielfach gibt es allerdings zu Abluftreinigungsmaßnahmen keine Alternative.

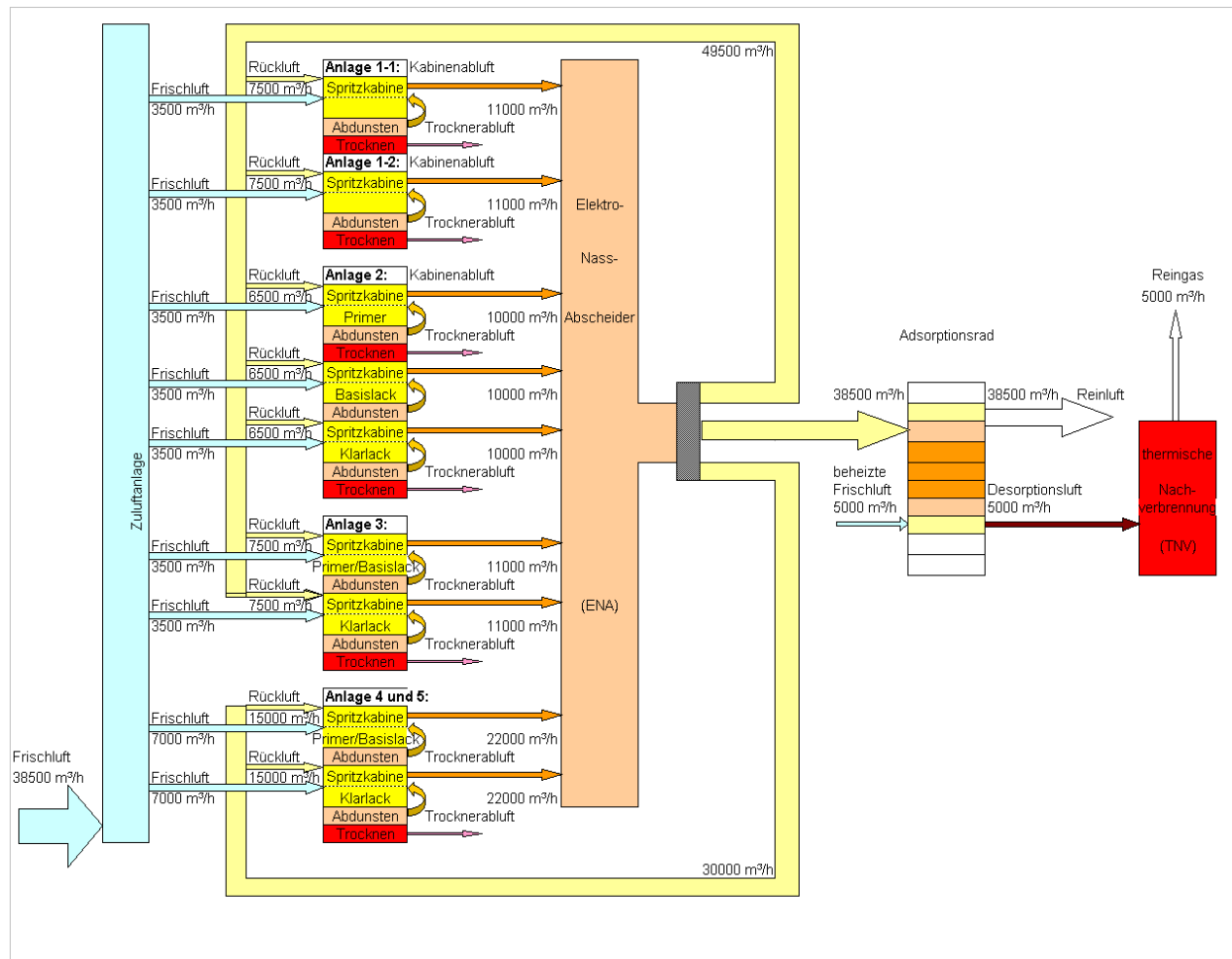


Abb. 30: Lufthaushalt eines Kfz-Zulieferers nach dem Umbau zur Einhaltung der VOC-Grenzwerte

12 Praxisbeispiel: Kunststofflackieranlage

Gegenübergestellt werden eine bestehende, neuwertige **Kunststofflackieranlage** und eine gleichwertige, energieoptimiert konzipierte Neuanlage. Abgeschätzt werden die erzielbare Reduktion des Energieverbrauchs, die Energiekosteneinsparungen und die entsprechenden Investitionsmehrkosten (Tab. 20). Ein Großteil der Maßnahmen gilt auch für die Nachrüstung bestehender Anlagen. Die technische Umsetzbarkeit und die Wirtschaftlichkeit sind im Einzelfall zu prüfen.

Hergestellt werden Zubehörteile für Automobile (Innenteile) aus Kunststoff.

Werkstückdurchsatz: ca. 60 m² pro Stunde, Dreischichtbetrieb

Lackierprozess:

- Vorbehandlung (Powerwash) mit nachfolgender Blaszone
- Haftwassertrockner (vorgeschaltete Abdunstzone 1 wird als Grundlacktrockner verwendet)

- *Flächenspritzkabine mit Abdunstzone 2*
- *Decklackrockner*
- *Transport der Werkstücke durch Zweistrang-Kettenförderer (Transportgeschwindigkeit: 1,1 m/min)*

Tab. 20: Energie sparende Komponenten und Maßnahmen für eine energetisch optimale Kunststofflackieranlage (Laufzeit 240 d à 24 h) einschließlich der Energiekosteneinsparung sowie der Investitionsmehrkosten im Vergleich zur bestehenden Anlage (Abschätzung)

Komponenten und Maßnahmen für eine energetisch optimal konzipierte Kunststofflackieranlage:	Verringerung des Energieverbrauchs in kWh/h	Energie-Kosteneinsparung in €/a	Investitionsmehraufwand in €
	im Vergleich	zur konventionellen	Anlage
Vorbereitung			
Abschaltung der Spritzpumpen in Pausen, während Transportlücken und bei Fördererstillstand	9 (thermisch)	2.600	2.000
Wärmedämmung der Rohrleitung und Wärmetauscher außerhalb der Anlage	1 (therm.)	300	500
frequenzgeregelte Umwälzpumpen (anstelle von Drosselklappen) in den Rohrleitungen	4 (elektrisch)	1.800	2.500
Kondensationsaggregat für einen abluftfreien Betrieb	7 (therm.)	3.200	9.000
Abdunstzone 1			
Ventilatoren mit höherem Wirkungsgrad und energieeffizienten Motoren	2 (el.)	900	3.500
Umluftbetrieb bei Grundierung	13 (therm.)	3.700	5.000
Teilstrom Umluft- und Teilstrom Frisch-/Abluftbetrieb	11 (therm.)	3.200	Keine Mehrkosten
Haftwassertrockner (Grundlackrockner)			
optimierte Öffnungszeiten der Klapp-tore	2 (therm.)	600	Keine Mehrkosten
Ventilatoren mit höherem Wirkungsgrad und energieeffizienten Motoren	3 (el.)	1.400	5.000
Temperaturreduzierung (Entfeuchtung der Umluft: d.h. auch eine Verringerung des benötigten Trockner-volumens) - nur für Wasserlackierung	30 (therm.)	8.600	15.000

Komponenten und Maßnahmen für eine energetisch optimal konzipierte Kunststofflackieranlage:	Verringerung des Energieverbrauchs in kWh/h	Energie-Kosteneinsparung in €/a	Investitionsmehraufwand in €
	im Vergleich	zur konventionellen	Anlage
Spritzkabine			
Abschaltung der Spritzkabine während Arbeitspausen (Berücksichtigung des Nachlaufs für die technische Lüftung)	31 (therm.)	8.900	3.000
Geringere Luftbefeuchtung (60 statt 80 Prozent)	174 (therm.)	50.000	keine Mehrkosten
Ventilatormotoren mit Frequenzumrichtern	20 (el.)	9.200	10.000
Umluftbetrieb mit Teilstrom Frisch-/Abluft (bei gleichzeitiger Reduzierung der Befeuchtung von 80 auf 60 Prozent, s.o.)	370 (therm.)	107.000	60.000
Abluftreinigung (Annahme: RNV)			350.000
Abdunstzone 2			
Ventilatoren mit höherem Wirkungsgrad und energieeffizienten Motoren	2 (el.)	900	3.500
Umluftbetrieb bei Decklackierung	34 (therm.)	9.800	5.000
Teilstrom Umluft- und Teilstrom Frisch-/Abluftbetrieb	26 (therm.)	7.500	Keine Mehrkosten
Lacketrockner			
optimierte Öffnungszeiten der Klapp-tore	2 (therm.)	600	Keine Mehrkosten
Ventilatoren mit höherem Wirkungsgrad und energieeffizienten Motoren	3 (el.)	1.400	5.000
Einstellen der Trocknerabluft auf die notwendige Mindestabluft	8 (therm.)	2.300	Keine Mehrkosten
Belüftungsanlage			
Ventilator mit höherem Wirkungsgrad und energieeffizientem Motor	3,5 (el.)	1.600	6.000
Ventilatormotor mit Frequenzumrichter	s. Abdunstzonen	s. Abdunstzonen	2.500
Summe im Vergleich zur bestehenden Anlage	708 (therm.) 38 (el.)	217.000	475.000

Der thermische Energieverbrauch liegt um ca. 60% Prozent und die Energiekosten um ca. 220.000 € niedriger als in der bestehenden Anlage. Abdunstzonen und Spritzkabine werden mit Umluft plus Teilstrom Frischluft-/Abluft betrieben. Hierfür ist eine Abluftreinigung notwendig.

13 Tipps bei Planung und Betrieb von Lackieranlagen

13.1 Energieeffizientes Anlagenkonzept

Bereits bei der Konzeption einer Lackieranlage können die Weichen für eine energieeffiziente Lackierung gestellt werden. Beziehen Sie die Energieeffizienz bei Anlagenplanung und Bewertung der vorgelegten Angebote mit ein. So können z.B. durch die direkte Wand-an-Wand Anordnung von „warmen“ Anlagenkomponenten die Wärme abstrahlenden Flächen und damit der Verlust an thermischer Energie minimiert werden (Abb. 31).

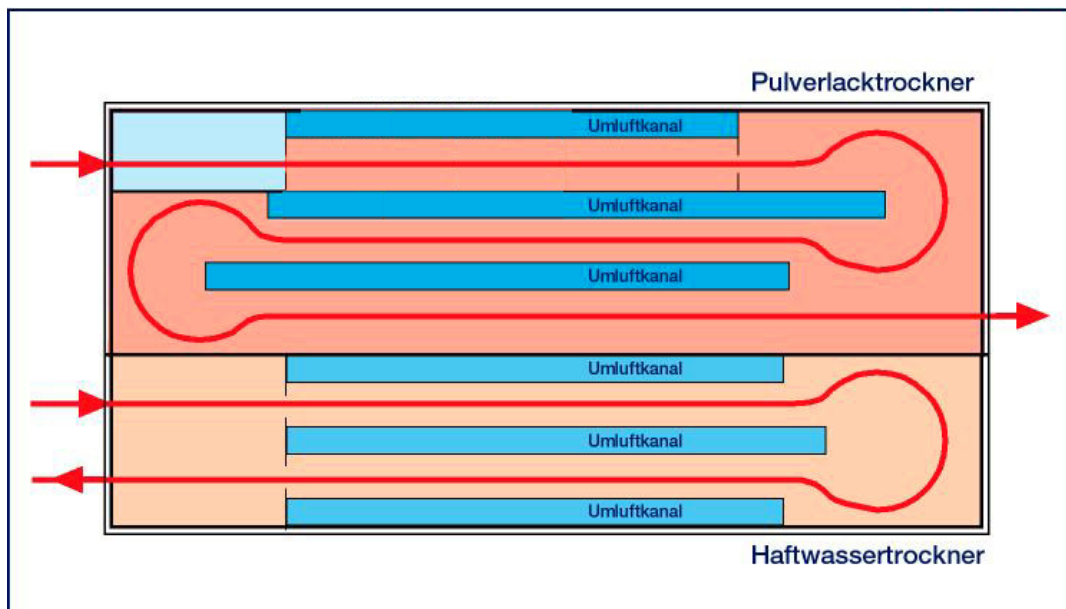


Abb. 31: Ein Blocktrockne erhöht die Energieeffizienz durch Oberflächenminimierung der „warmen Anlagenkomponenten“ (Quelle: Fa. Eisenmann)

13.2 Anlagenkapazität

Eine nicht voll ausgelastete Lackieranlage ist nicht energieeffizient. Um unnötigen Energieverbrauch zu vermeiden, sollte die Kapazität der Lackieranlage, d.h. der maximal mögliche Durchsatz an Masse bzw. an Teilen pro Zeit, voll ausgeschöpft werden. In der Praxis laufen oft leere oder nur teilweise beladene Warenträger durch die Anlage. Unter energetischen Gesichtspunkten optimal ist eine voll ausgelastete Anlage mit der Möglichkeit zur fallweisen Kapazitätserhöhung, z.B. durch

- zusätzliche Kleinanlagen,
- Einlegen von Sonderschichten oder
- Vergabe von Aufträgen an Lohnbeschichter.

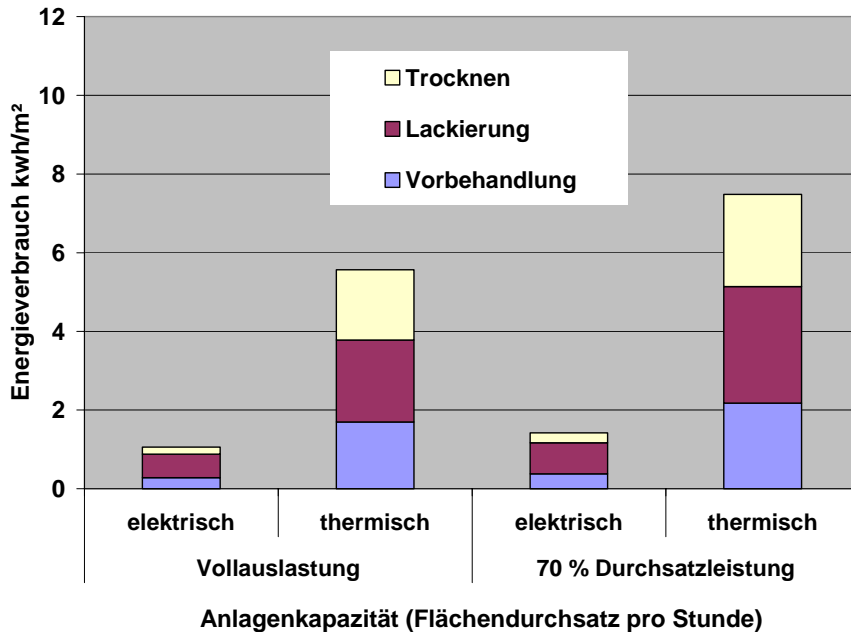


Abb. 32: Flächendurchsatz-bezogener Energieverbrauch bei Vollauslastung und Teilauslastung (Modellanlage für Metall-Büromöbel)

Abbildung 32 zeigt anhand der Modellanlage die Abnahme der Energieeffizienz bei einer Anlagenauslastung von lediglich 70%. Im Vergleich zur 100% ausgelasteten Anlage (Laufzeit 16 h/Tag), muss die teilausgelastete Anlage 22,8 h laufen, um die gleiche Oberfläche lackieren zu können. Dies erhöht die jährlichen Energiekosten erheblich (Tab. 23).

	Anlagenauslastung 100%	Anlagenauslastung 70%
Anlagenlaufzeit	240 d à 16h	240 d à 22.8 h
Energiekosten /a	187.000 €	257.000 €
Mehrkosten /a		70.000 €

Tab. 23: Vergleich der jährlichen Energiekosten einer voll- und einer teilausgelasteten Anlage (Modellanlage für Metall-Büromöbel)

13.3 Energieeffiziente Anlagenkomponenten

In der Planungsphase sollten mit den Anlagenherstellern die Mehrkosten und die Einsparpotenziale folgender energiekostenrelevanter Komponenten besprochen werden:

- Elektromotoren mit Energieeffizienzklasse eff 1,
- Drehzahlregelbare Elektromotoren,
- Sanftanlauf von Elektromotoren zur Vermeidung von Stromspitzen (⇒Einstufung in günstigeren Stromtarif),
- Ventilatoren mit verbessertem Wirkungsgrad,
- optimiertes Druckluftkonzept (z.B. mehrere Kompressoren),
- Einsatz von Lack-Applikationssystemen mit minimiertem Druckluftverbrauch sowie
- Einsatz einer Kraft-Wärme-Kopplung bzw. einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung.

13.4 Wirkungsgradverbesserung von Ventilatoren

Ein nennenswertes Einsparpotenzial für die Einsparung teurer Elektroenergie besteht bei Ventilatoren. Im Ist-Zustand haben Ventilatoren, bezogen auf die benötigte elektrische Antriebsenergie, einen Wirkungsgrad von ca. 0,4. Einige Ventilatorenhersteller haben durch Weiterentwicklungen, z.B. 2-flutige Systeme, bereits einen Wirkungsgrad von nahezu 0,6 erreicht.

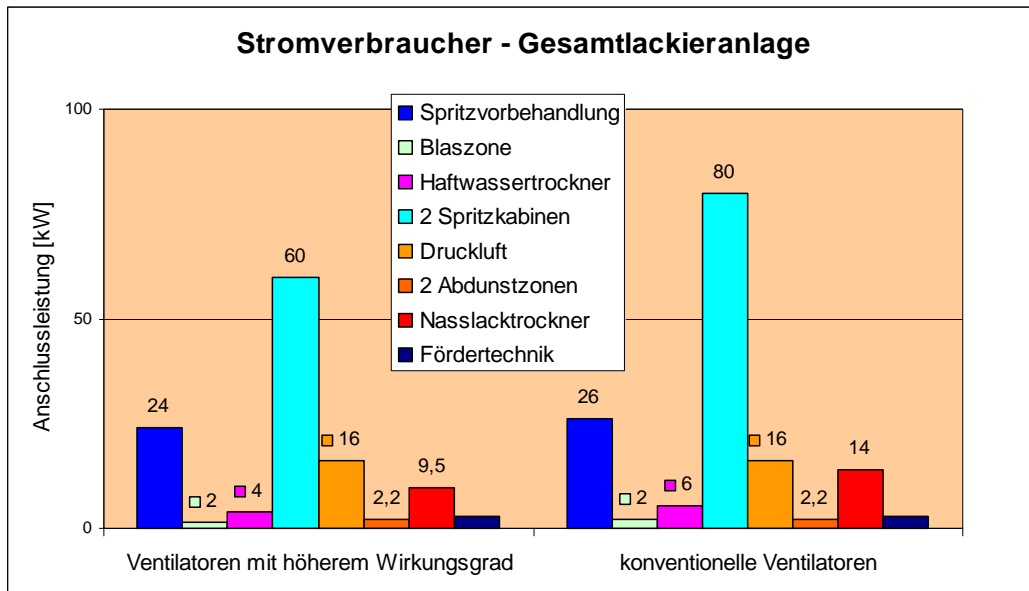


Abb. 33: Vergleich des Verbrauchs an elektrischer Energie bei Ventilatoren mit höherem Wirkungsgrad mit konventionellen Ventilatoren (Modellanlage)

Bei einer Luftleistung von 21.000 m³/h und einem statischen Druckabfall von 400 Pa reduziert sich die Motorenleistung von ursprünglich 5,5 kW um eine Stufe auf 4,0 kW.

Durch den Einsatz von Motoren mit geringerer Leistung in wirkungsgradverbesserten Ventilatoren ließe sich der Verbrauch der Modellanlage an elektrischem Strom um ca. 20 % senken (Abb. 33).

13.5 Alternative Lackierverfahren zur Reduzierung des Energieverbrauchs

Die Untersuchung verschiedener Fertigungskonzepte ermöglicht einen Vergleich verschiedener Lackierverfahren. Die Konzeptalternativen „Wasserlackierung“ und „Pulverlackierung“ für die Modellanlage zur Beschichtung von Metallbüromöbel lassen sich bezüglich des Energieverbrauchs, wie in Abbildung 34 dargestellt, vergleichen:

Die Vorbehandlung ist jeweils gleich.

Lackierung: Für die Pulverlackierung wird keine Heizenergie benötigt, da die Absaugung des Oversprays in den Pulversprühkabinen im Umluftbetrieb erfolgt

Trocknung: Die Pulverlackierung wird als Einschichtlackierung aufgetragen, daher entfällt eine Zwischentrocknung. Trotz höherer Einbrenntemperatur (220°C) wird für den Trocknungsprozess daher weniger Energie benötigt.

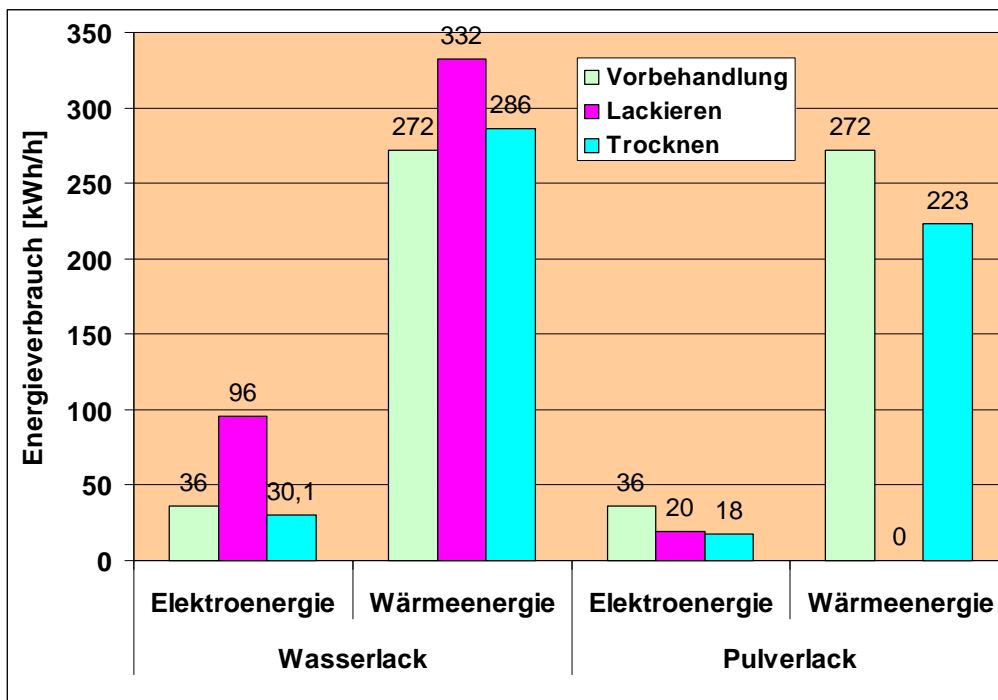


Abb. 34: Vergleich des Energieverbrauches in der Konzeptalternativen Wasserlack- und Pulverlackbeschichtung (Modelllackieranlage für Büromöbel)

14 Energieeffiziente Zukunftskonzepte

Um die Energieeffizienz nicht nur anhand von Detailoptimierungen zu verbessern, besteht Bedarf an ganzheitlich energieminierten Lackierkonzepten. Zu nennen ist hier unter anderem die Coil- und Platinenbeschichtung. Bei dieser Technologie wird die Beschichtung vor die Umformprozesse verlagert. Dadurch lässt sich die Vorbehandlung und Lackierung auf völlig ebenen und großen Flächen ausführen. So besteht die Möglichkeit, die umweltfreundlicheren und kostengünstigeren nicht zerstäubenden Lackierverfahren (z.B. Walzen, Gießen) einzusetzen, wodurch keine hohen Druckluftmengen - wie zum Spritzlackieren - benötigt werden. Auch kann auf das energieintensive Versprühen von wässrigen Medien in der Vorbehandlung verzichtet werden, da die Vorbehandlung mittels Walzen erfolgen kann. Die Coilbeschichtung wird in der Regel beim Coil-Hersteller ausgeführt. Für den verarbeitenden Betrieb entfällt dadurch die komplette Lackiertechnik.

Die derzeit realisierten Flüssiglack- und Pulverlack-Kabinenbelüftungen sind empirisch und damit großflächig ausgelegt. Ein weiteres energieminiertes Zukunftskonzept stellt daher die Reduzierung der Spritzkabinenflächen durch systematische Neuentwicklungen an den Kabinen dar. Grundsätzlich ist immer zu klären, ob die Bewegungseinrichtungen der Spritz- und Sprühaggregate bzw. die Spritzlackierer in der Lackierkabine stehen müssen. Weiterhin ist die Frage zu stellen, ob die komplette Kabinenfläche mit einer konstanten Luftsinkgeschwindigkeit zu belüften ist. Für diese energierelevanten Fragestellungen besteht bisher kein ausreichendes Wissen. Im Fraunhofer IPA werden hierzu z.Zt. Grundlagenuntersuchungen durchgeführt.

Mit verschiedenen Lackauftragsverfahren wird der Einfluss der Luftsinkgeschwindigkeit sowie auch die Wirkung von unterschiedlichen Werkstückkonfigurationen (z.B. an Förderern vertikal oder horizontal aufgehängte Flachteile und 3 D-Körper bzw. auf Transportbänder aufgelegte Flachteile, wie z. B. in der Holzindustrie) mit der numerischen Simulation erfasst und simuliert.

Weitere Untersuchungen befassen sich mit den Auswirkungen von automatischen Beschichtungsanlagen, wie Hubautomaten und Roboter, innerhalb des be- und entlüfteten Kabineninnenraumes. Dabei wird ermittelt, welche Einflussgrößen Bewegungsabläufe der Beschichtungsgeräte in Verbindung mit der Werkstückform auf die Luftströmung haben. Die Be- und Entlüftung von Kabineninnenräumen soll optimiert werden, indem festgestellt wird, in welchem Kabinenbereich in Abhängigkeit vom Spritzstrahl eine Luftströmung überhaupt erforderlich ist. Kabinenbelegungen, bei denen erhebliche Störungen der Luftströmung, z.B. durch Turbulenzen und Toträume auftreten, erfordern Maßnahmen zur Erzeugung laminarer Strömungen (Abb. 34).

Die numerische Strömungssimulation wird vom Fraunhofer IPA bereits erfolgreich zur Schwachstellenanalyse und Luftströmungsoptimierung im handwerklichen und industriellen Bereich eingesetzt. Eine optimierte Belüftung trägt auch hier entscheidend zur Minimierung des Energieeinsatzes bei.

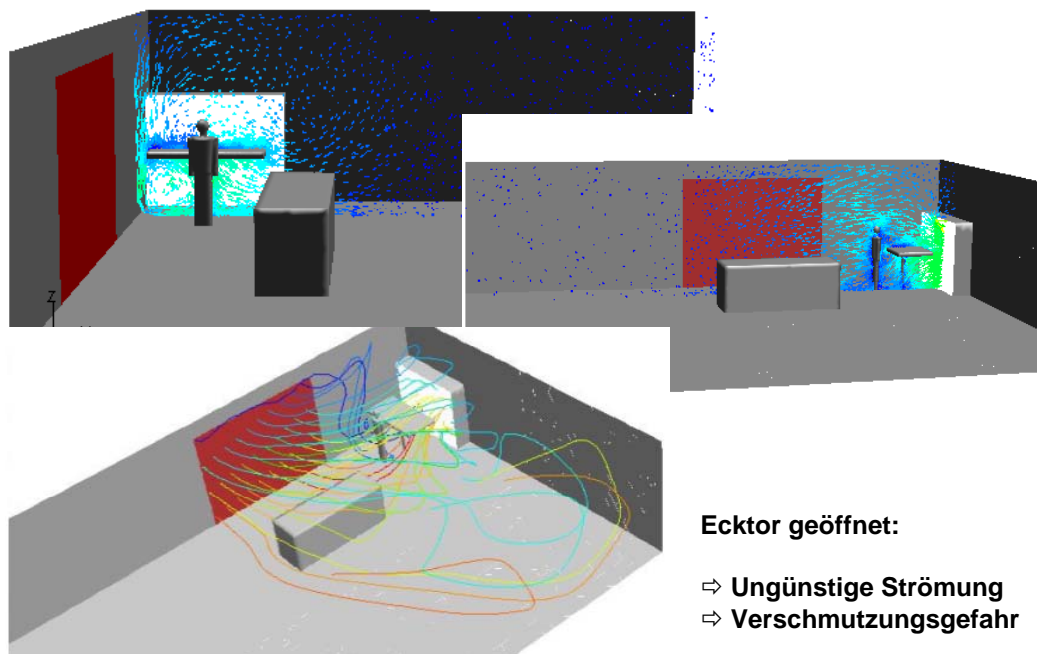


Abb. 35: Strömungssimulationen in handwerklichen Lackierkabinen.
(Quelle: Fraunhofer IPA)

Anhang: Zusammenstellung von Energieverbrauchern in Lackieranlagen

Prozess / Anlage	Verbraucher	Energieart	Leistung in kW	Einflussparameter
Vorbehandlung				
Tauchen / Spritzen	Heizung - Prozessmedien	therm.	100 - 600	Massendurchsatz, Zerstäubung, Dämmung
	Pumpenantriebe	el.	5 - 40	
	Abluftventilator	el.	5 - 50	Abluftmenge
Haftwassertrockner				Temperatur, Massendurchsatz, Abluftmenge, Dämmung
Umlufttrockner	Heizung	therm.	30 - 600	
	Umluftventilator	el.	2,2 - 22	
Blaszone	Luft	el.	2,2 - 4	
Blaszone, beheizt	Luft	el.	1,2 - 15	
	Heizung	therm.	15 - 120	
Lackapplikation,				
Spritzen/ Nasslack				
Spritzkabine	Zuluftheizung	therm.	50 - 300	Sinkgeschwindigkeit, Kabinengröße, Betriebsart
	Zuluftventilator	el.	5 - 40	
	Abluftventilator	el.	5 - 50	
(nur bei Nassausw.)	Wasser-Umwälzpumpe	el.	0,5 - 10	Kabinengröße, Auswaschsystem
	Kabinenbeleuchtung	el.	0,1 - 0,5	Betriebsart, Kabinengröße
Spritzstand	Abluftventilator	el.	0,5 - 5	Größe
	Wasser-Umwälzpumpe	el.	0,1 - 1	Kabinengröße, Auswaschsystem
Spritzgeräte	Lackapplikation/ Zerstäuber	el.	0,1 - 2	Zerstäuberart, -größe, Lackdurchsatz
	Lackapplikation/ Roboter	el.	1 - 4	
	Lackversorgung	el.	0,5 - 2	
Pulverbeschichten				
elektrostatisch	Abluftventilator	el.	6 - 12	Größe
	Pulversprühen, -kreislauf	el.	10 - 30	
	Hochspannungsgenerator	el.	0,1	Anzahl Pistolen, Durchsatz

Prozess / Anlage	Verbraucher	Energieart	Leistung in kW	Einflussparameter
Wirbelsintern	Teile- Vorheizung Fluidisierluft	therm. el.	40 - 400 0,5 - 4	
Tauchlackieren				
konv. Tauchen	Umwälzpumpe Absaugventilator	el. el.	0.5 - 10 0.5 - 5	Lackmenge Beckengröße
Elektrotauchen	Umwälzpumpen Abscheidestrom Kühlung Förderpumpen - Filtrat Spülung - Umwälz- pumpen Kabinenbeleuchtung	el. el. el. el. el.	10 - 50 10 - 50 10 - 50 0,5 - 2 5 - 50 0,1 - 0.5	Lackmenge, Anz. Kreisläufe Flächendurchsatz, Lackma- terial Durchsatz, Umwälzleistung (s. oben) Beckengrößen, Flächen- durchsatz Betriebsart, Kabinengröße
Fluten	Umwälzpumpe Absaugventilator	el. el.	0.5 - 10 0,5 - 5	Lackmenge Beckengröße
sonst. Beschichtungsver- fahren				
Gießen	Antrieb - Lackpum- pe Absaugventilator	el. el.	0,1 - 0.5 0,1 - 2,2	Flächenleistung, Lackmen- ge
Walzen	Walzenantrieb Absaugventilator	el. el.	0,5 - 5 0,1 - 2,2	Flächenleistung, Walzen- größe
Schleudern	Antrieb - Lack- schleuder	el.	0,5 - 5	Größe
Abdunsten	Umluftventilator Abluftventilator	el. el.	1 - 10 0,5 - 2	Durchsatz
Trocknen / Aushärten				
Umlufttrockner	Heizung Umluftventilator Abluftventilator	therm. el. el.	60,-,900 4,-,60 0,5,-,5	Temperatur, Massendurch- satz, Abluftmenge, Isolier- ung
IR- Strahlungstrockner	Strahlerheizung Abluftventilator	el. el.	50 - 500 0.5 - 5	Trocknergröße, Strahlerart Durchsatz, Lackmenge

Prozess / Anlage	Verbraucher	Energieart	Leistung in kW	Einflussparameter	
UV- Strahlungstrockner	Versorgung - UV-Lampen	el.	0.5 - 5	Trocknergröße, Strahlerart Temperatur, Massendurchsatz	
	IR - Vorheizung	el.	5 - 10		
	Abluftventilator	el.	0,1 – 0,5	Durchsatz, Lackmenge	
	Induktion	Versorgung - Induktorspulen	el.	5 - 50	Größe, Durchsatz, Temperatur
		Abluftventilator	el.	0,1 – 0,5	Durchsatz, Lackmenge
Kühlen					
Frischluft	Zu- Abluftventilator	el.	5 - 50	Durchsatz, Teiletemperatur	
Umluft	Umluftventilator	el.	5 - 50	Durchsatz, Teiletemperatur	
	Kühlung	el.	0 - 100	Durchsatz, Teiletemperatur	
Zuluftanlage					
Aufheizung	Heizung	therm.	50 - 1000	Zu- / Abluftmengen der einzelnen Anlagenteile	
Vollklimatisierung	Zuluftventilator	el.	1 - 30	Zu- / Abluftmengen der einzelnen Anlagenteile	
	Kühlung	el.	0 - 200		
Abwasserbehandlung					
konventionelle Abwasserbehandlung	Pumpenantriebe	el.	1 - 5		
	Rührwerke	el.	2 - 5		
	Dosierpumpen	el.	0,01 – 0,1		
Verdampfer	Heizung	el.	15 - 300		
	Dosierpumpen	el.	0.01 - 0.1		
Abluftbehandlung					
Thermische Nachverbrennung	Brenner zur Luftherhitzung	therm.	100 - 800	Abluftmengen, Lösemittelkonz. i. d. Abluft	
Regenerative Nachverbrennung	Brenner zur Luftherhitzung	therm.	50 - 400	Abluftmengen, Lösemittelkonz. i. d. Abluft	
Lösemittel-Rückgewinnung	Heißluft-/ Dampferzeugung	therm.	10 - 100	Abluftmengen, Lösemittelkonz. i. d. Abluft	
	Antriebe	el.	0,1 - 1	Anlagengröße	
	Hochspannung für Abscheider	el.	1 - 5	Abluftmengen	

GLOSSAR

Abluft	Luft, die dem Raum entnommen wird
Abwasserbehandlung	Aufbereitung von Abwasser aus Vorbehandlung und wasserberieselten Spritzkabinen zur Einleitung in den Abwasserkanal
Adiabatische Abkühlung	kein Wärmeaustausch mit der Umgebung
Adsorptionsrad	Rotor zur Aufkonzentrierung von Lösemitteln
Aerosole	hier: fein zerstäubte Lackpartikel
Airless-Zerstäubung	Lackapplikation mit Pumpe
Basislack	Bei dekorativen Lackierungen wird die farbgebende Schicht meistens mit einem Klarlack (Decklack) überlackiert
31. BImSchV	Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen
Coil-Coating	Beschichten von Bändern (Coils)
Dual-Cure-Lack	Hybrid-Lacksystem, das einen zusätzlichen chemischen Härter enthält und an unbestrahlten Stellen (UV) durch Wärmezufuhr chemisch nachreagiert
Druckluftzerstäubung	Lackapplikation mit Druckluftpistole
Düsentrockner	Umlufttrockner, bei dem die Heißluft mit Luftdüsen auf das Werkstück geblasen wird (z.B. Haftwassertrockner)
Effizienzklasse eff	Kennzeichnung von Elektromotoren nach Wirkungsgradklassen: eff 1 (sehr effizient) bis eff 3 (niedriger Wirkungsgrad)
Elektrostatische Lackierung	verlustarme Lackapplikation, bei der die Lackpartikel elektrostatisch aufgeladen werden
Festkörper	feste Bestandteile des Lacks
Fotoinitiator	Chemische Verbindung, die durch Einwirkung von UV-Strahlung in Radikale zerfällt und Polymerisationsprozesse (Vernetzung) von Molekülen einleitet
Frequenzumrichter	Gerät zur Drehzahlregelung von Elektromotoren durch Frequenzänderung des el. Stroms
Hochrotationsglocke	verlustarme Lackapplikation, bei der die Lackpartikel elektrostatisch aufgeladen und mit einer schnell drehenden Glocke zerstäubt werden
Hordenwagen	Wagen zum Auflegen bzw. Aufhängen von Werkstücken für den Transport zu den Prozessschritten der Lackierung
In-Line-Press-Coating	Verpressen des Lackmaterials mit dem Bauteil in einem Werkzeug
Konversionsschicht	organische oder anorganische Schicht auf Metalloberflächen zur Verbesserung der Haftung und des Korrosionsschutzes einer Lackschicht
Lackapplikation	Anlagen und Geräte zum Auftragen des Lacks

GLOSSAR

Lackauftragswirkungsgrad	Anteil der auf dem Werkstück verbleibenden Lackfestkörpermenge zur versprühten Lackfestkörpermenge (Festkörpernutzungsgrad)
Lackoverspray	Lackpartikel, die bei der Lackapplikation neben die Oberfläche gespritzt werden
Lackoverspray-Recycling	Zurückgewinnung und Wiederverwendung von Lackmaterial, das beim Spritzlackierprozess neben das Werkstück gespritzt wird
Luftschleuse	Quer zu Austrittsöffnungen geführte Luftströmung zur Reduzierung von Wärmeaustritt aus beheizten Räumen
Layout	Vereinfachte Aufstellungszeichnung z.B. einer Lackieranlage
Powerwash-Anlage	Spritzvorbehandlungsanlage für Kunststoffteile
Power und Free Förderer	Förderanlage, bestehend aus Antriebsschiene mit Kette (Power) und einer darunter angeordneten Schiebebahn mit Fahrwagen (Free)
Pre-Coating	Vorlackierung von Blechen
Pulverlack	Lackpartikel in Pulverform, die auf Werkstücke elektrostatisch aufgetragen und durch Wärmeeinwirkung zu einem Film verschmolzen werden
Rauchgas	Abgas aus einer Verbrennung
Reduzierungsplan	Vorgehen im Rahmen der 31. BImSchV zur schrittweisen Reduzierung von VOC-Emissionen
Sorptionstrocknung	Trocknung eines Gases durch Leitung über ein Sorptionsmittel (z.B. Silikagel)
Strahlen	mechanische Vorbehandlung einer Oberfläche durch Materialabtragung durch ein Strahlmittel (z.B. Strahlkies)
Trockenblaspistolen	Blaseinrichtung für trockene Luft mit Unterstützung von getrockneter Druckluft
UV-Licht	ultraviolette Strahlung
Verdüsung	Verspritzen einer Flüssigkeit durch Düsen (mechanische Wirkung und Oberflächenvergrößerung)
Wärmekaskade	Nutzung der Verbrennungsenergie z.B. einer TNV durch Verwendung des Reingases zur Beheizung von Trocknern und/ oder Vorbehandlung bei unterschiedlichen Temperaturniveaus
Wärmerad	Rotor aus wärmespeicherndem Material, das bei Drehung durch Sektoren Wärme aus der Abluft entzieht und an die Zuluft abgibt
Wasserlack	Lack, der vorwiegend Wasser als Lösemittel enthält
Zuluft	Luft, die dem Raum zugeführt wird

Abkürzungen:

ATL	anodische Tauchlackierung
Bay LFU	Bayrisches Landesamt für Umweltschutz
31. BImSchV	31. Bundes-Immissionsschutz-Verordnung
CO₂	Kohlendioxid
CrVI	6-wertiges Chrom
3-D	Dreidimensional
el.	Elektrisch
HVLP	High Volume Low Pressure, oversprayreduziertes Lackapplikationsverfahren
IR	Infrarot
1-K	Einkomponenten (-Lack)
2-K	Zweikomponenten (-Lack)
KTL	kathodische Tauchlackierung
MDF	Mitteldichte Faserplatten
PU	Polyurethan (Kunststoff)
rel.	relative (Feuchte)
RT	Raumtemperatur
RNV	Regenerative Nachverbrennung
therm.	thermisch
TNV	thermische Nachverbrennung (Abluftreinigung)
UF	Ultrafiltration
UV	Ultraviolett
VDMA	Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VOC	Volatile Organic Compounds