

Energie- und Stoffstromoptimierung in der betrieblichen Praxis der Lohnlackierung



Energie- und Stoffstromoptimierung in der betrieblichen Praxis der Lohnlackierung

herausgegeben von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
1. Auflage, Karlsruhe 2002

Impressum

Titel	Energie- und Stoffstromoptimierung in der betrieblichen Praxis der Lohnlackierung
ISSN	0949-0485 (Bd. 6, 2002)
Herausgeber	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Postfach 21 07 52 76185 Karlsruhe www.lfu.baden-wuerttemberg.de
Bearbeitung	Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU) Universität Karlsruhe Hertzstraße 16 76187 Karlsruhe Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Abteilung 3 – Industrie und Gewerbe Sabine Hellgardt, Dr. Christian Kühne, Karl-Heinz Röhm
Redaktion und Gestaltung	akzente Kommunikationsberatung, 80469 München www.akzente.de
Umschlaglayout	Stephan May Grafik Design, 76227 Karlsruhe
Titelbild	Jutta Ruloff, Diplom-Designerin, 76275 Ettlingen
Druck	Engelhardt & Bauer Druck und Verlagsgesellschaft mbH, Karlsruhe Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100% Altpapier
Bezug über	Verlagsauslieferung der LfU: JVA Mannheim – Druckerei Herzogenriedstraße 111 68169 Mannheim Fax: 06 21/3 98-3 70
Preis	8 €

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Zusammenfassung

In den letzten Jahren konnte eine weitgehende Emissionsminderung für eine Vielzahl von Luftschadstoffen (z.B. CO₂, NO_x, Schwermetalle) erreicht werden. Für die Emissionen an leichtflüchtigen organischen Verbindungen (VOC) hingegen ist dieser Trend noch nicht zu verzeichnen. Leichtflüchtige organische Verbindungen werden zu über 50 Prozent im Bereich der Lösemittelanwendung emittiert. Den größten Anteil hierbei hat die Lackverarbeitung.

Aus der bestehenden Gesetzeslage ergeben sich zahlreiche Anforderungen bezüglich Luftreinhaltung, Abwasser, Abfall, Gefahrstoffen sowie Gesundheits- und Arbeitsschutz an kleine und mittlere Unternehmen. Mittlerweile sieht die neuere Umweltgesetzgebung neben der Bestimmung der Verbrauchswerte auch die Bilanzierung der betrieblichen Eingangs- und Ausgangsstoffe vor. Beispielsweise werden bei der seit dem 21. August 2001 in deutsches Recht umgesetzten Lösemittel-Richtlinie der Europäischen Union (EU) auch die kleinen und mittleren lösemittelanwendenden Unternehmen künftig mit der Erstellung eines Lösemittelwirtschaftsplans konfrontiert. Auch die Novellierung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes fordert bei Überschreitung der festgelegten jährlichen Abfallmengen die Erstellung eines Abfallwirtschaftskonzepts und einer Abfallbilanz. Diese umweltrechtlichen Auflagen fordern von den betroffenen Betrieben neben der Erfüllung der Bilanzierungspflichten die Identifizierung ihrer technologischen Schwachstellen und die Nutzung der verfügbaren Emissionsminderungspotenziale.

Bereits heute sind gerade im Bereich Oberflächenbehandlung und insbesondere bei der Lackverarbeitung zahlreiche Materialien und Prozesse bzw. Technologien verfügbar, die zur Minderung von Lösemitteln, Abfällen, Energieverbräuchen etc. bei der Industrielackierung beitragen und zugleich zu Kosteneinsparungen führen können. Die Identifizierung von Potenzialen zur Umweltschonung sowie die Durchführung einer innerbetrieblichen Optimierung des Stoff- und Energieeinsatzes können mit Hilfe eines betrieblichen Energie- und Stoffstrommanagements realisiert werden.

Durch eine ganzheitliche Betrachtungsweise kann eine Erfassung der betrieblichen Stoff- und Energieströme mit geeigneten Instrumenten die Industrie- und Lohnlackierbetriebe unterstützen, Auswirkungen von Prozessänderungen auf den gesamten Betriebsablauf zu untersuchen.

Ziel dieses Vorhabens und der hier dargestellten Studie war die Entwicklung eines praxisorientierten Instruments zur effizienten Gestaltung der betrieblichen Stoff- und Energieströme für Unternehmen in den Bereichen Industrie- und Lohnlackierung. Ausgehend von der Ermittlung stofflicher und energetischer Daten wurde ein computergestütztes Prozesssimulationswerkzeug zur Modellierung der Energie- und Stoffflüsse entwickelt, das sich auf die kommerzielle Software UMBERTO® (zur Erstellung von Stoffstromanalysen und Ökobilanzen) stützt. Dieses Stoff- und Energieflussmodell dient der systematischen Abbildung von ausgewählten Prozessen und ermöglicht die Darstellung der Auswirkungen potenzieller Emissionsminderungsmaßnahmen unter technischen, ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten auf verschiedenen Aggregationsebenen (Betrieb, Prozesse etc.).

Weitere wesentliche Aufgaben im Rahmen dieser Studie umfassten die Durchführung einer Betriebs- und einer anschließenden Schwachstellenanalyse sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen hinsichtlich der identifizierten Verbesserungspotenziale. Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit einem ausgewählten Lackierbetrieb (Stoz Oberflächentechnik GmbH & Co. KG, Rottenburg-Hailfingen) durchgeführt. Die Aufdeckung innerbetrieblicher Optimierungspotenziale des Stoff- und Energieeinsatzes sowie von Produkt- und Technologieinnovationen als Beitrag zur Reduzierung von Umweltbelastungen wurde exemplarisch für die Prozesse der Mobiltelefon-Lackierung und der Lackierung von Weich-PVC-Leisten für Automobile durchgeführt.

Kleine und mittlere Unternehmen sind zunehmend gefordert, die Umwelt zu entlasten. Der Gesetzgeber verlangt, Verbrauchswerte zu bestimmen und Input-/Outputdaten zu bilanzieren.

Der Leitfaden stellt ein computergestütztes Energie- und Stoffstrommanagement vor. Ziel ist, ein praxisorientiertes Instrument zu entwickeln, das eine ganzheitliche Betrachtung erlaubt.

Für die Realisierung der Studie wurde zunächst auf methodische Aspekte des Stoffstrommanagements eingegangen. Die methodische Vorgehensweise bei der Durchführung einer Ökobilanzierung sowie die Anforderungen an ein computergestütztes Prozesssimulationswerkzeug zur Modellierung der Energie- und Stoffflüsse wurden dargestellt. Die Eigenschaften der ausgewählten kommerziellen Software UMBERTO® wurden anschließend kurz beschrieben.

Ein zentrales Element dieser Studie ist der Überblick über die Besonderheiten des Lohnlackierbereichs. Lohnlackierbetriebe verfügen nicht über ein eigenes Produkt, sondern übernehmen Aufträge von großen Industrieunternehmen (z.B. Automobilindustrie, Telekommunikationssektor). Aufgrund dieses Outsourcings gehören zu den Anforderungen, die an die Zulieferer gestellt werden, vor allem Flexibilität, gute Organisation und Kundennähe. Neben den steigenden Ansprüchen der Auftraggeber müssen Lohnlackierbetriebe rechtliche Rahmenbedingungen insbesondere hinsichtlich des Umweltschutzes und der Arbeitssicherheit erfüllen. Aufgrund ihrer geringen personellen und finanziellen Ausstattung sowie des erheblichen Kosten- und Konkurrenzdrucks sind Lohnlackierbetriebe in der Regel hinsichtlich Informationen beispielsweise in Bezug auf neue technische Verfahren und Prozesse oder neue Auflagen der Gesetzgebung im Vergleich zu großen Unternehmen benachteiligt.

Da in der Literatur nur wenige detaillierte Informationen über die Prozesse in der Industrie- und Lohnlackierung vorliegen, wurde die technologische Ausstattung der Lackierprozesse (Behandlung von Glas-, PVC-, Metalloberflächen) sowie der Vor- und Nachbehandlungsvorgänge im Referenzbetrieb erstmals ausführlich dargestellt. Ferner wurde ein ausführlicher Überblick über einsetzbare Emissionsminderungsmaßnahmen vermittelt. Neben verschiedenen Möglichkeiten zur Vermeidung bzw. Reduzierung der Emissionen von leichtflüchtigen organischen Verbindungen wurden auch Wege zur Reduzierung von Abfällen untersucht. Ausgehend von der Struktur des Referenzbetriebs wurde das computergestützte Energie- und Stoffstrommanagementsystem entwickelt und aufgebaut.

Die detaillierte Beschreibung des Ist-Zustands der zu untersuchenden Prozesse erforderte die Ermittlung relevanter Stoff- und Energieströme. Daher war eine umfassende Datenerhebung im Referenzbetrieb notwendig. Die Prozessschritte (Vorbehandlung, Lackierung, Trocknung) und entsprechenden Arbeitsabläufe (z.B. Spritzverfahren) wurden identifiziert und die eingesetzten Materialien (Lacke, Reinigungslösemittel usw.) und Technologien (z.B. Spritzpistolen) ausführlich analysiert. Mit diesem computergestützten Stoff- und Energieflussmodell wurde eine gezielte Untersuchung bezüglich des Einsatzes alternativer Produkte und Verfahren sowie nachgeschalteter Maßnahmen zur Minderung von Umweltbelastungen, insbesondere VOC-Emissionen, ermöglicht. So wurden beispielsweise die Verwendung von Lacksubstitutionen (z.B. wasserbasierte Lacke) und Verfahrensumstellungen (z.B. Einsatz von Hochrotationsglocken) sowie deren Abhängigkeiten von anderen Prozessschritten im Hinblick auf ökonomische und ökologische Auswirkungen untersucht. Insgesamt wurden für die zwei Prozesse (Lackierung von Weich-PVC-Leisten und die Lackierung von Mobiltelefon-Gehäusen) jeweils acht Szenarien untersucht.

Aufgrund seiner technologischen Ausstattung zählt der Referenzbetrieb, die Stoz Oberflächen-technik GmbH & Co. KG in Rottenburg-Hailfingen, zu den sehr fortschrittlichen Betrieben. Demzufolge besteht hier nur ein geringes zusätzliches Emissionsminderungspotenzial. Die derzeit einsetzbaren Umweltschutzmaßnahmen lassen noch keine Umstellung auf lösemittelarme bzw. -freie Lacksysteme zu: Aufgrund der besonderen Position der Lohnlackierbetriebe als Auftragnehmer kann der Einsatz alternativer Technologien oder Materialsubstituten nur in intensivem Dialog mit den Auftraggebern (z.B. Mobiltelefon-Produzenten, Automobilindustrie) erfolgen. Prozessänderungen werden aufgrund der hohen Qualitätsansprüche erst nach umfangreichen Tests (z.B. „Florida-Test“ mit zehn Jahren Dauer) zugelassen.

Bei industriellen Lohnlackierbetrieben ist der gegenwärtige Umfang eingesetzter ressourcenschonender bzw. emissionsarmer Lackmaterialien und Technologien nur schwer abschätzbar. Das Minderungspotenzial für die gesamte Branche der Industrie- und Lohnlackierung in Bezug auf Umweltbelastungen ist folglich ebenfalls schwer ermittelbar. Ausgehend davon ist für die Lohnlackierbranche die Ableitung von allgemeinen Empfehlungen und branchenspezifischen Kennzahlen im vorliegenden Projekt sehr beschränkt.

Die Anwendung des entwickelten Stoff- und Energieflussmodells ermöglicht eine einfache und schnelle Bilanzerstellung, z.B. für die Berichterstattung im Rahmen von umweltrechtlichen Regelungen oder für die Erfüllung der Anforderungen der EG-Öko-Audit-Verordnung bzw. der ISO 14000 ff. Gleichzeitig können die Auswirkungen auf Umweltbelastungen und Kosten sowie Minderungspotenziale ermittelt werden. Neben der transparenten Darstellung der Stoff- und Energieströme und deren nachvollziehbarer Berechnung ermöglicht diese Software die systematische Fortschreibung bei neuen Erkenntnissen in der Lackmaterial- und Technologieentwicklung. Die hauptsächliche Schwierigkeit im Rahmen der Modellentwicklung besteht für Lohnlackierbetriebe in der Abgrenzung bzw. Zuordnung von Stoff- und Energieströmen zu den einzelnen Prozessschritten oder den einzelnen Produkten. Da lösemittelrelevante Aktivitäten zudem im Regelfall einfache Prozesse darstellen, können die Ergebnisse anschließend in ein Flussdiagramm und in eine Kalkulationstabelle (z.B. in Microsoft Excel) übertragen werden.

Eine vollständige Ökobilanz, die z.B. auf der Methode der Wirkungskategorien basiert, verspricht jedoch keine weiteren Erkenntnisse, da die VOC-Emissionen, die bei der Lohnlackierung die größte Umweltrelevanz aufweisen, lediglich mit einem einzigen Wirkungsabschätzungsfaktor multipliziert werden.

Der Einsatz von Stoffstrommanagementsystemen bietet eine Unterstützung sowohl im Rahmen der Erfüllung von Berichtspflichten als auch bei der Aufdeckung sinnvoller Prozessverbesserungen, u.a. hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Aspekte. Dabei wird die geforderte Transparenz gewährleistet. Durch die Auswahl eines innovativen Referenzbetriebs der Industrie- und Lohnlackierung wurde der erfolgreiche Einsatz von Maßnahmen zur Minderung von Umweltbelastungen aufgezeigt.

Die Stoff- und Energiestrombilanzierung liefert die nötigen Daten für die Berichterstattung gegenüber dem Gesetzgeber oder im Rahmen von Umweltnormen wie der EG-Öko-Audit-Verordnung oder ISO 14001.

Inhalt

1	Einführung	9
1.1	Ausgangslage und Problemstellung	9
1.2	Zielsetzung	10
1.3	Vorgehensweise	10
2	Innerbetriebliches Energie- und Stoffstrommanagement	12
2.1	Methodische Vorgehensweise bei einer Ökobilanzierung	12
2.1.1	Zur Abgrenzung des Bilanzraums	13
2.1.2	Zur Erstellung einer Sachbilanz	14
2.1.3	Zur Erstellung einer Wirkungsbilanz	15
2.1.4	Bilanzbewertung/Auswertung	19
2.2	Computergestützte Durchführung einer Ökobilanzierung	20
2.2.1	Anforderungen an das Softwaresystem	20
2.2.2	Eignung von Stoffstromnetzen für die Sachbilanzierung	21
2.3	UMBERTO® als Software zur computergestützten Stoff- und Energiebilanzierung	23
2.3.1	Die Materialdatenbank	24
2.3.2	Implementierung der Stoffstromnetze	24
3	Besonderheiten der Lohnbeschichtung	27
3.1	Branchenspezifische Rahmenbedingungen	27
3.2	Rechtliche Rahmenbedingungen	27
3.2.1	Bundesimmissionsschutzgesetz	28
3.2.2	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz	28
3.2.3	Wasserhaushaltsgesetz	28
3.2.4	Gefahrstoffverordnung	29
3.2.5	Unfallverhütungsvorschrift	29
3.3	Anforderungen des Umweltschutzes und der Arbeitssicherheit in der Lohnlackierung	29
4	Prozesse in der Lohnlackierung	31
4.1	Auswahl eines Referenzbetriebs	31
4.2	Auftragsstruktur	32
4.3	Erfassung der technologischen Ausstattung	32
4.3.1	Vorbehandlung	33
4.3.2	Lackierung	36
4.3.3	Entlackung	36
4.3.4	Sonstige umwelt- und gesundheitsrelevante Maßnahmen	37
4.4	Erstellung eines vereinfachten Betriebsmodells	39
4.5	Erhebung der erforderlichen Daten im Betrieb	39

5	Betriebsanalyse	40
5.1	Detaillierte Beschreibung des Ist-Zustands	40
5.1.1	Lackierung von Mobiltelefonen	40
5.1.2	Lackierung von Weich-PVC-Leisten	42
5.1.3	Umweltbelastungen	44
5.2	Beschreibung der Betriebsdatenstruktur	46
5.3	Beschreibung der Kostenstruktur	47
5.4	Beschreibung der Vorgehensweise beim Modellaufbau: Grundlagen und Modellierung der Prozesse	47
5.4.1	Modellabgrenzung	47
5.4.2	Computergestützte Darstellung der betrieblichen Energie- und Stoffströme	48
5.4.3	Systematische Erfassung und Berechnung der betrieblichen Energie- und Stoffströme	49
5.4.4	Ermittlung der Kosten	50
5.5	Ermittlung möglicher Verfahrensalternativen	51
5.5.1	Einsatz lösemittelarmer bzw. -freier Lacke	51
5.5.2	Verbesserung des Auftragswirkungsgrads	52
5.5.3	Rückgewinnung von Lackoverspray	53
5.5.4	Abluftreinigungsverfahren	53
5.6	Bewertung der Alternativen unter Berücksichtigung von technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekten	54
5.6.1	Szenarienbildung für die Lackierung von Mobiltelefonen	54
5.6.2	Szenarienbildung für die Lackierung von Weich-PVC-Leisten	58
6	Fazit und Ausblick	63
6.1	Der Nutzen eines betrieblichen Energie- und Stoffstrommanagements für die Firma Stoz	63
6.2	Energie- und Stoffstrommanagement in der Industrielackierung	64
6.3	Methodische Aspekte bei der Entwicklung eines Energie- und Stoffstrommanagements für die Industrielackierung	65
6.3.1	Die Software UMBERTO®	65
6.3.2	Fehlerabschätzung und Ungenauigkeiten in der Ökobilanz	66
6.4	Fazit der Studie	67
7	Literaturverzeichnis	68
8	Abkürzungsverzeichnis	74
9	Abbildungsverzeichnis	75
10	Tabellenverzeichnis	76
	Anhang I–V	77

1 Einführung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Während bei einer Vielzahl von Luftschadstoffen (CO₂, NO_x, Schwermetallen) in den letzten Jahren aufgrund der Genehmigungsbedürftigkeit der Anlagen und der daraus erwachsenden Anforderungen an die eingesetzten Technologien schon eine weitgehende Emissionsminderung stattgefunden hat, sind die Emissionen an leichtflüchtigen organischen Verbindungen (VOC) insgesamt bisher nur wenig zurückgegangen. Leichtflüchtige organische Verbindungen werden zu über 50 Prozent im Bereich der Lösemittelanwendung emittiert. Den größten Anteil hierbei hat die Lackverarbeitung. Die handwerklich geprägten kleinen und mittleren Industrie- und Lohnlackierbetriebe stellen dabei einen in den letzten Jahren rasant wachsenden Wirtschaftsbereich dar. Aufgrund des zunehmenden Outsourcings von großen Industrieunternehmen (z.B. Automobilindustrie) sind überwiegend zweistellige Zuwachsraten bei Aufträgen und Beschäftigten zu verzeichnen. Durch die hohe Flexibilität dieser Industrielackierbetriebe und die steigenden Ansprüche an individuelle Lösungen aus Sicht der großen Industrieunternehmen wird dieser Trend auch in Zukunft anhalten.

Bereits heute sind gerade im Bereich Oberflächenbehandlung und insbesondere bei der Lackverarbeitung zahlreiche Materialien und Prozesse/Technologien verfügbar, die zur Minderung von Lösemitteln, Abfällen, Energieverbräuchen etc. beitragen und zugleich Kosteneinsparungen ermöglichen. Die Betriebe setzen diese Alternativen bisher allerdings nur in geringem Umfang ein, weil eine ausschließliche Beurteilung emissionsarmer Produkte nach Einkaufspreisen sowie verbrauchsarmer Technologien nach der Investitionssumme in ökonomischer und ökologischer Hinsicht häufig zu falschen Einkaufs- bzw. Investitionsentscheidungen führt. Mit der Einführung eines betrieblichen Energie- und Stoffstrommanagements lassen sich durch die ganzheitliche Betrachtungsweise Potenziale zur Umweltschonung durch eine wirksame Reduzierung der VOC-Emissionen und zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit für die einzelnen Betriebe aufzeigen und realisieren.

Zudem ergeben sich aus der bestehenden Gesetzeslage zahlreiche Anforderungen bezüglich Luftreinhaltung, Abwasser, Abfall, Gefahrstoffen sowie Gesundheits- und Arbeitsschutz an Lackierbetriebe, die gewisse Verbrauchsschwellenwerte überschreiten. Mittlerweile sieht die neuere Umweltgesetzgebung neben der Bestimmung der Verbrauchswerte auch die Bilanzierung der betrieblichen Eingangs- und Ausgangsstoffe vor. Mit steigenden Kapazitäten sind zunehmend auch kleine und mittlere Unternehmen (KMU) betroffen.

Neben der Erfüllung der Bilanzierungspflicht kann daher eine Erfassung der betrieblichen Stoff- und Energieströme mit geeigneten Instrumenten die Betriebe unterstützen, die Auswirkungen von Prozessänderungen auf den gesamten Betriebsablauf zu untersuchen sowie eine innerbetriebliche Optimierung des Material- und Produkteinsatzes durchzuführen. Derzeit werden im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) weitere Bereiche (u.a. Druckereien, Papierfabriken) auf Schwachstellen und Verbesserungspotenziale hinsichtlich Umwelt- und Ressourcenschonung untersucht [KÜHNE 2000]. Dabei wird ebenfalls auf Verfahren des betrieblichen Energie- und Stoffstrommanagements zurückgegriffen.

Für den Bereich der Industrie- und Lohnlackierung existieren branchenspezifische Modelle der betrieblichen Energie- und Stoffströme bislang ebenso wenig wie spezifische Kennzahlen zur Identifikation von Verbesserungspotenzialen oder umfassende Kostenflussanalysen. Da die Emissionen im Bereich Industrie- und Lohnlackierung etwa im Vergleich zum Reparaturlackierbereich [BLÜMEL 2000] um ein Vielfaches höher sind und ein ausgeprägtes Kostenbewusstsein in der Branche vorherrscht, wird ein Instrument zum betrieblichen Energie- und Stoffstrommanagement, das gleichzeitig Emissions- und Kostenminderungspotenziale aufdeckt, auf hohe Akzeptanz stoßen.

Lackierbetriebe sind Hauptverursacher der VOC-Emissionen. Potenziale zur Umweltschonung bleiben oft ungenutzt, weil branchenspezifische Managementsysteme fehlen.

Für exemplarische Lackierprozesse wird der Leitfaden Energie- und Stoffströme bilanzieren, Schwachstellen identifizieren und Handlungsempfehlungen ableiten.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen des vorliegenden Projekts sollen ausgehend von Betriebsanalysen mit Hilfe eines computergestützten Stoff- und Energieflussmodells Einsparpotenziale sowohl in ökologischer als auch in ökonomischer Dimension untersucht werden. Ziel dieses Projekts ist daher die Entwicklung eines praxisorientierten Instruments zur effizienten Gestaltung der betrieblichen Stoff- und Energieströme für Unternehmen im Bereich der Industrie- und Lohnlackierung. In enger Zusammenarbeit mit einem ausgewählten Lackierbetrieb (Stoz Oberflächentechnik GmbH, Rottenburg-Hailfingen) sollen durch innerbetriebliche Verbesserung bzw. Optimierung des Material- und Energieeinsatzes sowie durch Produkt- und Technologieinnovationen Minderungspotenziale aus umweltbezogener und ökonomischer Sicht identifiziert werden. Zugleich soll das zu entwickelnde Energie- und Stoffstrommanagementsystem die Erfüllung der Anforderungen der EG-Öko-Audit-Verordnung bzw. der ISO 14000 ff. unterstützen. Nach Möglichkeit sollen spezifische Kennzahlen für den Bereich der Industrie- und Lohnlackierung ermittelt werden, um zukünftig auch in anderen Betrieben der Branche die Aufdeckung von Emissionsminderungs- und Einsparpotenzialen zu ermöglichen.

Die wesentlichen Aufgaben im Rahmen dieser Studie umfassen die Entwicklung eines betrieblichen Energie- und Stoffstrommodells zur systematischen Erfassung und Bewertung der Abläufe in der Industrie- und Lohnlackierung, die Durchführung einer Betriebsanalyse und anschließenden Schwachstellenanalyse sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen hinsichtlich der identifizierten Verbesserungspotenziale. Diese Aufgaben sollen exemplarisch für die Prozesse der Mobiltelefon-Lackierung und der Lackierung von Weich-PVC-Leisten durchgeführt werden.

1.3 Vorgehensweise

Zur Unterstützung der geplanten Betriebsanalyse wird ein computergestütztes Prozesssimulationswerkzeug zur Modellierung der Energie- und Stoffflüsse der zu untersuchenden Prozesse (kurz: Energie- und Stoffflussmodell) eingesetzt. Die methodische Vorgehensweise sowie die Anforderungen an die computergestützte Durchführung bei einer Ökobilanzierung werden in Kapitel 2 dargestellt. Die Modellierung der ausgewählten Prozesse stützt sich auf die kommerzielle Software UMBERTO®, die kurz beschrieben wird.

Zunächst wird auf die Besonderheiten der Lohnlackierbetriebe eingegangen. Ausgehend von den branchenspezifischen und rechtlichen Rahmenbedingungen von Lohnlackierbetrieben werden die Probleme bei der Erfüllung der Anforderungen des Umweltschutzes und der Arbeitssicherheit erläutert (Kapitel 3).

In Kapitel 4 wird der ausgewählte Referenzbetrieb und seine Kundenstruktur vorgestellt. Aufgrund mangelnder Informationen in der Literatur wird die technologische Ausstattung der vorherrschenden Lackierprozesse (Behandlung von Glas-, PVC- und Metalloberflächen) sowie der Vor- und Nachbehandlungsvorgänge ausführlich beschrieben. Ausgehend von der Struktur des Referenzbetriebs wird kurz auf die Erstellung eines vereinfachten Betriebsmodells und die Erhebung der erforderlichen Daten im Betrieb eingegangen.

Da nicht sämtliche Lackierprozesse im Rahmen der Modellstudie detailliert untersucht werden können, soll in Kapitel 5 zunächst eine exemplarische Betriebsanalyse für die Prozesse der Mobiltelefon-Lackierung und der Weich-PVC-Leisten-Lackierung durchgeführt werden. Zur detaillierten Beschreibung des Ist-Zustands (Abschnitt 5.1) der zu untersuchenden Prozesse werden die Stoff- und Energieströme bei der Stoz GmbH ermittelt. So werden die Prozessschritte für die ausgewählten Prozesse (Vorbehandlung, Lackierung, Trocknung usw.) sowie die entsprechenden Arbeitsabläufe (z.B. Spritzverfahren) identifiziert und eingesetzte Materialien (Lacke, Reinigungslösemittel usw.) und Technologien (z.B. Spritzpistolen) ausführlich analysiert. Dazu wird eine umfassende Datenerhebung (u.a. von Verbrauchs- und Emissionswerten) im Betrieb vorgenommen (Abschnitte 5.2 und 5.3).

Die Erstellung des Energie- und Stoffstrommodells, die systematische Erfassung und computergestützte Abbildung der betrieblichen Stoff- und Energieströme sowie deren Berechnung ist Gegenstand des Abschnitts 5.4.

Der Einsatz alternativer Produkte und Verfahren sowie nachgeschalteter Maßnahmen zur Minderung von Umweltbelastungen, insbesondere VOC-Emissionen, wurde aufgrund der geringen Verfügbarkeit gleichartiger abgeschlossener Studien detailliert untersucht (Abschnitt 5.5). Anschließend erfolgt in Abschnitt 5.6 die Modellierung der verschiedenen Szenarien für die betrachteten Prozesse. Es werden beispielsweise die Verwendung von Lacksubstitutionen (z.B. wasserbasierte Lacke) und Verfahrensumstellungen (z.B. Einsatz von HVLP-Spritzpistolen) sowie deren Interdependenzen mit anderen Prozessschritten im Hinblick auf ökonomische und ökologische Auswirkungen untersucht.

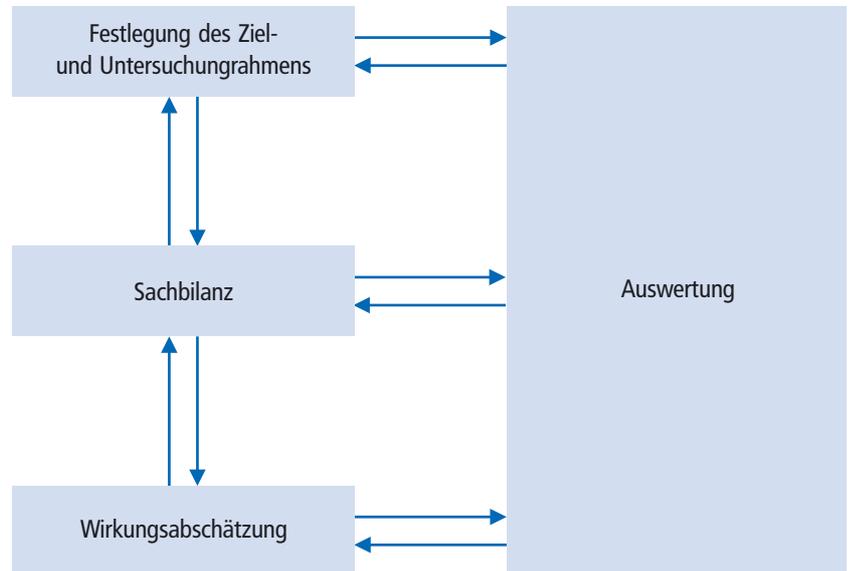
Zur umfassenden Untersuchung von Kosteneinsparungspotenzialen ist eine Kostenflussanalyse in direkter Kombination mit dem Stoff- und Energieflussmodell vorgesehen. Aus der Erstellung des computergestützten Stoff- und Energieflussmodells und der Betriebsanalyse ausgewählter Prozesse bei einem Lohnlackierbetrieb werden in Kapitel 6 die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich des Referenzbetriebs und der Lohnlackierbranche sowie der methodischen Aspekte der Ökobilanzierung dargestellt und diskutiert.

Der Leitfaden untersucht alternative Produkte und Verfahren. Ihr Einfluss auf die betrieblichen Prozesse wird in verschiedenen Szenarien erfasst. Ziel ist es, Verbesserungspotenziale ökologisch und ökonomisch zu bewerten.

(Output) bewirkt. Anhand einer Input-Output-Analyse des definierten Systems werden die Umweltwirkungen dieser Aktivitäten beurteilt. Allerdings wird bereits in der ISO 14040 ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich Ökobilanzen in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, so dass oft nur eine iterative Durchführung möglich ist. Das bedeutet, dass zunächst anhand der vorhandenen Informationen eine vorläufige ökologische Bewertung durchgeführt wird, die gegebenenfalls zu wiederholen und zu konkretisieren ist.

In Abbildung 2.1 werden die einzelnen Bestandteile der Ökobilanz gemäß ISO 14040 kurz vorgestellt.

Abb. 2.1: Phasen der Ökobilanz nach ISO 14040

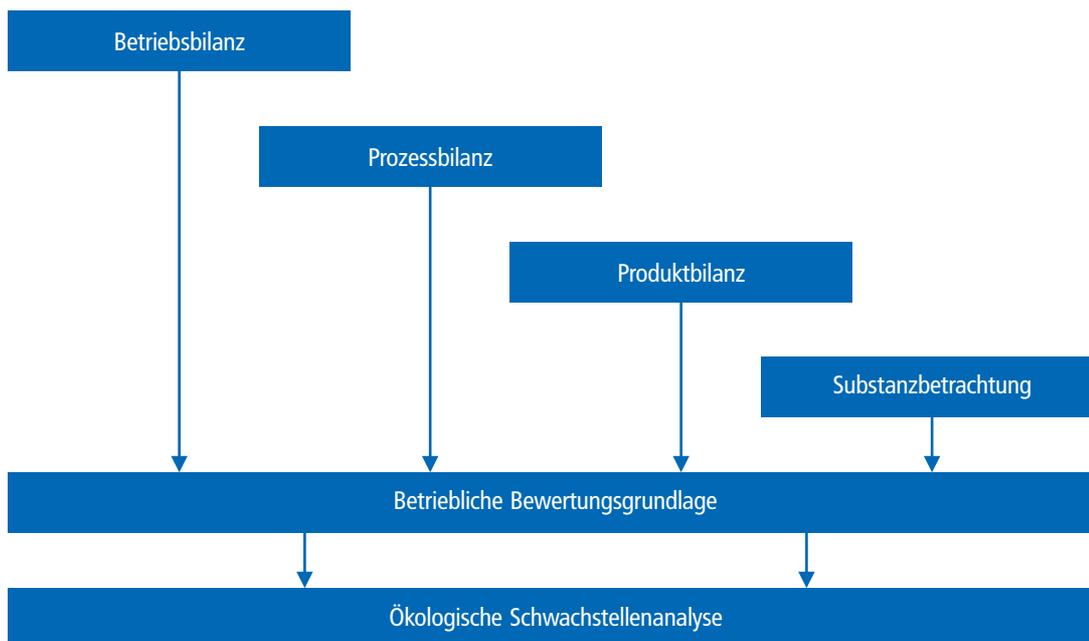


2.1.1 Zur Abgrenzung des Bilanzraums

Zunächst muss das zu untersuchende Objekt und das Ziel der Erhebung präzisiert werden. Eine derartige Zieldefinition beinhaltet die Festlegung und Abgrenzung (zeitlich wie räumlich) des zu untersuchenden Objekts, den Grund und die Zielsetzung für die Untersuchung sowie die

Interessentengruppe (vgl. [BMU 1995, LUNDIE 1999]). Auf die räumliche Abgrenzung soll im Folgenden detaillierter eingegangen werden, da sie einen zentralen Einfluss auf das weitere Vorgehen bei der Bilanzerstellung hat. Einen Überblick gibt Abbildung 2.2.

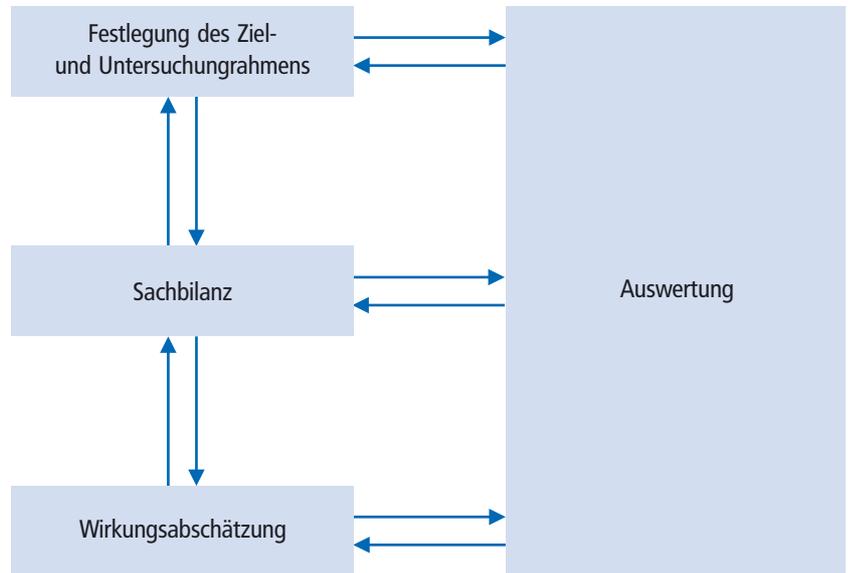
Abb. 2.2: Bilanzarten der Stoff- und Energiebilanzierung [HALLAY/PFRIEM 1992]



(Output) bewirkt. Anhand einer Input-Output-Analyse des definierten Systems werden die Umweltwirkungen dieser Aktivitäten beurteilt. Allerdings wird bereits in der ISO 14040 ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich Ökobilanzen in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, so dass oft nur eine iterative Durchführung möglich ist. Das bedeutet, dass zunächst anhand der vorhandenen Informationen eine vorläufige ökologische Bewertung durchgeführt wird, die gegebenenfalls zu wiederholen und zu konkretisieren ist.

In Abbildung 2.1 werden die einzelnen Bestandteile der Ökobilanz gemäß ISO 14040 kurz vorgestellt.

Abb. 2.1: Phasen der Ökobilanz nach ISO 14040

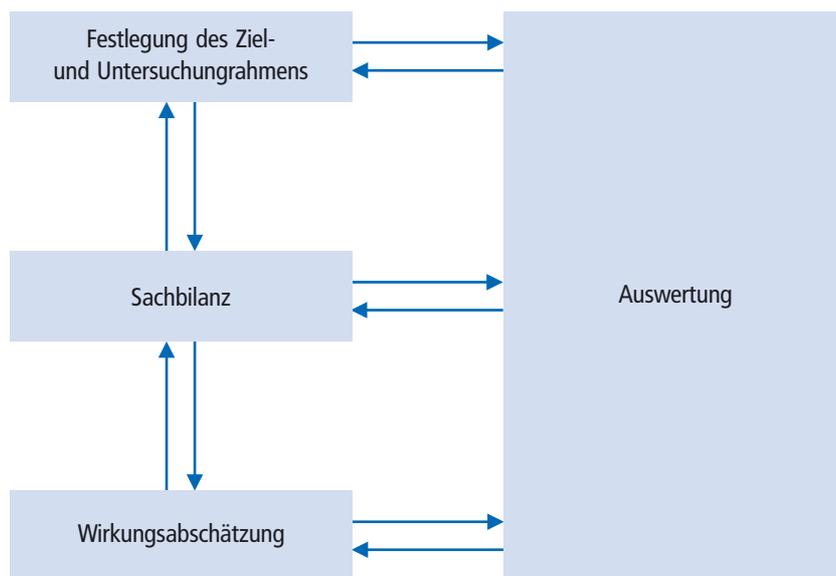


2.1.1 Zur Abgrenzung des Bilanzraums

Zunächst muss das zu untersuchende Objekt und das Ziel der Erhebung präzisiert werden. Eine derartige Zieldefinition beinhaltet die Festlegung und Abgrenzung (zeitlich wie räumlich) des zu untersuchenden Objekts, den Grund und die Zielsetzung für die Untersuchung sowie die

Interessentengruppe (vgl. [BMU 1995, LUNDIE 1999]). Auf die räumliche Abgrenzung soll im Folgenden detaillierter eingegangen werden, da sie einen zentralen Einfluss auf das weitere Vorgehen bei der Bilanzerstellung hat. Einen Überblick gibt Abbildung 2.2.

Abb. 2.2: Bilanzarten der Stoff- und Energiebilanzierung [HALLAY/PFRIEM 1992]



Betriebsbilanzen erfassen sämtliche Produktionsprozesse innerhalb räumlicher und zeitlicher Grenzen. Prozessbilanzen analysieren einen einzelnen Ablauf in all seinen Stufen. Produktbilanzen konzentrieren sich auf die Input-/Outputdaten eines Produkts während seines gesamten Lebenswegs oder einzelner Lebensphasen.

Betriebsbilanz

Im Rahmen einer Betriebsbilanz kann wahlweise das ganze Unternehmen, ein Werk oder nur ein Werksbereich untersucht werden. Charakteristisches Merkmal ist, dass nur die Stoff- und Energieströme erfasst werden, die an den Unternehmensgrenzen in sämtliche Produktionsprozesse und Produkte des Betriebs eingehen (Input) und dort entstehen (Output). Neben der räumlichen muss auch eine zeitliche Abgrenzung erfolgen. In Anlehnung an das Rechnungswesen wählt man hier als Betrachtungszeitraum meistens ein Jahr. Man spricht daher von einer Periodenrechnung [MÖLLER 1997].

Prozessbilanz

Bei der Prozessbilanz wird ein ausführlicher Einblick in betriebliche Abläufe angestrebt, indem ein einzelner Prozess des Unternehmens bilanziert wird: Zunächst erfolgt die Zerlegung in die einzelnen Prozessstufen, dann die Zurechnung der In- und Outputs zu diesen Stufen. Dadurch können Schwachstellen und Optimierungspotenziale identifiziert werden. Gegenstand dieser Bilanzform ist auch die Optimierung eines bestehenden Prozesses. Die Prozessbilanz findet außerdem oftmals beim Vergleich alternativer Produktionsverfahren Anwendung ebenso wie bei der Prüfung, ob zukünftige Grenzwerte mit den bestehenden Anlagen eingehalten werden können [BMU 1995, KIPPELEN 1995, RÖPENACK 1998].

Produktbilanz

Beim Begriff der Produktbilanz muss zwischen der Produktbilanz nach ISO 14040 und der betrieblichen Produktbilanz unterschieden werden. Erstere wird auch als „Life Cycle Assessment“ (LCA) bezeichnet. Nach ISO 14041 versteht man darunter die Betrachtung des gesamten Lebenswegs eines Produkts „von der Wiege (Rohstoffgewinnung) bis zur Bahre (Entsorgung)“.

Wegen der Fülle der zu erhebenden Daten und des damit verbundenen Aufwands erfolgt in der Unternehmenspraxis zumeist eine Beschränkung auf die eigenen Produktionsschritte in Form der betrieblichen Produktbilanz. Dabei werden nur diejenigen Stoffe, Energien und Emissionen erhoben, die im zu untersuchenden Betrieb für die Herstellung des Produkts eingesetzt werden oder dabei entstehen. Diese In- und Outputs werden dann dem Produkt direkt zugerechnet. Es handelt sich hier also im Gegensatz zur Betriebs- und Prozessbilanz um eine Stückrechnung (d.h., man bezieht die Stoff- und Energieströme nicht auf einen bestimmten Zeitraum, sondern auf eine bestimmte Ausbringungsmenge). Dies ermöglicht beispielsweise die direkte Zuordnung des Einsatzes bestimmter umweltschädlicher Materialien zu einzelnen Produkten [BMU 1995].

2.1.2 Zur Erstellung einer Sachbilanz

Die Sachbilanz³⁾ bildet das zentrale Element der Ökobilanz zur vollständigen Erfassung aller Stoff- und Energieströme innerhalb der Bilanzgrenzen für den Bilanzierungszeitraum. Dabei werden die Ströme nicht in Geldeinheiten, sondern mit ihren physikalischen Größeneinheiten erfasst. Die Erstellung eines Ökokontenrahmens ermöglicht die Strukturierung der zu erfassenden Ströme unter Berücksichtigung der anschließenden ökologischen Auswertung. Gleichartige Stoffe und Energien werden jeweils unter einem Gliederungspunkt zusammengefasst.

Diese Gleichartigkeit kann sich z.B. auf die Funktion (Lack, Klebstoff usw.), Verfügbarkeit, Herkunft (Primär-, Sekundärenergie) oder Art der Werkstoffe (Metalle in Aluminium, Stahl etc. unterteilt) beziehen. Tabelle 2.1 (Seite 15) zeigt eine Strukturierung, wie sie vom Umweltbundesamt für Produktionsunternehmen empfohlen wird [BMU 1995].

³⁾ Nach [SCHMIDT 1995] ist eine Sachbilanz auch als Stoff- und Energiebilanz, Stoff- und Energieflussanalyse oder Stoffstromanalyse zu betrachten.

Das Vorgehen bei der Sachbilanzierung kann grundsätzlich in vier Schritte eingeteilt werden: eine allgemeine Modellierung der Prozessstruktur, die Datensammlung, die Zusammenführung von Daten und Prozessstruktur und schließlich die Berechnung der Input- und Outputströme [MÖLLER 1997]. Im Idealfall – bei vollständiger Erfassung aller Ströme – muss eine mengenmäßig ausgeglichene Bilanz entstehen. Durch einen Vergleich von In- und Output kann daher festgestellt werden, ob alle relevanten Daten erfasst wurden oder ob beispielsweise noch unerkannte Emissionsquellen existieren. Bei der Prozessbilanz ist in der Regel die Erfassung sämtlicher notwendigen Daten möglich.

Bei den übrigen Bilanzierungsformen ist entweder eine Erfassung aller Ströme wegen des damit verbundenen Aufwands technisch nicht möglich oder es tauchen nicht alle Inputstoffe (direkt oder umgewandelt) auf der Outputseite wieder auf. Gründe hierfür können z.B. eine Zwischenlagerung oder der Einkauf vor dem betrachteten Bilanzzeitraum sein. Das Umweltbundesamt empfiehlt daher, auch die Bestände mit in den Ökokontenrahmen aufzunehmen.

2.1.3 Zur Erstellung einer Wirkungsbilanz

In der ökobilanziellen Wirkungsabschätzung werden die potenziellen Wirkungen der in der Sachbilanz erfassten Stoff- und Energieströme auf die natürliche Umwelt beschrieben. Dabei kann die Einschätzung qualitativ und/oder quantitativ erfolgen.

Aus den lebhaften Diskussionen der ökobilanziellen Bewertungsverfahren, die ausgehend von den Ansätzen zur ökologischen Buchhaltung in der Schweiz [MÜLLER-WENK 1978] geführt wurden, gingen in den letzten Jahren verschiedene Bewertungsverfahren hervor. Umfangreiche Beschreibungen und Klassifizierungen der ökobilanziellen Bewertungsverfahren sind in der Literatur (z.B. [STAHLMANN 1994, BÖNING 1994, BECK 1995]) zu

Tab. 2.1: Ökokontenrahmen nach Umweltbundesamt

Ökokontenrahmen	
Input	Output
1. Werkstoffe	3. Produkte
1.1 Rohstoffe	3.1 Selbst gefertigte Produkte
1.2 Hilfsstoffe	3.2 Ersatzteile
1.3 Betriebsstoffe	3.3 Handelswaren
1.4 Halbfabrikate	3.4 Sekundärprodukte
1.5 Wasser	4. Emissionen
1.6 Büromaterial	4.1 Abfälle
1.7 Handelswaren	4.2 Abluft
2. Energien	4.3 Abwasser
2.1 Elektroenergie	4.4 Energetische Emissionen
2.2 Primärenergie	
2.3 Verkehr	

finden. Von diesen ökobilanziellen Bewertungsverfahren haben sich für detaillierte Ökobilanzierungen nur die naturwissenschaftlich orientierten durchsetzen können (u.a. das Verfahren der kritischen Volumina und das Verfahren der Wirkungskategorien). Ihr Ziel liegt in der quantitativen Modellierung der durch die Stoff- und Energieströme potenziell verursachten Umweltauswirkungen. Aufgrund der komplexen Wirkungszusammenhänge, die bislang von den Naturwissenschaften noch nicht zufriedenstellend beschrieben werden können, stützen sich sämtliche Bewertungsansätze allerdings auf verschiedenen stark vereinfachende Modellannahmen.

Wirkungsbilanzen versuchen qualitativ oder quantitativ zu bewerten, welche Wirkungen von Stoff- und Energieströmen potenziell ausgehen.

So ist das Ziel der Methode der Wirkungskategorien eine auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen beruhende Analyse der potenziellen Umweltauswirkungen durch die Zuordnung der Sachbilanzdaten zu Wirkungskategorien (Klassifizierung), die Modellierung der Sachbilanzdaten innerhalb der Wirkungskategorien (Charakterisierung) und gegebenenfalls eine Zusammenfassung der Ergebnisse (Bewertung).

Die ISO 14040 führt allerdings in diesem Zusammenhang aus: „Der methodische und wissenschaftliche Rahmen für die Wirkungsabschätzung befindet sich noch in der Entwicklung. Modelle für die Wirkungskategorien sind unterschiedlich weit entwickelt. Es gibt keine allgemein anerkannten Methoden für eine durchgängige und genaue Zuordnung von Sachbilanzdaten zu spezifischen potenziellen Umweltwirkungen.“

Die Phase der Wirkungsabschätzung enthält subjektive Elemente, beispielsweise bei der Auswahl, Modellierung und Beurteilung der Wirkungskategorien. Deshalb ist bei der Wirkungsabschätzung

die Transparenz entscheidend, um sicherzustellen, dass die Annahmen eindeutig beschrieben werden.“

Grundsätzlich bezweckt das Konzept der Modellierung der Umweltauswirkungen innerhalb von Wirkungskategorien ein Aufzeigen der naturwissenschaftlichen Zusammenhänge zwischen den Stoff- und Energieströmen und deren potenziellen Umweltauswirkungen [HEIJUNGS 1992, UBA-TEXTE 23/95, UBA-TEXTE 52/95]. Die drei Hauptkriterien Ressourcenverbrauch, Verschmutzung und Zerstörung werden mit Hilfe der Wirkungskategorien erfasst, so dass sich ein nuancenreiches Ökoprofil der untersuchten Alternativen ergibt. Tabelle 2.2 liefert eine Übersicht über derzeit diskutierte Wirkungskategorien. Umfangreiche Listen mit Wirkungsabschätzungsfaktoren – auch als Klassifizierungsfaktoren bezeichnet – für die einzelnen Wirkungskategorien und die entsprechenden Stoffe wurden am Centre of Environmental Science (CML), Leiden, in Zusammenarbeit mit der Society of Environmental Toxicology and Chemistry SETAC) entwickelt und werden derzeit aktualisiert und ergänzt.

Tab. 2.2: Derzeit diskutierte ökobilanzielle Wirkungskategorien

Bezeichnung	Bedeutung			Einheit des Wirkungspotenzials	Quelle
	global	regional	lokal		
Ressourcenverknappung a) Fossile Energien b) Mineralische Rohstoffe	■			kg kg × a ⁻¹	[UBA-TEXTE 52/95, RENTZ 1998, HEIJUNGS 1992, GOEDKOOP 1996]
Treibhauseffekt	■			kg CO ₂ -Äquivalent	[UBA-TEXTE 52/95, HEIJUNGS 1992, GOEDKOOP 1996]
Ozonabbau	■			kg FCKW 11-Äquivalent	[UBA-TEXTE 52/95, HEIJUNGS 1992, GOEDKOOP 1996]
Sommersmog		■	■		[GOEDKOOP 1996]
Wintersmog		■	■		[GOEDKOOP 1996]
Bildung von Photooxidantien		■	■	kg Ethylen-Äquivalent	[UBA-TEXTE 52/95, RENTZ 1998, HEIJUNGS 1992]
Eutrophierung (Eintrag von Nährstoffen in Böden und Gewässer)		■	■	kg PO ₄ ³⁻ -Ionen-Äquivalent	[UBA-TEXTE 52/95, HEIJUNGS 1992, GOEDKOOP 1996]
Versauerung von Böden und Gewässern		■	■	kg SO ₂ -Äquivalent	[UBA-TEXTE 52/95, HEIJUNGS 1992, GOEDKOOP 1996]
Beeinträchtigung der Gesundheit des Menschen (Humantoxizität)		■	■	m ³ Luft	[UBA-TEXTE 52/95, RENTZ 1998, HEIJUNGS 1992]
Gesundheitsgefährdung am Arbeitsplatz („Arbeitsschutz“)			■		[HEIJUNGS 1992, GOEDKOOP 1996]

Bezeichnung	Bedeutung			Einheit des Wirkungspotenzials	Quelle
	global	regional	lokal		
Krebserzeugende Stoffe		■	■		[GOEDKOOP 1996]
Direkte Schädigung von Organismen und Ökosystemen (Ökotoxizität)		■	■		[UBA-TEXTE 52/95, RENTZ 1998, HEIJUNGS 1992]
a) bedingt durch atmosphärische Emissionen b) bedingt durch wasserseitige Emissionen				m ³ Luft Wasser	[RENTZ 1998]
Wassergängige Schwermetallemissionen		■	■		[GOEDKOOP 1996]
Pestizide		■	■		[GOEDKOOP 1996]
Gefährlicher Abfall		■	■	kg gefährlicher Abfall	[GOEDKOOP 1996, RENTZ 1998]
Beeinträchtigung des maritimen Umfelds (Meeresschutz)	■	■		kg	[RENTZ 1998]
Artenvielfalt (Biodiversität)			■		[HEIJUNGS 1992]
Beeinträchtigung der Naturschönheit und Verlust von Biotopen („Naturschutz“)			■		[HEIJUNGS 1992]
Abwärme und Strahlung			■		[UBA-TEXTE 52/95, HEIJUNGS 1992]
Belästigungen (Lärm, Geruch)			■	Lärm- bzw. Geruchsgrenzwert ¹	[UBA-TEXTE 52/95, HEIJUNGS 1992]
Austrocknung		■	■		[UBA-TEXTE 52/95, HEIJUNGS 1992]
Flächenbedarf			■	km ²	[UBA-TEXTE 52/95, HEIJUNGS 1992]

Legende

■ markiert die geographische Bedeutung

Quellen: UBA-TEXTE 52/95, RENTZ 1998, HEIJUNGS 1992, GOEDKOOP 1996

Für sämtliche Elementarströme, die direkt in die oder aus der Umwelt führen, werden die Wirkungspotenziale aus der Stoff- und Energiebilanz berechnet, indem die Stoffmenge mit einem für den jeweiligen Stoff und die jeweilige Wirkungskategorie charakteristischen Wirkungsabschätzungsfaktor multipliziert wird. Die Wirkungsabschätzungsfaktoren sind z.B. Äquivalenzfaktoren, die nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft angeben, in welchem Ausmaß bestimmte Schadstoffe zu den Wirkungskategorien beitragen (vgl. Tabelle 2.3). Stoff- und Energieströme, die keine direkte Umweltwirkung aufweisen oder deren Wirkung zum heutigen Zeitpunkt noch nicht quantifiziert ist, sollten gesondert dokumentiert werden. Für eine weitere Aggregation der verschiedenen Umweltwirkungen über die Wirkungspotenziale existiert keinerlei wissenschaftliche Basis.

Vielmehr werden die Untersuchungssysteme hinsichtlich ihrer Umweltrelevanz – bezogen auf die Wirkungskategorien – einander gegenübergestellt und verbal argumentativ abgewogen.

Die Methode der Wirkungskategorien stellt den derzeit am weitesten entwickelten Ansatz zur ökobilanziellen Bewertung dar, um die naturwissenschaftlichen Zusammenhänge zwischen den Stoff- und Energieströmen und deren potenziellen Umweltauswirkungen aufzuzeigen [UBA-TEXTE 52/95, UBA-TEXTE 23/95, RENTZ 1998, HEIJUNGS 1992]. Sie wird jedoch vielfach kritisiert, weil die zugrunde liegenden toxikologischen Zusammenhänge zu komplex sind, um durch lineare Wirkungsabschätzungsfaktoren wiedergegeben zu werden. Insbesondere also Auswirkungen, die weder zeitlich noch räumlich in einen Zusammenhang zu

bringen sind, können nicht angemessen berücksichtigt werden, so dass die Aussagekraft dieser Wirkungspotenziale begrenzt ist. Außerdem werden die jeweiligen Hintergrundbelastungen und die Verweildauern der Emissionen vernachlässigt. Da sich die Berechnung einiger Wirkungspotenziale zudem auf noch nicht ausreichend erforschte Wirkungszusammenhänge stützt, kann sich die Zuverlässigkeit der verschiedenen Wirkungskategorien stark unterscheiden [RENTZ 1998, GELDERMANN 1999B].

Da die Forderung nach der Untersuchung des gesamten Lebenswegs („cradle-to-grave“) sämtlicher Einsatzstoffe und Produkte aufgrund des immensen Datenerhebungsaufwands in der Praxis vielfach nicht erfüllt werden kann, ist ein Vergleich alternativer Produktionsprozesse nur innerhalb

der prozessspezifischen Systemgrenzen unter den genannten Einschränkungen möglich.

Für die ökobilanzielle Bewertung von alternativen Produktionsprozessen ist ferner zu prüfen, ob die berechneten Wirkungspotenziale die umweltrelevanten Stoff- und Energieströme angemessen repräsentieren.

Hinsichtlich der Wirkungskategorie zur Photooxidantienbildung sind allerdings erhebliche Datenlücken für organische Verbindungen zu kennzeichnen: In der Regel wird die Wirkungsabschätzung für die gesamte Stoffgruppe mit Hilfe eines allgemeinen Parameters durchgeführt [FINNVEDEN 2000]. Deshalb ist die Quantifizierung der Auswirkung auf die Photooxidantienbildung bei einer Substitution organischer Lösemitteln nicht sinnvoll.

Tab. 2.3: Ausgewählte Äquivalenzfaktoren für die Klassifizierung [KRÄHLING 1999]

Zur Wirkungskategorie beitragender Stoff	Einheit
Treibhauspotenzial-100 (GWP)	[kg CO₂-Äquivalente/kg]
Kohlendioxid (CO ₂)	1
Methan (CH ₄)	21
Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	310
Tetrafluormethan (CF ₄)	6.300
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	23.900
Versauerungspotenzial (AP)	[kg SO₂-Äquivalente/kg]
Stickoxid (NO _x)	0,7
Chlorwasserstoff (HCl)	0,88
Schwefeldioxid (SO ₂)	1
Cyanwasserstoff (HCN)	1,185
Fluorwasserstoff (HF)	1,6
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	1,88
Ammoniak (NH ₃)	1,88

2.1.4 Bilanzbewertung/Auswertung

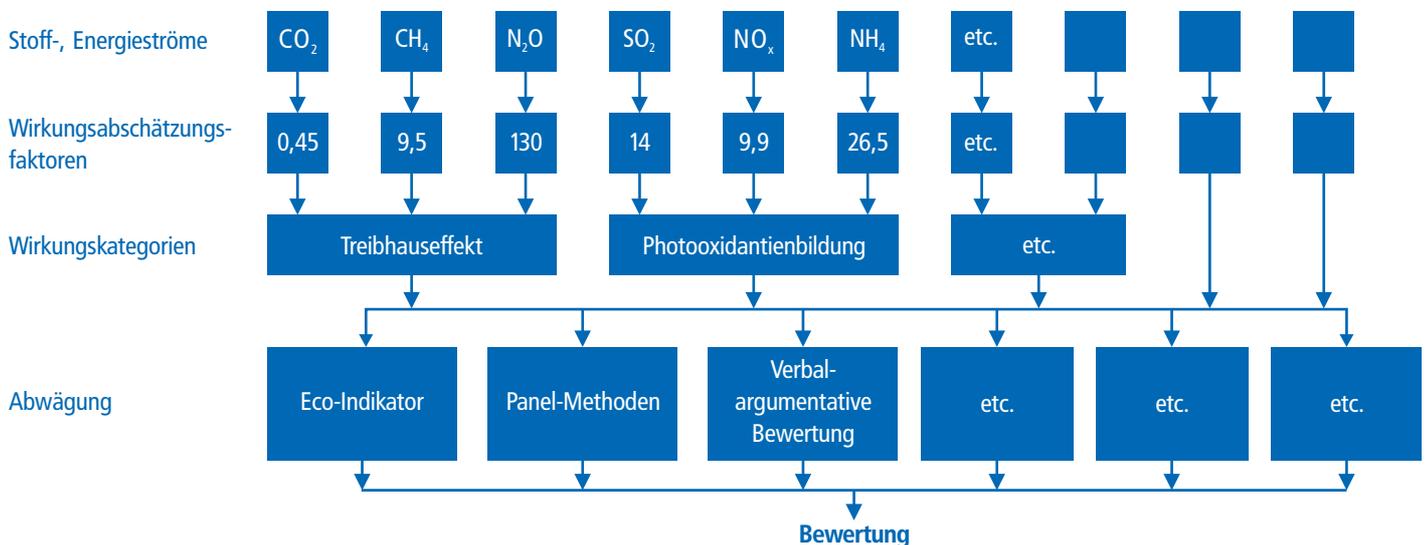
Bei einer ökobilanziellen Auswertung werden gemäß ISO 14040 die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung zusammengefasst, um Schlussfolgerungen und Empfehlungen für Entscheidungen entsprechend den Zielen der durchgeführten Ökobilanz abzuleiten. Doch nur in wenigen Fällen ist nach der Durchführung der ökobilanziellen Wirkungsabschätzung eine Entscheidung unmittelbar möglich. Meist schneiden die untersuchten Alternativen hinsichtlich einiger Aspekte besser und hinsichtlich anderer schlechter ab. Für die ökobilanzielle Auswertung werden die nachfolgenden zwei Aggregationsansätze unterschieden [DOLD 1996]:

- Die Vertikalaggregation fasst lediglich einzelne gleichartige Umweltwirkungen zusammen.
- Die High-Level-Aggregation (z.B. Ökopunkte) versucht hingegen, durch die Gewichtung der verschiedenen Umweltwirkungen letztlich zu einer Gesamtbewertung aller Umweltbelastungen durch das Bilanzobjekt zu gelangen. Diese Methode ist jedoch wissenschaftlich nicht gerechtfertigt und wird von der SETAC sogar als methodisch falsch angesehen.

Da die Ökobilanz wie jedes Modell nur ein vereinfachtes Abbild der Realität darstellen kann, sind im Verlauf einer Ökobilanzstudie zahlreiche Annahmen zu treffen. Deshalb sind vor der Ableitung von

Empfehlungen und Schlussfolgerungen die getroffenen Modellannahmen und die Datenqualität für die Wirkungsabschätzung zu reflektieren. Zur Interpretation der Ergebnisse werden häufig Sensitivitätsanalysen vorgenommen, die den Einfluss unterschiedlicher Parameter verdeutlichen sollen. Das Umweltbundesamt empfiehlt außerdem die Entwicklung von alternativen Szenarien („best case“, „worst case“). Darauf aufbauend können dann Prognosen über Entwicklungspotenziale und Handlungsempfehlungen abgegeben werden. Das Abwägen der potenziellen Umweltauswirkungen bereitet die Bewertung der Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung im Hinblick auf ihre relative Bedeutung untereinander und auf das Gesamtergebnis vor. Sie umfasst sowohl fachwissenschaftliche („objektive“) als auch bewertende Aussagen [UBA-TEXTE 52/95]. Abbildung 2.3 zeigt zusammenfassend die Informationsverdichtung von der Sammlung der physischen Stoff- und Energieströme über die Wirkungsabschätzung bis hin zur zusammenfassenden Bewertung. Grundsätzlich sind die bewertenden Aussagen oftmals durch das persönliche und/oder das gesellschaftliche Wertesystem beeinflusst. Die Bewertung erfolgt also mittels „gesellschaftlich anerkannter Kriterien“. Daraus ergibt sich direkt die zentrale Problematik: Die Ergebnisse bilden lediglich gesellschaftliche Präferenzen ab und können daher leicht auf Akzeptanzprobleme stoßen (vgl. [LUNDIE 1999]).

Abb. 2.3: Mögliche Umweltauswirkungen (eigene Darstellung in Anlehnung an [VAN SOEST 1998])



2.2 Computergestützte Durchführung einer Ökobilanzierung

Wie aus den vorangegangenen Ausführungen erkennbar ist die Erstellung einer Ökobilanz als zentrale Informationsquelle eines betrieblichen Stoffstrommanagements mit einem hohen Aufwand verbunden. Insbesondere die Sachbilanzierung ist durch die Vielzahl eingesetzter Stoffe und

Energien, die erfasst werden müssen, oftmals sehr komplex. Ein grundlegender Ansatz zur Untersuchung komplexer Systeme ist die Modellbildung [IFU 1998A]. Gegenstand dieses Abschnitts ist deshalb die computergestützte Durchführung einer Ökobilanzierung.

2.2.1 Anforderungen an das Softwaresystem

Zur Abbildung einer realen Stoffstromstruktur werden die nachfolgenden Anforderungen an ein Softwaresystem gestellt [HÄUSLEIN 1995, TUMA 1997]:

- Zur Verdeutlichung der Prozesse soll die Möglichkeit bestehen, Produktionsbeziehungen, die den Zusammenhang zwischen Input und Output wiedergeben, zu berücksichtigen.
- Das Softwaresystem soll es ermöglichen, periodenbezogene Bilanzen zu erstellen.
- Eine hohe Flexibilität sollte gegeben sein, um Elemente und Parameter des Modells leicht variieren und austauschen zu können: Verfahren zur Beherrschung der Komplexität, bei denen die Übersichtlichkeit erhalten bleibt, z.B. die Aggregation und Disaggregation, stehen im Mittelpunkt der Anforderungen.
- Eine Strukturierung der Materialien in Form eines Ökokontenrahmens, der auch in der Bilanzaufstellung berücksichtigt wird, sollte möglich sein.
- Es sollte die Möglichkeit bestehen, bestimmte Teile des Modells (z.B. Prozesse mit ihren Spezifikationen) in Datenbanken abzuspeichern, um später auf sie zurückgreifen zu können (Wiederverwendbarkeit).
- Vordefinierte Bibliotheken für Standardprozesse sollten zur Verfügung stehen.
- Leichte Handhabbarkeit der Software: Gerade in mittelständischen und kleinen Betrieben wird kaum die Möglichkeit bestehen, Experten nur für die Stoff- und Energiebilanzierung einzustellen. Daher sollte das Programm auch von gelegentlichen Anwendern zu bedienen sein. Dazu gehören eine intuitiv zu erfassende Benutzeroberfläche sowie die einfache Modellierung und Visualisierung durch eine grafische, interaktive Benutzerführung. Aber auch die Fehlervermeidung durch eine Konsistenzprüfung ist wichtig.
- Schließlich ist es, insbesondere unter dem Aspekt der beschränkten finanziellen Ressourcen von kleinen und mittleren Unternehmen, wünschenswert, dass die Software nicht nur für die Bilanzierung eines bestimmten Prozesses, sondern auch für andere Ökobilanzformen (Produkt-, Betriebsbilanz) verwendbar ist.

2.2.2 Eignung von Stoffstromnetzen für die Sachbilanzierung

Stoffstromnetze bieten wesentliche Unterstützung als Hilfsmittel bei der Sachbilanzierung. Die Stoffstromnetze stellen ein flexibles Prinzip dar, um beliebige Produktionssysteme abzubilden. Sowohl Vorgänge/Prozessschritte (durch Transitionen) als auch Zustände/Lager (durch Stellen) sowie die zwischen ihnen bestehenden Stoffströme (durch Kanten) sind damit modellierbar. Insbesondere in der Einbeziehung von Beständen ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Methoden wie Flussdiagrammen⁴⁾ zu sehen. Die Einbettung und beliebige Erweiterbarkeit der Netze unterstützt eine sukzessive Modellentwicklung. Dadurch lassen sich bei Bedarf Stoffstromnetze einzelner Prozesse zu Modellen für den gesamten Betrieb oder sogar über die standortbezogene Bilanzierung hinaus zu einer Abbildung von kompletten Produktlebenswegen erweitern.

Außerdem sind sie ein besonders geeignetes Konzept, um die Anforderungen an eine Modellierung zu erfüllen. Produktionsprozesse können mit ihrer Hilfe anschaulich dargestellt werden und selbst große Informationsmengen sind übersichtlich ablesbar. Durch die grafische Modellierung erfolgt eine Veranschaulichung des zu untersuchenden Systems. Sie ermöglicht es auch dem gelegentlichen Anwender, schnell einen Überblick zu erhalten. Die erfassten Daten können zudem durch Verfeinerung oder Vergrößerung auf beliebige Stufen aggregiert und wieder disaggregiert werden, ohne dass eine erneute Dateneingabe notwendig ist.

Die informationstechnische Grundlage für ihre Modellierung bildet die Theorie der Petri-Netze, die in den 1960er Jahren von Adam Petri entwickelt wurde. Sie bietet eine einfache Syntax und Semantik für grafische Darstellungen und mathematische Analysen. Transitionen stellen Prozesse (etwa Produktion, Verarbeitung, Stoffumwandlung etc.) dar, die spezifiziert werden, indem die bei der Fertigung bzw. Stoffumwandlung eingehenden Stoff- und Energieströme gemäß zu definierender Regeln als Outputströme abgebildet

werden. Stellen repräsentieren Lager, an denen Stoffe und Energien gelagert und verteilt werden. Aus bekannten Größen können mit Hilfe der Transitionsspezifikation unbekannte Ströme berechnet werden. So müssen nicht alle Ströme gemessen und eingegeben werden. Dabei können sowohl lineare als auch nichtlineare Produktionsfunktionen formuliert werden.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass durch die Stellenabgrenzung Transitionen als ein klar abgegrenztes Subsystem betrachtet werden können. Sie sind unabhängig vom Gesamtsystem analysierbar und können deshalb z.B. von Arbeitsgruppen genutzt werden, um die Stoff- und Energieströme in ihrer lokalen Umgebung zu steuern, ohne dass ihnen das gesamte Netz bekannt sein muss.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Stoffstromnetze als komfortables Instrument zur Datenerfassung und -aufbereitung eine gute Basis bei der Bilanzierung bilden. Um Stoffstromnetze jedoch in der Praxis effektiv einsetzen zu können, muss ihre Anwendung durch eine Software unterstützt werden. Erst dann ist eine unkomplizierte Handhabung gewährleistet, mit der Modelle einfach und mit möglichst geringem Aufwand (beispielsweise durch die Speicherung und Wiederverwendung von Elementen) aufgebaut und berechnet werden können.

Im Folgenden soll zunächst kurz auf die Grundelemente der Petri-Netze eingegangen werden, da deren Verständnis für die anschließende Erklärung der Stoffstromnetze hilfreich ist. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass keinesfalls die komplette Petri-Netz-Theorie für die Stoffstromnetze von Bedeutung ist, sondern lediglich deren Darstellungsform übernommen wird. Daher werden sich auch die folgenden Ausführungen auf deren Erläuterung beschränken [REINECKE 1997].

Stoffstromnetze sind ein geeignetes Instrument der Sachbilanzierung. Sie stellen nicht nur Stoffströme dar, sondern erfassen auch ruhende Bestände. Sie sind flexibel und erweiterbar und führen zu anschaulichen Modellen des gesamten Betriebs oder Produktlebenswegs.

⁴⁾ Bei Flussdiagrammen („flow charts“) werden die Prozesse durch rechteckige Kästen dargestellt. Diese sind dann durch Pfeile, die die Stoff- und Energieflüsse darstellen, verbunden. Die Abbildung von Lagern ist dabei – wie der Name bereits andeutet – nicht vorgesehen.

Systemabbildungen durch Petri-Netze

Petri-Netze basieren auf theoretischer Informatik und dienen der formalen Beschreibung von Systemen. Vorrangig wurden solche Netze zur Modellierung von Computer-Kommunikationssystemen und betrieblichen Organisationsstrukturen oder für Materialflussanalysen genutzt. Doch auch moderne Produktionssysteme, die zunehmend in Form von Netzwerken realisiert bzw. in denen Materialien verteilt, bereitgestellt, transportiert und transformiert werden, lassen sich so abbilden [TUMA 1997, HÄHRE 1998, HÄHRE 2001, BLÜMEL 2000].

Die beiden wesentlichen Bausteine von Petri-Netzen sind die so genannten aktiven Elemente, die Transitionen (im Netz durch ein Rechteck dargestellt), und die passiven Elemente, die Stellen (durch einen Kreis symbolisiert). Mit den Transitionen werden Prozesse jeglicher Art, mit den Stellen Bestände modelliert. Wenn ein Prozess Zugriff auf einen bestimmten Bestand hat, so wird die entsprechende Transition mit der Stelle durch eine gerichtete Kante verbunden, die den Stoffstrom kennzeichnet. Eine zentrale Bedingung beim Aufbau von Petri-Netzen ist daher, dass zwei Elemente vom gleichen Typ nie miteinander verknüpft werden dürfen. Stattdessen sind z.B. Transportvorgänge zwischen zwei Bestandsmengen durch eine Transition abzubilden. Umgekehrt bekommen Stellen somit neben der Lager- auch eine Verknüpfungsfunktion, indem sie Transitionen gegeneinander abgrenzen bzw. miteinander verbinden müssen [REINECKE 1997].

Die Informationen, Stoffe oder Energien, die durch das Netz wandern (auch als Marken bezeichnet), bewegen sich dann nach bestimmten Regeln durch die Transitionen hindurch von Stelle zu Stelle. Der Vorgang an einer Transition wird als „Schalten“ bezeichnet und entspricht beispielsweise einem Transport-, Montage- oder Umwandlungsprozess. Beim einfachsten Netztyp wird die Markenzahl aller Eingangstellen (Stellen, die dem Prozess Stoffe liefern) um die für den Prozess

benötigten Mengen verringert und die Markenzahl der Ausgangsstellen (Stellen, die Stoffe aus dem Prozess empfangen) um die produzierten (oder transportierten) Mengen erhöht. Eine Transition darf jedoch nur schalten, wenn sie aktiviert wurde. Dies ist dann der Fall, wenn die Markenzahl an einer Eingangsstelle mindestens so groß ist wie für den Prozess benötigt. Die Regeln, mit denen diese Bedarfe ermittelt werden, werden als Transitionspezifikationen bezeichnet. Wichtig ist dabei, dass im Zuge eines Schaltvorgangs auch Marken verschwinden oder neu entstehen können. Komplexere Netztypen stellen weitergehende Bedingungen an die Schaltbarkeit (Markentheoreme), die hier jedoch vernachlässigt werden können [REINECKE 1997].

Vom Petri- zum Stoffstromnetz

Auf dem Prinzip der Petri-Netze aufbauend entwickelte Rolf Arno die Stoffstromnetze [ARNO 1979] als Grundlage für das ökologische Rechnungswesen. Er betrachtete Produktionssysteme als Netzwerke und modellierte sie mit Hilfe von Transitionen, Stellen und Verbindungen. Dabei gab den Ausschlag, dass es mit den Petri-Netzen – anders als bei den bis dahin meist verwendeten Flussdiagrammen – möglich ist, auch Bestände abzubilden. Besonders für periodenbezogene Stoff- und Energiebilanzierungen (wie die Prozess- und die Betriebsbilanz) ist dies von großem Vorteil, da nur so eine mengenmäßig ausgeglichene Bilanz zu erreichen ist. Andernfalls würden Stoffe, die in den Produktionsprozess eintreten, dort aber gelagert und erst in einer späteren Periode verarbeitet werden, „verschwinden“ und die Bilanz verfälschen. Gleiches gilt für Stoffe, die bereits zu einem früheren Zeitpunkt beschafft wurden, aber erst in der bilanzierten Periode verbraucht werden [MÖLLER 1995].

Stoffstromnetze beruhen auf der Theorie der Petri-Netze zur Beschreibung von Systemen. Petri-Netze bilden aktive und passive Elemente ab und stellen den Austausch zwischen ihnen als Stoffströme dar.

Die Stoffstromnetze übernehmen die drei Grundelemente der Petri-Netze und verwenden sie wie folgt, um ein reales Produktionssystem abzubilden (vgl. [IFU 1998A, MÖLLER 1995]):

- Stellen (auch hier durch einen Kreis dargestellt) kennzeichnen Orte, an denen Materialien⁵⁾ lagern, also keine Umwandlungsprozesse stattfinden. Mit ihnen werden Bestände modelliert, wobei an einer Stelle durchaus verschiedene Materialien lagern können. Solche Orte können Lager oder Puffer sein. Auch die Ein- und Austrittspunkte an den Grenzen des Systems werden durch Stellen modelliert, da an ihnen Material für die Prozesse zur Verfügung steht (Quelle) oder abgenommen werden kann (Senke).
Wegen der Grundbedingung der Petri-Netze, dass nur unterschiedliche Knotentypen miteinander verbunden werden dürfen, dienen Stellen außerdem zur Verknüpfung bzw. Abgrenzung von Prozessen.
- Transitionen (durch ein Rechteck dargestellt) kennzeichnen Orte, an denen Materialien umgewandelt werden. Dabei ist der Begriff der Umwandlung sehr weit auszulegen, so dass auch Montage- und Transportvorgänge⁶⁾ dazu zählen. Letztlich kann auf derartige Weise jede

Art von Prozessen oder Prozessschritten innerhalb des zu bilanzierenden Systems abgebildet werden. Transitionen sind grundsätzlich mit mindestens einer Stelle verbunden, die Material liefert, und einer anderen, an der dieser Output abgelegt wird. Der Prozess(schritt), den die Transition modelliert, muss noch genauer definiert werden, damit Berechnungen der Ströme möglich sind. Dies geschieht durch mathematische Funktionen (so genannte Spezifikationen), die den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsstoffen sowohl bezüglich der Menge als auch der Materialart beschreiben. Durch diese Funktionen wird also der eigentliche Umwandlungsprozess simuliert.

- Verbindungen verknüpfen Stellen und Transitionen und stellen die Materialströme dar. Sie werden mit einem Pfeil in Richtung des Materialflusses modelliert. Dabei sind weder Verzweigungen oder Zusammenführungen noch Zyklen entlang der Verbindung erlaubt. Außerdem wird spezifiziert, welche Materialien in welchen Mengen an der Verbindung entlang fließen.

Mit Hilfe dieser drei Elemente lassen sich ganze Produktionssysteme abbilden.

Kreise modellieren ruhende Bestände. Rechtecke symbolisieren Orte der Materialumwandlung. Verbindungen stellen den Materialfluss zwischen Beständen und Orten der Materialumwandlung dar.

2.3 UMBERTO® als Software zur computergestützten Stoff- und Energiebilanzierung

Die kommerzielle Software UMBERTO® wurde vom ifeu (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg) in Kooperation mit dem ifu (Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH) zur Erstellung von Stoffstromanalysen und Ökobilanzen entwickelt. Sie bietet dem Anwender eine Unterstützung bei der Durchführung von Stoff- und Energiebilanzen im Rahmen von Produkt-, Betriebs- oder standortbezogenen Bilanzen. Aufbauend auf dem Konzept der Stoffstromnetze lassen sich Prozessketten eines Produktionsbetriebs oder eines Produktlebenswegs aufstellen und anschließend sowohl die betrachteten Stoff- und Energieflüsse als auch ihre Bestände berechnen und in Input-/Output-Bilanzen darstellen.

Neben der Erstellung einer Sachbilanz im Rahmen der Ökobilanzierung besteht die Möglichkeit, eine ökologische Wirkungsanalyse und Auswertung mit verschiedenen Bewertungsansätzen, z.B. durch Kennzahlensysteme, vorzunehmen. Bei der Wahl des Bilanzraums werden dem Anwender große Freiheiten und eine hohe Flexibilität geboten, z.B. können aus größeren Netzen beliebige Teilnetze gebildet werden. Durch die Bildung von Szenarien und Perioden können die zeitliche Entwicklung der abgebildeten Stoffströme ebenso wie der Vergleich mehrerer Alternativen dargestellt werden. Gegenstand dieses Abschnitts ist die Beschreibung der grundlegenden Elemente der Software [HÄUSLEIN 1995, IFU 1998A, B].

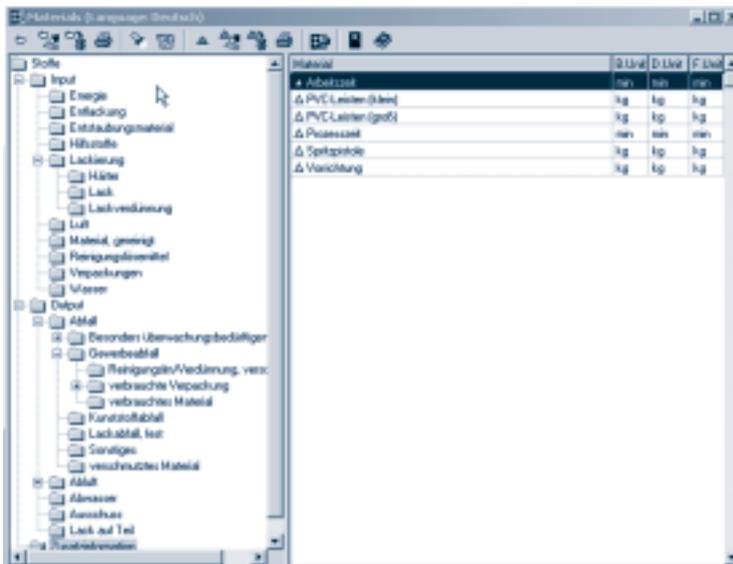
⁵⁾ Bei Stoffstromnetzen werden grundsätzlich Stoffe und Energien gleich behandelt und zusammenfassend als Materialien (oder auch einfach als Stoffe) bezeichnet.

⁶⁾ So lässt sich z.B. ein Transportvorgang auch als eine Umwandlung beschreiben, da dabei Material seinen Ort ändert und Energie verbraucht wird (vgl. [IFU 1998B]).

2.3.1 Die Materialdatenbank

Grundlage für die Modellierung in UMBERTO® ist die Materialdatenbank (vgl. Abbildung 2.4). Dabei werden unter dem Begriff Material sowohl die Stoff- als auch die Energieströme zusammengefasst. In der Software erfolgt – gemäß dem Prinzip der Stoffstromnetze – keine Unterscheidung in der Handhabung dieser Daten, sie sind nur an den unterschiedlichen Maßeinheiten identifizierbar (Stoffe in Kilogramm, Energien in Kilojoule).

Abb. 2.4: Die Materialdatenbank in UMBERTO® 3.x [IFU 1998B]



Zu jedem Material lassen sich der Name, eine Obergruppe, eine Beschreibung sowie die Basiseinheit (kg oder kJ) angeben. Obwohl intern immer in diesen Basiseinheiten gerechnet wird, können andere Eingabe- und Anzeigeeinheiten durch entsprechende Umrechnungsregeln definiert werden. Um den Aufwand der Materialeingabe zu verringern, werden mit UMBERTO® bereits viele Materialdefinitionen in strukturierter Form mitgeliefert [IFU 1998A]. In der Datenbank werden die Materialien alphabetisch aufgeführt. Allerdings besteht die Möglichkeit, in Anlehnung an den Ökokontenrahmen eine hierarchische Struktur zu schaffen, indem die Materialien unter Oberbegriffen gruppiert werden. Diese Gliederung kann in der Bilanz übernommen werden. Dadurch lassen sich bereits mit der Materialdatenbank verschiedene Abstraktionsebenen realisieren. Zudem legt das Programm nicht fest, was unter dem Begriff Material verstanden wird.

So können je nach Zielsetzung der Untersuchung beliebige Stoffzusammensetzungen als ein Material betrachtet (z.B. „Verpackungsabfälle“) oder detailliert aufgeführt werden („PVC-Folie“, „Karton“, „Füllmaterial“ usw.). Auch im Verlauf der Untersuchung können damit – abhängig vom jeweiligen Kenntnisstand – sukzessive Materialien durch spezifiziertere ersetzt werden [KLAMT 1997, IFU 1998A].

2.3.2 Implementierung der Stoffstromnetze

Grafische Modellerstellung

Bei der grafischen Darstellung erweitert die Software die Petri-Netz-Darstellung um einige Details, die eine bessere Übersicht ermöglichen sollen. Zunächst werden vier Typen von Stellen unterschieden (vgl. [IFU 1998B]):

⁷⁾ Auch als Materialquellen bezeichnet.

⁸⁾ Auch als Materialsinken bezeichnet.

- Inputstellen⁷⁾ sind Stellen, an denen Material über die Systemgrenzen in das System eintritt (z.B. Rohstoffe, Energien). Sie werden durch einen grünen Kreis mit einer Markierung am linken Rand dargestellt: 

- Outputstellen⁸⁾ sind Stellen, an denen Materialien das System verlassen (z.B. in Form von Endprodukten, Emissionen, Abfällen). Sie werden durch einen roten Kreis mit einer Markierung am rechten Rand dargestellt: 

- Storage-Stellen entsprechen den Lagern und Puffern des Produktionssystems und werden durch einfache Kreise abgebildet:  In ihnen werden Materialbestände auf- und abgebaut. Sie sind besonders bei der

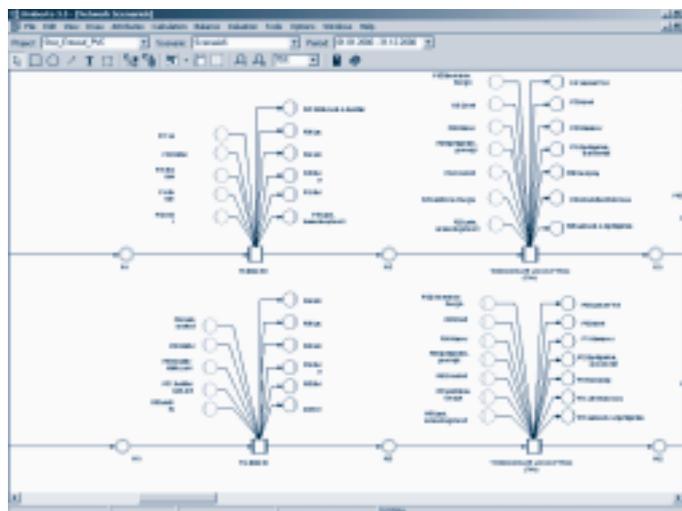
periodenbezogenen Bilanzierung (Betriebs- und Prozessbilanz) von großer Bedeutung. In UMBERTO® erfolgt eine automatische Überprüfung dieser Lager. Wird mehr Material verbraucht, als durch die Buchführung im Lager verbucht wurde, gibt das Programm eine Fehlermeldung aus.

- Connections, gekennzeichnet durch einen Doppelkreis,  dienen der Verbindung und Abgrenzung von zwei Prozessen, zwischen denen keine Lagerung erfolgt (z.B. bei getakteten Maschinen in einer Produktionsstraße). Die Materialien fließen also ohne Unterbrechung durch diese Stellen hindurch.
- Transitionen werden in UMBERTO® durch Quadrate abgebildet:  Sie modellieren – entsprechend den Stoffstromnetzen – sämtliche (Umwandlungs-)Prozesse. Dabei muss eine Transition mit jeweils mindestens einer Stelle verbunden werden, von der sie Material bezieht, und einer weiteren, an die sie den Output des Prozesses wieder ablegt. Alternativ kann sie über eine Connection „direkt“ mit einer weiteren Transition verbunden werden.
- Eine Verbindung, entlang welcher Stoff- und Energieströme fließen, wird vom Programm durch einen Pfeil gekennzeichnet, der die Flussrichtung angibt: 

Der gesamte Entwurf der Modellstruktur kann interaktiv mit Hilfe einer grafischen Benutzeroberfläche erstellt werden. Dazu stehen vordefinierte Symbole zur Verfügung, die mit Hilfe der komfortablen Maussteuerung zu einem Netz verknüpft werden können (vgl. Abbildung 2.5).

Werden grundlegende Modellierungsregeln nicht beachtet (z.B. Verbindung zu zwei Stellen), erfolgt eine Fehlermeldung. Erweiterte Editierungsfunktionen, wie die freie Festlegung von Farbe und Größe der Netzelemente oder die beliebige Ausrichtung von Verbindungen, verbessern die Übersichtlichkeit besonders bei komplexen Modellen. Außerdem können zusätzliche Kommentare eingefügt werden, die beispielsweise Hinweise auf Modellannahmen oder Datenherkunft geben.

Abb 2.5: Der Netzeditor in UMBERTO® 3.5 [IFU 1998A]



Spezifikation und Berechnung

UMBERTO® unterstützt den Benutzer wesentlich bei der Berechnung von unbekanntem Flussgrößen, so dass einerseits für die Erstellung der Sachbilanz nicht alle Daten erhoben werden müssen, andererseits alternative Szenarien im Rahmen der Planung simuliert werden können. Durch diese Unterstützung wird es dem Anwender ermöglicht, verschiedene Szenarien festzulegen und ihre Auswirkungen zu beurteilen.

Voraussetzung für die Berechnung von Stoffstromnetzen sind Spezifikationen, die der Benutzer für Stellen, Transitionen und Verbindungen eingibt. Dabei müssen jedoch nicht alle Elemente spezifiziert werden. Die Software versucht, aus den gegebenen Daten die unbekanntem zu ermitteln, und gibt eine Fehlermeldung aus, wenn dies nicht möglich ist. Man spricht hier von einem „unterspezifizierten“ Netz. Umgekehrt kann das Netz auch „überspezifiziert“ sein, wenn zu viele Angaben gemacht wurden, die in sich nicht konsistent sind. Auch hier meldet das Programm einen Fehler und fragt nach, mit welchen Angaben weitergerechnet werden soll.

Die nachfolgenden Spezifikationen sind möglich (vgl. [IFU 1998A, B]):

- Bei den Stellen können die Materialien, die dort lagern, mit ihren Anfangsbeständen angegeben werden.
- Den Transitionen müssen die Stellen zugeordnet werden, von denen sie Material beziehen und an die sie „liefern“. Außerdem können die Zusammenhänge zwischen Input und Output durch lineare oder nichtlineare Gleichungen bzw. Verhältniszahlen beschrieben werden. Diese Angaben können für spezielle Prozesse manuell vom Benutzer eingetragen werden. Mit UMBERTO® werden allerdings bereits viele vordefinierte Transitionen für Standardprozesse mitgeliefert, bei deren Verwendung nur noch den Ein- und Ausgängen entsprechende Stellen zugeordnet werden müssen.
- Dadurch, dass als Transitionsspezifikation alle berechenbaren Funktionen zugelassen sind, wird die Definition von Parametern ermöglicht. Diese können von zentraler Bedeutung für das Modell sein, denn mit ihnen können Bedingungen abgebildet werden, die den Prozess zwar beeinflussen, aber nicht mit den Stoffströmen erfasst werden. Solche Parameter können zum Beispiel Druck, Temperatur, aber auch Auslastungen oder Transportentfernungen sein. Sie werden als Konstanten, die in UMBERTO® zentral verwaltet und definiert werden können, in die Funktionen einbezogen.
- Für die Verbindungen kann spezifiziert werden, welche Materialien in welchen Mengen in Pfeilrichtung fließen.

Die eigentliche Analyse kann sowohl mit der („upstream“) als auch gegen („downstream“) die Stoffflussrichtung erfolgen. Das Vorgehen wird in der Regel von der Fragestellung abhängen. Für eine produktbezogene Bilanzierung wird man von der zu produzierenden Menge ausgehen und entgegen der Flussrichtung die benötigten Einsatzstoffe ermitteln. Für eine Betriebs- oder Prozessbilanz wird dagegen eher in Richtung des Materialflusses gerechnet. Die Richtung kann jedoch auch während der Berechnung mehrmals wechseln, abhängig davon, welche Daten bereits bekannt sind. Wichtig bei einer Berechnung entgegen der Flussrichtung ist, dass die Transitionen Spezifikationen enthalten, die auch in dieser Richtung ausgewertet werden können. Gegebenenfalls muss dafür eine Umkehrfunktion explizit angegeben werden [SCHMIDT 1995].

Der Fortschritt der Analyse wird durch Einfärbung der bereits berechneten Verbindungen in der Netzstruktur visualisiert. Zudem kann ein Protokoll erstellt werden, das angibt, in welcher Reihenfolge die Rechenschritte durchgeführt wurden, und so eine Fehlerdiagnose vereinfacht.

Mit der Software werden folgende Anforderungen erfüllt:

- Übersichtlichkeit der Darstellung der Stoff- und Energieflüsse,
- Übersichtlichkeit der Datenverwaltung,
- Transparenz der zugrunde liegenden Berechnungen und mathematischen Ansätze,
- Möglichkeit der Fortschreibung,
- Benutzerfreundlichkeit.

3 Besonderheiten der Lohnbeschichtung

3.1 Branchenspezifische Rahmenbedingungen

In der Regel verfügen Lohnbeschichtungsbetriebe über kein eigenes Produkt. Ihre Aufgabe besteht darin, für andere Unternehmen die Oberflächenbehandlung durchzuführen. Die Lohnbeschichtung zeichnet sich durch eine große Anzahl an Auftraggebern und somit einer Vielfalt von zu beschichtenden Oberflächen aus. Daher sind Eigenschaften wie Flexibilität, Erfahrung, gute Organisation und Kundennähe erforderlich. Die technologischen Entwicklungen, die in den letzten Jahren in der Oberflächenbehandlung erfolgt sind, haben zu signifikanten Umstellungen der Verfahren sowohl in der Vorbehandlung von Metallen und Kunststoffen als auch beim Einsatz von Lacksystemen auf Wasserbasis oder bei der Umstellung auf automatisierte Spritzvorgänge geführt. Auch bei der Entwicklung neuer Produkte wird der Lohnbeschichtungsbetrieb oftmals eingebunden. Deshalb verfügen viele der Lohnbeschichter heutzutage – dank der Vielfalt der Produkte und Verfahren sowie der Einbindung in Beratung, Entwicklung und Forschung – über eine sehr breite Fachkompetenz [STOZ 1999].

In den meisten Fällen haben die Lohnlackierbetriebe ihren Ursprung in Bereichen der Autoreparaturlackierung, der Galvanikbetriebe oder des Maler- und Lackierhandwerks [STOZ 1999]. Diese Betriebe umfassen sowohl Kleinunternehmen mit wenigen Mitarbeitern als auch große, meist mittelständische Industriebetriebe mit über hundert Mitarbeitern.

Bei der industriellen Lohnlackierung wird bei den unterschiedlichen Lackierprozessen eine Vielzahl von Materialien und Technologien eingesetzt, die zu einer Umweltbelastung führen können. Neben den dabei anfallenden Abfällen und Abwässern muss ebenfalls das Entstehen von flüchtigen organischen Verbindungen durch den Einsatz von lösemittelhaltigen Produkten, z.B. Lacken und Reinigungslösemitteln, berücksichtigt werden. Die VOC bilden bodennahes Ozon, das für Mensch und Umwelt insgesamt eine schädliche Wirkung auslöst [UMWELTBUNDESAMT 1998].

Lohnbeschichtungsbetriebe zeichnen sich nicht nur durch eine Vielzahl von Aufgaben und Fähigkeiten aus. Sie nutzen auch eine Vielfalt von Materialien und Prozessen, die die Umwelt belasten können – in Form von Abfällen, Abwässern und Emissionen.

3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die große Mehrheit der lackverarbeitenden Betriebe (99 Prozent von etwa 50.000 Anlagen in Deutschland) waren bisher nicht genehmigungsbedürftig, d.h., es gab für viele Betreiber kleinerer und mittlerer Anlagen keine verbindlichen emissionsbegrenzenden Vorgaben. Dies änderte sich 2001 mit der Umsetzung der EU-Lösemittel-Richtlinie (EU RL 1999/13/EG) in nationales Recht. Für die meisten Branchen gelten nun gemäß dieser Richtlinie Schwellenwerte von fünf Tonnen pro Jahr Lösemittelverbrauch (vgl. [MAY 2000]).

In Deutschland müssen lackverarbeitende Betriebe nun folgende Gesetze und Verordnungen beachten:

- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)
- VOC-Richtlinie (31. BImSchV)
- Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG)
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG)
- Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)
- Unfallverhütungsvorschrift (UVV)

Die wesentlichen Anforderungen an die Lohnlackierung werden auf den folgenden Seiten dargestellt.

3.2.1 Bundes-Immissionsschutzgesetz

In Deutschland gelten als Grundlage für die Reinhaltung der Luft zum einen das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) mit den zugehörigen Verordnungen und zum anderen die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft).

1. Für Tätigkeiten unter Verwendung von organischen Lösungsmitteln ist seit dem 21. August 2001 die 31. Verordnung zum BImSchG (VOC-Richtlinie) zu beachten. Gemäß dieser Verordnung müssen die Betreiber genehmigungsbedürftiger und nichtgenehmigungsbedürftiger Anlagen ab einem jährlichen Lösemittelverbrauch von fünf Tonnen pro Jahr (d.h. unter Umständen auch kleinere und mittlere

Betriebe) ihre VOC-Emissionen begrenzen. Altanlagen müssen diese Anforderungen ab dem 31. Oktober 2007 einhalten.

2. Die TA Luft orientiert sich am Stand der Technik. Da der Verbrauchsschwellenwert für genehmigungsbedürftige Lackieranlagen bei 25 Kilogramm Lösemittel pro Stunde liegt, sind viele Lohnlackieranlagen in Deutschland wegen ihrer geringeren Verbrauchswerte nicht von klassischen ordnungsrechtlichen Maßnahmen, wie der 4. Bundes-Immissionsschutzverordnung zur Minderung von Lösemittel-Emissionen aufgeführt, betroffen.

3.2.2 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz

Gemäß Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) müssen sämtliche Betriebe, in denen jährlich mehr als zwei Tonnen besonders überwachungsbedürftige Abfälle bzw. mehr als 2.000 Tonnen überwachungsbedürftige Abfälle anfallen, ein Abfallwirtschaftskonzept (§ 19) und eine Abfallbilanz (§ 20) erstellen. Dafür sind u.a. Angaben über Art, Menge und Entsorgungsweg dieser Abfälle zu machen. Es wird geschätzt, dass etwa 20 Prozent der Lackierbetriebe den Verbrauchsschwellenwert für besonders überwachungsbedürftige Abfälle überschreiten; der Wert für überwachungsbedürftige Abfälle ist hingegen nicht relevant.

Die Erstellung eines betrieblichen Abfallwirtschaftskonzepts wurde erstmals für das Jahr 1999 für einen Zeitraum von fünf Jahren gefordert und soll Angaben enthalten über [MAY 1997]:

1. Art und Menge der erzeugten Abfälle,

2. getroffene und geplante Maßnahmen zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung,
3. Begründung der Beseitigungsnotwendigkeit,
4. Verwertungs- und Beseitigungswege,
5. Standort- und Anlagenplanung bei Eigenentsorgung und
6. Verbleibnachweise bei Entsorgung innerhalb und außerhalb von Deutschland.

Die Abfallbilanz hingegen stellt eine rückblickende Beschreibung zum abgelaufenen Abfallwirtschaftsjahr dar, bei der die Punkte 1, 3 und 6 zu erfüllen sind. Entsprechende Bilanzen waren erstmals 1998 rückblickend für das Jahr 1997 zu erstellen.

3.2.3 Wasserhaushaltsgesetz

Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) bildet die Grundlage für den Schutz der Gewässer. Gemäß diesem Gesetz sind Abwasser, die gefährliche Stoffe enthalten, vor der Ableitung nach dem Stand der Technik zu reinigen. Dafür werden die gefährlichen Stoffe in Wassergefährdungsklassen

(WGK) eingeteilt: Lösemittelhaltige Lacke entsprechen z.B. WGK 2 (wassergefährdend) und wasserbasierende Lacke WGK 1 (schwach wassergefährdend). Die entsprechenden Informationen sind auf den Sicherheitsdatenblättern der Lackmaterialien und Lösemittel vermerkt.

3.2.4 Gefahrstoffverordnung

Gemäß § 16 Abschnitt 3 a der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) ist der Anlagenbetreiber dazu verpflichtet, ein Verzeichnis aller Gefahrstoffe zu führen, mit denen ihre Arbeitnehmer umgehen. Dieses Verzeichnis soll Angaben über Bezeichnungen, Kennzeichnungen und Menge der Gefahr-

stoffe im Betrieb sowie über Arbeitsbereiche, in denen mit Gefahrstoffen umgegangen wird, beinhalten [MAY 1997]. Diese Verordnung richtet sich nicht nach Schwellenwerten; die Erstellung von Bilanzen wird in diesem Bereich grundsätzlich gefordert.

3.2.5 Unfallverhütungsvorschrift

Die Unfallverhütungsvorschrift (UVV) umfasst Anforderungen an den Unternehmer zur Verhütung von Arbeitsunfällen, darunter die, dass die notwendigen Einrichtungen, Anordnungen und Maßnahmen zu treffen sind, die den Bestimmungen dieser Unfallverhütungsvorschrift ent-

sprechen. Insbesondere die allgemein anerkannten sicherheitstechnischen und arbeitsmedizinischen Regeln sind zu beachten. Die Unfallverhütungsvorschrift regelt ebenfalls die arbeitsmedizinische Vorsorge beim Umgang mit Gefahrstoffen und bei gefährdenden Tätigkeiten [UVV].

3.3 Anforderungen des Umweltschutzes und der Arbeitssicherheit in der Lohnlackierung

Gerade kleine und mittlere Unternehmen sind im Vergleich zu Großunternehmen aufgrund der geringeren personellen und finanziellen Ausstattung sowohl über umweltrechtliche Auflagen wie auch über die ökologisch und ökonomisch relevanten Auswirkungen alternativer Produktionsprozesse oftmals schlechter informiert. Insbesondere Lohnlackierbetriebe sind einem beträchtlichen Kosten- und Konkurrenzdruck ausgesetzt: Ihre Personalkapazität im Umweltschutz- und Arbeitssicherheitsbereich ist dadurch sehr beschränkt. Außerdem sind sie bereits durch die Umsetzung der zahlreichen Gesetze und Vorschriften außerordentlich belastet. In extremen Situationen kann ein gravierender Informationsmangel hinsichtlich Umweltschutz und Arbeitssicherheit zur Stilllegung der Lackieranlage führen. Wenn ein Unternehmen die Personalkraft für umwelt- und arbeitssicherheitsrelevante Zwecke nicht zur Verfügung stellen kann, muss ein externer Umweltberater eingeschaltet werden, wodurch erhebliche Zusatzkosten entstehen.

Die Aufgaben eines Umweltschutz- und Arbeitssicherheitsbeauftragten in kleinen und mittleren Unternehmen umfassen z.B. auch die Erfüllung der Anforderungen der Gefahrstoffverordnung. Diese Verordnung betrifft insbesondere die Lagerung von Gefahrstoffen. Es wird vorausgesetzt, dass der Beauftragte ausreichende Kenntnisse über eine Vielfalt von Chemikalien hat, um die Lagerung und vor allem die Aufteilung der Gefahrstoffe nach Lagern ordnungsgerecht durchzuführen [ANDRUSCH 2000].

Umweltschutzmaßnahmen, z.B. die Einführung lösemittelarmer oder -freier Produkte bzw. emissionsarmer Verfahren, sind zwar für eine Vielzahl von Anwendungen und Branchen auf dem Markt verfügbar, doch oftmals scheitert die Einführung solcher Maßnahmen daran, dass ihre potenziellen Anwender nicht ausreichend informiert sind. Gerade die kleinen und mittleren Unternehmen sind mit der Auswahl geeigneter emissionsarmer Produkte und Verfahren häufig überfordert. Verschärft wird diese Problematik, wenn eine Umstellung auf umweltschonende Einsatzstoffe oder Verfahren komplexe Auswirkungen auf die Produktionsprozesse hat bzw. wenn mögliche Kosteneinsparungen oder -belastungen nicht deutlich beurteilt werden können.

Kleinen und mittleren Betrieben fehlt oft die finanzielle und personelle Kapazität, sich über die Erfüllung gesetzlicher Vorschriften hinaus mit Fragen des Umweltschutzes zu befassen.

Um den zunehmenden Erwartungen von Gesetz- und Auftraggeber entsprechen zu können, benötigen kleine und mittlere Unternehmen einen schnellen und einfachen Zugang zu umweltbezogenen Informationen.

Ein weiterer Aspekt, der für kleine und mittlere Unternehmen signifikanten Zeit- und folglich Kostenaufwand bedeutet, ist die Erfüllung der Unfallverhütungsvorschrift. Entweder die kleineren Betriebe beauftragen einen externen Berater oder die mittleren Unternehmen beschäftigen einen Mitarbeiter für Arbeitssicherheitsfragen, der zur Erfüllung der Unfallverhütungsvorschrift einen Teil seiner Arbeitszeit (zum Teil bis zu 25 Prozent) der Anweisung und Betreuung der Mitarbeiter widmet [ANDRUSCH 2000].

Auch die in den letzten Jahren deutlich gestiegenen Anforderungen an Qualität und Wirtschaftlichkeit haben zum Einsatz von umweltverträglicheren und sicheren Arbeitsweisen sowie zu fortschrittlicheren Lacken und Lackierverfahren geführt. Damit sind auch die Anforderungen an die Qualifikation der Personen, die sich mit lackiertechnischen Fragen befassen, gewachsen. Es zeichnet sich ein zunehmender Informations- und Weiterbildungsbedarf ab, insbesondere für das Personal aus der Produktion sowie für die Umweltschutz- und Sicherheitsbeauftragten. Die kontinuierliche Aus- und Weiterbildung des Personals stellt einen weiteren wichtigen Kostenfaktor dar.

Als Auftragnehmer müssen die Lohnlackierbetriebe ebenfalls diverse Anforderungen der Kundenseite erfüllen. Auftraggeber fordern eine hohe Flexibilität, insbesondere bezüglich des Anlaufs der Produktion und schwankender Auftragsmengen. Die Lackieranlage muss in kürzester Zeit mit optimalen Parametern betrieben werden, damit der Auftrag wirtschaftlich bleibt. Darüber hinaus verlangen viele Auftraggeber mittlerweile von ihren Zulieferern eine Zertifizierung nach EG-Öko-Audit-Verordnung bzw. ISO 14000 ff., was zusätzlichen Aufwand verursacht.

Für Informationen zu gesetzlichen Auflagen im Bereich des Umwelt- und Arbeitsschutzes können industrielle Lackierbetriebe auf kostenpflichtige Informationsmanagementsysteme zurückgreifen (z.B. UB Media www.ubmedia.de). Ferner werden regelmäßig Informationsveranstaltungen (z.B. Tagungen, Seminare) durchgeführt, die entweder im großen Kreis zu aktuellen Entwicklungen und neuen Erkenntnissen der Lackiertechnik stattfinden oder in kleineren Gruppen auf konkrete und spezielle Fragestellungen eingehen. Derartige Veranstaltungen vermitteln sowohl fachliche Informationen hinsichtlich Lackierverfahren (z.B. über umweltschonende und sichere Lackiertechniken) als auch Informationen über Umwelt- und Arbeitsschutz. Eine Übersicht über Lehrgänge und Schulungen im Bereich der Lackiertechnik können [ONDRATSCHKEK 1999] entnommen werden.

Zur Unterstützung der kleinen und mittleren Unternehmen der Lohnlackierung wäre die Schaffung eines Forums, beispielsweise über Landesinnungsverbände oder spezifische Fachverbände, zur Bereitstellung und zum Austausch von Informationen wünschenswert. Um sämtlichen potenziellen Interessenten die Nutzung dieses Forums zu ermöglichen, könnte eine umfassende Datenbasis im Internet abgelegt werden. Die Entwicklung, Organisation, kontinuierliche Aktualisierung und Pflege dieser Datenbank sowie die Verwaltung der Diskussionsforen müssten zentral erfolgen.

4 Prozesse in der Lohnlackierung

Ziel des durchgeführten Forschungsprojekts war die Entwicklung eines Instruments zur effizienten Gestaltung der betrieblichen Stoff- und Energieströme in Unternehmen der Lohnlackierung. Mit diesem Instrument sollten Potenziale zur Reduzie-

rung von Umweltbelastungen und auch Kosten aufgezeigt werden. Im anschließenden Kapitel 5 wird ausführlich auf den Aufbau eines dafür geeigneten Stoff- und Energieflussmodells eingegangen.

4.1 Auswahl eines Referenzbetriebs

Für die Entwicklung eines praxisorientierten Instruments wurde ein Referenzbetrieb in Baden-Württemberg ausgewählt, bei dem eine detaillierte Ermittlung der Stoff- und Energieströme durchgeführt wurde.

Die Firma Stoz Oberflächentechnik GmbH & Co. KG arbeitet im Auftrag der Automobil-, Computer- und Luftfahrtindustrie, behandelt aber auch Oberflächen für medizinische Anlagen, messtechnische Einrichtungen und Teile für die Bauindustrie. Derzeit konzentrieren sich die Aufträge, die eine durchschnittliche Laufzeit von etwa zwei Jahren haben, auf die Oberflächenbehandlung von sechs Produkten/Produktgruppen (u.a. Laborflaschen, Weich-PVC-Leisten und Kunststoffspritzteile aus Polypropylen für die Automobilindustrie oder Mobiltelefon-Gehäuse). Die Beschichtungsprozesse unterscheiden sich je nach Produkt bzw. Produktgruppen: etwa in Nass- oder Pulverlackierung bzw. in manuelles oder automatisiertes Verfahren. Die Firma hat inzwischen etwa 140 Mitarbeiter und arbeitet im Dreischichtbetrieb. Die Zertifizierung gemäß ISO 9001 wurde bereits abgeschlossen und bis Ende 2001 wird die Zertifizierung gemäß ISO 14001 angestrebt.

Die Firma Stoz wurde 1926 als Maler- und Lackierbetrieb in Sindelfingen gegründet. Zu Beginn wurden hauptsächlich Malerarbeiten im Bauhandwerk durchgeführt. Besonders nach dem Zweiten Weltkrieg war im Baubereich in Deutschland ein enormer Bedarf vorhanden. Damals beschäftigte das Unternehmen ca. 70 Maler und Lackierer.

1961 wurde in Sindelfingen auf einem neuen Betriebsgelände ein Neubau erstellt, in dem die Möglichkeit zur Industrielackierung bestand. Bereits Mitte der 1960er Jahre wurden Vorbehandlungsverfahren auf Wasserbasis sowie Metall-Chromatierung und -Phosphatierung eingesetzt. Hauptauftraggeber in den 1970er und 1980er Jahren waren u.a. Unternehmen der Computerbranche (IBM, Hewlett-Packard) sowie der Automobilindustrie (z.B. Porsche) und deren Zulieferer (z.B. Bosch).

1988 wurde in Hailfingen ein zweites Werk errichtet, um den Anforderungen der Automobilindustrie gerecht zu werden. Die Konfiguration der zur Verfügung stehenden Anlagen ermöglicht eine breite Abdeckung von Kundenwünschen mit entsprechender Flexibilität [Stoz 1999]. Die in den vergangenen zwei Jahren kontinuierlich durchgeführten Investitionen zur Verbesserung der technologischen Ausstattung haben dazu beigetragen, dass die Firma Stoz zu den besonders innovativen Betrieben des Industrie- und Lohnlackierbereichs in Baden-Württemberg gehört.

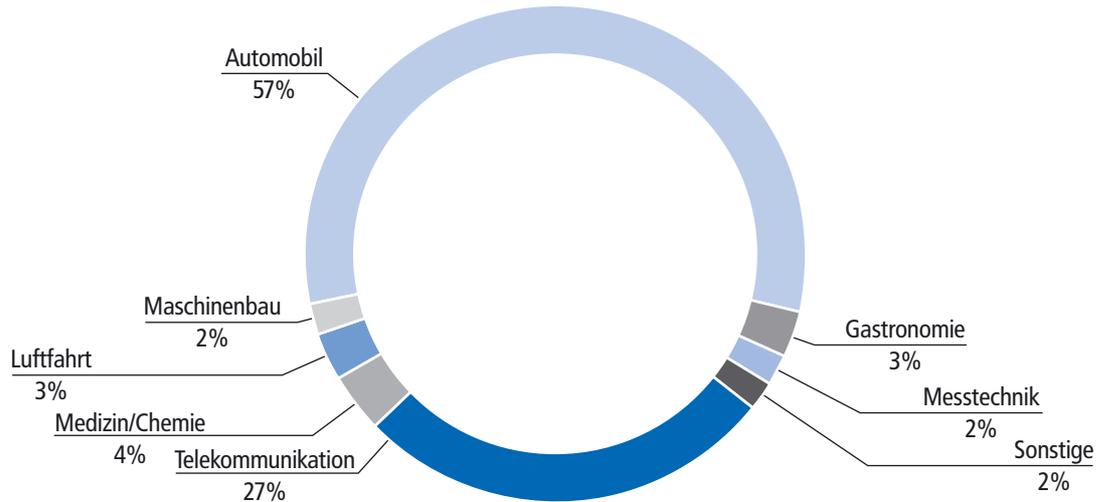
Als Referenzbetrieb dient der Standort der Firma Stoz Oberflächentechnik GmbH & Co. KG in Rottenburg-Hailfingen, Baden-Württemberg. Das Unternehmen mit 140 Mitarbeitern behandelt Oberflächen in manuellen und automatisierten Prozessen mit Nass- und Pulverlackverfahren.

4.2 Auftragsstruktur

Die wichtigsten Kunden kommen aus den Branchen Automobilbau und Telekommunikation. Abbildung 4.1 zeigt eine Übersicht der aktuellen Auftragsstruktur. In der Regel betragen die Laufzeiten

der Aufträge wenige Monate bis zu einigen Jahren, was eine hohe Flexibilität der Ausstattung und Mitarbeiter erfordert.

Abb. 4.1: Auftragsstruktur der Stoz Oberflächentechnik GmbH & Co. KG

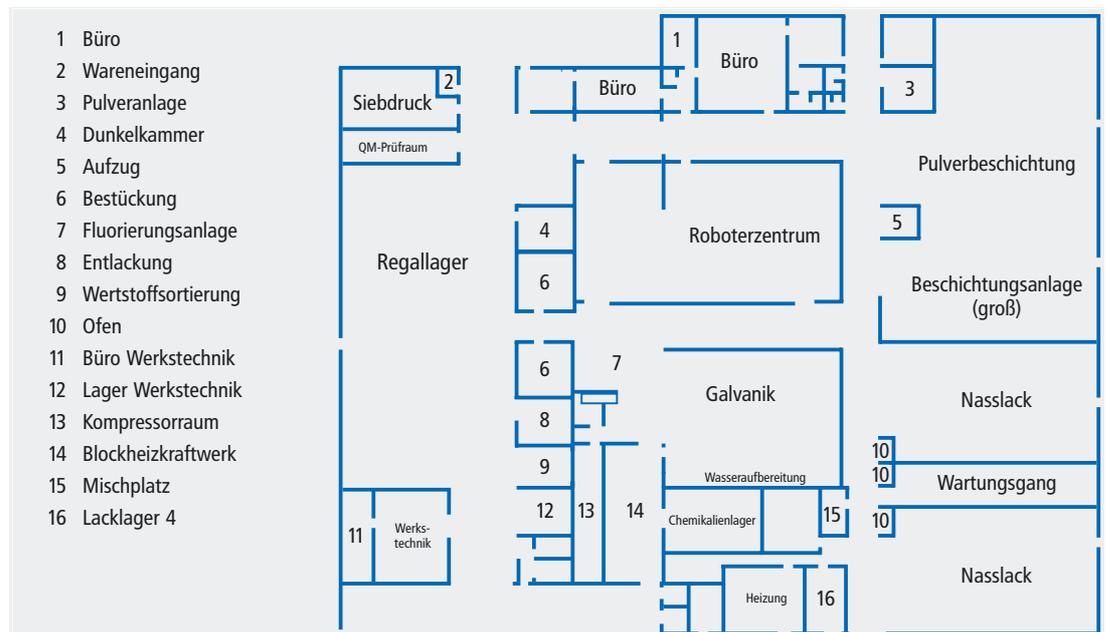


4.3 Erfassung der technologischen Ausstattung

Bei der Firma Stoz wird die notwendige hohe Flexibilität durch die Trennung der Vorbehandlungsanlagen von den nachfolgenden Beschich-

tungsanlagen gewährt. Im Folgenden werden die wesentlichen Prozessschritte entlang des Produkt-durchlaufs beschrieben.

Abb. 4.2: Grundriss der Stoz Oberflächentechnik GmbH & Co. KG am Standort Hailfingen



4.3.1 Vorbehandlung

Die Vorbehandlung von metallischen Beschichtungsuntergründen zählt zu den wichtigsten Schritten im Lackierprozess, da sie die Grundlage für die Haftfestigkeit und die Korrosionsbeständigkeit der anschließenden Beschichtung bildet. Da die Anforderungen an die Beständigkeit von Beschichtungen in den letzten Jahren erheblich gestiegen sind, muss auch die Vorbehandlung in gleichem Maß optimiert werden. In der Firma Stoz werden die nachfolgenden Vorbehandlungsverfahren eingesetzt.

Chromatierung

Eine Chromatierung besteht darin, Metalloberflächen mit Chrom(VI)-haltigen Lösungen zu behandeln. Es wird zwischen Gelb- und Grünchromatierung unterschieden. Grünchromatiert wird in Lösungen auf Wasserbasis, die aus Chromsäure (CrO₃), Fluoriden und Phosphaten zusammengesetzt sind. Die grüne Farbe wird durch die Zugabe von Chrom(III)-Phosphat gewonnen. Bei der Gelbchromatierung enthält die wässrige Lösung hauptsächlich Chromsäure. Die gelbe Farbe wird durch das beigesezte Chromat hervorgerufen [KLEIN 1999].

In einer vollautomatischen Taktanlage werden Aluminium-, Magnesium-, Zinkprodukte oder deren Legierungen mit entsprechenden Chromatschichten behandelt. Als qualitativ bestes und gängigstes Verfahren hat sich die Gelbchromatierung durchgesetzt, jedoch können auch andere Chromatierungen durchgeführt werden. Als Alternative zur Chromatierung bei Aluminium bietet die Firma Stoz eine Titan-Zirkonium-Beschichtung an. Dieses relativ neue Vorbehandlungsverfahren kommt bereits serienmäßig auch im Automobilbau zum Einsatz [STOZ 2000].

Phosphatierung

Die Phosphatierung zählt seit vielen Jahren zum anerkannten Stand der Technik für die Vorbehandlung diverser Teile aus der Automobilindustrie, dem Maschinenbau und vielen anderen Industriezweigen. Durch die Phosphatierung werden folgende Ziele erreicht:

- Erhöhung der Haftfestigkeit von Lackschichten,

- Verbesserung des Korrosionsschutzes,
- keine Störungen des Beschichtungsprozesses durch Oberflächenfehler und
- gleichmäßige Ausbildung der Beschichtung.

Bei den zu phosphatierenden Werkstoffen handelt es sich überwiegend um Stahl und vorbeschichteten Stahl, aber mit entsprechend eingestellten Phosphatierbädern kann auch Aluminium phosphatiert werden. Die nachfolgenden Tabellen 4.1 und 4.2 zeigen die zurzeit am häufigsten angewandten Phosphatierverfahren, ihre Anwendungen und Eigenschaften.

Tab. 4.1: Phosphatierverfahren und ihre Anwendungen [STOZ 2000]

Verfahren	Anwendung
Eisenphosphatierung	einfaches Vorbehandlungsverfahren für nachträgliches Beschichten
Zinkphosphatierung	hochwertiges Vorbehandlungsverfahren für nachträgliches Beschichten
Manganphosphatierung	Behandlungsverfahren für die Gleiterleichterung (z.B. im Motor, Getriebe oder beim Umformen)
Dickschichtphosphatierung	Rostschutz, meist in Verbindung mit nachträglichem Ölen oder Wachsen

Tab. 4.2: Phosphatierverfahren und ihre Eigenschaften [STOZ 2000]

Verfahren	Beschichtbar	Korrosionsschutz	
		unbeschichtet	beschichtet
Eisenphosphatierung	ja	sehr gering	gut
Zinkphosphatierung	ja	gering	sehr gut
Manganphosphatierung	nein	gering bis mittel	—
Dickschichtphosphatierung	nur Öl/Wachs	gering bis mittel	mittel

Während des Phosphatiervorgangs laufen an der Metalloberfläche mehrere gekoppelte physikalisch-chemische Reaktionen ab:

- Beizangriff auf das Metall, z.B. Eisen,
- Erhöhung des pH-Werts im angrenzenden Film der Phosphatschicht,
- Kristallkeimbildung auf dem Metall,
- Oxidation des Eisens in die dreiwertige Form und
- Ausfällung des Eisens im Bad als Eisenphosphatschlamm.

Eisenphosphatierung ist ein kostengünstiges Verfahren, das hauptsächlich bei Produkten für Innenräume, die also keiner extremen Korrosionsbeanspruchung ausgesetzt sind, Anwendung findet. Jedoch kommt von den oben aufgeführten Verfahren die Zinkphosphatierung am häufigsten zum Einsatz. Sie bietet einen sehr guten Korrosionsschutz und stellt einen hervorragenden Untergrund dar, auf dem Beschichtungen sehr gut haften. Im Rahmen der Zinkphosphatierungsverfahren spielen die Niedrigzink-Verfahren eine besondere Rolle. Seit ihrer Markteinführung haben sie die Normalzink-Verfahren immer mehr verdrängt. Sie bieten gegenüber den Normalzink-Verfahren eindeutige Vorteile in Bezug auf Korrosionsschutz, Steinschlagbeständigkeit sowie Haftung der Beschichtung.

Zinkphosphatschichten sind kristalline Schichten, die sich auf blanken Metalloberflächen bilden. Bestimmender Bestandteil der Zinkphosphat-Behandlungslösung ist primäres Zinkphosphat. Durch Verwendung weiterer Kationen wie Nickel, Mangan u.a. können die chemische Zusammensetzung und die Struktur der Zinkphosphatschicht speziellen Anforderungen angepasst werden. Zur Steuerung der Schichtbildungsgeschwindigkeit werden den Badlösungen Oxidationsmittel wie Nitrat, Chlorat, Nitrit u.a. zugegeben [KLEIN 1999, BROCK 1998].

Das Niedrigzink-Verfahren wurde im Zusammenhang mit der Einführung der kathodischen Elektrotauchlackierung (KTL) entwickelt. Während die Normalzink-Verfahren flächige Kristallite in fächerartiger Form ausbilden, die auch teilweise aus der Ebene herausragen, zeigen die mit Niedrigzink-Verfahren aufgebrauchten Schichten eine weitgehende parallele Ausrichtung zur Metallunterlage und sind wesentlich feinkristalliger und kompakter.

Bei der Firma Stoz wird ein Niedrigzink-Verfahren eingesetzt. Es handelt sich um ein Drei-Kationen-Tauchverfahren (Zink-Nickel-Mangan). Zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit können chromhaltige und chromfreie Nachspüllösungen oder das von Stoz patentierte Verfahren LYMA Care® 3001 angewandt werden [STOZ 2000].

Zur Reinigung der Teile vor der Zinkphosphatierung werden umweltfreundliche alkalische Reiniger/Entfetter verwendet. Rost und Zunder können durch Beizen entfernt werden. Die Behandlung erfolgt in einer vollautomatischen, computergesteuerten Taktanlage, in der die Badparameter überwacht und aufgezeichnet werden.

Fluorierung

Die Fluorierung ist eine Vorbehandlungsmethode für unpolare Kunststoffe wie Polypropylen oder Polyethylen, die eine Vielzahl von Vorteilen bieten, z.B.:

- einfache Herstellung und Verarbeitung zu verschiedenen Zwischen- und Endprodukten,
- hohe mechanische Festigkeit und thermische Belastbarkeit,
- gute Recyclingfähigkeit der Produkte sowie
- geringe Rohstoffkosten.

Als weitere Vorteile sind zu nennen [Stoz 2000]:

- **Stabilität der Wirkung über mehrere Monate:** Fluorierte Kunststoffteile können sowohl direkt in der Lackiererei weiterverarbeitet als auch für mehrere Monate zwischengelagert werden. Selbst ein nachträgliches Waschen beeinträchtigt die polar eingestellte Oberfläche nicht.
- **Keine Schädigung des Grundmaterials:** Beim Fluorierungsverfahren findet keine thermische oder sonstige Belastung des Grundmaterials statt und somit entsteht keine Beschädigung.
- **Umweltfreundlich:** Nach der Fluorierung können alternative Beschichtungsmaterialien wie z.B. Lacke auf Wasserbasis eingesetzt werden.

Fluorierung bei der Firma Stoz

Seit März 1999 wird bei Stoz eine der modernsten Vorbehandlungsanlagen für Kunststoffe, eine Fluorieranlage (s. Abbildung 4.3), eingesetzt. In einer Vakuumkammer können Kunststoffteile durch eine Fluorgasbehandlung für weitere Oberflächenprozesse vorbehandelt werden.

Nicht nur kritische Materialien wie Polypropylen werden fluoriert, sondern auch Teile aus Materialien wie Polyester, Melaminharz, Polyamid etc. Hierdurch kann in fast allen Fällen auf den Einsatz

von Grundierungen, selbst bei der Verwendung von Wasserlacken, verzichtet werden. Parallel zur Vorbehandlung von Kunststoffen wurden auch Versuche mit Glas und Metallen durchgeführt. Auch hier sind positive Ergebnisse bezüglich des Beschichtungsverhaltens und der Haftung von Lacken und Pulverlacken festzustellen. Zwischenzeitlich wurden diese Verfahren auch bis zur Serienreife gebracht und eingesetzt. Besonders erfolgreich werden Gussmaterialien behandelt. Beim Gießprozess werden oft Trennmittel verwendet, die mit konventionellen Vorbehandlungsmethoden schwer oder nur partiell entfernt werden können. Kritisch sind besonders Werkstoffe, bei denen wegen ihrer empfindlichen Oberfläche oder wegen sehr enger Toleranzen keine aggressiven Reiniger oder Beizen angewandt werden können. Durch die Fluorierung kann auch hier eine ausgezeichnete Haftung der aufgetragenen Beschichtungen erzielt werden [Stoz 2000].

Der Behandlungsprozess läuft vollautomatisch und computergesteuert ab. Sämtliche Prozessparameter werden kontinuierlich mitgeschrieben und als Fertigungsdokument abgelegt. Besonderes Augenmerk gilt dem Umweltschutz und der Arbeitssicherheit. So wird die Prozessabluft wie auch die Umgebungsluft über eine kombinierte zweistufige Nass-/Trocken-Abgasreinigungsanlage gewaschen. Sensoren überprüfen und dokumentieren rund um die Uhr sämtliche Messwerte.

Kunststoffe, Glas und Metalle werden mit Fluorgas unter Vakuum vorbehandelt. Dadurch kann auf die Grundierung der Oberflächen verzichtet werden.

Abb. 4.3: Fluorieranlage der Stoz Oberflächentechnik GmbH & Co. KG [Stoz 2000]



Moderne Pulverbeschichtungsanlagen erlauben durch Kreislaufführung Lacküberschüsse zurückzugewinnen. Dank des hohen Auftragswirkungsgrads sinkt die Abfallmenge deutlich.

4.3.2 Lackierung

Pulverbeschichtung

Aufgrund der ständig steigenden Nachfrage am Markt nach Pulverbeschichtungen und zur Ergänzung der Angebotspalette wurde Ende der 1980er Jahre bei der Firma Stoz die Pulverbeschichtung eingeführt. Derzeit verfügt sie über folgende Ausstattung: zwei Durchlaufhandpulverkabinen, eine vollautomatische Durchlaufkabine mit Hubanlagen und eine Nasslackkabine mit Lackierroboter. Diese Anlage ermöglicht den Durchlauf von Teilen bis zu einer Länge von 3.000 Millimetern [STOZ 1999]. Parallel zu dieser Pulver-/Nasslackanlage wurde eine zweite Lackierlinie mit drei Hand- und einer Durchlaufkabine aufgebaut, die hauptsächlich zur Beschichtung von Teilen für die Automobil- und Computerindustrie genutzt wird. Die besondere Anordnung der Anlagen ermöglicht die Lackierung von komplizierten Abdeckungen wie Dichtflächen oder Gewinden an den Teilen. In dieser Anlage können Teile mit einer Länge bis zu 1.600 Millimetern bearbeitet werden [STOZ 1999].

Mitte der 1990er Jahre wurde eine sehr kompakte, vollautomatische Anlage zum Durchlauf von Kleinteilen (z.B. Motorengehäuse) realisiert. Die verwendeten Pulver-Beschichtungssysteme werden im Kreislauf geführt: Durch die Rückgewinnung des

Oversprays⁹⁾ wird ein hoher Auftragswirkungsgrad erreicht und im Gegensatz zur Nasslackierung die Abfallmenge deutlich verringert. Ferner wird überschüssige Prozesswärme, z.B. aus den Kühlanlagen der Ofenausläufe, in einen Wärmerückgewinnungskreislauf gespeist. Diese Energie wird als Prozesswärme in der Produktion und für die Warmwasserherstellung verwendet. Derzeit macht die Beschichtung mit Pulvermaterial etwa 30 Prozent der Gesamtproduktion aus [STOZ 2000].

Lackierung auf Basis wasserverdünnter Lacke

Der Anteil der Nasslackierung beträgt ca. 60 Prozent, davon etwa acht Prozent wasserverdünnter Lacke. Die Nasslackierung wird in folgenden Bereichen eingesetzt: Automobilinnenausstattung, Stoßfänger, Schmutzleisten, Produkte der Luft- und Raumfahrttechnik, Glasbeschichtungen, Produkte der Computerindustrie, Mess- und Regeltechnik, Gastronomie, Schienenfahrzeuge und Anlagenbau. Derzeit stehen elf Lackieranlagen (Durchlaufanlagen, Chargenanlagen, Lackierroboter, Rundspritzautomaten, Handspritzstände) zur Verfügung. Alle Anlagen sind gekapselt und verfügen über eine eigene Zuluft-/Abluftsteuerung [STOZ 1999].

4.3.3 Entlackung

Die Entlackung von lackierten oder pulverbeschichteten Metallteilen (z.B. Vorrichtungen für Kleinteile) erfolgt in einer geschlossenen Entlackungsanlage (s. Abbildung 4.4) durch Besprühung mit einer chemischen Lösung bei einer Temperatur von ca. 100 °C. Nach einer Behandlungszeit von 20 bis 30 Minuten löst sich das Beschichtungsmaterial auf und wird von einem Sprühstrahl abgewaschen. In einer zweiten Behandlungsstufe werden die entlackten Teile mit einer Nachspüllösung gereinigt und anschließend getrocknet. Entlackung und Nachspülung laufen vollautomatisch ab. Dies gewährleistet eine hohe Prozess- und Arbeitssicherheit.

Grundsätzlich können alle Metalle mit diesem Verfahren entlackt werden. Ein chemischer oder mechanischer Angriff auf das Metall findet nicht statt. So können auch kritische Stoffe wie etwa Aluminium oder Magnesium entlackt werden, ohne das Produkt zu beschädigen. Auch die Entlackung von speziellen Kunststoffen ist möglich.

Das Verfahren arbeitet in einem geregelten Stoffkreislauf und vollständig abwasserfrei. Somit werden keine Gefahrstoffe an die Umwelt abgegeben und die gelösten Lacke werden durch Aufbereitung der Wiederverwertung zugeführt [STOZ 2000].

⁹⁾ Overspray bezeichnet die Lacktröpfchenmenge, die nicht auf der Werkstückoberfläche auftrifft und dort haftet, sondern am Werkstück vorbeigespritzt wird und durch die Spritzraumluftströmungen in eine Abscheidevorrichtung gelangt [ABAG 1993].

Abb. 4.4: Entlackungsanlage der Stoz Oberflächentechnik GmbH&Co. KG [Stoz 2000]



4.3.4 Sonstige umwelt- und gesundheitsrelevante Maßnahmen

Abwasserfreie Vorbehandlung

Durch den Einsatz von Drei-Phasen-Zentrifugen in den Vorbehandlungsbecken wird eine kontinuierliche Reinigung der einzelnen Tauchbecken während der Fertigung gewährleistet, damit werden die Standzeiten der Bäder erheblich verlängert. Demzufolge ist der Einsatz von Chemikalien und Wasser erheblich zurückgegangen. Des Weiteren sind die Spülen mit Kaskaden ausgerüstet. Bei der mehrstufigen Spülmethode im Gegenstromprinzip erfolgt die Frischwasserzugabe nur in der letzten Spülzone. Der Überlauf dieses Bades fließt jeweils in das vorherige Spülbad. Die Mehrfachnutzung des Spülwassers führt ebenfalls zu einer Verminderung des Wasserverbrauchs. Wenn ein Wechsel der Bäder anfällt, werden die Flüssigkeiten in einer chemischen Entgiftungsanlage neutralisiert.

Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung der Frischwassermenge stellt die Rückgewinnung von entsalztem Spülwasser dar: Eine Möglichkeit zur Aufbereitung des aus der Kaskade abfließenden Spülwassers besteht darin, in einer Mikrofilteranlage das Spülwasser vom Schlamm zu trennen, in einer Umkehrosmose zu entsalzen, mit vollentsalztem Wasser zu ergänzen und der letzten Spüle wieder zuzuführen [KLEIN 1999].

Der Einsatz dieser Technologien brachte der Firma Stoz wirtschaftliche Vorteile durch die Reduzierung des Frischwasserverbrauchs. Darüber hinaus werden hierbei keine industriellen Abwässer in das kommunale Abwassernetz geleitet [STOZ 2000].

Abwasseraufbereitung

Für die Aufbereitung der Abwässer bei der Firma Stoz wurden bis 1997 Chargen-Aufbereitungsanlagen verwendet. Die kontinuierliche Senkung der Grenzwerte bei der Wassereinleitung bewirkte eine kontinuierliche Verbesserung der Wasseraufbereitungsanlagen. Seit Anfang 1997 ist der gesamte Abwasserkreislauf zu einem System zusammengefasst und geschlossen worden. Sämtliche Abwässer aus der Vorbehandlungsanlage und aus der Lackieranlage werden zentral gesammelt, vorgereinigt und einer 250-Liter-Verdampfungsanlage zugeführt. Das entstehende Destillat wird in Vorlagebehältern gesammelt und bei Bedarf dem Fertigungskreislauf erneut zugeführt. Das Konzentrat wird eingedickt, gepresst und in der Festform als Sondermüll entsorgt [STOZ 1999].

Kontinuierliche Reinigung, Kaskadenführung und Rückgewinnung senken den Frischwasserbedarf. Gleichzeitig wird das Abwasser weniger belastet, was die Effizienz der Abwasseraufbereitung erhöht.

Recycling in der Lackiererei

Die Lackierstände verfügen über wasserberieselte Lackierwände. Dabei wird der Lacknebel zum Teil im Wasser gebunden. Zusätzlich sind die Kabinen mit Reinigungsfiltern für das Wasser und Abscheidschikanen für die in der Luft verbleibenden Festkörper ausgestattet. Der anfallende Restlack wird in dafür vorgesehenen Spezialgefäßen gesammelt und einer stofflichen bzw. thermischen Verwertung außerhalb des Betriebs zugeführt. Der Austausch des Wassers der Lackierkabinen erfolgt über eine Filterpresse, was die Filtration der sich noch im Wasser befindlichen Festkörper ermöglicht. Anschließend wird das verschmutzte Wasser dem Vakuumverdampfer zugeführt. Das Destillat wird dem Industrierisikreislauf wieder zugeführt, das Konzentrat energetisch verwertet.

Die durch Reinigungsprozesse (z.B. Spritzpistolen) anfallenden Lösemittel werden nach ihrem Verschmutzungsgrad in verschiedenen dafür vorgesehenen Behältnissen gesammelt und von einem spezialisierten Unternehmen aufbereitet und in ihre Fraktionen getrennt. Die Lösemittel werden regeneriert und könnten erneut zur Reinigung eingesetzt werden; jedoch wird dies aus Gründen der Qualität derzeit bei der Firma Stoz nicht durchgeführt. Aus den Festkörpern entsteht neues Lackmaterial, das aber derzeit nur für minderwertige Zwecke eingesetzt wird [Stoz 2000].

Beschränkter Einsatz von gesundheits-schädigenden Stoffen

Bei Lohnlackierbetrieben finden sich gesundheits-schädigende Stoffe in den Lackmaterialien (insbesondere die darin enthaltenen Pigmente und Lösemittel) und in den Reinigungslösemitteln (z.B. zur Reinigung der Spritzpistolen). Auch Schwermetalle, die in besonders kräftigen farbigen Lacken enthalten sind und oftmals noch in der Automobilindustrie verwendet werden, sind gesundheitsgefährdend. Die aufgezählten Stoffe und Verbindungen

können beträchtliche Einwirkungen auf die Mitarbeiter haben, wenn sie als Gase, Dämpfe, Aerosole oder Stäube eingeatmet, über die Haut resorbiert werden oder über den Mund und die Verdauungsorgane in den Körper gelangen [MAY 1999]. Bei Stoz wurden die krebserzeugenden, giftigen, reproduktionstoxischen und weitere besonders gesundheitsschädigende Stoffe und Verbindungen weitgehend ersetzt. Beim Einkauf von Betriebsstoffen werden möglichst schadstoffreduzierte Produkte, die auf dem Markt mittlerweile in großer Menge angeboten werden, bevorzugt [ANDRUSCH 2000].

Maßnahmen zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes

Zur Erfüllung der Gefahrstoffverordnung werden für die Lackierer die erforderlichen Maßnahmen zum Schutz vor gesundheitsgefährdenden Stoffen in Sicherheitsdatenblättern und Betriebsanweisungen dokumentiert. Weiterhin werden bei der Firma Stoz die notwendigen Schutzausrüstungen für die Lackierer wie Atemschutzmasken, Lackieranzüge, Augenschutzbrille etc. zur Verfügung gestellt und eingesetzt [ANDRUSCH 2000].

Effiziente Energieerzeugung

Der Betrieb verfügt über ein Blockheizkraftwerk mit einer Feuerungswärmeleistung von 996 Kilowatt und einer elektrischen Leistung von 430 Kilowatt. Das Blockheizkraftwerk besteht aus drei Diesellaggregaten, wovon zwei Aggregate in Betrieb sind und das dritte als kalte Reserve zur Verfügung steht. Diese Anlage deckt den kompletten elektrischen Energiebedarf des Betriebs und liefert einen Großteil der für die Fertigung benötigten thermischen Wärme. Die thermische Energie wird insbesondere für die Beheizung der Bäder der Vorbehandlungsanlage und für die Lufterwärmung der Zuluftanlagen eingesetzt.

Lackrückstände in Luft und Wasser werden über entsprechende Filter abgeschieden und der thermischen Verwertung zugeführt. Lösemittelrückstände werden in Fraktionen gesammelt und gelangen in die Wiederaufbereitung.

4.4 Erstellung eines vereinfachten Betriebsmodells

Zur effizienten Modellierung von Stoff- und Energieströmen sind zunächst die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Prozessschritten, eingesetzten Materialien und Technologien zu analysieren und die betrieblichen Stoff- und Energieströme zu ermitteln und abzubilden. Anschließend soll die Kostenstruktur verdeutlicht werden. Im letzten Schritt sollen Minderungspotenziale hinsichtlich Umweltbelastungen und anfallender Kosten aufgezeigt sowie die umweltrelevanten und wirtschaftlichen Auswirkungen von Verfahrensänderungen ermittelt werden. Dazu muss das zu erstellende Stoff- und Energieflussmodell folgenden Anforderungen gerecht werden:

- transparente Darstellung der Stoff- und Energieströme,
- nachvollziehbare Berechnung der Stoff- und Energieströme,
- einfache und schnelle Ermittlung der technologischen und umweltrelevanten Auswirkungen bei der Durchführung von Verfahrensänderungen,
- Möglichkeit der systematischen Fortschreibung bei neuen Erkenntnissen in der Produkt- und Technologieentwicklung.

4.5 Erhebung der erforderlichen Daten im Betrieb

Zur umfassenden und detaillierten Erfassung und Analyse der Stoff- und Energieströme sind eine Vielzahl von Daten, insbesondere Material- und Energieverbräuche sowie Leistungsdaten, des Betriebs notwendig. Auch Kostendaten sind erforderlich. Im Einzelnen werden folgende Daten erhoben:

- allgemeine Angaben zur Betriebsstruktur, z.B. Auftrags- und Kundenstruktur, Mitarbeiterzahl etc.,
- Abfolge der einzelnen Prozessschritte für die Prozesse „Mobiltelefon-Lackierung“ und „Lackierung von Weich-PVC-Leisten“,
- eingesetzte Materialien und Technologien sowie spezifische Daten zu entsprechenden Verbräuchen und technischen Kenngrößen für jeden Arbeitsschritt,
- Angaben zu entsorgten bzw. abgegebenen Abfällen sowie deren Entsorgungs- bzw. Beseitigungswege,
- Informationen zur Kostenstruktur sowohl für Eingangsmaterialien als auch für die Outputseite der betrachteten Prozesse (z.B. Entsorgungskosten).

Dafür kann weitgehend auf im Betrieb vorhandene Informationen, z.B. aus dem Einkauf, den Bericht zur Abfallbilanz und zum Abfallkonzept oder auf hauseigene Erfahrungen zurückgegriffen werden, so dass sich dadurch der Datenerhebungsaufwand erheblich reduziert. Bei der Firma Stoz wurde die zeitaufwendige detaillierte Erhebung von weiteren notwendigen Daten im Wesentlichen durch den Umwelt- und Arbeitssicherheitsbeauftragten durchgeführt. Dabei erforderte die Erfassung der Outputseite den größeren Aufwand, da hier meist keine systematische innerbetriebliche Erfassung vorlag.

Um Material- und Energieverbrauch zu erfassen und die Leistungsdaten des Betriebs zu bestimmen, empfiehlt es sich auf vorhandene Bilanzen und Berichte zurückzugreifen, wie sie etwa die Bereiche Einkauf, Umwelt und Arbeitssicherheit erstellen.

5 Betriebsanalyse

Für die Analyse der Stoff- und Energieströme im Referenzbetrieb wird zunächst der Ist-Zustand hinsichtlich der Prozessabläufe für die Lackierung von Mobiltelefon-Gehäusen und von Weich-PVC-Leisten beschrieben. Da die Firma Stoz zahlreiche

Prozessinnovationen zum Teil gemeinsam mit ihren Kunden entwickelt hat, werden nicht alle Prozesse bis ins Detail beschrieben. Anschließend wird ein Stoff- und Energieflussmodell aufgebaut.

5.1 Detaillierte Beschreibung des Ist-Zustands

Bei den ausgewählten Lackierprozessen handelt es sich um relativ einfache Prozesse: Im Gegensatz beispielsweise zur Automobilserienlackierung, bei der der Lackaufbau aus verschiedenen Lackschichten besteht (Spachteln, Grundierung, Füller, Basislack, Klarlack), werden die Mobiltelefone und die Weich-PVC-Leisten mit einer einzigen Decklack-

schicht versehen. Grundsätzlich umfassen die zu berücksichtigenden Prozessschritte nicht nur den eigentlichen Lackiervorgang, sondern auch Vorgänge der Vor- und Nachbehandlung der zu beschichtenden Teile. Diese Schritte werden für beide Lackierprozesse im folgenden Abschnitt kurz beschrieben.

5.1.1 Lackierung von Mobiltelefonen

Abb. 5.1: Vereinfachter Prozessablauf bei der Lackierung von Mobiltelefonen

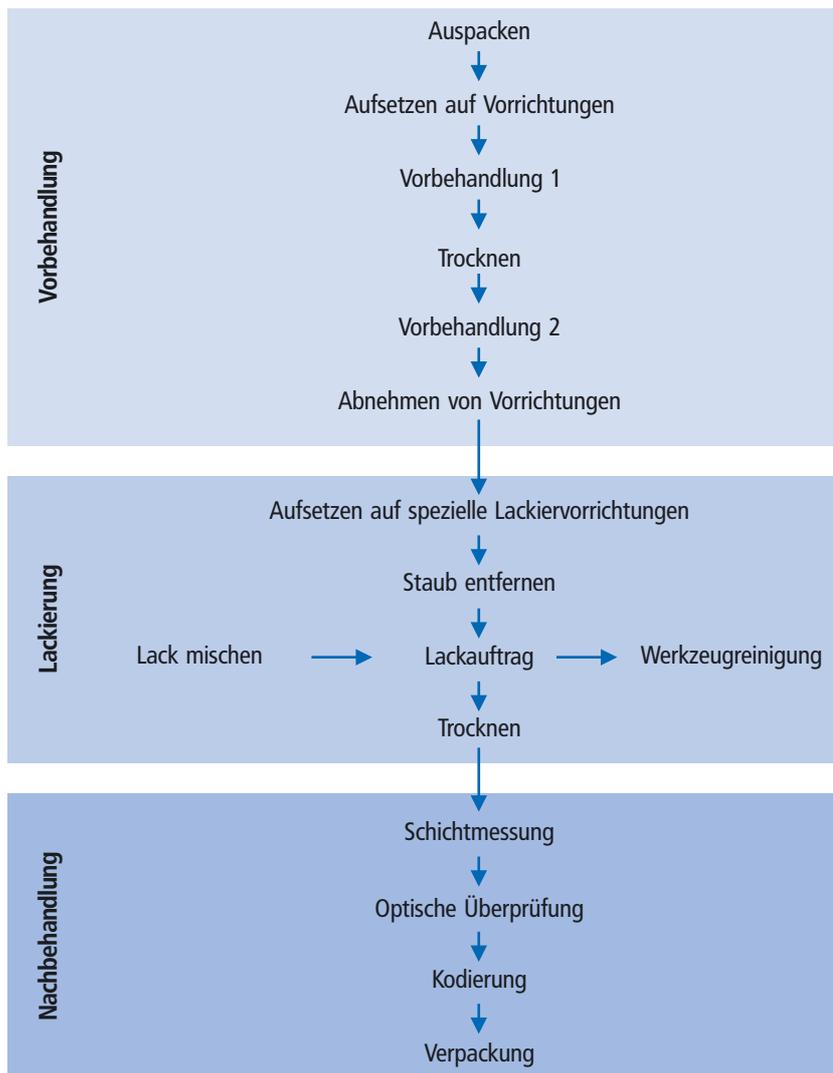


Abb. 5.2: Lackiertes Mobiltelefon-Gehäuse [ABB 2000]



In Abbildung 5.2 ist ein lackiertes Mobiltelefon-Gehäuse abgebildet. Ein vereinfachter Prozessablauf der Mobiltelefon-Lackierung ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Im Einzelnen gliedert sich die Lackierung von Mobiltelefonen (Handy-Gehäusen) in die ab Seite 41 ff. beschriebenen Arbeitsvorgänge.

Auspacken und Aufsetzen auf Vorrichtungen

Die Mobiltelefone werden aus den Anlieferungsverpackungen manuell herausgenommen und auf Vorrichtungen, die zum Transport durch die Vorbehandlungsanlage halten, aufgesetzt.

Vorbehandlung

Das Handy-Gehäuse besteht aus einer Aluminium-Magnesium-Legierung. Ein charakteristisches Merkmal von Aluminium-Untergründen ist, dass sie von einer dünnen, farblosen, vor Korrosion schützenden Aluminiumoxid-Schicht bedeckt sind. Diese Oxid-Schicht schützt zwar das Aluminium (im neutralen Zustand) vor Korrosion, behindert aber die Lackhaftung [BROCK 1998]. Weiterhin ist anzumerken, dass die Beständigkeit von Aluminium sowohl gegen Säuren als auch gegen Laugen sehr beschränkt ist. Eine Vorbehandlung ist deshalb notwendig.

Zunächst werden die Handy-Gehäuse einem ersten Vorbehandlungsschritt unterzogen. Es folgen zwei Spülvorgänge in Kaskadenführung mit vollentsalztem Wasser und anschließend ein Trocknungsvorgang. Aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen an die Lackierung und demzufolge an die Vorbehandlung ist eine zweite Vorbehandlung notwendig.

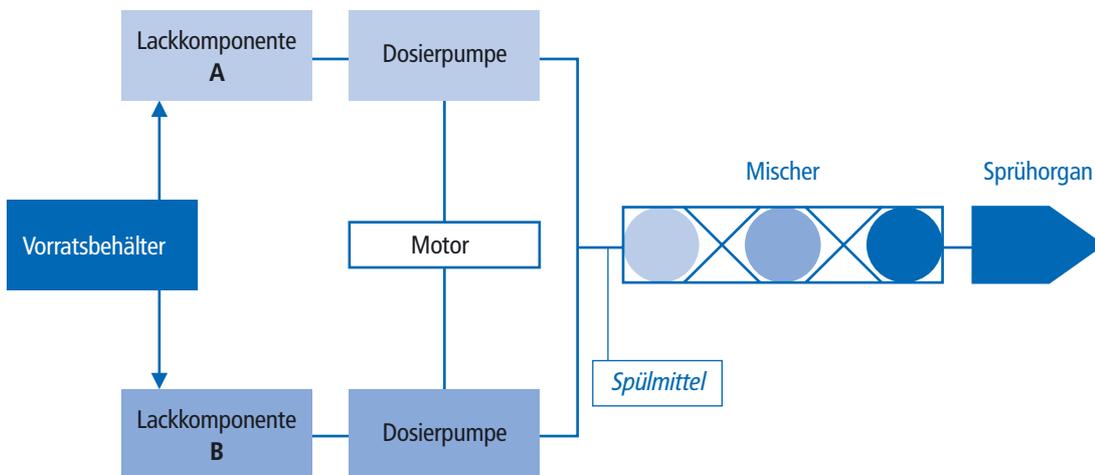
Schließlich werden die Handy-Gehäuse von den Vorrichtungen genommen und auf andere Vorrichtungen, die speziell für den Lackiervorgang gestaltet wurden, aufgesetzt.

Lackierung

Der eingesetzte Lack ist ein lösemittelhaltiger Zwei-Komponenten-Lack (2K-Lack) mit einem Festkörpergehalt von ca. 56 Gewichtsprozent, der mittels einer 2K-Dosier- und Mischanlage vorbereitet wird. Eine derartige Anlage gewährleistet eine hohe Zuverlässigkeit und Fehlerfreiheit beim Dosieren und Mischen der Reaktionskomponenten Lack und Härter. Außerdem eignet sich die Zwei-Komponenten-Anlagentechnik besonders bei den relativ teuren 2K-Lacksystemen, da Wegwerfverluste vermieden werden können. Eine vereinfachte Darstellung der 2K-Anlagentechnik zeigt die Abbildung 5.3.

Zur Entfernung von Fremdsubstanzen auf der Aluminiumoberfläche, insbesondere Schmutzpartikeln, die die optische Beschichtungsqualität beeinträchtigen können, wird vor jedem Lackiervorgang eine sorgfältige manuelle Reinigung vorgenommen. Diese erfolgt mit Druckluftunterstützung.

Abb. 5.3: Vereinfachte Darstellung einer 2K-Dosier- und Mischanlage [BROCK 1998]



Derzeit werden die Handy-Gehäuse in zwei Spritzkabinen mit unterschiedlicher Ausrüstung lackiert. Die VBG 23 (Unfallverhütungsvorschrift „Verarbeiten von Beschichtungsstoffen“ der gewerblichen Berufsgenossenschaften) erfordert die Ausrüstung der Kabinen mit Absaugeinrichtungen, die ein Ausströmen von Spritznebeln aus dem Arbeitsbereich verhindern. Die Spritzkabinen werden durchgehend mit gereinigter, temperierter Luft (ca. 25 °C) von oben nach unten durchströmt. Die Frischluft wird mittels Filter insbesondere von feinen Staubpartikeln gereinigt und anschließend erwärmt. Der kontinuierliche Luftstrom führt den Overspray nach unten in eine Einrichtung zur Overspray-Abscheidung.

In jeder Spritzkabine wird jeweils ein Lackierroboter eingesetzt. Lackierroboter sind Bewegungsautomaten, die programmierte Bewegungsabläufe wiederholen. Ihre Auftragswirkungsgrade unterscheiden sich vor allem durch ihre Präzision in den Bewegungen. Beispielsweise stellt der neuere Roboter die Lackversorgung automatisch während bestimmter Drehbewegungen ab, was zu Lackmaterialeinsparungen führt. Für den Lackiervorgang werden konventionelle Spritzpistolen eingesetzt; dabei erfolgt die Zerstäubung der Lackmaterialien rein mechanisch durch die Geschwindigkeit von Luftstrahlen. Dieses Verfahren ist aufgrund seiner großen Flexibilität besonders vorteilhaft.

Trocknung

Nach dem Decklackauftrag wird die Lackschicht getrocknet und ausgehärtet. Bei der Mischung von Stammlack und Härter (2K-Lacken) erfolgt zunächst eine Aushärtung durch Vernetzung der

Bindemittelmoleküle mit Hilfe chemischer Reaktionen (Polyaddition). Zusätzlich wird eine physikalische Trocknung bei ca. 97 °C vorgenommen.

Optische Überprüfung, Kodierung und Verpackung

Am Ende des Lackierungsablaufs werden die beschichteten Handy-Gehäuse durch eine automatische Anlage zur Schichtdickenmessung geführt. Anschließend werden die lackierten Teile nochmals einer optischen Überprüfung unterzogen. Die Gehäuse, die die Qualitätsanforderungen erfüllen, werden mit einem Code versehen und zurück in die Anlieferungsverpackungen gelegt, um an die externe Weiterverarbeitungsstelle gesendet zu werden.

Entlackung

Die Vorrichtungen zum Halt und Transport der zu beschichtenden Mobiltelefone werden während des Lackiervorgangs zwangsläufig mitlackiert. Nach jeder Lackierung müssen die Vorrichtungen wegen der hohen Qualitätsanforderungen entlackt werden. Bei der Firma Stoz wird eine chemische Heißentlackung mit alkalischen Entlackungsmitteln bei etwa 90 °C eingesetzt.

Werkzeugreinigung

In regelmäßigen Zeitabständen bzw. nach jedem Lackauftragsvorgang werden die Spritzpistolen sowie die Rohrleitungen für die Lackmaterialversorgung mit organischen Reinigungslösemitteln gespült, wodurch insbesondere die Härtung in Leitungen und Werkzeugen vermieden wird.

Um Lacküberschüsse zurückzugewinnen, leitet ein kontinuierlicher Luftstrom den Overspray über Lackabscheider. Roboter, die den Lackauftrag automatisiert kontrollieren, sparen Material ein.

5.1.2 Lackierung von Weich-PVC-Leisten

Bei den Weich-PVC-Leisten handelt es sich um Kunststoffleisten für die Automobilindustrie, die durch die Lackierung ausreichende Beständigkeit und Oberflächenqualität erhalten. Zwar sind Kunststoffe z.B. im Bezug auf Elastizität anderen Werkstoffen überlegen, weisen jedoch andererseits eine Reihe von Schwachstellen auf:

- die eingeschränkte Beständigkeit gegen mechanische oder thermische Belastungen sowie gegen aggressive Medien,

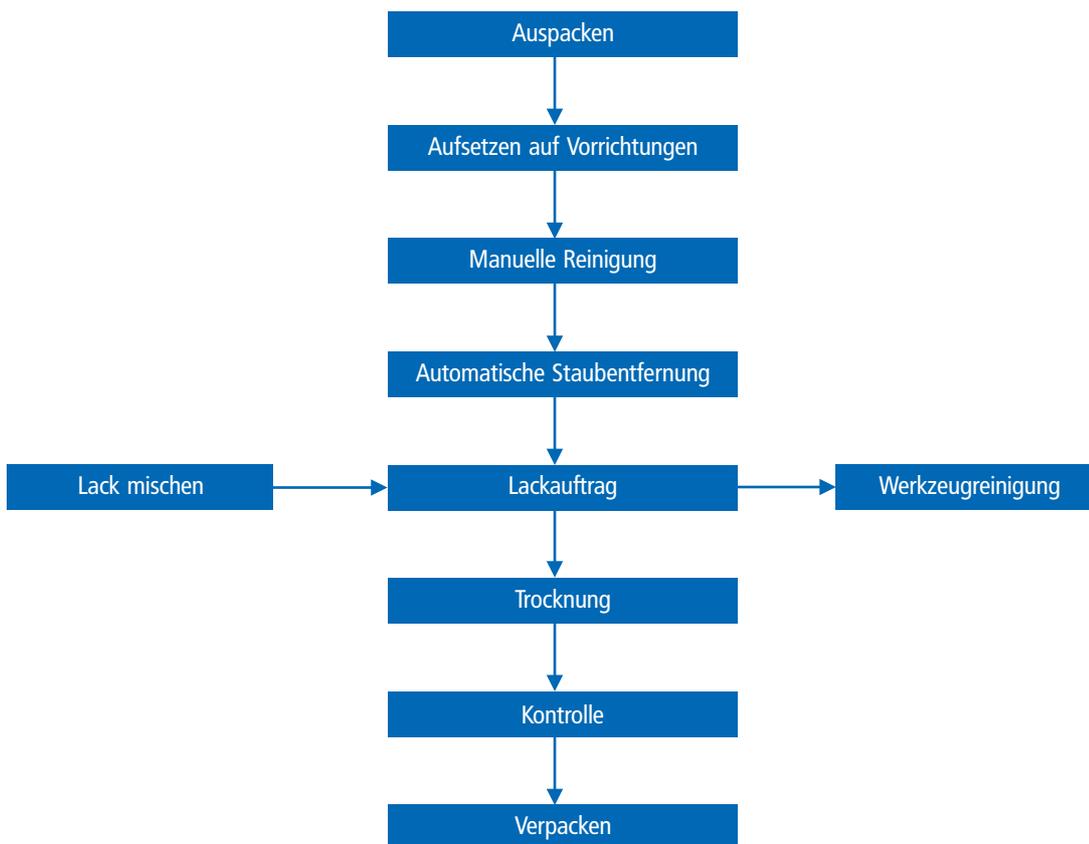
- die elektrische Nichtleiterfunktion der Werkstücke sowie
- erschwerte Bedingungen zur Farbgebung der Kunststoffoberflächen.

Deshalb erfordert die Beschichtung von Kunststoffwerkstücken oftmals den Einsatz spezieller Lacksysteme und Auftragsverfahren. Des Weiteren muss aufgrund der überwiegend komplexen Werkstückformen sowie der vom Auftraggeber vorgegebenen Qualitätsanforderungen eine

möglichst hohe Flexibilität des verarbeitenden Betriebs gewährleistet werden. Damit die Aufträge anforderungsgerecht ausgeführt werden können, wurde bei der Firma Stoz bisher manuell spritzlackiert. Aufgrund der geometrischen Form der Weich-PVC-Leisten bringt das Spritzlackierverfahren hohe Lackverluste durch Overspray mit sich:

In der Regel liegt der Wirkungsgrad des Lackauftrags nur bei 20 Prozent [ABAG 1994]. Diese Lackverluste stellen einen erheblichen Kostenfaktor dar und verursachen außerdem relevante Umweltbelastungen wie Lackkoagulat, das wiederum entsprechende Entsorgungskosten verursacht.

Abb. 5.4: Vereinfachter Prozessablauf bei der Lackierung von Weich-PVC-Leisten



In Abbildung 5.4 ist ein vereinfachter Prozessablauf der Lackierung von Weich-PVC-Leisten dargestellt, der im Folgenden näher beschrieben wird.

Auspacken und Vorrichten

Die Weich-PVC-Leisten werden bereits in einem vorbehandeltem Zustand an die Firma Stoz geliefert. Dort werden sie manuell ausgepackt und auf spezielle Vorrichtungen, die zur Beförderung durch die Lackieranlage dienen, aufgesetzt.

Lackierung

Für die Lackierung von einfachen Karosserieanbauteilen wird in der Regel eine einzige Decklack-schicht in mattschwarzem Farbton aufgetragen.

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Lack-systeme bezüglich Elastizität und Haftfestigkeit werden vorwiegend hochmolekulare Bindemittel bei der Lackformulierung eingesetzt. Der Lösemittelgehalt derartiger Systeme ist in der Regel hoch, da die Bindemittel nur mit relativ geringem Festkörpergehalt löslich sind [ABAG 1994]. Beim eingesetzten Lack handelt es sich um einen lösemittelhaltigen Zwei-Komponenten-Lack mit einem Festkörpergehalt von rund 40 Gewichtsprozent. Die Filmbildung erfolgt durch Mischung von Lack und Härter.

Damit die vom Auftraggeber geforderte Qualität der Beschichtung gewährleistet werden kann, muss die Kunststoffoberfläche vor der Lackierung von Fremdstoffen wie Schmutzpartikeln und

Fasern befreit werden. Zunächst werden die Weich-PVC-Leisten manuell mit einem Staubbindetuch gereinigt. Kurz vor dem Lackauftrag wird eine Druckluftreinigung des Untergrunds, ebenfalls manuell, vorgenommen.

Derzeit erfolgt die Lackierung von Weich-PVC-Leisten ohne Lackierroboter, der allerdings bereits bestellt wurde. Wegen der erfordernten Flexibilität werden konventionelle Spritzpistolen mit Druckluftzerstäubung eingesetzt. Wie für die Handy-Gehäuse wird die Spritzkabine durchgehend mit gereinigter, temperierter Frischluft (ca. 25 °C) von oben nach unten durchströmt. Der Overspray wird durch den kontinuierlichen Luftstrom nach unten in eine Einrichtung zur Overspray-Abscheidung geleitet.

Trocknung

Die Filmbildung erfolgt durch eine chemische Reaktion zwischen Stammlack und Härter. Neben dem bei Raumtemperatur ablaufenden Aushär-

tungsprozess erfolgt zusätzlich eine physikalische Trocknung, indem dem beschichteten Kunststoffteil Wärme in einem Trockner zugeführt wird. Die Trocknungstemperatur beträgt ca. 80 °C.

Optische Überprüfung und Verpackung

Nach der Trocknung wird die Beschichtung der Weich-PVC-Leisten optisch überprüft. Auf den Vorrichtungen werden beim Lackiervorgang kleine Metallplättchen mitlackiert, die eine Messung der aufgetragenen Schichtdicke ermöglichen. Schließlich werden die beschichteten Weich-PVC-Leisten verpackt und zum Automobilhersteller zurückgeschickt.

Werkzeugreinigung

In regelmäßigen Zeitabständen werden die Spritzpistolen mit Lösemitteln gereinigt.

5.1.3 Umweltbelastungen

Die nachstehend aufgeführten Umweltbelastungen sind für die betrachteten Lackierprozesse zu verzeichnen. Sie umfassen Lösemittel-Emissionen, Abwasseranfall und die Generierung von unterschiedlichen Abfällen (u.a. Lack- und Galvanikschlamm, verunreinigte Lösemittel).

Lösemittel-Emissionen

Bei den betrachteten Beschichtungsprozessen entstehen Lösemittel-Emissionen während des Applikations- und Trocknungsvorgangs des Lacks. Eine Abdunstung der Lösemittel aus dem Lack findet bereits beim Lackauftrag statt. Ungefähr 75 bis 90 Prozent der Lösemittel werden während der Lackapplikation und der Aushärtung bei Raumtemperatur emittiert, die restlichen zehn bis 25 Prozent werden durch den Trocknungsvorgang generiert. Diese Emissionsaufteilung hängt stark von der verwendeten Lösemittelart sowie von der Effizienz der eingesetzten Lackauftragsverfahren ab [US-EPA 1995, GAUDOSIO 1996]. Je höher der Lösemittelgehalt in der Lackzusammensetzung, desto bedeutender die Lösemittel-Emissionen.

Außerdem leistet die Verwendung von notwendigen Hilfsstoffen wie Verdünnungen und Lösemitteln zur Werkzeugreinigung einen Beitrag zu den Lösemittel-Emissionen in Lackieranlagen.

Abwasser

Die bei der Chromatierung bzw. Phosphatierung anfallenden Chrom(VI)-haltigen Abwässer werden mit geeigneten Chemikalien reduziert. Bei der Spritzlackierung entsteht Overspray, der in Spritzkabinen in Nasswäschern abgeschieden wird. Die zur Abluftreinigung notwendigen Wassermengen werden im Kreislauf geführt. Abgeschiedener Overspray und anfallende Lackschlämme müssen daher aus dem Umlaufwasser entfernt werden, um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten.

Bei Lacken auf Lösemittelbasis ist der Overspray in der Regel nicht wasserdispergierbar. Daher bildet er relativ schnell einen zusammenhängenden Koagulateppich, der leicht ausgetragen werden kann. Das Waschwasser der Spritzkabinen, das im Kreislauf geführt wird, wird nach Bedarf erneuert. Weiterhin fällt bei der Reinigung der Wärmeaustauscher der Spritzkabinenabluft Abwasser an. Das Abwasser wird bei der Firma Stoz einer Verdampfungsanlage zugeführt.

Galvanikschlamm

Die Chromatierung von Mobiltelefonen führt zu einer Reduzierung der Chrom(VI)-haltigen Lösung zu Chrom(III)-Verbindungen, die als Schlamm im Chromatierungsbad anfallen. Dieser Schlamm wird durch Absetzen oder Filtration abgetrennt. In der Abfallbilanz wird nicht zwischen Chromat- und Phosphatschlamm unterschieden: Beide werden gemeinsam als Galvanikschlamm beseitigt.

Lackkoagulate bzw. Lackschlamm aus der Overspray-Abscheidung

Bei Stoz erfolgen die betrachteten Lackierprozesse durch Spritzverfahren, wodurch in den jeweiligen Kabinen Lackverluste durch Overspray entstehen. Die Spritzkabinen sind mit Overspray-Nassabscheidern ausgerüstet. Bei der Nassabscheidung wird die mit Overspray beladene Kabinenluft in einem Nasswäscher von den Lackpartikeln befreit. Der Abscheidegrad beträgt 95 bis 99,9 Prozent. Das Waschwasser wird einem Klärbecken zugeleitet, in dem Lackpartikel und Wasser durch Zugabe von Koagulierungsmittel entklebt werden. Der Overspray fällt als Lackkoagulat oder -schlamm an. Lackkoagulat setzt sich aus Lackpartikeln, geringen Lösemittelmengen, Koagulierungsmitteln sowie Wasser zusammen. Sofern Lackkoagulate nicht als Reststoffe verwertet werden, gelten sie als besonders überwachungsbedürftige Abfälle [ABAG 1994].

Verunreinigte Lösemittel

Zur Reinigung von Spritzpistolen, Rohrleitungen für die Lackherleitung sowie sonstigen Werkzeugen zur Aufbereitung und Anwendung von Lack werden Lösemittel verwendet, die nach Gebrauch als verunreinigte Lösemittel anfallen. Dabei handelt es sich in der Regel um besonders überwachungsbedürftige Abfälle, die, sofern eine Verwertung z.B.

durch Destillation nicht möglich ist, in Sonderabfallverbrennungsanlagen zu entsorgen sind [ABAG 1994].

Bei der Firma Stoz werden die verunreinigten Lösemittel extern zu wiederverwendbaren Reinigungs Lösemitteln aufbereitet. Das rückgewonnene Lösemittel könnte innerhalb des Betriebs wieder eingesetzt werden, z.B. zur Werkzeugreinigung, jedoch wird dies wegen der hohen Qualitätsansprüche derzeit nicht durchgeführt.

Lackreste

Bei der Firma Stoz werden der Stammlack und der Härter erst kurz vor Eintritt in die Spritzpistole vermischt. Demzufolge entstehen keine Lackreste aus angemischten 2K-Systemen. Lack- und Härterreste entstehen jedoch in den Lack- und Härterbehältern. Leere Behälter mit Resten werden extern entsorgt, so dass für den Betrieb keine Lackresteentsorgung anfällt. Gelagerte Lacke müssen als besonders überwachungsbedürftige Abfälle entsorgt (z.B. in Abfallverbrennungsanlagen) oder wiederaufbereitet werden. Falls vollständig ausgehärtete Lacke (die keine Lösemittel mehr enthalten) zur Entsorgung gegeben werden müssen, können sie aufgrund ihrer Einstufung als nicht besonders überwachungsbedürftig als hausmüllähnlicher Gewerbeabfall entsorgt werden [ABAG 1994].

Rückstände aus der Verdampfungsanlage

Rückstände aus der Verdampfungsanlage werden zusammen mit dem in der Vorbehandlung anfallenden Galvanikschlamm entsorgt.

Entlackungsabfälle

Entlackungsabfälle entstehen hauptsächlich bei der Reinigung der durch Overspray verschmutzten Halte- und Transportvorrichtungen für die Mobiltelefone durch die Lackieranlage. Bei Stoz wird ein chemisches Entlackungsverfahren eingesetzt, das mit einem alkalischen Entlackungsmittel unter Zufuhr von Wärme wirkt. Als Abfall entsteht eine lackschlammhaltige Lauge, die dem Chrom(III)-haltigen Galvanikschlamm zugerechnet und dementsprechend außerbetrieblich thermisch verwertet wird.

Lackkoagulate, Lösemittelreste und lösemittelhaltige Lackreste gelten als besonders überwachungsbedürftige Abfälle und müssen entsprechend entsorgt werden. Chrom- und Phosphathaltige Schlämme und lackschlammhaltige Laugen werden der thermischen Verwertung zugeführt.

5.2 Beschreibung der Betriebsdatenstruktur

Für die Betriebsanalyse war eine umfassende Datenerhebung, insbesondere bezüglich der Stoff- und Energieströme, erforderlich. Zunächst wurden allgemeine Angaben zum Unternehmen (Mitarbeiteranzahl, Tätigkeitsschwerpunkte) und zur Auftragsstruktur (s. Abschnitt 4.2) erhoben. Weiterhin wurde die Abfolge der einzelnen Arbeitsschritte der ausgewählten Lackierungsprozesse analysiert. Für jeden Arbeitsschritt wurde anschließend die technologische Ausstattung (z.B. Spritzpistolen, Lackierkabine, Trockner) erfasst. Hierbei wurden auch die Funktionsweise, Leistungsfähigkeit und weitere zur Ableitung spezifischer Verbräuche notwendige Kenngrößen ermittelt, z.B. die Auftragswirkungsgrade der eingesetzten Verfahren (Roboter, manuell) oder auch die individuellen Verbräuche für die manuelle Bearbeitung der Aufträge.

Ermittlung der jährlichen Stoffströme

Für die Ermittlung der Jahresverbräuche der eingesetzten Stoffe und Hilfsmittel wurde auf die Lieferscheine und Rechnungen aus den Jahren 1999 und 2000 zurückgegriffen. Dabei fanden die Inventare am Anfang und am Ende des Jahres 1999 Berücksichtigung; jedoch kann der Unterschied dieser Lagerbestände vernachlässigt werden. Bei der Analyse der Stoff- und Energieströme galt es vorrangig die angefallenen Stoffe und Abfälle sowie deren Entsorgungswege zu ermitteln. Hierfür konnte auf den „Bericht zur Abfallbilanz und zum Abfallkonzept 1999“ der Firma Stoz zurückgegriffen werden, der in Anlehnung an §§ 19 und 20 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW-/AbfG) erstellt wurde. Zur Erstellung einer konsistenten Sachbilanz war die Umrechnung sämtlicher Stoffverbräuche in die Basiseinheit Kilogramm erforderlich. Zum Teil mussten deshalb die Dichten für die eingesetzten Lacke herangezogen werden, die aus den Produktmerkbüchern der Hersteller und den Arbeitsanweisungsbogen der Firma Stoz entnommen werden konnten. Zur Ergänzung der Angaben wurden Rückfragen bei den Betreibern der Anlagen und bei Mitarbeitern vorgenommen sowie verschiedene Teile vor Ort gewogen bzw. gemessen. Der Betrieb hat in diesem Zusammenhang eine

Reihe von Messungen durchführen lassen. Zur Vervollständigung des Datensatzes wurden auch Verpackungen und Vorrichtungen erfasst.

Ermittlung der jährlichen Energieströme

Die Ermittlung der jährlichen Energieströme stellte eine schwierige Aufgabe dar, weil die Energieverbräuche weder für jeden einzelnen Prozessschritt, noch für jeden Prozess im Betrieb erfasst werden. Zum einen wird aus Sicht des Betriebs der Kostenaufwand für Strom und Wärme im Vergleich zu den Lackkosten als vernachlässigbar betrachtet (prozentuales Verhältnis von ca. zehn zu 90). Zum anderen sind die Energieaufwendungen für die einzelnen Prozessschritte nur schwer zu ermitteln. Sogar in großen Betrieben sind systembezogene Stromzähler in der Regel selten zu finden. Deshalb wird z.B. für die Erfassung des Energiebedarfs in einer Lackierkabine auf Werte aus der Literatur (vgl. [HOFFMANN 1999]) zurückgegriffen. Zur Erstellung einer konsistenten Energiebilanz muss die Umrechnung sämtlicher Energieverbräuche in die Basiseinheit Kilojoule erfolgen.

Erfahrung aus der Ermittlung der Stoff- und Energieströme

Die Datenerhebung war insgesamt mit einem hohen Arbeitsaufwand und somit einer deutlichen Zeitbelastung für den Betrieb, insbesondere für den Umwelt- und Arbeitssicherheitsbeauftragten, verbunden. Die für die Erstellung eines Energie- und Stoffstrommanagementmodells notwendigen Daten waren nicht vollständig dokumentiert, da diese Art von Daten für den reibungslosen Betrieb bisher nicht erforderlich waren. Die Erfassung des detaillierten Energieverbrauchs (Heizölverbrauch für das Blockheizkraftwerk) oder des Verbrauchs von Hilfsstoffen (z.B. flüssiger Stickstoff) wurde als vergleichsweise wenig wichtig eingestuft (insgesamt ein Verhältnis von ca. fünf zu acht). Für die für den Betrieb als relevant eingestuft Daten (z.B. Lackverbräuche) verfügte Stoz jedoch über eine gute bzw. ausgezeichnete Dokumentation, zum Teil EDV-gestützt.

Der Jahresverbrauch von Prozess- und Hilfsmitteln lässt sich anhand von Lieferscheinen und Rechnungen verfolgen. Abfallmengen können der Abfallbilanz entnommen werden. Energieströme zu erfassen stellt sich oft schwieriger dar. Hier empfiehlt es sich, auf Literaturwerte zurückzugreifen.

Vergleiche, Überprüfungen oder Ergänzungen von mangelhaften Daten konnten in dieser Studie nicht vorgenommen werden, weil keine Erfahrungen aus bereits vorhandenen gleichartigen oder in der Literatur dokumentierten Studien vorlagen. Aufgrund der Vielfalt der Aufträge bei der Lohnlackierung ist die Erfassung von Verbrauchsdaten für einzelne Prozessschritte bzw. einzelne Produkte oder Aufträge oftmals zusätzlich erschwert. Beispielsweise werden die Vorbehandlungsbäder bei Stoz für verschiedene Produkte verwendet. Die Spülbecken (vollentsalztes Wasser) werden für sämtliche Galvanikprozesse genutzt, sowohl bei der Chromatierung wie auch bei der Phosphatierung. Eine genaue mengenmäßige Zuordnung

einzelner Materialien, Stoffe und vor allem der Energieverbräuche war daher zumindest für die Vorbehandlung nur teilweise möglich. Allerdings konnte eine annähernde Zuordnung dann getroffen werden, wenn die Auslastung (eines Bades oder einer Anlage durch ein Produkt) geschätzt wurde. Da die Auslastung, bedingt durch die erforderliche Flexibilität der Lohnlackierbetriebe, über ein ganzes Jahr nicht konstant ist, wurde hierfür auf die Erfahrungen der Mitarbeiter zurückgegriffen. Derartige Abgrenzungs- und Zuordnungsprobleme werden in der Literatur (vgl. z.B. [AZAPAGIC 2000]) sowie in der ISO 14041 (Ökobilanz – Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz) angesprochen.

5.3 Beschreibung der Kostenstruktur

Die spezifischen Preise und Entsorgungskosten wurden von der Firma Stoz angegeben und stammen überwiegend aus Lieferantenrechnungen und Gebührensätzen (z.B. Abwassergebühr). Die Preise

(inkl. Heizöl) beziehen sich somit auf die Materialien, die bei Stoz im Einsatz sind. Anhang II stellt die wesentlichen Kostendaten der untersuchten Prozesse im Referenzbetrieb zusammen.

5.4 Beschreibung der Vorgehensweise beim Modellaufbau: Grundlagen und Modellierung der Prozesse

Nachfolgend wird auf den Aufbau des zu entwickelnden Modells zur Gestaltung betrieblicher Stoff- und Energieströme näher eingegangen. Die Modellierung der Stoffstromnetze, die den

ausgewählten Prozessen der Lackierung von Mobiltelefon-Gehäusen und Weich-PVC-Leisten entsprechen, wurde mit der Software UMBERTO® durchgeführt.

5.4.1 Modellabgrenzung

In der vorliegenden Studie wurden ausschließlich die Stoff- und Energieströme für die Prozesse der Mobiltelefon-Lackierung und der Lackierung von Weich-PVC-Leisten sowie für die entsprechenden notwendigen Vor- und Nachbehandlungen betrachtet. Der ausgewählte Detaillierungsgrad gewährleistete, dass bei der Auswertung zwischen

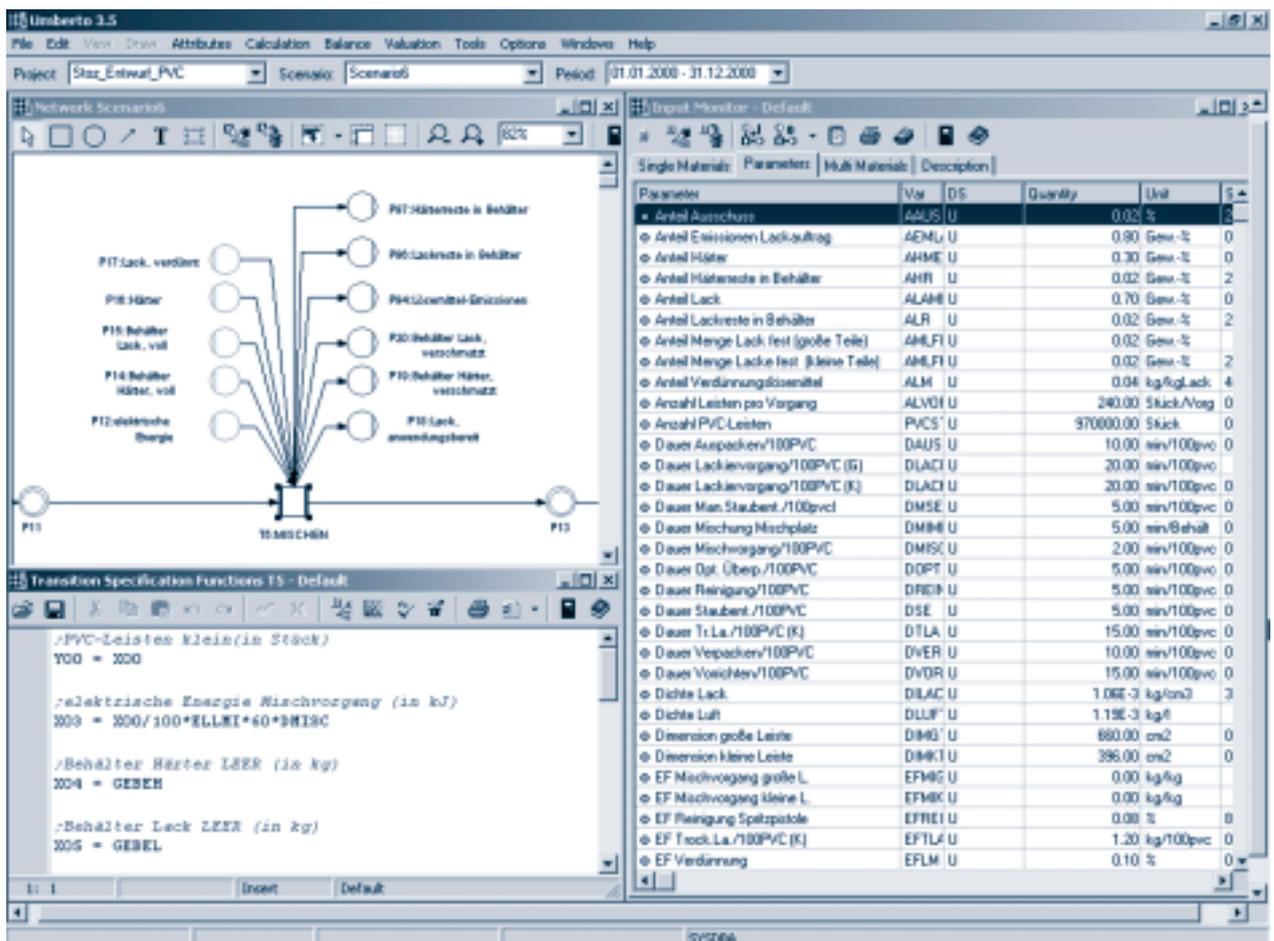
den relevanten Stoffen und Energien sowie den Entstehungsorten von Emissionen und Abfällen unterschieden werden konnte, wobei eine relativ genaue Erfassung der Ströme möglich war.

5.4.2 Computergestützte Darstellung der betrieblichen Energie- und Stoffströme

In Abbildung 5.5 sind beispielhaft für den Prozessschritt „Lackauftrag auf Weich-PVC-Leisten“ die eingehenden und ausgehenden Stoff- und Energieströme (links oben), die entsprechend definierten Parameter (rechts) und die mathematische Dar-

stellung der Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsstoffen bzw. -energien (links unten) aufgeführt. Diese Darstellung erfolgte in der Software UMBERTO®.

Abb. 5.5: Darstellung der Input- und Outputströme in UMBERTO® 3.5



Dieses computergestützte Instrument ermöglicht insbesondere [BLÜMEL 2000] die:

- Unterscheidung unterschiedlicher Prozesse und Prozessschritte,
- Verdeutlichung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Arbeitsschritten durch eine anschauliche Darstellung,
- flexible Festlegung der Bilanzgrenzen zur Analyse einzelner Prozessschritte,
- transparente Durchführung der Berechnungen,
- Verwaltung einer Vielzahl von Parametern,
- Aktualisierung der Prozesse bei Produkt- und Prozessentwicklungen.

5.4.3 Systematische Erfassung und Berechnung der betrieblichen Energie- und Stoffströme

Für die ausgewählten Prozesse wurden für jeden Prozessschritt die eingehenden und ausgehenden Stoff- und Energieflüsse sowie deren teilebezogene Verbrauchswerte¹⁰⁾ (in Abhängigkeit von der Anzahl lackierter Mobiltelefone bzw. Weich-PVC-Leisten) erfasst. Darüber hinaus wurden auch Arbeits- und Prozesszeit berücksichtigt.

In Anhang I sind die Prozessdaten für die ausgewählten Prozesse im Referenzbetrieb Stoz Oberflächentechnik GmbH & Co. KG dokumentiert.

Das ermittelte Verhältnis der eingehenden zu den ausgehenden Stoff- und Energieflüssen wurde in Form von mathematischen Gleichungen definiert. Bei der Formulierung dieser Zusammenhänge wurden etwa 150 Parameter für die Lackierung von Mobiltelefonen und 90 Parameter für die Lackierung von Weich-PVC-Leisten berücksichtigt (s. Anhang I). Zu solchen Parametern zählen z.B. Lackverbräuche, Prozesszeiten, Mischungsverhältnisse und Auftragswirkungsgrade.

Ausgehend von den ermittelten Stoff- und Energieströmen werden für festgelegte Zeitabstände (z.B. ein Jahr) Bilanzen der Eingangs- und Ausgangsströme erstellt. Abbildung 5.6 zeigt eine derartige Stoff- und Energiebilanz für einen ausgewählten Prozess, die mit UMBERTO® erstellt wurde.

Jedem Eingangs- bzw. Ausgangsmaterial entspricht eine Verbrauchs- bzw. Anfallmenge. Das Modell ermöglicht die Aufteilung der Verbrauchs- und Anfallmenge je nach festgelegtem Detaillierungsgrad. Auf der Inputseite z.B. wird zwischen Stammlack und dazugehörigen Zusatzmaterialien wie Härtern und Verdünnung unterschieden. Auf der Outputseite kann zwischen unterschiedlichen Abfällen wie Lackschlamm und Galvanikschlamm differenziert werden. Für jedes Material können Menge und Entstehungsort ausgewiesen werden.

Durch die systematische Erfassung der Stoffflüsse kann das Modell über mathematische Verknüpfungen In- und Outputbilanzen je nach festgelegtem Detaillierungsgrad erstellen.

Abb. 5.6: Darstellung der Stoff- und Energiebilanz für einen ausgewählten Prozess in UMBERTO® 3.5

Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
Input			Output		
Elektrische Energie (Strom)	2.627.088,0	kJ	Lackierung		
Chemische Energie	1.294.742,9	kJ	Lack		
Einbaubergmaterial			Lack, verdünnt	19389,62	kg
Staubkuchen	0,39	kg	Lack, verwendungslos	25298,85	kg
Lackierung			Verpackungen		
Härter			Verpackung	183821,05	kg
Härter	7729,15	kg	Abfall		
Lack			Besondere Überwachung		
Lack, verdünnt	18004,48	kg	Reinigungsflüssigkeit, ne	7467,08	kg
Lack, Lieferzustand	11737,80	kg	Gewinnabfall		
Lack, verwendungslos	1.27408,10	kg	verbrauchtes Material		
Lackverdünnung			verbrauchte Staubk	0,39	kg
Lackverdünnung	794,80	kg	Lackabfall, fest		
Luft			Härterreste, Milchpaste	161,95	kg
Druckluft	88264,22	kg	Lackabfall, fest	7.629289,02	kg
Kabinenzuluf	6.8629,7	kg	Lackreste, Milchpaste	253,62	kg
Material, gereinigt			verschmutztes Material		
Behälter Härter, voll	3,21	kg	Behälter Härter, versch	3,21	kg
Behälter Lack, voll	3,21	kg	Behälter Lack, versch	3,21	kg
Spitzpaste, gereinigt	2,81	kg	Spitzpaste, verschmut	2,81	kg
Verpackungen, entleert	25298,85	kg	Reinigungsflüssigkeit		
Reinigungsflüssigkeit			Reinigungsflüssigkeit, neu	8185,48	kg
Verpackungen			Verpackungen		
Verpackung	22734,35	kg	Verpackung	22734,35	kg
Verpackung	22734,35	kg	Wasser		
Wasser			Wasser	37080,80	kg
Wasser	37080,80	kg			
Sum			Sum		
kJ	1.407.908,9	kJ	kg	8.295.327,8	kg
kg	1.298.528,10	kg			

¹⁰⁾ Da diese Verbrauchswerte für ein einzelnes Handy-Gehäuse oder eine einzelne Weich-PVC-Leiste einen sehr geringen Wert darstellen, werden die teilebezogenen Verbrauchswerte in Abhängigkeit von 1.000 beschichteten Mobiltelefonen bzw. 100 Weich-PVC-Leisten erfasst.

Um Stoff- und Energieströme unter ökonomischen Gesichtspunkten zu bewerten, empfiehlt sich eine Flusskostenrechnung. Sie bezieht neben Material- und Entsorgungskosten auch Personalkosten der Verwaltung mit ein.

5.4.4 Ermittlung der Kosten

Die flussbezogene Darstellung des Modells findet ebenfalls bei der Ermittlung der Kosten Anwendung: Ausgehend von den ermittelten Stoff- und Energieflussmengen erfolgt eine monetäre Bewertung, die in [LFU 1999] als Flusskostenrechnung bezeichnet wird. Die Flusskostenrechnung unterscheidet die nachfolgenden Kostenarten: Material-, Entsorgungs- und Bearbeitungskosten. Die Kostenermittlung erfolgt durch eine Multiplikation der Flussmenge mit dem Material- bzw. Entsorgungspreis pro Mengeneinheit. Hinsichtlich der Bearbeitungskosten muss weiterhin in physische und dispositive Bearbeitungskosten unterschieden werden. Dabei entsprechen die physischen Bearbeitungskosten den Aufwendungen, die direkt am Material- bzw. Energiefluss entstehen, z.B. für den Transport; im Wesentlichen handelt es sich um

Kosten für Anlagen und Personal. Die dispositiven Bearbeitungskosten umfassen beispielsweise Personalkosten der Verwaltung.

Diese Vorgehensweise nähert sich dem Ansatz zur Kostenermittlung, der in der VDI-Richtlinie 3800 [VDI 3800] beschrieben wird. Jedoch erfolgt die Kostenermittlung in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3800 auf disaggregierter Ebene. Die Richtlinie verfolgt den Ansatz, dass diejenigen Kosten berücksichtigt werden, die durch den Einsatz von Maßnahmen zur Vermeidung oder Minderung von Umweltbelastungen verursacht werden. Die jahresbezogenen Kosten für eine gegebene oder zu installierende Emissionsminderungsmaßnahme können nach folgender Gleichung geschätzt werden:

$$K = \sum_{j \in J} a_j \cdot (I - \Delta I_j) + \sum_{i \in I} \dot{m}_i \cdot p_i + \sum_{l \in L} A_l \cdot p_l + \sum_{n \in N} S_n + \sum_{q \in Q} F_q - \sum_{u \in U} |E_u|$$

K = Jährliche Kosten [DM/a]

I = Investition [DM]

a_j = Prozentsatz für die Ermittlung der investitionsabhängigen Kostenarten
 $j \in J$ (wie Abschreibungen usw.) [1/a]

ΔI_j = Hinzurechnungen und/oder Kürzungen der Investition I bei der Bestimmung der Kostenart $j \in J$ [DM]

\dot{m}_i = Technische Verbrauchsmenge der Sorte $i \in I$ [ME/a]

p_i = Zur Verbrauchsmenge i gehörender Verrechnungspreis [DM/ME]

A_l = Personalbedarf der Art $l \in L$ [Beschäftigte]

p_l = Dem Personalbedarf A_l zugeordnete Personalkosten [DM/a und Beschäftigtem]

S_n = Sonstige Kosten: in den übrigen Termini nicht erfasste Kosten, deren anderweitige Zuordnung nicht sinnvoll bzw. nicht üblich ist, z.B. Gemeinkosten(-anteile), Kosten für mess- und sicherheitstechnische Überwachungen usw. [DM/a]

F_q = Folgekosten, z.B. Änderungen der Erlöse des (eigentlichen) Produktionsprozesses (z.B. wegen Änderungen der Produktqualität des Produktspektrums wie bei quantitativen Verschiebungen bei Kuppelproduktion oder der Verfügbarkeit der produzierten Menge) sowie Änderungen der Kosten des Produktionsprozesses (z.B. wegen Änderung von Wirkungsgraden, Ausbeuten, Rohstoffeinsätzen) [DM/a]

E_u = Verkaufserlöse für Produkte aus Emissionsminderungsanlagen, gekürzt um (direkte) Vertriebskosten [DM/a]

Gerade die Berücksichtigung von Folgekosten und Verkaufserlösen ist bei lackverarbeitenden Betrieben von Bedeutung. Bei einer Umstellung von konventionellen lösemittelhaltigen Lacksystemen auf wasserverdünnbare Lacksysteme, müssen auch die Kosten, die in anderen Teilen eines Betriebs oder einer Anlage anfallen, wenn beispielsweise dadurch die Anschaffung eines neuen Trockners notwendig ist, mit einbezogen werden. Wird aber z.B. eine Adsorption auf Aktivkohle als Abgasreinigungsverfahren eingesetzt, können Lösemittel rückgewonnen werden. Damit sind Einsparungen durch den Verkauf der rückgewonnenen Lösemittel zu erwarten.

Wegen ihres niedrigen Beitrags zu den Gesamtkosten und ihres geringen Optimierungspotenzials

bezüglich des jeweiligen Verbrauchs können für die untersuchten Prozesse der Mobiltelefon-Lackierung und der Lackierung von Weich-PVC-Leisten folgende Kostenanteile vernachlässigt werden: Verpackungen, Vorrichtungen, Staubtücher, Trinkwasser, Heizöl. Die meisten Kosten entstehen durch:

- den Stammlack,
- den Härter,
- das Verdünnungs- und Reinigungsmittel,
- die Entsorgung des Reinigungslösemittels und des Lackschlammes.

5.5 Ermittlung möglicher Verfahrensalternativen

Insbesondere für den Lackiervorgang können Lackierbetriebe auf zahlreiche prozessintegrierte Maßnahmen zurückgreifen. Grundsätzlich umfassen integrierte Umweltschutzmaßnahmen bei der Lackierung von Kunststoff- und Aluminiumteilen:

- den Einsatz von lösemittelarmen bzw. -freien Lacken (entweder durch Festkörperanreicherung oder Lösemittlersatz),
- die Verbesserung des Auftragswirkungsgrads,

- die Rückgewinnung von Lackoverspray,
- die Verwertung von Lackkoagulat.

In kleinen und mittleren Betrieben der Lohnlackierung gewinnen die integrierten Maßnahmen zunehmend an Bedeutung. Der Betrieb nachgeschalteter Technologien zur Reinigung der schadstoffbeladenen Abgase findet wegen der hohen Betriebskosten jedoch nur begrenzten Einsatz: solche Maßnahmen sind für kleine und mittlere Unternehmen schlicht unwirtschaftlich.

5.5.1 Einsatz lösemittelarmer bzw. -freier Lacke

Vom Auftraggeber werden genau definierte Anforderungen an die Lackierung gestellt. Die Lackschicht muss eine feste Verbindung zum Untergrund, eine hohe innere Festigkeit bei guter Flexibilität und gutem Widerstand gegen mechanische Beanspruchungen, ein zuverlässiges Einbinden der funktionellen Pigmente und eine langjährige Beständigkeit bei Einwirkung von Temperaturschwankungen, Feuchtigkeit und Chemikalien aufweisen [BLÜMEL 2000, BABLICK 1997]. Bei der Entwicklung eines Lacks wird eine zeitintensive Prüfung unter extremen Klimabedingungen durchgeführt (der so genannte Florida-Test, der bis zu zehnjährige Untersuchungen erfordern kann). Für den Ersatz von Lack würde wegen der Qualitätsanforderungen an die Beständigkeit ein derartiger

Test nochmals erforderlich sein: Der damit verbundene Zeit- und Kostenaufwand ist allerdings für einen Lohnlackierbetrieb nicht zu leisten.

Für die Lackierung von Kunststoffteilen ist die Auswahl eines geeigneten Lacksystems entscheidend. Daher bedarf es der Untersuchung folgender beschichtungsrelevanter Eigenschaften des Kunststoffes [ABAG 1994]:

- Kunststoffart (chemischer Aufbau, Molekulargewicht),
- Molekularaufbau (Thermoplaste, Elastomere, Duromere),

Um die Qualität eines Lacks zu testen, wird dieser über mehrere Jahre extremen Witterungsbedingungen ausgesetzt. Derart strenge Prüfkriterien erschweren den Einsatz alternativer Materialien.

- zugemischte Bestandteile (Füllstoffe, Weichmacher),
- Zustandsform (kompakt, geschäumt),
- Oberflächenbeschaffenheit (geschlossen, offenporig),
- physikalische Eigenschaften (Lösemittel- und Temperaturbeständigkeit, elektrische Leitfähigkeit),
- mechanische Eigenschaften (weich, hart).

Pulverlackssysteme

Die Beschichtung von Kunststoffen in Pulverlacksystemen wird derzeit nur selten durchgeführt; es liegen nur wenige Erfahrungen in der Serienanwendung vor. Aufgrund der geringeren Wärmebelastbarkeit von Kunststoffen gegenüber anderen Substraten ist die Anwendung von konventionellen Pulverlacksystemen durch die hohen Einbrenntemperaturen eingeschränkt. Der zukünftige Einsatz von Pulverlacken für die Beschichtung von Kunststoffen ist deshalb stark von den Entwicklungen und Forschungen der Lack- und Rohstoffhersteller abhängig.

Für andere Substrate, z.B. Metalloberflächen, ist die Pulverbeschichtung technisch möglich. Zur Auswahl eines geeigneten Lacksystems auf Pulverbasis für die Beschichtung von Mobiltelefonen aus Aluminium müsste die Entwicklung in Kooperation mit einem Lackhersteller erfolgen. Der Einsatz der Pulverbeschichtung ist mit dem Auftraggeber abzustimmen.

5.5.2 Verbesserung des Auftragswirkungsgrads

Eine Alternative zu Verwendung lösemittelarmer Lacke bietet der Einsatz von Auftragstechnologien, die einen sparsameren Umgang mit lösemittelhaltigen Produkten ermöglichen. Hierbei stellt die Form der Objekte den einschränkenden Faktor dar.

Lacksysteme auf Wasserbasis

Im Kunststoffbeschichtungssektor werden derzeit bereits umfassend Lacksysteme auf Wasserbasis eingesetzt. Neben einer erheblichen Minderung der Lösemittel-Emissionen erleichtern solche Systeme die Rückgewinnung von Lackoverspray (vgl. [ABAG 1993]) und den Einsatz von elektrostatischen Verfahren. Aus Qualitätsgründen und wegen noch nicht abgeschlossener Prüfungen geben die Auftraggeber den Lohnlackierbetrieben jedoch die genaue Zusammensetzung des zu verwendenden meist konventionell lösemittelhaltigen Lacks wie auch die entsprechende Arbeitsweise strikt vor.

Aufgrund der bereits zahlreich vorhandenen Anwendungen von Wasserlacken für unterschiedliche Substrate (s. z.B. [DIETZ 1999]) ist der Einsatz von Lacksystemen auf Wasserbasis auch bei der Lackierung von Handy-Gehäusen aus Aluminium möglich. Jedoch sollte die Auswahl eines geeigneten Wasserlacksystems in Kooperation mit dem Auftraggeber und gegebenenfalls einem Lackhersteller stattfinden.

Beim Einsatz von wasserbasierenden Lacken können Auftragsgeräte (z.B. Spritzpistolen) mit Wasser unter Zusatz eines wässrigen Mittels gereinigt werden. Das Reinigungswasser kann anschließend mit einem Koagulieremittel versetzt werden, um eine Ausflockung der Lackpartikel zu bewirken. Dadurch werden sowohl die Lösemittel-Emissionen als auch die Menge an verschmutzten Reinigungslösemitteln und damit an Lackresten verringert [BLÜMEL 2000].

Bei der Lackierung von Kunststoffteilen wird weitestgehend das Spritzverfahren mit Druckluftzerstäubung (Hochdruck) eingesetzt. In der Literatur [HOFFMANN 1999, REITER 1999] werden Overspray-Raten zwischen 60 und 80 Prozent – abhängig von der Teilegeometrie – verzeichnet.

Pulverlackbeschichtung und Lacksysteme auf Wasserbasis sind besonders umweltverträglich, da sie den Bedarf an Lösemitteln deutlich senken.

Alternativen zum Hochdruckverfahren umfassen:

- die Druckluftzerstäubung im Niederdruckverfahren (High Volume Low Pressure, HVLP), die Auftragswirkungsgrade zwischen 25 und 50 Prozent gewährleistet, und
- elektrostatische Hochrotationsglocken mit ähnlichen Auftragswirkungsgraden wie beim

HVLP, die ebenfalls nennenswerte Lacksparungen ermöglichen.

Jedoch werden elektrostatische Spritzapplikationen bisher nur bei Mehrschichtaufbauten eingesetzt, da nur eine leitfähige Grundierung das elektrostatische Verfahren ermöglicht.

5.5.3 Rückgewinnung von Lackoverspray

Bei beiden untersuchten Beschichtungsprozessen werden Zwei-Komponenten-Lacksysteme eingesetzt. Bislang liegen noch keine positiven Erfahrungen in Bezug auf die Rückgewinnung von

Overspray in 2K-Lacksystemen vor. Auch eine anschließende Verwertung von Lackkoagulaten ist somit derzeit nicht möglich.

5.5.4 Abluftreinigungsverfahren

In der Vergangenheit wurden im gesamten Bereich der industriellen Lackierung die Lacktrockner überwiegend mit thermischen Nachverbrennungsanlagen ausgerüstet. Aufgrund der für Lackierkabinen typischen großen Abluftvolumenströme und niedrigen Schadstoffbeladungen wurden bislang Lacksubstitutions- und Auftragsumstellungsmaßnahmen gegenüber End-of-Pipe-Maßnahmen bevorzugt (vgl. [MAV 1999]). Technisch mögliche, wenn auch zum Teil wirtschaftlich nicht sinnvolle Abluftreinigungsverfahren werden nachfolgend kurz beschrieben.

Thermische und katalytische Nachverbrennungsverfahren

Ein Abluftreinigungsverfahren im Zusammenhang mit einer Möglichkeit zur Energieeinsparung stellt die thermische Nachverbrennung für den Lacktrockner dar (vgl. [ABAG 1994]). Eine thermische Nachverbrennungsanlage besteht aus einer Brennkammer und einem direkt nachgeschalteten Wärmetauscher. In der Brennkammer wird die schadstoffbeladene Abluft unter definierten Bedingungen für Temperatur, Verweilzeit, Sauerstoffgehalt und Zusatzbrennstoff auf ca. 700 bis

800 °C erwärmt. Die organischen Verbindungen werden in Wasser und CO₂ umgewandelt. Ein bedeutender Vorteil derartiger Verfahren ist die Möglichkeit zur Energierückgewinnung, die einen kostengünstigen Betrieb der Abluftreinigungsanlage zulässt. Für die rückgewonnene Energie ist z.B. folgende Verwendung möglich:

- Vorwärmung der Abluft,
- direkte Zuführung gereinigter Abluft in den Trockner,
- indirekte Beheizung der Trocknerfrischluft,
- Erzeugung von Dampf,
- Beheizung von Warmwasseranlagen.

Derzeit sind keine Daten über die Implementierung von Nachverbrennungsanlagen in Betrieben der industriellen Lohnlackierung verfügbar. Es darf jedoch vermutet werden, dass in diesen Betrieben sowohl in Lacktrocknern als auch in Lackierkabinen thermische oder katalytische¹¹⁾ Nachverbrennungsanlagen bisher nur selten eingesetzt werden.

Die Reinigung der Abluft durch thermische Behandlung empfiehlt sich dann, wenn die Verbrennungsanlagen mit Wärmeaustauschern ausgerüstet sind. Dadurch lässt sich ein Großteil der eingesetzten Energie zurückgewinnen.

¹¹⁾ Die katalytische Nachverbrennung erfolgt durch einen Katalysator bei Temperaturen zwischen 200 und 400 °C.

Durch Reinigung der Abluft mittels Adsorptionsverfahren können Lösemittel zurückgewonnen werden. Der Vorteil biologischer Verfahren besteht in der rückstandsfreien Entsorgung organischer Verbindungen.

Adsorptionsverfahren

Beim Adsorptionsverfahren werden die Verbindungen selektiv aus dem Abgasstrom auf der aktiven Fläche eines Festkörpers (weitestgehend Aktivkohle) aufgenommen. Das Adsorptionsverfahren besteht aus mehreren Schritten: Adsorption, Desorption, Trocknung, Kühlung. Sowohl die adsorbierten Substanzen wie auch der Adsorbent können nach der Desorption wieder verwendet werden. Die Adsorption ist besonders effizient bei großen Abgasvolumenströmen mit niedrigen NMVOC-Konzentrationen (wie man sie in der Lackierung üblicherweise vorfindet), die nicht durch Abscheideverfahren wie thermische oder katalytische Nachverbrennung behandelt werden können. Die Adsorption ermöglicht eine anschließende Rückgewinnung der verwertbaren Lösemittel oder eine Nachverbrennung mit Wärmerückgewinnung.

Aufgrund seiner hohen Flexibilität ist das Adsorptionsverfahren bereits eine etablierte Technologie zur Abscheidung und Rückgewinnung von Lösemitteln. Wie weit diese Technologie in Betrieben der Lohnlackierung derzeit verbreitet ist, ist jedoch nicht bekannt. Hier kann vermutet werden, dass aus Kostengründen Adsorptionsverfahren nicht implementiert werden.

Biologische Verfahren

Biologische Verfahren (Biofiltration, Biowäscher) wurden ursprünglich zur Reduzierung von Ge-

ruchsbelastungen eingesetzt. Aufgrund der relativ niedrigen Schadstoffbelastungen der zu reinigenden Abluft aus Lackieranlagen sind biologische Verfahren hier besonders geeignet (vgl. [MAY 1999]). Während die Biofiltration in zwei gleichzeitig ablaufenden Schritten erfolgt, umfasst der Biowäscher zwei getrennte Schritte: die Sorption der Schadstoffe auf eine Trägeroberfläche und die Zerstörung der Schadstoffe durch Mikroorganismen.

Wegen der Empfindlichkeit der Mikroorganismen sind biologische Abgasreinigungsverfahren im Gegensatz zu anderen Abscheideverfahren unflexible Systeme hinsichtlich längerer Stillstandzeiten: Voraussetzungen für einen konstanten Betrieb sind die Mindestfeuchte des Trägermaterials (z.B. Humus, Torf) und die Begrenzung der thermischen Belastung. Diese Anforderungen können in der industriellen jedoch nicht immer gewährleistet werden. Als Vorteil ist aber zu nennen, dass weder sekundäre Verschmutzungen noch Abwasserprobleme auftreten und deshalb auf das Nachschalten von weiteren Abgasreinigungstechnologien sowie auf eine Abfallbeseitigung verzichtet werden kann. Derzeit unterliegen biologische NMVOC-Abscheideverfahren intensiver Forschung: Daher wird erwartet, dass in Zukunft ihre Bedeutung zunimmt. Gegenwärtig liegen allerdings noch keine Daten zum Einsatz biologischer Abgasreinigungsverfahren in den Betrieben der Lohnlackierung vor.

5.6 Bewertung der Alternativen unter Berücksichtigung von technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekten

5.6.1 Szenarienbildung für die Lackierung von Mobiltelefonen

Aus der durchgeführten Betriebsanalyse ergibt sich, dass für die Lackierung von Mobiltelefon-Gehäusen folgende Prozessschritte Umweltauswirkungen haben:

- die Vorbehandlung,
- die Verdünnung des Lacks am Mischplatz,
- der Lackauftrag,

- der Trocknungsvorgang,
- die Reinigung der Spritzpistolen,
- die Entlackung der Vorrichtungen.

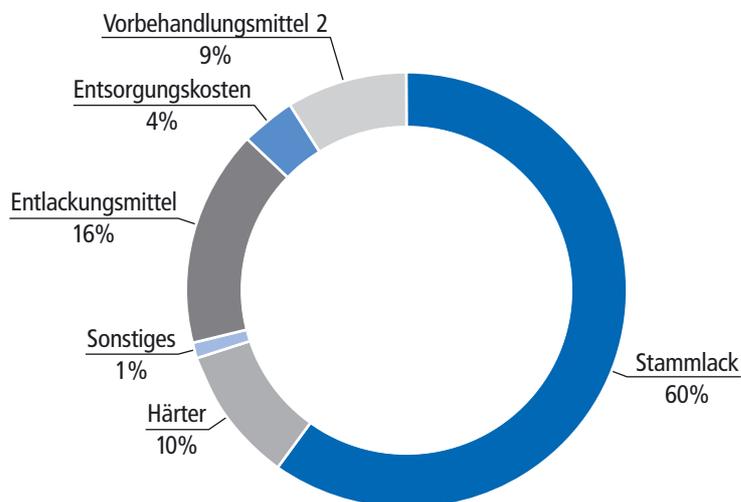
Als relevanteste Umweltbelastungen sind der Anfall von Galvanik- und Lackschlamm sowie Lösemittel-Emissionen zu nennen. Lösemittel-Emissionen, die durch das Mischen von Lack und Härter in der Spritzkabine entstehen, sind jedoch vernachlässigbar, da die Behälter bis auf wenige Sekunden, in denen die Lackversorgungsleitungen angebracht werden, durchgehend geschlossen sind.

Um eine Bewertung der Alternativen unter umweltbezogenen und wirtschaftlichen Aspekten zu ermöglichen, werden acht Szenarien definiert und mit der Ausgangssituation im Betrieb (Referenzszenario) verglichen. Dazu wird das in Kapitel 4 erarbeitete Betriebsmodell herangezogen. Durch den Einsatz der Software UMBERTO® können nun die untersuchten Szenarien abgebildet und miteinander verglichen werden. Im Folgenden werden die Szenarien vorgestellt und die wesentlichen Ergebnisse diskutiert. Die ausführlichen Ergebnisse der Energie- und Stoffflussanalyse für die Firma Stoz sind in den Anhängen zusammengestellt.

Szenario 0

Das Referenzszenario (Szenario 0) entspricht dem in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Ist-Zustand. Für die Beschichtung von einer Million Handy-Gehäusen werden ca. 4.300 Kilogramm Lösemittel emittiert und es fallen etwa 3,7 Tonnen Lackschlamm, drei Tonnen Galvanikschlamm und eine Tonne Entlackungsschlamm an. Die entsprechenden Betriebskosten betragen etwa 200.000 DM. Eine detaillierte Kostenaufteilung für das Referenzszenario ist in Anhang III aufgeführt; Abbildung 5.7 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Zusammensetzung der Kosten für das Referenzszenario.

Abb. 5.7: Zusammensetzung der Kosten für das Referenzszenario der Mobiltelefon-Lackierung



Szenario 1: Einsatz eines modernen Lackierroboters

Szenario 1 umfasst den Vergleich zwischen dem älteren Lackierroboter (bei der Modellierung mit „GMF“ gekennzeichnet) und dem neuen Lackierroboter (bei der Modellierung mit „ABB“ gekennzeichnet). Der neue Roboter trägt wegen seiner verbesserten Präzision (z.B. stellt er die Lackversorgung beim Umdrehen ab) zu einem verbesserten Lackauftragswirkungsgrad und somit zur Ressourcenschonung bei. Durch die Erhöhung des Lackauftragswirkungsgrads von 16 auf 26 Prozent wird eine Einsparung an Lackmaterial (Stammlack, Härter, Verdünnungslösemittel) von 38 Prozent erreicht. Die Lösemittel-Emissionen werden um 32 Prozent gesenkt und der Lackschlamm anfall um 46 Prozent verringert. Die entsprechenden Kosteneinsparungen machen ca. 30 Prozent aus. Der ausführliche Kostenvergleich zwischen dem ABB- und dem GMF-Roboter ist in Anhang III aufgeführt.

Ergebnis: Ein neuerer Roboter mit höherem Lackauftragswirkungsgrad ist von der Firma Stoz bereits in Betrieb genommen worden.

Szenario 2: Einsatz von Abgasreinigungsverfahren

Szenario 2 beinhaltet eine Auswahl verschiedener Alternativen zum Einsatz von Abgasreinigungsverfahren. In Tabelle 5.1 werden die Szenarien kurz dargestellt.

Tab. 5.1: Beschreibung der Szenarien 2 für die Mobiltelefon-Lackierung

Szenario	Szenariobeschreibung
2A	Thermische Nachverbrennung auf den Lackiertrockner
2B	Adsorption auf Aktivkohle auf die Spritzkabinen
2C	Biofilter auf die Spritzkabinen

Abgasreinigungsverfahren sind nachgeschaltete Technologien, die weder zur Ressourcenschonung noch zur Abfallminderung beitragen können; sie werden in erster Linie für die Reduzierung von Lösemittel-Emissionen eingesetzt. Die höchste Reduktion (ca. 60 Prozent) wird durch Biofiltrationsanlagen auf den Spritzkabinen erreicht. Die Eignung dieses Verfahrens ist im Einzelfall zu prüfen, da die Mikroorganismen in der Regel sehr empfindlich auf Schwankungen im Betrieb der Lackieranlagen reagieren. Der Einsatz von Adsorption auf Aktivkohle (Reduzierung der Lösemittel-Emissionen um etwa 50 Prozent) hat den Vorteil, dass Lösemittel rückgewonnen werden kann. Die Wiederverwendung dieses Lösemittels hinsichtlich der Qualitätsanforderungen ist im Einzelnen zu prüfen. Szenario 2A, das eine thermische Nachverbrennung auf dem Lackiertrockner vorsieht, ist nicht sinnvoll, da hier nur eine geringe Reduktion der Lösemittel zu erzielen ist (rund zwei Prozent). Eine detaillierte Aufstellung der Untersuchungsergebnisse dieser Szenarien ist in Anhang III und Tabelle 5.2 (Seite 58) dargestellt.

Maßnahme: Der Einsatz von Biofiltrationsanlagen bei der Firma Stoz wurde im Jahre 2001 durch ein Hochschulinstitut untersucht. Weitere Untersuchungen alternativer Abgasreinigungsverfahren sind für die Jahre 2002/2003 geplant.

Szenario 3: Umstellung auf lösemittelarme Lacksysteme

Dieses Szenario muss als hypothetisches gelten, da bislang keine Alternativen für den lösemittelhaltigen Lack bei der Mobiltelefon-Lackierung verfügbar sind. Bei Stoz wurden bereits praktische Versuche zur Umstellung auf Pulverlacksysteme durchgeführt. Die damit minimal erreichbare Schichtdicke von über 80 Mikrometern ist aber zu hoch, um die Anforderungen des Auftraggebers an die Oberflächenqualität zu erfüllen; ferner kleben die Vorrichtungen in dieser Art Lacksystem zusammen, was zu einer Hemmung des Prozessablaufs führt.

Das virtuelle Szenario 3A bildet den Einsatz von wasserverdünnbarem Lack ab. Die Umstellung auf lösemittelarme Lacksysteme kann weitere Änderungen in anderen Teilen der Anlage bzw. des Betriebs erfordern. In der Regel ist mit einer zusätzlichen Investition zu rechnen. Die Einführung von wasserverdünnbarem Lack ermöglicht die Verwendung von Verdünnungs- und Reinigungslösemitteln auf Wasserbasis, was insgesamt zu einer beträchtlichen Reduzierung von Lösemittel-Emissionen führt. Wegen des niedrigeren Festkörpergehalts des wasserverdünnbaren Lacksystems im Vergleich zum konventionell lösemittelhaltigen Lacksystem wird im Szenario 3A etwa 14 Prozent mehr Lackmaterial benötigt. Da die Spritzpistolen mit Wasser gereinigt werden können, wird Reinigungslösemittel eingespart, somit fällt weniger verschmutztes Reinigungslösemittel an. Die Lösemittel-Emissionen werden im Vergleich zu konventionell lösemittelhaltigen Lacksystemen um etwa 57 Prozent verringert. Der Kostenunterschied ist vernachlässigbar.

Auf der Grundlage von Szenario 3A wurde die zusätzliche Installation eines Biofilters auf der Spritzkabine untersucht. Dies ermöglicht eine weitere Reduktion der Lösemittel-Emissionen um rund 35 Prozent.

Eine Tabelle für eine betriebseigene Analyse ist in Anhang III zu finden.

Szenario 4: Lackauftragsverfahren mit verbessertem Wirkungsgrad

In diesem Szenario soll die Einführung von Lackauftragsverfahren mit verbessertem Wirkungsgrad untersucht werden. Beim Einsatz von HVLP-Spritzpistolen oder Hochrotationsglocken wird ein Auftragswirkungsgrad um 40 Prozent angenommen. Szenario 4A stellt die Einführung eines Verfahrens mit einem verbesserten Auftragswirkungsgrad dar, wobei weiterhin lösemittelhaltiger Lack eingesetzt wird. Darauf aufbauend umfasst Szenario 4B die Kombination von wasserverdünnbarem Lack mit HVLP-Spritzpistolen bzw. Hochrotationsglocken. Hier sei angemerkt, dass derzeit bei der Firma Stoz sowohl HVLP-Spritzpistolen als auch Hochrotationsglocken nicht einsetzbar wären; das dort eingesetzte Lacksystem ist mit diesen Verfahren nicht kompatibel.

Die Untersuchung dieser hypothetischen Szenarien zeigt, dass beim Einsatz von HVLP-Spritzpistolen bzw. Hochrotationsglocken der Verbrauch an Lackmaterial und Werkzeugreinigungslösemittel um ca. 55 Prozent gegenüber dem Referenzszenario reduziert werden könnte. Weiterhin könnten im Vergleich zum Referenzszenario auch Lackschlamm und Lösemittel-Emissionen um 68 Prozent bzw. 42 Prozent verringert werden. Die entsprechende Kosteneinsparung beträgt etwa 41 Prozent gegenüber dem Referenzszenario.

Das Szenario 4B führt in etwa zu den gleichen Ergebnissen hinsichtlich Lackmaterialeinsatz und Lackschlammfall wie Szenario 4A. Zusätzlich könnte der Verbrauch von Reinigungslösemitteln reduziert werden, da die Werkzeugreinigung zum Teil mit Wasser erfolgen kann. Darüber hinaus wäre eine weitere signifikante Verringerung der Lösemittel-Emissionen zu verzeichnen (68 Prozent gegenüber 42 Prozent).

Anhang III enthält eine ausführliche Tabelle für den betriebseigenen Vergleich der hier vorgestellten Szenarienanalysen.

Szenario 5: Austausch der Vorbehandlungsanlage

Neben Szenario 1 wurde während der Laufzeit dieser Studie bei der Firma Stoz ein weiteres Szenario realisiert: der Austausch der alten Vorbehandlungsanlage. Die neue Anlage ermöglicht sowohl einen optimierten Ressourcenverbrauch wie auch eine optimierte Oberflächenqualität. Derzeit sind noch keine Erfahrungswerte verfügbar, deshalb konnte dieses Szenario im Rahmen der vorliegenden Studie nicht durchgespielt werden.

Zusammenfassung

Eine zusammenfassende Darstellung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen für die untersuchten Szenarien ist in Tabelle 5.2 aufgeführt. Die Szenarien 4A (Lackauftragsverfahren mit verbessertem Wirkungsgrad, konventioneller Lack) und 4B (Lackauftragsverfahren mit verbessertem Wirkungsgrad und wasserverdünnbarer Lack) stellen erfolversprechende Szenarien dar. Sie ermöglichen eine substanzielle Reduktion der Lösemittel-Emissionen bei gleichzeitiger Verringerung des Ressourceneinsatzes und somit des Abfallaufkommens. Eine deutliche Reduzierung der Lösemittel-Emission wird durch den Einsatz von Abgasreinigungsverfahren erzielt, wodurch aber keine Ressourcen geschont werden. Auch die Substitution von herkömmlichem lösemittelhaltigem Lack durch wasserverdünnbaren Lack trägt zu einer nennenswerten Verringerung der Lösemittel-Emissionen bei. Je nach Festkörpergehalt des Lacks auf Wasserbasis können Lackmaterial und Verdünnungslösemittel eingespart werden. Bei der Verwendung von wasserverdünnbarem Lack ist jedoch eine bedeutende Einsparung von Lösemitteln für die Werkzeugreinigung zu verzeichnen, da für diesen Zweck teilweise Wasser eingesetzt werden kann.

Szenario 1 zeigt auf, dass die Einführung eines neueren Lackroboters im Vergleich zu einem älteren erheblich Kosten einspart. Der Einsatz von Lack- und Verdünnungsmaterial, das entsprechende Abfallaufkommen sowie die Lösemittel-Emissionen können durch diese Maßnahme deutlich reduziert werden.

Maßnahmen, die die Effizienz des Lackauftrags erhöhen, wirken sich ökologisch und ökonomisch positiv aus. Sie reduzieren die Lösemittel-Emissionen ebenso wie den Ressourceneinsatz und das Abfallaufkommen.

Tab. 5.2: Wesentliche Ergebnisse der untersuchten Szenarien für die Lackierung von Mobiltelefonen

Szenarien		Ressourcen		Abfälle		Emissionen	Primäre Maßnahmen		Abgas- reinigungs- verfahren
Szenario	Szenariobeschreibung	Lack- material	Verdün- nungs- lösemittel	Lack- schlamm	Reinigungs- lösemittel	Lösemittel- Emissionen	Kosten [DM]	Investi- tionen [DM]	Betriebs- kosten [DM/a]
1	GMF-Roboter	0	0	0	0	0	0	—	—
	ABB-Roboter	-38%	-38%	-46%	-52%	-32%	-30%	—	—
0	Ist-Zustand (Referenzszenario)	0	0	0	0	0	0	0	0
2A	TNV auf Trockner	0%	0%	0%	0%	-2%	0%	700.000	490.000
2B	Adsorption auf Spritzkabine	0%	0%	0%	0%	-50%	0%	1.000.000	100.000
2C	Biofilter auf Spritzkabine	0%	0%	0%	0%	-60%	0%	700.000	80.000
3A	Wasserverdünnbarer Lack	+14% ¹⁾	+14%	0%	-77% ²⁾	-57%	+9%	k.A. ³⁾	k.A. ³⁾
3B	Szenario 3A + 2C	+14% ¹⁾	+14%	0%	-77% ²⁾	-72%	+9%	k.A. ³⁾	k.A. ³⁾
4A	HVLP oder Hochrotationsglocken	-55%	-55%	-68%	0%	-42%	-41%	k.A.	k.A.
4B	Szenario 4A + 3A	-48%	-48%	-68%	-77%	-68%	-36%	k.A. ³⁾	k.A. ³⁾

Legende

k.A.: keine Angabe

¹⁾ Es wird angenommen, dass der Lösemittelgehalt des wasserverdünnbaren Stammlacks 12,5 Gew.-% beträgt.²⁾ Es wird angenommen, dass pro Schicht drei Reinigungsvorgänge der Spritzpistole mit Wasser und einer mit Lösemittel durchgeführt wird.³⁾ Die notwendigen Umstellungen bei der Einführung von wasserverdünnbarem Lack sind von Fall zu Fall zu untersuchen.**5.6.2 Szenariobildung für die Lackierung von Weich-PVC-Leisten**

Für die Untersuchung alternativer Szenarien für die Lackierung von Weich-PVC-Leisten wird eine ausführliche Energie- und Stoffstromanalyse auf die umweltrelevanten Prozessschritte konzentriert:

- die Verdünnung des Lacks am Mischplatz,
- die Mischung des Lacks mit dem Härter am Arbeitsplatz,
- der Lackauftrag,
- der Trocknungsvorgang,
- die Reinigung der Spritzpistolen.

Hier stellen die relevanteste Umweltbelastung die Lösemittel-Emissionen dar. Lösemittel-Emissionen, die durch die Mischung von Lack und Härter in der Spritzkabine entstehen, sind jedoch vernachlässigbar. Die Behälter sind, bis auf die wenigen Sekunden, in denen die Lackversorgungsleitungen angebracht werden, durchgehend geschlossen. Bei einem sorgfältigen Umgang mit den Behältern sollten keine oder nur sehr wenige Lösemittel-Emissionen anfallen.

Im Folgenden werden die Szenarien für die Lackierung von Weich-PVC-Leisten definiert, die anschließend unter umweltrelevanten und wirtschaftlichen Aspekten bewertet werden. Dabei werden sie jeweils mit dem Referenzszenario (Szenario 0: Ausgangssituation im Betrieb) verglichen. Die Abbildung der Szenarien und die Durchführung der jeweiligen Energie- und Stoffflussanalysen erfolgen in der Software UMBERTO®. Zum Schluss werden die wesentlichen Ergebnisse diskutiert; ausführlichere Ergebnisse sind in den Anhängen aufgeführt.

Szenario 0

Das Referenzszenario (Szenario 0) entspricht dem in Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Ist-Zustand. Für die Beschichtung von 970.000 Weich-PVC-Leisten werden demnach 12.570 Kilogramm Lösemittel emittiert und es fallen 10.587 Kilogramm Lackschlamm an. Die Betriebskosten für dieses Szenario betragen 440.000 DM. Der Anteil der Kostenarten ist in der Abbildung 5.8 dargestellt.

Aufgrund zu geringer Optimierungspotenziale werden die Energiekosten im Rahmen dieser Untersuchung nicht berücksichtigt. Der Vollständigkeit halber werden jedoch die Entsorgungskosten, trotz ihres ebenfalls geringen Anteils an den Gesamtkosten, weiterhin aufgeführt.

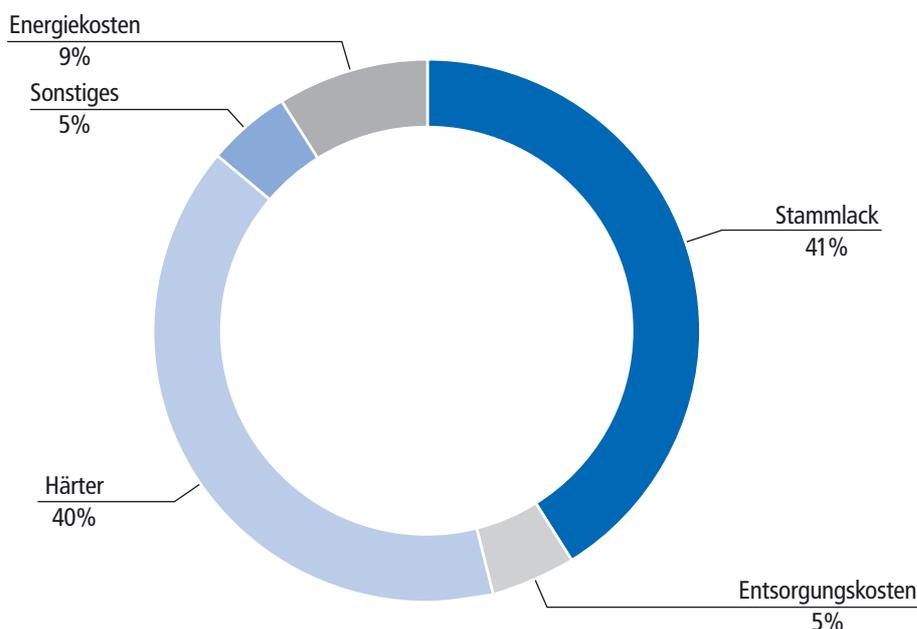
Szenario 1: Einsatz eines Lackierroboters

Szenario 1 untersucht die Umstellung von manueller (durch Mitarbeiter getätigte) auf automatische Lackierung mittels Roboter. Bei der manuellen Lackierung wurde festgestellt, dass sich die Lackverbräuche je Lackierer erheblich unterscheiden. Der Einsatz von Lackierrobotern ist nicht wegen einer möglichen Personal- sondern hauptsächlich wegen der damit zu erzielenden Lackeinsparung attraktiv. Der Lackierroboter erlaubt außerdem die Programmierung von optimierten Parametern, die eine konstante Schichtdicke ermöglichen und somit den Kontrollaufwand reduzieren. Durch die Erhöhung des Lackauftragswirkungsgrads von 25 auf 45 Prozent wird eine Einsparung an Lackmaterial (Stammlack, Härter, Verdünnungslösemittel) von 45 Prozent erreicht. Die Lösemittel-Emissionen werden um 42 Prozent gesenkt, der Lackschlamm rund 60 Prozent verringert. Die jeweiligen Kosteneinsparungen betragen etwa 43 Prozent im Vergleich zum Referenzszenario. Eine Tabelle zum Kostenvergleich zwischen dem Referenzszenario und Szenario 1 ist in Anhang IV zu finden.

Diese Maßnahme war bei der Firma Stoz bereits vorgesehen und konnte Anfang 2001 umgesetzt werden.

Um alternative Verfahren ökologisch und ökonomisch zu bewerten, werden ihre umweltrelevanten Prozessschritte hinsichtlich der Stoff- und Energieströme analysiert. Die Ergebnisse werden anschließend mit der aktuellen Praxis im Unternehmen verglichen.

Abb. 5.8: Zusammensetzung der Kosten für das Referenzszenario der Lackierung von Weich-PVC-Leisten



Szenario 2: Einsatz von Abgasreinigungsverfahren

Hier werden verschiedene Szenarien zur Einführung von Abgasreinigungsverfahren untersucht. Im Gegensatz zu Szenario 1 tragen nachgeschaltete Abgasreinigungsverfahren weder zur Ressourcenschonung noch zur Abfallredzierung bei; lediglich die Lösemittel-Emissionen werden verringert. Die entsprechenden Beschreibungen und Ergebnisse der durchgeführten Szenarien sind in den Tabellen 5.3 und 5.4 (Seite 62) dargestellt.

Das rückgewonnene Lösemittel in Szenario 2B kann gegebenenfalls als Reinigungslösemittel für die Spritzpistolen verwendet werden. Das Szenario 2E ist eine Kombination aus Roboterlackierung und einer Biofiltrationsanlage auf der Spritzkabine: die Einsparungen an Lackmaterial und die Reduzierung des Lackschlammanfalls durch Erhöhung des Lackauftragswirkungsgrads entsprechen denen des Szenarios 1. Die Lösemittel-Emissionen hingegen können im Vergleich zum Referenzszenario um rund 80 Prozent reduziert werden. Eine detaillierte Tabelle für einen Kostenvergleich ist in den Anhängen IV zu finden.

Ergebnis: Der Einsatz von Biofiltrationsanlagen bei der Firma Stoz wurde im Jahre 2001 durch ein Hochschulinstitut untersucht. Weitere Untersuchungen alternativer Abgasreinigungsverfahren sind für die Jahre 2002/2003 geplant.

Szenario 3: Einsatz von wasserverdünnbarem Lack

Im Szenario 3A wird der Einsatz von wasserverdünnbarem Lack untersucht. Diese Umstellung ermöglicht die Verwendung von Verdünnungs- und Reinigungslösemitteln auf Wasserbasis, wodurch eine erhebliche Reduzierung an Lösemittel-Emissionen zu erreichen ist. Die Umstellung von konventionellen lösemittelhaltigen Lacksystemen auf wasserbasierende erfordert jedoch oft Um- oder Ausbau von Anlagen bzw. andere verfahrenstechnische Maßnahmen [DIETZ 1999]:

- das Lackversorgungssystem muss aus Edelstahl oder geeigneten Kunststoffen bestehen,
- die Spritzpistolen müssen mit Einsätzen und Düsen aus Edelstahl umgerüstet werden,

Tab. 5.3: Beschreibung und Ergebnisse der Szenarien 2 für die Lackierung von Weich-PVC-Leisten

Szenario	Szenariobeschreibung	Lösemittel-Emissionen ¹⁾	Zusätzliche Investitionen [DM]	Zusätzliche Betriebskosten [DM/a]
2A	TNV auf Trockner	- 3%	700.000	490.000
2B	Adsorption auf Spritzkabine	- 60%	1.000.000	100.000
2C	TNV auf Spritzkabine	- 60%		
2D	Biofilter auf Spritzkabine	- 72%	700.000	80.000
2E	Roboterlackierung und Biofilter auf Spritzkabine	- 81%	k.A.	k.A.

Legende

¹⁾ Im Vergleich zu dem Referenzszenario

k.A.: keine Angaben

- die Lagerbedingungen für Wasserlacke sollten genau eingehalten werden,
- wegen längerer Abdunstzeiten können andere Trocknereinstellungen oder auch die Anschaffung neuer Trockner notwendig werden,
- zur Behandlung des Kabinenwassers müssen geeignete Zusatzmittel ausgewählt werden.

Aufgrund des niedrigeren Festkörpergehalts von wasserverdünnbaren gegenüber den konventionellen lösemittelhaltigen Lacksystemen wird beim Szenario 3A etwa sechs Prozent mehr Lackmaterial benötigt. Da die Spritzpistolen mit Wasser gereinigt werden können, wird Reinigungslösemittel eingespart und somit auch eine geringere Menge an verschmutztem Reinigungslösemittel anfallen. Im Vergleich zu lösemittelhaltigen Lacksystemen werden die Lösemittel-Emissionen um rund 78 Prozent reduziert. Der Kostenunterschied ist gering und kann hier vernachlässigt werden.

Szenario 3B umfasst die Einführung von wasserverdünnbarem Lack und den Einsatz eines Lackroboters. Während die Lackmaterialeinsparung etwa 40 Prozent beträgt und der Anfall an Lackschlamm um rund 60 Prozent verringert wird, werden die Lösemittel-Emissionen um ca. 87 Prozent vermindert. Hier können Kosteneinsparungen von 44 Prozent im Vergleich zum Referenzszenario erzielt werden.

Eine ausführliche Referenztabelle für einen eigenen Vergleich ist dem Anhang IV zu entnehmen.

Zusammenfassung

Tabelle 5.6 auf der folgenden Seite ist eine Zusammenfassung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der untersuchten Szenarien. Die erfolgversprechenden Szenarien sind die Szenarien 1 (Einführung eines Lackroboters, konventioneller Lack) und 3B (Einführung eines Lackroboters, wasserverdünnter Lack). Diese Szenarien versprechen eine erhebliche Emissionsminderung für die Schadstoffgruppe VOC und ermöglichen gleichzeitig eine Reduzierung des Ressourceneinsatzes und somit auch des Abfallaufkommens. Darüber hinaus bewirkt die Verwendung von wasserverdünntem Lack eine deutliche Reduktion der Lösemittel-Emissionen.

Einsparungen von Lack- und Verdünnungsmaterial können zwar erzielt werden, sind jedoch vom entsprechenden Festkörpergehalt des Lacks auf Wasserbasis abhängig. Weil beim Einsatz von wasserverdünntem Lack für die Werkzeugreinigung teilweise Wasser verwendet werden kann, ist hier eine deutliche Einsparung von Reinigungslösemitteln möglich; somit wird auch der Entsorgungsaufwand reduziert. Beim Einsatz von Abgasreinigungsverfahren werden die Lösemittel-Emissionen stark reduziert, aber keine Ressourcen geschont.

Die Einführung eines neuen Lackroboters war für den Referenzbetrieb eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Maßnahme. Dadurch konnten nicht nur die Lösemittel-Emissionen und das Abfallaufkommen, sondern auch der Lackverbrauch deutlich reduziert werden.

Tab. 5.4: Wesentliche Ergebnisse der untersuchten Szenarien für die Lackierung von Weich-PVC-Leisten

Szenarien		Ressourcen		Abfälle		Emissionen	Primäre Maßnahmen		Abgas- reinigungs- verfahren
Szenario	Szenariobeschreibung	Lack- material	Verdün- nungs- lösemittel	Lack- schlamm	Reinigungs- lösemittel	Lösemittel- Emissionen	Kosten [DM]	Investi- tionen [DM]	Betriebs- kosten [DM/a]
0	Ist-Zustand (manuelle Lackierung)	0	0	0	0	0	0	0	0
1	Lackroboter	-45%	-45%	-60%	0%	-42%	-43%	ca. 400.000	0
2A	TNV auf Trockner	0%	0%	0%	0%	-3%	0%	700.000	490.000
2B	Adsorption auf Spritzkabine	0%	0%	0%	0%	-60%	0%	1.000.000	100.000
2C	TNV auf Spritzkabine	0%	0%	0%	0%	-60%	0%	k.A. ³⁾	k.A.
2D	Biofiltration auf Spritzkabine	0%	0%	0%	0%	-72%	0%	700.000	80.000
2E	Szenario 2D + Szenario 1	-45%	-45%	-60%	0%	-81%	-43%	k.A.	k.A.
3A	Wasserverdünnbarer Lack	+6% ¹⁾	+6%	0%	-75% ²⁾	-78%	+2%	k.A.	k.A.
3B	Szenario 3A + Szenario 1	-41% ¹⁾	-41%	-60%	-75% ²⁾	-87%	-44%	k.A.	k.A.

Legende

k.A.: keine Angabe

¹⁾ Es wird angenommen, dass der Lösemittelgehalt des wasserverdünnbaren Stammlacks 12,5 Gew.-% beträgt.²⁾ Es wird angenommen, dass pro Schicht drei Reinigungsvorgänge der Spritzpistole mit Wasser und einer mit Lösemittel durchgeführt werden.³⁾ Die notwendigen Umstellungen bei der Einführung von wasserverdünnbarem Lack sind von Fall zu Fall zu untersuchen.

6 Fazit und Ausblick

Die Umsetzung der Lösemittel-Richtlinie der EU in deutsches Recht betrifft nun auch die kleinen und mittleren lösemittelanwendenden Unternehmen. Diese Betriebe (im Folgenden die Lohnlackierbetriebe) müssen daher ihre technologischen Schwachstellen erkennen und die verfügbaren Emissionsreduzierungspotenziale nutzen. Außerdem ist damit zu rechnen, dass die Mehrheit der Lohnlackierbetriebe künftig mit der Erstellung eines Lösemittelwirtschaftsplans konfrontiert wird. Die Novellierung des KrW-/AbfG bei Überschreitung der festgelegten jährlichen Abfallmengen fordert von ihnen die Erstellung eines Abfallwirtschaftskonzepts sowie einer Abfallbilanz.

Ziel der durchgeführten Untersuchung war die Entwicklung eines praxisorientierten Instruments bzw. praxisnaher Leitlinien für Lohnlackierbetriebe. Durch eine effiziente und systematische Erfassung, Analyse und Modellierung ihrer stofflichen und energetischen Ströme sollen sie Stoffstromanalysen und Ökobilanzen erstellen können. Dies wird – neben der konventionellen Datenerhebung – auch durch die Software UMBERTO® unterstützt und ermöglicht. Darüber hinaus soll dieses Werkzeug durch die systematische Abbildung von ausgewählten Prozessen die Auswirkungen technologischer und ökonomischer Maßnahmen zur Emissionsminderung darstellen und damit zur Entscheidungsfindung über deren Einsatz beitragen.

Neben verschiedenen Möglichkeiten zur Vermeidung bzw. Verminderung von Emissionen leichtflüchtiger organischer Verbindungen wurden auch

Wege zur Reduktion von Abfällen untersucht. Da für Unternehmen der Industrie- und Lohnlackierung in der Literatur diesbezüglich wenig Informationen verfügbar sind, wurde zunächst ein ausführlicher Überblick über mögliche Maßnahmen zur Reduzierung von Emissionen vermittelt. Des Weiteren wurden betriebliche Stoff- und Energiebilanzen erstellt, die als Grundlage für eine Schwachstellenanalyse sowie für eine umfassende Betrachtung von Potenzialen zur Kosteneinsparung verwendet werden können. Für Empfehlungen zum Einsatz von Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Minderung von Emissionen und Abfällen wird die vergleichende Abschätzung des Aufwand-/Nutzen-Verhältnisses durch eine Kostenflussanalyse unterstützt.

Am Beispiel eines ausgewählten Lohnlackierbetriebs in Baden-Württemberg wurden die verschiedenen Szenarien für zwei Prozesse (Mobiltelefonlackierung und Lackierung von Weich-PVC-Leisten) beschrieben, unter technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekten analysiert und Empfehlungen abgeleitet. Dafür wurde eine umfassende Datenerhebung im Betrieb durchgeführt.

Im Folgenden werden die gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf die Situation des untersuchten Betriebs und der gesamten Branche zusammengefasst und diskutiert. Anschließend werden methodische Aspekte beleuchtet, bevor ein Fazit gezogen wird.

Die verschärfte Umweltgesetzgebung fordert von kleinen und mittleren Unternehmen zunehmend, Emissionsminderungspotenziale zu nutzen. Voraussetzung dafür ist eine systematische Erfassung von Stoff- und Energieströmen.

6.1 Der Nutzen eines betrieblichen Energie- und Stoffstrommanagementsystems für die Firma Stoz

Im einem eigens dafür entwickelten Stoff- und Energieflussmodell wurden die vorgefundenen Arbeitsschritte der beiden ausgewählten Prozesse zu Beginn des Projekts als Ist-Zustand abgebildet. Parallel dazu wurde die technologische Ausstattung des Referenzbetriebs ausführlich beschrieben. Auf der Grundlage des Ist-Zustands wurden verschiedene Szenarien ermittelt: Diese umfassen sowohl die Einführung von prozessintegrierenden Maßnahmen (Einsatz von lösemittelarmen bzw.

-freien Lacksystemen, Einführung von oversprayarmen Lackauftragsverfahren) als auch die Nachschaltung von Abgasreinigungsverfahren (thermische Nachverbrennung, Adsorption auf Aktivkohle, Biofiltration). Es wurde festgestellt, dass die deutlichsten Emissions- und Kostenreduzierungen durch den Einsatz von oversprayarmen Lackauftragsverfahren (z.B. Umstellung von manueller auf robotisierte Lackierung; Einführung von HVLP-Spritzpistolen) erzielt werden können.

Die derzeit einsetzbaren Umweltschutztechnologien umfassen keine Umstellungen auf lösemittelarme bzw. -freie Lacksysteme: Obwohl die Qualitätsanforderungen der Auftraggeber an die Lackierung mit Lacksystemen auf Wasserbasis erfüllt werden könnten, stimmen die Auftraggeber einer derartigen Materialumstellung bislang nicht zu. Umweltbelastungen könnten also nur weiter gesenkt werden, wenn die Auftraggeber andere Anforderungen an die Lohnlackierbetriebe stellen würden.

Beim Modellaufbau lag die Schwierigkeit im Wesentlichen in der Datenerhebung: Die Ermittlung von Stoff- und Energiedaten für die einzelnen Prozessschritte war besonders aufwändig. Da im Betrieb mehrere unterschiedliche Produkte durch verschiedene Verfahren beschichtet, aber zum Teil die gleichen Anlagen genutzt werden, ist die Zuordnung von Stoffen und Energien sowie die Auslastung einer Anlage durch ein bestimmtes Produkt schwierig zu ermitteln. Insbesondere

für eine Erhebung prozessspezifischer Energieverbräuche oder die Auslastung der Vorbehandlung durch die Mobiltelefone mussten Annahmen getroffen werden.

Aufgrund seiner technologischen Ausstattung zählt der Referenzbetrieb, die Stoz Oberflächen-technik GmbH & Co. KG in Rottenburg-Hailfingen, zu den sehr fortschrittlichen Betrieben und ist daher für die Lohnlackierbranche nur bedingt repräsentativ. Aus den erheblichen Investitionen, die der Betrieb innerhalb der vergangenen zwei Jahre getätigt hat (insgesamt 3,5 Millionen DM) wird ersichtlich, dass dieser mittelständische Betrieb seine Prozesse fortwährend optimiert, um Umweltbelastungen zu reduzieren. Demzufolge gibt es nur dort noch geringe zusätzliche Emissionsminderungspotenziale. Grundsätzlich konnten aber mit dem Energie- und Stoffstrommanagementsystem die Vorteile der geplanten und durchgeführten Maßnahmen bestätigt werden.

6.2 Energie- und Stoffstrommanagement in der Industrielackierung

Schon aus der bisherigen Gesetzeslage ergaben sich an Lackierbetriebe, die bestimmte Verbrauchsschwellenwerte überschritten, zahlreiche Anforderungen bezüglich Luftreinhaltung, Abwasser, Abfall, Gefahrstoffen sowie Gesundheits- und Arbeitsschutz. Mittlerweile sieht die neuere Umweltgesetzgebung neben der Bestimmung der Verbrauchswerte auch die Bilanzierung der betrieblichen Eingangs- und Ausgangsstoffe vor. Für kleine und mittlere Unternehmen bedeutet die Erfüllung einer Bilanzpflicht einen zusätzlichen Aufwand bei der Erfassung, Pflege und Auswertung der erforderlichen Daten. Für diese Betriebe wäre die Einführung eines innerbetrieblichen Energie- und Stoffstrommanagementsystems sinnvoll.

Früher war die große Mehrheit der lackverarbeitenden Betriebe (99 Prozent von etwa 50.000 Anlagen in Deutschland) nicht genehmigungsbedürftig, d.h. es gab keine verbindlichen emissionsbegrenzenden Vorgaben. Seit dem 21. August 2001 stehen jedoch viele kleine und mittlere Unternehmen unter Handlungsdruck. Grund dafür ist die

Umsetzung der EU-Lösemittel-Richtlinie in deutsches Recht. Für die meisten Branchen gelten gemäß Richtlinienbeschluss Schwellenwerte von fünf Tonnen Lösemittelverbrauch pro Jahr (vgl. [31. BIMSCHV]).

Bei industriellen Lohnlackierbetrieben ist der gegenwärtige Umfang eingesetzter ressourcenschonender bzw. emissionsarmer Lackmaterialien und Technologien nur abschätzbar. Daher ist auch für die gesamte Branche das Reduzierungspotenzial von Umweltbelastungen nur schwer zu ermitteln. Im Rahmen dieser Studie konnten jedoch Informationen über mögliche Emissionsminderungen bzw. Kosteneinsparungen sowie über die Einsatzmöglichkeiten umweltschonender Stoffe und technologischer Ausrüstungen gegeben werden. Wie sinnvoll ihr Einsatz sein könnte, muss von den Betrieben jedoch im Einzelnen geprüft werden.

Die Umsetzung der EU-Lösemittel-Richtlinie verpflichtet nun auch die kleinen und mittleren Betriebe der lackverarbeitenden Industrie zur Bestimmung ihrer Verbrauchswerte sowie die Bilanzierung ihrer Ein- und Ausgangsstoffe.

Eine wesentliche Schwierigkeit, mit der zahlreiche kleine und mittlere Unternehmen konfrontiert sind, stellt der Mangel an Information sowohl über die gesetzlichen Auflagen im Bereich des Umwelt- und Arbeitsschutzes wie auch über umweltschonende und sichere Lackiertechniken dar. Derzeit können industrielle Lohnlackierbetriebe auf kostenpflichtige Informationsmanagementsysteme zurückgreifen sowie an Informationsveranstaltungen, Lehrgängen oder Schulungen teilnehmen. Dies erfordert allerdings viel Zeit für die Informationssuche. Landesinnungsverbände oder spezifische Fachverbände der Lohnlackierung könnten ihre Position stärken, indem sie die kleinen und mittleren Unternehmen der Lohnlackierung durch Bereitstellung und Austausch von Informationen, z.B. im Internet, unterstützen.

Aufgrund der besonderen Position der Lohnlackierer als Auftragnehmer kann der Einsatz alternativer

Technologien oder Materialsubstituten bei Lohnlackierern nur in intensivem Dialog mit den Auftraggebern (z.B. Mobiltelefon-Produzenten, Automobilindustrie) erfolgen. Wegen unterschiedlich zu lackierender Materialien (z.B. Kunststoff, Metall, Holz) sowie der Geometrien und Verwendungszwecke der zu lackierenden Produkte sind allgemeine Empfehlungen aus diesem Projekt kaum möglich.

Auch die Ermittlung von branchenspezifischen Kennzahlen war im Rahmen dieses Projektes besonders erschwert: Sowohl Lackhersteller als auch andere Lackierbetriebe waren nicht bereit, notwendige Informationen bereitzustellen. Zur Sammlung von Kennzahlen für den Lohnlackierbereich wäre die Bildung eines Arbeitskreises mit Vertretern der Verbände, der Lackindustrie und den Betreibern von Lohnlackieranlagen empfehlenswert.

Der Handlungsspielraum von Lohnlackierbetrieben ist zwar gering. Ihre Position ließe sich aber stärken, wenn Informationen zum Umweltschutz schnell und unkompliziert verfügbar wären.

6.3 Methodische Aspekte bei der Entwicklung eines Energie- und Stoffstrommanagementsystems für die Industrielackierung

6.3.1 Die Software UMBERTO®

Bei der Anwendung des hier entwickelten Stoff- und Energieflussmodells bietet die Möglichkeit zur einfachen und schnellen Bilanzerstellung, z.B. für die Berichterstattung im Rahmen von Umweltgesetzgebung, einen eindeutigen Vorteil. Gleichzeitig ermöglicht es durch eine Szenariobildung mit unterschiedlichen Vorgaben die Ermittlung von Umweltbelastungen bzw. Möglichkeiten zu deren Reduzierung sowie von Kosteneinsparpotenzialen. Für die Entwicklung und Ausarbeitung dieses Modells wurde auf die kommerzielle Software UMBERTO® zurückgegriffen. Neben der transparenten Darstellung der Stoff- und Energieströme und deren Berechnung ermöglicht diese Software auch die systematische Fortschreibung bei neuen Erkenntnissen in der Lackmaterial- und Technologieentwicklung.

Die hauptsächliche Schwierigkeit im Rahmen der Modellentwicklung bestand in der Abgrenzung oder Zuordnung von Stoff- und Energieströmen zu einzelnen Prozessschritten oder zu einzelnen Produkten. Insbesondere im Wasser- und Energiebereich mussten die Verbrauchsmengen in direkter Diskussion mit dem Umwelt- und Sicherheitsbeauftragten abgeschätzt werden, da für einzelne Prozesse im Allgemeinen weder Wasser- noch Stromzähler vorhanden sind.

Im vorliegenden Fall handelte es sich um einschichtige Lackierungen, also relativ einfache Prozesse¹²⁾. Hierbei gehen die wesentlichen Umweltbelastungen von den Lösemittel-Emissionen und dem Lackschlamm aus. Für solch einfache Prozesse können die Ergebnisse in ein Flussdiagramm kombiniert mit einer Kalkulationstabelle (z.B. Microsoft Excel) übertragen werden.

¹²⁾ Im Gegensatz hierzu sind sowohl bei der Automobilserienlackierung [RENTZ 2000] wie auch bei Autoreparaturlackierung [BLÜMEL 2001] unterschiedliche mehrschichtige Lackaufbauten üblich.

Die relevantesten Umweltauswirkungen durch Lackierbetriebe gehen von deren Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aus. Für eine Wirkungsanalyse fehlt aber noch die naturwissenschaftliche Grundlage.

Die relevantesten Umweltauswirkungen durch die industrielle Lackierung gehen von deren Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aus. Obwohl in UMBERTO® Wirkungskategorien zu deren Wirkungsabschätzung vorhanden sind und auch kontinuierlich aktualisiert werden, ist diese Funktion für einfache Prozesse, die organische Lösemitel verwenden, zu vernachlässigen. Die Wirkungsabschätzung für die gesamte Stoffgruppe wird mit Hilfe eines allgemeinen Parameters durchgeführt, der zudem je nach ökobilanziellem Ansatz variieren kann. Daher ist aus einer derartigen Umrechnung

in Wirkungspotenziale kein Erkenntniszuwachs zu erwarten. Darüber hinaus existiert keine wissenschaftliche Grundlage für eine weitere Aggregation der verschiedenen Wirkungspotenziale. Aus diesen Gründen wurde im durchgeführten Projekt auf eine komplette Ökobilanz verzichtet. Es wird ausschließlich auf die Abbildungs- und Sachbilanzierungseigenschaften der Software zurückgegriffen. Auch die in den Materialbibliotheken vorhandenen Informationen (Transport, Energiebereitstellung) sind auf die untersuchten spezifischen Prozesse nicht anwendbar.

6.3.2 Fehlerabschätzung und Ungenauigkeiten in der Ökobilanz

Aufgrund der komplexen Anforderungen an die Datengrundlage und deren ökologischer Bewertung ist eine Fehlerabschätzung von Energie- und Stoffstromanalysen von besonderer Bedeutung. Schon die Wahl der Systemgrenzen kann die Ergebnisse stark beeinflussen [VAN SOEST 1998]. Eine weitere Einschränkung für eine Ökobilanz ergibt sich aus der zwangsläufig unvollständigen Datenerhebung wegen beschränkter Zeit- und Budgetressourcen. Außerdem sind die erhobenen Daten nicht unmittelbar aussagekräftig, da Menge und stoffliche Zusammensetzung der Emissionen von den verwendeten Einsatzstoffen abhängen und somit Schwankungen unterliegen. Zudem fehlen oftmals geeignete Messverfahren (vgl. auch [RENTZ 1998]). Eine weitere Ursache für Ungenauigkeiten in den Energie- und Stoffstromanalysen sind unvollständige Daten.

Darüber hinaus belegen vergleichende Studien, dass die Anwendung von verschiedenen ökobilanziellen Bewertungsmethoden auf eine vorhandene Sachbilanz signifikant unterschiedliche Ergebnisse

liefern kann [BAISNEÉ 1994, POHL 1996]. Die Ungewissheit über die exakten – naturwissenschaftlich verifizierbaren – Zusammenhänge zwischen Stoff- und Energieströmen und deren Umweltauswirkungen verstärkt wiederum auch die Ungenauigkeiten in der Ökobilanz. Solange keine abgesicherte Methode zur Wirkungsabschätzung existiert, sollten daher die verwendeten Daten und Wirkungsabschätzungsfaktoren dokumentiert werden, um deren Überprüfung oder Aktualisierung zu einem späteren Zeitpunkt zu ermöglichen.

Bei der Auswertung der gesammelten Informationen können Subjektivität bzw. individuelle Wertesysteme des oder der Entscheidungsträger schließlich zu ganz unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Keiner dieser Aspekte bezüglich Ungenauigkeiten bei der ökobilanziellen Bewertung (Unvollständigkeit, Ungewissheit und Subjektivität) kann derzeit exakt quantifiziert werden. Zudem kumulieren relativ kleine Fehler von Einzelbeträgen im Endergebnis zu starken Abweichungen [HEIJUNGS 1994],

verursacht durch „ein kaum durchschaubares Zusammenspiel von kleinen Mengenunterschieden in der Sachbilanz, methodenspezifischen Überempfindlichkeiten für einzelne Stoffe und dem (zufälligen) Fehlen oder Vorhandensein von Sachbilanzdaten oder Gewichtungsfaktoren“ [POHL 1996].

Schließlich lässt sich feststellen, dass – unter Berücksichtigung dieser einschränkenden Annahmen – die Ergebnisse von Energie- und Stoffflussanalysen lediglich eine vergleichende Aussage über die jeweilige ökologische Überlegenheit oder Gleichwertigkeit untersuchter Szenarien zulassen.

6.4 Fazit der Studie

Der Einsatz von Stoffstrommanagementsystemen bietet Unterstützung im Rahmen der Berichtspflichten. Dabei ist die Transparenz gewährleistet. Darüber hinaus dient die Modellierung von Prozessen mit Hilfe eines Stoffstrommanagementsystems der Aufdeckung sinnvoller Optimierungspotenziale vor allem unter ökologischen und ökonomischen Aspekten. Eine vollständige Ökobilanz, die z.B. auf der Methode der Wirkungskategorien

Während in Zukunft die Erforschung der naturwissenschaftlichen Zusammenhänge zwischen Stoff- und Energieströmen und deren potenzielle Umweltauswirkungen die Ungewissheit über die Wirkungszusammenhänge sicher reduzieren wird, sind die jeweiligen Stoff- und Energieströme bei der ökobilanziellen Bewertung zu vervollständigen, um Fehlurteile aufgrund einer unvollständigen Datenbasis zu vermeiden.

basiert, verspricht jedoch keine weiteren Erkenntnisse bei der Prozessoptimierung in der industriellen Lackierung. Durch die Auswahl eines innovativen Referenzbetriebs der Industrie- und Lohnlackierung wurde der erfolgreiche Einsatz von Maßnahmen zur Reduzierung von Umweltbelastungen aufgezeigt.

Stoff- und Energieflussanalysen sind zwar fehleranfällig, eignen sich aber für eine vergleichende Bewertung alternativer Verfahren. Um ihre Aussagekraft zu erhöhen, ist eine Vervollständigung der Datenbasis unerlässlich.

Literaturverzeichnis

Kapitel 1

[BLÜMEL 2000]

Blümel, F.; Geldermann, J.; Lonjaret, J.-P. (u.a.): Stoffstrommanagement für kleine und mittlere Unternehmen aus dem Bereich der Autoreparaturlackierung. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2000.

[KÜHNE 2000]

Kühne, Ch.: Betriebliches Energie- und Stoffstrommanagement. In: Umwelt, 30 (2000), 7/8, S. 15–16.

Kapitel 2

[ARNO 1979]

Arno, R.: Zur Mechanisierung der Arbeit in Büro und Verwaltung durch Informationstechnik. Dissertation. Universität Osnabrück, 1979.

[BECK 1995]

Beck, A.; Bosshart, S.: Umweltanalyseinstrumente im Vergleich. Diplomarbeit am Laboratorium für Energiesysteme. ETH Zürich, 1995.

[BLÜMEL 2001]

Blümel, F.: Stoffstrommanagement in der handwerklichen Autoreparaturlackierung – zur Planung und Steuerung betrieblicher Stoff- und Energieströme in kleinen und mittleren Unternehmen der Autoreparaturlackierung. Vorgelegte Dissertation, Universität Karlsruhe, vorgesehene Veröffentlichung 2001.

[BMU 1995]

Bundesumweltministerium; Umweltbundesamt (Hrsg.): Handbuch Umweltcontrolling. München: Verlag Vahlen, 1995.

[BÖNING 1994]

Böning, J. A.: Methoden betrieblicher Ökobilanzierung. Marburg: Metropolis-Verlag, 1994.

[DE MAN 1998]

Man, R. De; Haralabopoulou, D.; Henseling, K. O.: Ziele, Anlässe und Formen des Stoffstrommanagements. In: Friege, Engelhardt, Henseling. 1998. S. 20–26.

[DOLD 1996]

Dold, G.; Wörner, C.: Einordnung, Grenzen und Aufbau von Ökobilanzen. In: Krcmar, H.; Dold, G. (Hrsg.): Aspekte der Ökobilanzierung – Ansprüche, Ziele und Computerunterstützung. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag/Gabler-Verlag, 1996.

[ENQUETE-KOMMISSION 1994]

Enquête-Kommission: Schutz des Menschen und der Umwelt: Die Industriegesellschaft gestalten – Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Bonn, 1994.

[FINNVEDEN 2000]

Finnveden, G.: On the Limitations of Life Cycle Assessment and Environmental Systems Analysis Tools in General. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, 5 (2000) 4, S. 229–238.

[FRINGS 1998]

Frings, E.: Stoffstromanalysen. In: Friege; Engelhardt; Henseling. 1998. S. 34–47.

[GELDERMANN 1999A]

Geldermann, J.: Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 16: Technik und Wirtschaft. Zugl.: Dissertation, Universität Karlsruhe, 1999.

[GELDERMANN 1999B]

Geldermann, J.; Spengler, T.; Rentz, O.: Proposal for an integrated approach for the assessment of cross-media aspects relevant for the determination of "Best Available Techniques" BAT in the European Union, International Journal of Life Cycle Assessment 4 (1999) 2, S. 94–105.

[GOEDKOOP 1996]

Goedkoop, M.: The Eco-indicator 95. Final Report, NOH report 9523, PRé Consultants, Amersfoort, The Netherlands, 1996.

[HÄHRE 1998]

Hähre, S.; Spengler, T.; Rentz, O.: Kopplung von Flowsheeting-Modellen und Petri-Netzen zur Planung industrieller Stoffstromnetzwerke – konkretisiert für den Zinkkreislauf in der Metallindustrie. In: Umweltwirtschaftsforum (Schwerpunktthema Stoffstrommanagement), 2/1998.

[HÄHRE 2000]

Hähre, S.: Stoffstrommanagement in der Metallindustrie – zur Gestaltung und techno-ökonomischen Bewertung industrieller Recyclingkonzepte. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 16: Technik und Wirtschaft, 2000. Zugl.: Dissertation, Universität Karlsruhe, 1999.

[HALLAY/PFRIEM 1992]

Hallay, H.; Pfriem, R.: Öko-Controlling. Frankfurt/Main: Campus Verlag, 1992.

[HÄUSLEIN 1995]

Häuslein, A.; Hedemann, J.: Die Bilanzierungssoftware UMBERTO® und mögliche Einsatzgebiete. In: Schmidt, M.; Schorb, A. (Hrsg.): Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits. Berlin: Springer-Verlag, 1995.

[HEIJUNGS 1992]

Heijungs, R.; Guineé, J. B.; Udo De Haes, H. A. (u.a.): Environmental Life Cycle Assessment of Products, Guide & Backgrounds. Leiden: Centre of Environmental Science, 1992.

[IFU 1998A]

Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH: UMBERTO® 3.0 – Handbuch zur Software. 1998.

[IFU 1998B]

Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH: UMBERTO® – Das Konzept der Stoffstromnetze. In: www.ifu.com/software/umberto/programm/stoffstrom.htm. 1998.

[KIPPELEN 1995]

Kippelen, C.; Spengler, T.; Brunn, H. (u.a.): Ganzheitliche Bilanzierung und Bewertung von Produktionsprozessen – dargestellt am Beispiel von Reinigungssystemen für die Oberflächenbehandlung. In: Staub – Reinhaltung der Luft 55, S. 361–366. Berlin: Springer-Verlag, 1995.

[KLAMT 1997]

Klamt, S.: Modellierung von Stoffstromnetzen in UMBERTO®. In: Matthies, M. (Hrsg.): Stoffstromanalyse und -bewertung. Institut für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück, 1997.

[KRÄHLING 1999]

Krähling, H.; Krömer, S. (Hrsg.): Ökobilanz-Studie „Stromversorgung unter Nutzung der SF6-Technologie“. Hannover: Zentralbereich Umweltschutz & Sicherheit der Solvay Deutschland GmbH, 1999.

[KYTZIA 1995]

Kytzia, S.: Die Ökobilanz als Bestandteil des betrieblichen Informationsmanagements. Chur/Zürich: Verlag Rüegger AG, 1995.

[LUNDIE 1999]

Lundie, S.: Ökobilanzierung und Entscheidungstheorie: praxisorientierte Produktbewertung auf der Basis gesellschaftlicher Werthaltungen. Berlin: Springer-Verlag, 1999.

[MÖLLER 1995]

Möller, A.; Rolf, A.: Methodische Ansätze zur Erstellung von Stoffstromanalysen. In: Schmidt, M.; Schorb, A. (Hrsg.): Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits. Berlin: Springer-Verlag, 1995.

[MÖLLER 1997]

Möller, A.; Häuslein, A.; Rolf, A.: Öko-Controlling in Handelsunternehmen: ein Leitfaden für das Stoffstrommanagement. Springer-Verlag: Berlin, 1997.

[MÜLLER-WENK 1978]

Müller-Wenk, R.: Die ökologische Buchhaltung. Frankfurt/Main: Campus Verlag, 1978.

[ORWAT 1995]

Orwat, C.: Informationsinstrumente des Umweltmanagements – ökologische Bilanzierung und Controlling. Berlin: Analytica Verlagsgesellschaft, 1995.

[REINECKE 1997]

Reinecke, M.: Ein Eindruck von Theorie und Anwendbarkeit der Petri-Netze. In: Matthies, M. (Hrsg.): Stoffstromanalyse und -bewertung. Institut für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück, 1997.

[RENTZ 1998]

Rentz, O.; Geldermann, J.; Jahn, C. (u.a.): Vorschlag für eine medienübergreifende Bewertungsmethode zur Identifikation der „Besten Verfügbaren Techniken“ BVT im Rahmen der Arbeiten der Europäischen Kommission/Proposal for an integrated approach for the assessment of cross-media aspects relevant for the determination of “Best Available Techniques” BAT in the European Union. Forschungsprojekt 109 05 006 im Auftrag des Umweltbundesamtes (Berlin). Karlsruhe: Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), 1998.

[RÖPENACK 1998]

Röpenack, A.: Ökologische Produktoptimierung mit Umweltmanagementsystemen und Ökobilanzen, In: Sietz, M. (Hrsg.): Umweltschutz, Produktqualität und Unternehmenserfolg – vom Öko-Audit zur Ökobilanz. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.

[SCHMIDT 1995]

Schmidt, M.: Stoffstromanalysen und Ökobilanzen im Dienste des Umweltschutzes. In: Schmidt, M.; Schorb, A. (Hrsg.): Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits. Berlin: Springer-Verlag, 1995.

[STAHLMANN 1994]

Stahlmann, V.: Umweltverantwortliche Unternehmensführung. München: Verlag C. H. Beck, 1994.

[TUMA 1997]

Tuma, A.; Siestrup, G.; Haasis, H.-D.: Stoffstrommanagement auf der Basis von Fuzzy-Petri-Netzen. In: Grützner, R. (Hrsg.): Modellbildung und Simulation im Umweltbereich. Wiesbaden u.a.: Vieweg-Verlag, 1997.

[UBA-TEXTE 23/95]

UBA-Texte 23/95 (Klöpfer, W.; Renner, I.): Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien. UBA-FB 94-095. In: UBA-Texte 23/95: Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen – Wirkungsbilanz und Bewertung. Berlin, 1995.

[UBA-TEXTE 52/95]

UBA-Texte 52/95 (Schmitz, S.; Oels, H.-J.; Tiedemann, A.): Ökobilanz für Getränkeverpackungen. Berlin, 1995 (Englische Version: UBA-Texte 19/96: Life cycle assessment for drinks packaging systems).

[VAN SOEST 1998]

Van Soest, J. P.; Sas, H.; De Wit, G.: Apples, oranges and environment – Prioritizing environmental measures on the basis of their cost-effectiveness. Delft: Centre for Energy Conservation and Environmental Technology, 1998.

Kapitel 3

[Andrusch 2000]

Andrusch, J. (Firma Stoz): Persönliche Mitteilungen, 2000.

[31. BIMSCHV]

31. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 1999/13/EG über die Begrenzung von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen) vom 21.08.2001; Bundesgesetzblatt Jahrgang 2001, Teil I Nr. 44.

[MAY 1997]

May, T.: Umweltmanagement im Lackierbetrieb. Hannover, 1997.

[ONDRATSCHEK 1999]

Ondratschek, D.: Weiterbildungsmaßnahmen zu lackiertechnischen Fragen in Industrie und Handwerk. In: Jahrbuch für Lackierbetriebe 2000. Hannover: Vincentz Verlag, 1999.

[Stoz 1999]

Stoz, M.: Besonderheiten der Lackverarbeitung in der Lohnbeschichtung. In: Schriftreihe Praxis-Forum. 1999.

[UMWELTBUNDESAMT 1998]

Umweltbundesamt: Hintergrundinformation – Sommersmog. Pressestelle des Umweltbundesamtes. Berlin, Juni 1998.

[UVV]

Unfallverhütungsvorschrift. In: bc-verlag.de/UVVen/100/inhalt.htm

Kapitel 4

[ANDRUSCH 2000]

Andrusch, J. (Firma Stoz): Persönliche Mitteilungen. 2000.

[BROCK 1998]

Brock, T.; Groteklaes, M.; Mischke, P.: Lehrbuch der Lacktechnologie. Hannover: Vincentz Verlag, 1998.

[KLEIN 1999]

Klein, W.: Vorbehandlung von metallischen Beschichtungsuntergründen. In: Jahrbuch für Lackierbetriebe 2000. Hannover, Vincentz Verlag, 1999.

[MAY 1999]

May, T.: Emissionsminderung und Abfallvermeidung – Gesetzliche Anforderungen und Stand der Entsorgungstechnik. In: Jahrbuch für Lackierbetriebe 2000, Hannover: Vincentz Verlag, 1999.

[Stoz 1999]

Stoz, M.: Besonderheiten der Lackverarbeitung in der Lohnbeschichtung. In: Schriftreihe Praxis-Forum. 1999

[Stoz 2000]

www.stoz.de

Kapitel 5

[ABAG 1993]

Obst, M.; Siegfried, F.: Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren – Fahrzeugserienlackierung. Im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), 1993.

[ABAG 1994]

Obst, M.; Hoffmann, U.; Siegfried, F. (u.a.): Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren – Kunststoffteilelackierung. Im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), 1994.

[ABB 2000]

ABB Connect – Das Kundenmagazin der ABB Automation. Ausgabe 02/2000. In: www.stoz.de/Unternehmen/Pressestimmen/ABB-Connect/abb-connect.html.

[AZAPAGIC 2000]

Azapagic, A.; Clift, R.: Allocation of Environmental Burdens in Co-product systems – Process and Product-related Burdens (Part 2). In: The International Journal of Life Cycle Assessment, 5 (2000) 1, S. 31–36.

[BABLICK 1997]

Bablick, M.; Federl, S.: Fachwissen für Maler und Lackierer. 3. Auflage. Köln, 1997.

[BLÜMEL 2000]

Blümel, F.; Geldermann, J.; Lonjaret, J.-P. (u.a.): Stoffstrommanagement für kleine und mittlere Unternehmen aus dem Bereich der Autoreparaturlackierung. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2000.

[BROCK 1998]

Brock, T.; Groteklaes, M.; Mischke, P.: Lehrbuch der Lacktechnologie. Hannover: Vincentz Verlag, 1998.

[DIETZ 1999]

Dietz, T.: Industrielle Wasserlacke und ihre besonderen Verarbeitungsbedingungen. In: Jahrbuch für Lackierbetriebe 2000. Hannover: Vincentz Verlag, 1999.

[GAUDOSIO 1996]

Gaudosio, D.; Brini, S.: SNAP 06 01 01. In: UN/ECE-EMEP-CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook. Version 1.5, Februar 1996.

[HOFFMANN 1999]

Hoffmann, U.; Klein, W.: Energiebilanz von Lackieranlagen. In: Jahrbuch für Lackierbetriebe 2000, Hannover: Vincentz Verlag, 1999.

[LFU 1999]

Landesanstalt für Umweltschutz (LFU); Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (Hrsg.): Betriebliches Material- und Energieflussmanagement – Öko-Effizienz durch nachhaltige Reorganisation. Karlsruhe, 1999.

[MAY 1999]

May, T.: Emissionsminderung und Abfallvermeidung – Gesetzliche Anforderungen und Stand der Entsorgungstechnik. In: Jahrbuch für Lackierbetriebe 2000. Hannover: Vincentz Verlag, 1999.

[REITER 1999]

Reiter&Schefenacker GmbH&Co. KG: Elektrostatische Beschichtung von Kunststoffen am Beispiel der Pkw-Anbauteilelackierung. Im Auftrag der ABAG-itm GmbH, 1999.

[US-EPA 1995]

US-EPA (ed.): AP 42. CD-ROM, Juli 1995.

[VDI 3800]

Verein Deutscher Ingenieure e. V.: VDI-Richtlinie 3800: Kostenermittlung für Anlagen und Maßnahmen zur Emissionsminderung. Düsseldorf, 1979.

Kapitel 6

[BAISNÉE 1994]

Baisnée, P.-F.; Boidot-Forget, M.; Goybet, S.: Critical Comparison of Several Impact Assessment Methods. In: SETAC – Integrating Impact Assessment into LCA. Proceedings of the LCA Symposium at the fourth SETAC Europe Congress. Brussels, 1994.

[BLÜMEL 2001]

Blümel, F.: Stoffstrommanagement in der handwerklichen Autoreparaturlackierung – zur Planung und Steuerung betrieblicher Stoff- und Energieströme in kleinen und mittleren Unternehmen der Autoreparaturlackierung. Vorgelegte Dissertation. Universität Karlsruhe, vorgesehene Veröffentlichung 2001.

[HEIJUNGS 1994]

Heijungs, R.: A generic method for the identification of options for cleaner products. In: Ecological Economics 10 (1994), S. 69–81.

[MAY 2000]

May, T.: Diskussion um die VOC-Richtlinie. In: Journal für Oberflächentechnik, 7 (2000).

[POHL 1996]

Pohl, C.; Reichert, P.; Roš, M. (u.a.): Unsicherheit und Ungenauigkeit in ökologischen Bewertungen. Nachbereitung des 3. Diskussionsforums Ökobilanzen vom 30.10.1996 an der ETH Zürich.

[RENTZ 1998]

Rentz, O.; Geldermann, J.; Jahn, C. (u.a.): Vorschlag für eine medienübergreifende Bewertungsmethode zur Identifikation der „Besten Verfügbaren Techniken“ BVT im Rahmen der Arbeiten der Europäischen Kommission/Proposal for an integrated approach for the assessment of cross-media aspects relevant for the determination of “Best Available Techniques” BAT in the European Union, Forschungsprojekt 109 05 006 im Auftrag des Umweltbundesamtes (Berlin). Karlsruhe: Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), 1998.

[RENTZ 2000]

Rentz, O.; Nunge, S.; Geldermann, J.: Bericht über Beste Verfügbare Techniken (BVT) in den Bereichen der Lack- und Klebstoffanwendung in Deutschland. Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes, Erster Zwischenbericht. Karlsruhe, 2000.

[VAN SOEST 1998]

Van Soest, J. P.; Sas, H.; De Wit, G.: Apples, oranges and environment – Prioritizing environmental measures on the basis of their cost-effectiveness. Delft: Centre for Energy Conservation and Environmental Technology, 1998

Abkürzungsverzeichnis

2K-Lack	Zwei-Komponenten-Lack
ABAG	Abfallberatungsagentur
ABB	Bezeichnung des neuen Lackierroboters von ABB für die Mobiltelefon-Lackierung bei der Firma Stoz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
CML	Centre of Environmental Science
Ca	Kalzium
CaF ₂	Kalzium-Fluorid
CO ₂	Kohlendioxid
CrO ₃	Chromsäure
EU	Europäische Union
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
Gew.-%	Gewichtsprozent
GMF	Bezeichnung des älteren Lackierroboters von GMF für die Mobiltelefon-Lackierung bei der Firma Stoz
Hrsg.	Herausgeber
HVLP	High Volume Low Pressure
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Life Cycle Assessment
LfU	Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg
NM VOC	Non-methan volatile organic compounds (deutsch: nicht-Methan-flüchtige organische Verbindungen)
NO _x	Stickoxide
PVC	Polyvinylchlorid
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SO ₂	Schwefeldioxid
TA Luft	Technische Anleitung Luft
TNV	Thermische Nachverbrennung
UBA	Umweltbundesamt, Berlin
UVV	Unfallverhütungsvorschrift
VDI	Verein der Deutschen Ingenieure
VOC	Volatile organic compounds (deutsch: flüchtige organische Verbindungen)
WGK	Wassergefährdungsklasse
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Phasen der Ökobilanz nach ISO 14040	13
Abb. 2.2:	Bilanzarten der Stoff- und Energiebilanzierung [HALLAY/PFRIEM 1992]	13
Abb. 2.3:	Mögliche Umweltauswirkungen (eigene Darstellung in Anlehnung an [VAN SOEST 1998])	19
Abb. 2.4:	Die Materialdatenbank in UMBERTO® 3.x [IFU 1998B]	24
Abb. 2.5:	Der Netzeditor in UMBERTO® 3.5 [IFU 1998A]	25
Abb. 4.1:	Auftragsstruktur der Stoz Oberflächentechnik GmbH&Co. KG	32
Abb. 4.2:	Grundriss der Stoz Oberflächentechnik GmbH&Co. KG	32
Abb. 4.3:	Fluorieranlage der Stoz Oberflächentechnik GmbH&Co. KG [Stoz 2000]	35
Abb. 4.4:	Entlackungsanlage der Stoz Oberflächentechnik GmbH&Co. KG [Stoz 2000]	37
Abb. 5.1:	Vereinfachter Prozessablauf bei der Lackierung von Mobiltelefonen	40
Abb. 5.2:	Lackiertes Mobiltelefon-Gehäuse [ABB 2000]	40
Abb. 5.3:	Vereinfachte Darstellung einer 2K-Dosier- und Mischanlage [Brock 1998]	41
Abb. 5.4:	Vereinfachter Prozessablauf bei der Lackierung von Weich-PVC-Leisten	43
Abb. 5.5:	Darstellung der Input- und Outputströme in UMBERTO® 3.5	48
Abb. 5.6:	Darstellung der Stoff- und Energiebilanz für einen ausgewählten Prozess in UMBERTO® 3.5	49
Abb. 5.7:	Zusammensetzung der Kosten für das Referenzszenario der Mobiltelefon-Lackierung	55
Abb. 5.8:	Zusammensetzung der Kosten für das Referenzszenario der Lackierung von Weich-PVC-Leisten	59

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Ökokontenrahmen nach Umweltbundesamt	15
Tab. 2.2:	Derzeit diskutierte ökobilanzielle Wirkungskategorien	16
Tab. 2.3:	Ausgewählte Äquivalenzfaktoren für die Klassifizierung [KRÄHLING 1997]	18
Tab. 4.1:	Phosphatiervverfahren und ihre Anwendungen [STOZ 2000]	33
Tab. 4.2:	Phosphatiervverfahren und ihre Eigenschaften [STOZ 2000]	33
Tab. 5.1:	Beschreibung der Szenarien 2 für die Mobiltelefon-Lackierung	56
Tab. 5.2:	Wesentliche Ergebnisse der untersuchten Szenarien für die Lackierung von Mobiltelefonen	58
Tab. 5.3:	Beschreibung und Ergebnisse der Szenarien 2 für die Lackierung von Weich-PVC-Leisten	60
Tab. 5.4:	Wesentliche Ergebnisse der untersuchten Szenarien für die Lackierung von Weich-PVC-Leisten	62

Anhänge

Tab. I-1:	Prozessdaten für die Mobiltelefon-Lackierung	77
Tab. I-2:	Prozessdaten für die Lackierung von Weich-PVC-Leisten	80
Tab. II-1:	Kostendaten für den Prozess der Mobiltelefon-Lackierung	83
Tab. II-2:	Kostendaten für den Prozess der Lackierung von Weich-PVC-Leisten	83
Tab. III-1:	Überblick über die ermittelten Stoff- und Energieflüsse für das Referenzszenario (Ist-Zustand) der Mobiltelefon-Lackierung	84
Tab. III-2:	Kostenvergleich des Szenarios 1: Vergleich zwischen dem GMF-Roboter und dem ABB-Roboter	85
Tab. III-3:	Kostenvergleich zwischen dem GMF-Roboter und dem ABB-Roboter	86
Tab. IV-1:	Überblick über die ermittelten Stoff- und Energieflüsse für das Referenzszenario (Ist-Zustand) der Lackierung von Weich-PVC-Leisten	87
Tab. IV-2:	Vergleich zwischen dem Referenzszenario und Szenario 1	88
Tab. IV-3:	Kostenvergleich zwischen dem Referenzszenario und Szenario 1	88

Anhang I

Prozessdaten für die ausgewählten Prozesse der Mobiltelefon-Lackierung und der Lackierung von Weich-PVC-Leisten

Zugleich entsprechen diese Daten den im Modell verwendeten Parametern zur Definition der Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsmaterialien.

Tab. I-1: Prozessdaten für die Mobiltelefon-Lackierung

Parameter	Wert	Einheiten
Anteil ABB Lackierung		%
Anteil Ausschuss Messband		%
Anteil Ausschuss optische Überprüfung		%
Anteil Emissionen Lackauftrag		Gew.-%
Anteil Emissionen Trocknung nach Lackauftrag		Gew.-%
Anteil GMF Lackierung		%
Anteil Härter Mischvorgang ABB		Gew.-%
Anteil Härter Mischvorgang GMF		Gew.-%
Anteil Härterreste Mischvorgang ABB (in Behälter)		Gew.-%
Anteil Härterreste Mischvorgang GMF (in Behälter)		Gew.-%
Anteil Lack fest in Spritzpistole ABB		Gew.-%
Anteil Lack fest in Spritzpistole GMF		Gew.-%
Anteil Lack Mischvorgang ABB		Gew.-%
Anteil Lack Mischvorgang GMF		Gew.-%
Anteil Lackreste Mischvorgang ABB (in Behälter)		Gew.-%
Anteil Lackreste Mischvorgang GMF (in Behälter)		Gew.-%
Anteil Lösemittel bei Lackverdünnung		Gew.-%
Anzahl Mobiltelefone/Verpackung		Stück/Verpackung
Anzahl Mobiltelefone/Vorrichtung (Lackierung)		Stück/Vorrichtung
Anzahl Mobiltelefone/Vorrichtung (VBH)		Stück/Vorrichtung
Dauer Aufsetzen auf Vorrichtungen (Lackierung)		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer Aufsetzen auf Vorrichtungen (VBH)		min/Vorrichtung
Dauer Auspacken		min/Verpackung
Dauer Entlackung		min/100 Vorrichtungen
Dauer Kodierung		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer Lackauftrag ABB		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer Lackauftrag GMF		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer Messung		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer Mischvorgang ABB		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer Mischvorgang GMF		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer optische Überprüfung		min/1.000 Mobiltelefone

Parameter	Wert	Einheiten
Dauer Reinigung ABB		min/Vorgang
Dauer Reinigung GMF		min/Vorgang
Dauer Spülung 1		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer Spülung 2		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer Spülung Entlacken		min/100 Vorrichtungen
Dauer Staubentfernung (ABB)		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer Staubentfernung (GMF)		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer Trocknen nach Entlacken		min/100 Vorrichtungen
Dauer Trocknen nach Lackierung		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer Trocknen nach VBH		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer Verdünnung Mischplatz		min/Lackbehälter
Dauer Verpacken		min/Verpackung
Dauer Vorbehandlung 1		min/1.000 Mobiltelefone
Dauer Vorbehandlung 2		min/1.000 Mobiltelefone
Dichte Entlackungsmittel		kg/l
Dichte Luft		kg/m ³
Dichte Reinigungslösemittel		kg/l
Effizienz thermische Nachverbrennung		%
Effizienz Adsorption auf Aktivkohle		%
Effizienz Biofiltration		%
Elektrische Leistung Entlackung		
Elektrische Leistung Lackauftrag		kW
Elektrische Leistung Messband		
Elektrische Leistung Mischvorgang GMF		kW
Elektrische Leistung Trockner nach Entlackung		kW
Elektrische Leistung Trockner nach Lackierung		kW
Elektrische Leistung Trockner nach Vorbehandlung		
Emissionsfaktor Lösemittel-Emissionen Entlackung		kg/kg Entlackungsmittel
Emissionsfaktor Lösemittel-Emissionen Lackverdünnung		kg/kg Verdünnungslösemittel
Emissionsfaktor Lösemittel-Emissionen Mischung ABB		kg/kg Lack
Emissionsfaktor Lösemittel-Emissionen Mischung GMF		kg/kg Lack
Emissionsfaktor Lösemittel-Emissionen Spritzpistolenreinigung ABB		kg/kg Reinigungslösemittel
Emissionsfaktor Lösemittel-Emissionen Spritzpistolenreinigung GMF		kg/kg Reinigungslösemittel
Emissionsfaktor Lösemittel-Emissionen Trocknen nach Entlacken		kg/kg Entlackungsmittel
Emissionsfaktor Trocknen nach Vorbehandlung		
Festkörpergehalt Lack anwendungsbereit (lösemittelhaltig)		Gew.-%
Festkörpergehalt Lack anwendungsbereit (wasserverdünnbar)		Gew.-%
Gewicht Behälter Härter		kg/Behälter
Gewicht Behälter Lack		kg/Behälter

Parameter	Wert	Einheiten
Gewicht Spritzpistole ABB		kg/Spritzpistole
Gewicht Spritzpistole GMF		kg/Spritzpistole
Gewicht Verpackung		kg/Verpackung
Gewicht Vorrichtung (Lack)		kg/Vorrichtung
Gewicht Vorrichtung (VBH)		kg/Vorrichtung
Inhalt Lackbehälter		kg/Behälter
Lösemittelgehalt Lack anwendungsbereit (lösemittelhaltig)		Gew.-%
Lösemittelgehalt Lack Lieferzustand (lösemittelhaltig)		Gew.-%
Lösemittelgehalt Lack verdünnt (lösemittelhaltig)		Gew.-%
Lösemittelgehalt Lack anwendungsbereit (wasserverdünnbar)		Gew.-%
Lösemittelgehalt Lack Lieferzustand (wasserverdünnbar)		Gew.-%
Lösemittelgehalt Lack verdünnt (wasserverdünnbar)		Gew.-%
Lösemittelgehalt Verdünnung für wasserverdünnbaren Lack		Gew.-%
Menge Abdunstung Spüle 1		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Abdunstung Spüle 2		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Abluft Lackauftrag ABB		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Abluft Lackauftrag GMF		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Abluft Trocknung nach Entlackung		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Abluft Trocknung nach Lackierung		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Abluft Trocknung nach Vorbehandlung		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Abwasser aus Spüle 1 (VBH)		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Abwasser aus Spüle 2 (VBH)		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Abwasser Lackierung ABB		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Abwasser Lackierung GMF		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Abwasser Spülung nach Entlackung		kg/100 Vorrichtungen
Menge CaF ₂		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Ca-Gemisch		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Druckluft Lackierung ABB		l/min
Menge Druckluft Lackierung GMF		l/min
Menge Druckluft Spritzpistolenreinigung		l/min
Menge Druckluft Staubentfernen		l/min
Menge Entlackungsmittel		kg/100 Vorrichtungen
Menge Galvanikschlamm		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Lack auf Teil		g/Teil
Menge Tinte		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Vorbehandlungsmittel 1		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Vorbehandlungsmittel 2		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Wasser Lackierung ABB		kg/1.000 Mobiltelefone
Menge Wasser Lackierung GMF		kg/1.000 Mobiltelefone

Parameter	Wert	Einheiten
Thermische Leistung Lackierung		kW
Thermische Leistung Trocknung		kW
Verbrauch Druckluft Lackiervorgang		l/min
Verbrauch Druckluft Spritzpistolenreinigung		l/min
Verbrauch Druckluft Staubentfernung		l/min
Verbrauch Zuluft Lackiervorgang		kg/h

Tab. I-2: Prozessdaten für die Lackierung von Weich-PVC-Leisten

Parameter	Wert	Einheiten
Anteil Ausschuss		%
Anteil Härter (Mischverhältnis)		Gew.-%
Anteil Härterreste in Behälter (Mischvorgang)		Gew.-%
Anteil Lack (Mischverhältnis)		Gew.-%
Anteil Lackreste (Lackauftrag, große Teile)		Gew.-%
Anteil Lackreste (Lackauftrag, kleine Teile)		Gew.-%
Anteil Lackreste in Behälter (Mischvorgang)		Gew.-%
Anteil Lösemittel-Emissionen Lackauftrag		Gew.-%
Anteil Lösemittel-Emissionen Trocknungsvorgang		Gew.-%
Anteil Verdünnungslösemittel		kg/kg Lack
Anzahl Leisten pro Spritzpistolenreinigungsvorgang		Stück/Vorgang
Dauer auspacken/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Dauer Lackiervorgang/100 Weich-PVC-Leisten (große Teile)		min/100 Weich-PVC-Leisten
Dauer Lackiervorgang/100 Weich-PVC-Leisten (kleine Teile)		min/100 Weich-PVC-Leisten
Dauer Lackverdünnung (Mischplatz)		min/Behälter
Dauer manuelle Staubentfernung/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Dauer Mischvorgang/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Dauer optische Überprüfung/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Dauer Staubentfernung/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Dauer Trocknung Lack/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Dauer Verpacken/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Dauer Vorrichten/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Dichte Lack		kg/m ³
Dichte Luft		kg/m ³
Dimension großes Teil		cm ²
Dimension kleines Teil		cm ²

Parameter	Wert	Einheiten
Effizienz ADS-Anlage		%
Effizienz Biofiltration		%
Effizienz Spritzpistole, manuell		%
Effizienz Spritzpistole, Roboter		%
Effizienz TNV-Anlage		%
Elektrische Leistung Lackierung		kW
Elektrische Leistung Lackmischung		kW
Elektrische Leistung Trocknung		kW
Emissionsfaktor Lackverdünnungsvorgang		kg VOC/kg Lösemittel
Emissionsfaktor Mischvorgang (große Teile)		kg VOC/kg Lösemittel
Emissionsfaktor Mischvorgang (kleine Teile)		kg VOC/kg Lösemittel
Emissionsfaktor Spritzpistolenreinigung		kg VOC/kg Lösemittel
Festkörpergehalt Lack anwendungsbereit (lösemittelhaltig)		Gew.-%
Festkörpergehalt Lack anwendungsbereit (wasserverdünnbar)		Gew.-%
Gewicht Behälter Härter		kg/Behälter
Gewicht Behälter Lack		kg/Behälter
Gewicht große Weich-PVC-Leiste (ohne Beschichtung)		g/Stück
Gewicht kleine Weich-PVC-Leiste (ohne Beschichtung)		g/Stück
Gewicht Spritzpistole		kg/Spritzpistole
Gewicht Staubtuch		g/Staubtuch
Gewicht Verpackung (Ausgang, kleine und große Teile)		kg/Verpackung
Gewicht Verpackung (Eingang, große Teile)		kg/Verpackung
Gewicht Verpackung (Eingang, kleine Teile)		kg/Verpackung
Gewicht Vorrichtung		kg/Vorrichtung
Inhalt Lackbehälter		kg/Behälter
Lösemittelgehalt Lack anwendungsbereit (lösemittelhaltig)		Gew.-%
Lösemittelgehalt Lack anwendungsbereit (wasserverdünnbar)		Gew.-%
Lösemittelgehalt Lack verdünnt (lösemittelhaltig)		Gew.-%
Lösemittelgehalt Lack verdünnt (wasserverdünnbar)		Gew.-%
Lösemittelgehalt Lack vor Verdünnung (lösemittelhaltig)		Gew.-%
Lösemittelgehalt Lack vor Verdünnung (wasserverdünnbar)		Gew.-%
Lösemittelgehalt Verdünnung für wasserverdünnbaren Lack		Gew.-%
Menge Abluft Lackierung		kg/h
Menge Abluft Trocknung		kg/h
Menge Abwasser Lackiervorgang		kg/100 Weich-PVC-Leisten
Menge große Weich-PVC-Leisten/Verpackung (Ausgang)		Stück/Verpackung
Menge große Weich-PVC-Leisten/Verpackung (Eingang)		Stück/Verpackung
Menge große Weich-PVC-Leisten/Vorrichtung		Stück/Vorrichtung

Parameter	Wert	Einheiten
Menge kleine Weich-PVC-Leisten/Verpackung (Eingang)		Stück/Verpackung
Menge kleine Weich-PVC-Leisten/Vorrichtung		Stück/Vorrichtung
Menge Spülverdünnung Spritzpistolenreinigung		l/Vorgang
Menge Staubtücher/100 Weich-PVC-Leisten		Stück/100 Weich-PVC-Leisten
Menge Wasser Lackiervorgang/100 Weich-PVC-Leisten		kg/100 Weich-PVC-Leisten
Menge Zuluft Lackiervorgang/100 Weich-PVC-Leisten		kg/h
Prozesszeit auspacken/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Prozesszeit Lackiervorgang/100 Weich-PVC-Leisten (große Teile)		min/100 Weich-PVC-Leisten
Prozesszeit Lackiervorgang/100 Weich-PVC-Leisten (kleine Teile)		min/100 Weich-PVC-Leisten
Prozesszeit Lackverdünnung (Mischplatz)		min/Behälter
Prozesszeit manuelle Staubentfernung/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Prozesszeit Mischvorgang/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Prozesszeit optische Überprüfung/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Prozesszeit Staubentfernung/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Prozesszeit Trocknung Lack/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Prozesszeit verpacken/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Prozesszeit vorrichten/100 Weich-PVC-Leisten		min/100 Weich-PVC-Leisten
Schichtdicke Lack		µm
Thermische Leistung Lackierung		kW
Thermische Leistung Trocknung		kW
Verbrauch Druckluft Lackiervorgang		l/min
Verbrauch Druckluft Spritzpistolenreinigung		l/min
Verbrauch Druckluft Staubentfernung		l/min
Verbrauch Zuluft Lackiervorgang		kg/h

Anhang II

Kostendaten für die ausgewählten Prozesse der Mobiltelefon-Lackierung und der Lackierung von Weich-PVC-Leisten

Tab. II-1: Kostendaten für den Prozess der Mobiltelefon-Lackierung

Preise und Entsorgungskosten	Wert	Einheiten
Vorbehandlung		
Vorbehandlungsmittel 1		DM für ein 2.000-Liter-Bad
Vorbehandlungsmittel 2		DM/kg
Calcium-Gemisch (Kalk-Chips)		DM/t
Lackierung		
Stammlack		DM/kg
Härter		DM/kg
Verdünnungslösemittel		DM/l
Reinigungslösemittel		DM/l
Wasser		
Trinkwasser		DM/m ³
Entlackung		
Entlackungsmittel		DM/kg
Entsorgung		
Lackkoagulat		DM/t
Reinigungslösemittel/Verdünnung		DM/kg
CaF ₂		DM/t
Galvanikschlamm		DM/t

Tab. II-2: Kostendaten für den Prozess der Lackierung von Weich-PVC-Leisten

Preise und Entsorgungskosten	Wert	Einheiten
Lackierung		
Stammlack		DM/kg
Härter		DM/kg
Verdünnungslösemittel		DM/l
Reinigungslösemittel		DM/l
Wasser		
Trinkwasser		DM/m ³
Entsorgung		
Lackabfälle, fest		DM/t
Lackabfälle, flüssig/pastös		DM/t
Reinigungslösemittel/Verdünnung		DM/kg

Anhang III

Auswertung der Szenarioanalyse und Kostenvergleich für den Prozess der Mobiltelefon-Lackierung

Tab. III-1: Überblick über die ermittelten Stoff- und Energieflüsse für das Referenzszenario (Ist-Zustand) der Mobiltelefon-Lackierung

Lackierung von 1 Mio. Mobiltelefonen

Material (Input)	Menge	Einheit	Material (Output)	Menge	Einheit
Vorbehandlung			Lackkoagulat		kg
Vorbehandlungsmittel 1		kg	Reinigungslösemittel		kg
Vorbehandlungsmittel 2		kg	Galvanikschlamm		kg
Ca-Gemisch		kg	Entlackungsschlamm		kg
Lackierung			Lösemittel-Emissionen		kg
Stammlack		kg	ABB-Roboter		
Härter		kg	Lackauftrag		kg
Lackverdünnung		kg	Spritzpistolenreinigung		kg
Entlackung			GMF-Roboter		
Entlackungsmittel		kg	Lackauftrag		kg
Weiteres			Spritzpistolenreinigung		kg
Trinkwasser		kg	Weiteres		
Reinigungslösemittel		kg	Lackverdünnung		kg
			Trocknungsvorgang (nach Lackauftrag)		kg
			Entlackung (Entlackungsvorgang)		kg
			Entlackung (Trocknungsvorgang)		kg

Tab. III-2: Kostenvergleich des Szenarios 1: Vergleich zwischen dem GMF-Roboter und dem ABB-Roboter

Lackierung von 1 Mio. Mobiltelefonen

Material (Input)	Menge (GMF)	Einheit	Menge (ABB)	Einheit	Differenz (absolut)	Einheit	Differenz (prozentual)	Einheit
Vorbehandlung								
Vorbehandlungsmittel 1		kg		kg		kg		%
Vorbehandlungsmittel 2		kg		kg		kg		%
Ca-Gemisch		kg		kg		kg		%
Lackierung								
Stammlack		kg		kg		kg		%
Härter		kg		kg		kg		%
Lackverdünnung		kg		kg		kg		%
Entlackung								
Entlackungsmittel		kg		kg		kg		%
Weiteres								
Trinkwasser		kg		kg		kg		%
Reinigungslösemittel		kg		kg		kg		%
Material (Output)								
Lackkoagulat		kg		kg		kg		%
Reinigungslösemittel		kg		kg		kg		%
Galvanikschlamm		kg		kg		kg		%
Entlackungsschlamm		kg		kg		kg		%
Lösemittel-Emissionen								
ABB								
Lackauftrag		kg		kg		kg		%
Spritzpistolenreinigung		kg		kg		kg		%
GMF								
Lackauftrag		kg		kg		kg		%
Spritzpistolenreinigung		kg		kg		kg		%
Weiteres								
Lackverdünnung		kg		kg		kg		%
Trocknungsvorgang (nach Lackauftrag)		kg		kg		kg		%
Entlackung (Entlackungsvorgang)		kg		kg		kg		%
Entlackung (Trocknungsvorgang)		kg		kg		kg		%

Tab. III-3: Kostenvergleich zwischen dem GMF-Roboter und dem ABB-Roboter

Lackierung von 1 Mio. Mobiltelefonen

Material (Input)	Menge GMF	Menge ABB	Einheit	Preis GMF	Preis ABB	Einheit	Ausgaben GMF	Ausgaben ABB	Ausgaben- differenz	Einheit
Vorbehandlung										DM
Vorbehandlungsmittel 1			kg							DM
Vorbehandlungsmittel 2			kg			DM/kg				DM
Calcium-Gemisch			kg			DM/t				DM
Lackierung										DM
Stammlack			kg			DM/kg				DM
Härter			kg			DM/kg				DM
Lackverdünnung			kg			DM/l				DM
Entlackung										DM
Entlackungsmittel			kg			DM/kg				DM
Weiteres										DM
Trinkwasser			kg			DM/m ³				DM
Reinigungslösemittel			kg			DM/l				DM
Material (Output)										
Lackkoagulat			kg			DM/t				DM
Reinigungslösemittel			kg			DM/kg				DM
Galvanikschlamm			kg			DM/t				DM
Entlackungsschlamm			kg			DM/t				DM
Summe:										DM

Anhang IV

Auswertung der Szenarioanalyse für den Prozess der Lackierung von Weich-PVC-Leisten

Tab. IV-1: Überblick über die ermittelten Stoff- und Energieflüsse für das Referenzszenario (Ist-Zustand) der Lackierung von Weich-PVC-Leisten

Lackierung von 970.000 Weich-PVC-Leisten

Material (Input)	Menge	Einheit	Material (Output)	Menge	Einheit
Druckluft		kg	Lackabfälle		
Staubentfernung		kg	flüssig/pastös		kg
Lackauftrag		kg	Lösemittel, verschmutzt		
Spritzpistolenreinigung		kg	Reinigungslösemittel		kg
Elektrische Energie		kJ	Lösemittel-Emissionen		kg
Mischvorgang		kJ	Lackauftrag		kg
Lackauftrag		kJ	Trocknungsvorgang		kg
Trocknungsvorgang		kJ	Lackverdünnung		kg
Thermische Energie		kJ	Spritzpistolenreinigung		kg
Lackauftrag		kJ	Sonstiges		
Trocknungsvorgang		kJ	Staubtücher, verschmutzt		kg
Lackmaterial					
Härter		kg			
Lack		kg			
Lackverdünnung		kg			
Sonstiges					
Reinigungslösemittel		kg			
Staubtücher		Stück			
Trinkwasser		kg			

Tab. IV-2: Vergleich zwischen dem Referenzszenario und Szenario I

Lackierung von 970.000 Weich-PVC-Leisten

Material (Input)	Menge Szenario 0	Menge Szenario 1	Einheit	Differenz (absolut)	Einheit	Differenz (prozentual)	Einheit
Lackmaterial							
Härter			kg		kg		%
Lack			kg		kg		%
Lackverdünnung			kg		kg		%
Sonstiges							
Reinigungslösemittel			kg		kg		%
Trinkwasser			kg		kg		%
Material (Output)							
Lackabfälle							
flüssig/pastös			kg		kg		%
Reinigungslösemittel							
Reinigungslösemittel			kg		kg		%
Lösemittel-Emissionen							
Lackauftrag			kg		kg		%
Trocknungsvorgang			kg		kg		%
Lackverdünnung			kg		kg		%
Spritzpistolenreinigung			kg		kg		%

Tab. IV-3: Kostenvergleich zwischen dem Referenzszenario und Szenario I

Lackierung von 970.000 Weich-PVC-Leisten

Material(Input)	Menge Szenario 0	Menge Szenario 1	Einheit	Preis Szenario 0	Preis Szenario 1	Einheit	Ausgaben Szenario 0	Ausgaben Szenario 1	Ausgaben-differenz	Einheit
Lackmaterial										
Härter			kg			DM/kg				DM
Lack			kg			DM/kg				DM
Lackverdünnung			kg			DM/kg				DM
Sonstiges										
Reinigungslösemittel			kg			DM/kg				DM
Material (Output)										DM
Lackabfälle										
flüssig/pastös			kg			DM/t				DM
Lösemittel, verschmutzt										DM
Reinigungslösemittel			kg			DM/kg				DM
Summe:										DM

Anhang V

Veröffentlichungen der Reihe Industrie und Gewerbe ISSN 0949-0485

Titel	Band	Jahr der Herausgabe	Preis (falls lieferbar)
Regelwerke und beste verfügbare Techniken zur Luftreinhaltung sowie Einsatz von Abfällen in der Zementindustrie	1	1999	kostenlos
Entwicklung der Emissionen krebserzeugender Luftschadstoffe in Baden-Württemberg auf der Basis der Emissionserklärungen für das Jahr 1996	2	2000	kostenlos
Betriebliche Energie- und Stoffstrommanagementsysteme Methoden, Praxiserfahrungen, Software – eine Marktanalyse	3	2000	9 €
Blockheizkraftwerke Technik, Ökologie, Ökonomie	4	2001	6 €
Holz hackschnitzel-Heizanlagen	5	2001	9 €
Energie- und Stoffstromoptimierung in der betrieblichen Praxis der Lohnlackierung	6	2002	8 €

