

Energie-/Stoffstrommanagement und Prozesscontrolling für Galvanik-Betriebe

IMPRESSUM

Titel	Energie-/Stoffstrommanagement und Prozesscontrolling für Galvanik-Betriebe
Herausgeber	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Postfach 21 07 52 D-76157 Karlsruhe http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de
ISSN	0949-0485 (Bd. 10, 2004)
Bearbeitung	GWU mbH Dr. M. Urban, B. Stürznickel Niederlassung Mülheim: Mellinghofer Straße 77 45473 Mülheim an der Ruhr http://www.gwu.net
Redaktion	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) Abteilung 3 – Industrie und Gewerbe, Kreislaufwirtschaft Sabine Hellgardt, Karl-Heinz Röhm, Dr. Gabriel Striegel, Volker Schäferjohann
Umschlaglayout	Stephan May Grafik-Design, D-76227 Karlsruhe
Titelbild	Jutta Ruloff, Dipl. Designerin, D-76275 Ettlingen
Druck	
Bezug über	Verlagsauslieferung der LfU bei: JVA Mannheim – Druckerei Herzogenriedstraße 111 68169 Mannheim Telefax 0621/398-370
Preis	8 € Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet

INHALT

1	EINLEITUNG	4
2	INNERBETRIEBLICHES STOFF- UND ENERGIESTROMMANAGEMENT	5
2.1	Material- und Energiebilanz	5
2.2	Schließung von Datenlücken	6
2.3	Stoffstromsoftware	8
3	STAND DER TECHNIK / OPTIMIERUNGSPOTENZIALE	9
3.1	Verringerung der Elektrolytausschleppung	9
3.2	Kapazitätserhöhende Maßnahmen	10
4	PROZESSORIENTIERTE KOSTENRECHNUNG POK	12
4.1	Durchschnittlicher Stundensatz	12
4.2	Detaillierter Stundensatz	14
5	PROZESSKENNZAHLEN PKZ	17
5.1	Indikatorenhierarchie	17
5.2	Bezugsgröße Oberfläche	18
5.3	Indikatoren für operative Prozesse	18
6	WEITERFÜHRENDE LITERATUR	20
7	ANHANG	21
7.1	Formelzeichen und Einheiten / Abkürzungen	21
7.2	Personal- und Maschinenkosten (Beispiel)	22
7.3	Vorbehandlungskosten (Beispiel)	24
7.4	Legierungsbeschichtung (Beispiel)	25
7.5	Nachbehandlungskosten (Beispiel)	26
7.6	Infrastrukturkosten (Beispiel)	28
7.7	Zusammenfassung Stundensatzkalkulationsschema (Beispiel)	30
7.8	Ergebnistabelle Stundensatzkalkulation (Beispiel)	32
7.9	Kennzahlenschema (Beispiel)	34
7.10	Berechnung der beschichteten Oberfläche (Faradaysches Gesetz)	36
7.11	Berechnung der beschichteten Oberfläche (Massenbilanz)	37

1 Einleitung

Bei der Oberflächenveredelung handelt es sich um eine wachstumsstarke Branche. Die Bedienung des Marktes erfordert große Flexibilität, um mit den schnell wechselnden und steigenden Anforderungen Schritt zu halten. Als Beispiel sei hier nur die Anforderung der Automobilindustrie genannt, Zink- bzw. Zinklegierungsoberflächen Cr(VI)-frei zu passivieren.

Galvanotechnische Betriebe müssen also in der Lage sein, innovative Lösungen zu entwickeln, die eine Wirtschaftlichkeit innerhalb der Fertigungskette sicherstellen und die den außerordentlich hohen Kostendruck aufzufangen im Stande sind. Aus diesem Grunde gewinnt die Ausschöpfung verborgener Kostensenkungspotenziale auch in den bestehenden Prozessen mehr und mehr an Bedeutung.

Es reicht nicht mehr aus, einzelne Kosten, wie z.B. die Personalkosten, zu senken. Vielmehr ist es notwendig, die Kostenstruktur im Unternehmen nachhaltig zu verändern und damit Kostensenkungspotenziale sichtbar zu machen.

Einen entscheidenden Ansatzpunkt zur Erkennung von Optimierungspotenzialen bietet das nachhaltige Prozesscontrolling.

Das systematische, nachhaltige Prozesscontrolling unterstützt dabei, zuverlässig Optimierungspotenziale im Unternehmen zu erkennen. Dieses geschieht insbesondere durch Soll-Ist-Vergleiche und Zeitreihenanalysen. Durch monetäre Bewertung der Veränderungen lassen sich auch die Analyseschwerpunkte priorisieren, um die Umsetzungsreihenfolge festzulegen.

Das Prozesscontrolling soll dazu dienen, systematisch Optimierungs- bzw. Kostensenkungspotenziale zu ermitteln sowie die Kommunikation innerhalb des Unternehmens zu verbessern,

damit verborgene Potenziale genutzt werden können. Es stellt also kein reines Kontrollinstrument dar.

Durch ein nachhaltiges Prozesscontrolling können gezielte Fragen gestellt werden, die zu einer Prozessverbesserung auffordern. Die Entwicklung und Umsetzung konkreter Einsparmaßnahmen erfolgt im nachfolgenden Schritt durch das Betriebspersonal, welches die Prozesse am besten kennt.

Ziel des Leitfadens ist es, ein für Unternehmen leicht einfühbares, nachhaltiges Prozesscontrolling (PC) darzustellen. Das PC soll der Unternehmensleitung ermöglichen, Maßnahmen zur Steigerung der Prozesseffizienz, z.B. in Bezug auf die Ausbringung und in Bezug auf den Einsatz von Material, Energie sowie von Personal- und Maschinenkapazität umfassend zu analysieren und Anregungen für technische und organisatorische Optimierungsmaßnahmen zu erhalten.

Der vorliegende Leitfaden liefert einen Überblick über die drei Instrumente eines nachhaltigen Prozesscontrollings. Ausgehend von der Stoff- und Energiestromanalyse (**SEM**) über die prozessorientierte Kostenrechnung (**POK**) bis hin zum Aufbau eines Prozesskennzahlensystems (**PKZ**) als Controlling- und Steuerungsinstrument für Galvanik-Betriebe.

Eine wesentliche Grundlage für die Erstellung des Leitfadens stellt das durch die LfU Baden-Württemberg geförderte Projekt „Aufbau und Installation eines nachhaltigen Prozesscontrollings bei der Wieland GmbH, Mannheim“ dar. Daneben sind die Erfahrungen bezüglich der Anwendung des Stoffstrommanagements, der prozessorientierten Kostenrechnung sowie des Prozesscontrollings in verschiedenen Unternehmen unterschiedlicher Branchen eingeflossen.

2 Innerbetriebliches Stoff- und Energiestrommanagement

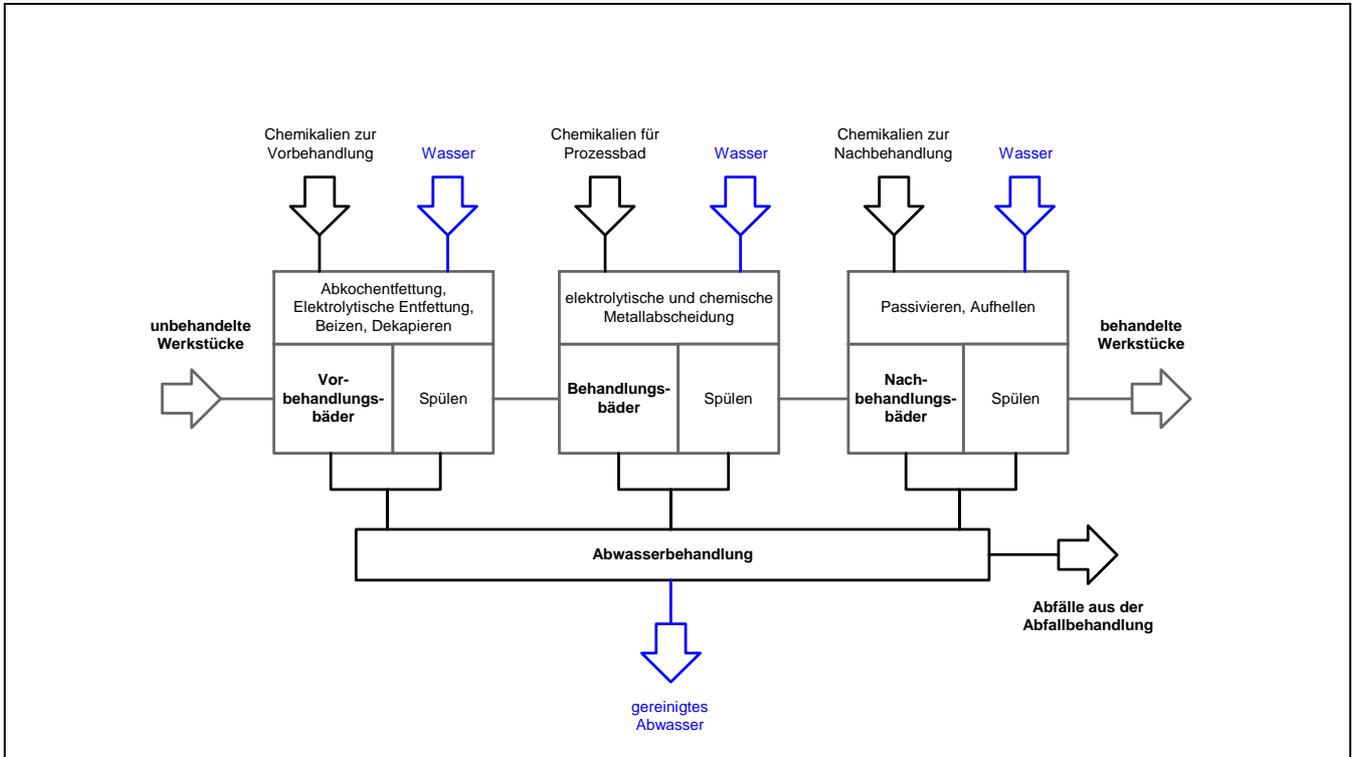


Abb. 1: Schematische Darstellung der elektrolytischen Oberflächenbehandlung in wässrigen Medien.

Das moderne Stoff- und Energiestrommanagement (SEM) hat die Aufgabe, die Transparenz über die Produktionsprozesse im Unternehmen zu erhöhen und die Identifizierung von Optimierungs- und Kostensenkungspotenzialen sowie die Entwicklung von integrierten Lösungsansätzen zu unterstützen.

2.1 Material- und Energiebilanz

Der Grundsatz der Bilanzierung besteht in der Annahme, dass die in die Produktionsanlage eingebrachte Material- und Energiemenge die Anlage auch wieder verlassen müssen.



Abb. 2: SEM (schematisch).

Um einen Gesamtüberblick über die im Unternehmen bewegten Material- und Energieströme zu erhalten (Abb. 2), ist eine Input-/Output-Bilanz zu erstellen. Als Betrachtungsraum kann ein gesamter Produktionsstandort, eine Anlagengruppe oder auch eine einzelne Anlage herangezogen werden. Verfahrensbeschreibungen, Verfahrensfliessbilder, Genehmigungsunterlagen, QM-Unterlagen und Anlagenbegehungen stellen die Basis für die Skizzierung der Anlagenstruktur dar.

Das Anlagenschema, wie in Abb. 1 für die elektrolytische Oberflächenbehandlung in wässrigen Medien dargestellt, ist im zweiten Schritt mit Daten zu füllen. Dabei sind alle Input- und Outputströme zu erfassen. Im Folgenden sind die wesentlichen zu erfassenden Mengen- und Energieströme nach Gruppen zusammengefasst aufgezählt.

Für die **Stoffbilanz** sind die folgenden Daten von besonderem Interesse:

Prozesslösung

- Bedarf an Prozesschemikalien
- Verwurfsvolumina der Prozesslösung (Stoffkonzentration)
- Verdunstungsverluste
- Zusammensetzung der Prozesslösung

Konzentrationsänderungen

- Massenströme Fremdstoffanreicherung
- Elektrolytverschleppung
- Zusammensetzung Stadtwasser / Brunnenwasser

Spülwasser

- Verdunstungsverluste
- Verwurfsvolumina der Standspülen (Stoffkonzentration)
- Spülwasservolumina in Spülkaskaden
- Zusammensetzung des Spülwassers

weitere relevante Stoffströme

- Volumenströme rückgeführter Spüllösungen
Verdunstungsverlust
- Zulaufvolumenströme von z.B. Ionenaustauscherkreislaufanlagen
- Zusammensetzung der Stoffströme

Für die **Wasserbilanz** sind die unten aufgezählten Daten zu ermitteln.

- Verwurf von Prozess- und Spüllösungen (Wasseranteil)
- Spülwasservolumina in Spülkaskaden
- Verdunstungsverluste
- Wasserbedarf zum Ausgleich der Verdunstungsverluste
- Einsatz in Wasser gelöster Chemikalien

Für die **Energiebilanz** sind von besonderem Interesse:

- der Stromverbrauch für die elektrolytische Beschichtung inklusive der Stromausbeute

- Heizenergieverbrauch für Badtemperierung (Dampf, elektrische Energie)
- Druckluftverluste (Messung der Leistungsaufnahme des Kompressors a) im Normalbetrieb und b) bei Stillstand der Produktion)
- der Kühlenergiebedarf für die Kühlkristallisation

2.2 Schließung von Datenlücken

Häufig treten bei der ersten Analyse Lücken auf, das heißt, dass die Summe der Produktionsmenge und der Abfallmenge nicht der Summe der Einsatzmaterialmengen entspricht. Treten solche Lücken auf, sind diese zu analysieren.

Insbesondere ist hier eine Analyse der Datenstruktur im Unternehmen angezeigt. Eine dezentrale Datenhaltung, ein fehlendes datenführendes System und die damit häufig verbundene Datenredundanz erschweren häufig eine einfache und schnelle Auswertung. Ein möglichst geschlossenes Zahlenwerk ist aber für die sichere Überwachung und Steuerung einer Anlage / eines Betriebes erforderlich.

Die Stoff- und Energiestromanalyse ist also in der Regel auch mit einer Analyse der Datenstruktur verknüpft und kann Hinweise liefern, diese Datenstruktur zu verbessern.

Zur Schließung der Datenlücken können verschiedene Ansätze verfolgt werden. Verfügbare Daten sollten aus den vorhandenen Datenquellen bezogen werden. Bei Daten, die nicht vorhanden sind bestehen die Möglichkeiten der Datenerfassung oder auch einer Abschätzung (z.B. wenn es um die verursachungsgerechte Zuordnung von Abfallmengen geht) basierend auf den Erfahrungen des Betriebspersonals. Häufig reichen solche Abschätzungen aus, um die Betriebssituation hinreichend genau zu beschreiben.

Die folgende Aufzählung zeigt mögliche Datenquellen für die Stoff- und Energiestromanalyse. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zum Teil alternative Datenquellen genannt sind, die nur bei Bedarf herangezogen werden.

Mögliche Datenquellen:

- Warenwirtschaftssystem (anlagenbezogene Entnahmemengen, Auslieferungsmengen jeweils inklusive Zeitbezug)
- Rezepturen / Stücklisten
- Einkaufsmengen inklusive Zeitbezug
- Inventurlisten (inklusive Zeitbezug)
- Abfallbilanz (anlagenbezogene Abfallmengen, inklusive Zeitbezug)
- Kontierungsliste (Zuordnung von Materialien zu den Anlagen, inklusive Zeitbezug bzw. Gültigkeit)
- Verstärkungspläne (Chemikalienzugabemengen, inklusive Zeitbezug)
- Messwerte chemischer Analysen der Prozessbäder inklusive Zeitbezug
- Anlagenbezogene Messwerte bezüglich des Energieverbrauches (alternativ Anschlusswerte)
- Anlagenbezogen erfasste durchschnittliche Materialeinsatzmengen je Zeiteinheit
- Prozessdaten
- automatisch erfasste Messwerte aus der Produktion (Verbrauchswerte),
- Aufschreibungen
- Daten aus der Kostenrechnung

Wichtig bei der Analyse ist die anlagenbezogene Datenerhebung. Eine grobe Standortbilanz erlaubt lediglich durchschnittliche Bewertungen. Detailliertere anlagen- bzw. produktbezogene Auswertungen bedürfen einer präziseren Datenerfassung und -zuordnung.

Von besonderem Interesse sind häufig **prozessbedingte Verlustströme** wie die Ausschleppung von Elektrolyten, der Verwurf von Prozesslösungen und Spülwasser, Verdunstungsverluste, Qualitätsausschuss, Abfall, Abwasser und Emissionen. Zur Schließung der Massenbilanz bedarf es deren Ermittlung oder zumindest deren Abschätzung. Die wesentlichen **Stoffverluste** und die Methoden zu ihrer Ermittlung sind in der folgenden Aufzählung erläutert.

Elektrolytausschleppung:

Zur Ermittlung der Elektrolytausschleppung können zwei Methoden eingesetzt werden, die Verbrauchs- und die Anreicherungsmethode.

Bei der Verbrauchsmethode wird die Konzentrationsabnahme eines Stoffes gemessen, der durch die im Elektrolyten ablaufenden Prozess keiner Umwandlung unterliegt. Bei diesem Stoff erfolgt die Konzentrationsabnahme lediglich durch Ausschleppung. Eine hinreichend lange Messzeit ist erforderlich, um ein repräsentatives Teilespektrum zu berücksichtigen.

Bei der Anreicherungsmethode wird die Konzentrationszunahme eines ausgeschleppten Elektrolyten in der nachfolgenden Spülstufe (Standspüle!) gemessen. Eine konstante Konzentration des Referenzparameters in der Prozesslösung ist bei dieser Methode sicherzustellen.

Die Messergebnisse beider Messmethoden für die Referenzchemikalie kann auf die anderen Chemikalien unter Berücksichtigung der jeweiligen Konzentration übertragen werden.

Verwurf:

Durch die Auswertung der Dokumentation verworfener Materialmengen inklusive der Verwurfsgründe lassen sich die erforderlichen Daten für die Bilanz ermitteln. (Fehlergrund: Verunreinigung der Prozesslösung durch Öle/Fette, Metalle, Fremdmetalle, organische Abbauprodukte, anorganische Umwandlungsprodukte, Algen- oder Bakterienbefall in Spülbehältern usw.). Die Erfassung der Fehlergründe ist wichtig, da sie die Grundlage für die Ursachenbekämpfung darstellen.

Verdunstungsverluste:

Die Verdunstungsverluste sind experimentell unter Betriebsbedingungen (gleiche Temperatur, gleiche Absaugung etc.) ohne Warendurchsatz durch die Prozesslösung (Ausschleppung) zu ermitteln. Automatische Dosierungen von Prozesschemikalien oder Spülwasserrückführungen sind während der Messung abzuschalten. Der Verdunstungsverlust wird mittels der Oberfläche

des Prozessbades und der Füllhöhenänderung (Anfangsfüllstand – Endfüllstand) bezogen auf den Messzeitraum berechnet.

Qualitätsausschuss:

Qualitätsausschuss reduziert die Anlagenkapazität für Gutware. Die Vermeidung von Qualitätsausschuss ist somit von großer Bedeutung. Die Erfassung des anlagenbezogenen Qualitätsausschusses inklusive der Fehlergründe ist als Grundlage für eine Ursachenanalyse erforderlich. Die Fehlergründe sind zu erfassen, um Ansatzpunkte für die Vermeidung von Ausschuss zu erhalten.

Abfall, Emissionen, Abwasser:

Für die Schließung der Massenbilanzierung und die verursachungsgerechte Zuordnung von Kosten (Materialkosten, Entsorgungskosten etc.) ist die anlagenbezogene Erfassung von Abfall- und Abwassermengen (und Emissionen) erforderlich. Häufig werden in den Unternehmen insbesondere die Abfallmengen nicht verursachungsgerecht mit Bezug zur Anfallstelle erfasst. Für die Stoffstromanalyse kann hier eine Abschätzung durch das erfahrende Betriebspersonal vorgenommen werden.

2.3 Stoffstromsoftware

Grundsätzlich ist es ratsam, eine Stoffstromanalyse zunächst mit einfachen Mitteln (Checklisten, Excel) anzugehen. Eine Excelauswertung, die vom Unternehmen selbst modifiziert und erweitert werden kann, findet leicht Einzug in die alltägliche Arbeit. Wesentliche Ergebnisse lassen sich mit einfachen Methoden gewinnen und bedürfen nicht unbedingt einer speziellen Software für Stoffstrommanagement.

Die verfügbaren Programme zum Stoffstrommanagement stellen hohe Anforderungen an die verfügbaren Daten. Bei unzureichender Datenlage liefern diese Programme keine Ergebnisse. In der Regel ist die Einführung einer solchen Software mit einer grundsätzlichen Analyse und Veränderung der Datenstruktur im Unternehmen verbunden.

Verspricht die erste Analyse Verbesserungspotenziale, die detaillierter untersucht werden sollen, um präzise Ursache-Wirkungsanalysen durchführen zu können, dann ist der Einsatz einer speziellen Stoffstromsoftware sehr wohl ratsam. Eine wesentliche Stärke einer solchen Software ist die Möglichkeit, ein mathematisches Anlagenmodell zu entwickeln und dieses über eine Schnittstelle regelmäßig mit aktuellen Daten zu versorgen und damit regelmäßig aktuelle Bilanzierungen durchzuführen. Mittels Abweichungsanalyse können hier dann automatisch Schwachstellen visualisiert werden.

3 Stand der Technik / Optimierungspotenziale

An dieser Stelle werden einige Maßnahmen beschrieben, die relativ einfach umzusetzen sind und sich gleichzeitig als besonders wirksam erwiesen haben. Es soll verdeutlicht werden, wie durch integrierte Technologien bzw. geeignete organisatorische Maßnahmen Materialverluste vermieden und kapazitätserhöhende Maßnahmen realisiert werden können, die den Unternehmen einen wirtschaftlichen und umweltgerechten Betrieb ihrer Produktionsanlagen ermöglichen.

Eine vollständige Beschreibung der besten verfügbaren Techniken zur Oberflächenbehandlung von Metallen ist im Entwurf des BREF (Best available techniques reference documents) „Surface treatment of metals“ [3] ausführlich beschrieben.

3.1 Verringerung der Elektrolytausschleppung

Durch aufeinander folgendes Tauchen der Trommeln in die verschiedenen Bäder (bzw. Spülen) wird Elektrolyt mitgeschleppt und steht damit im Prozessbad nicht mehr zur Verfügung. Dieser Verlust (und auch die durch den Fertigungsprozess verbrauchte Chemikalienmenge) muss durch Verstärken der Bäder ausgeglichen werden. Die Reduzierung der Elektrolytverschleppung ist aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen anzustreben.

Die Elektrolytausschleppung kann im allgemeinen durch folgende Maßnahmen reduziert werden:

- Verlängerung der Abtropfzeiten
- Verringerung der Aushebegeschwindigkeit
- Abblasen, absaugen, abquetschen, abschleudern, abstreifen, abspritzen
- Gezielte Trommelbewegung (z.B. Rütteln)
- Werkstückgestaltung (sofern beeinflussbar)
- Trommel- bzw. Gestellgestaltung (sofern beeinflussbar) sowie deren Pflege (Trommel-

größe, Perforation, Form der Trommel bzw. des Gestells)

- Verbesserte Prozessbadgestaltung
- Optimierung des Konzentrationsverlaufes in der Prozesslösung
- Optimierte Spültechnik
- Vermeidung von „Kalben“ der Prozesslösungen

Die letzten vier der oben genannten Maßnahmen zur Reduzierung der Elektrolytausschleppung werden im Folgenden kurz erläutert:

Prozessbadgestaltung:

Das Prozessbad lässt sich durch den Zusatz geeigneter Hilfsstoffe und durch gezielte Steuerung der Prozessbadchemikalien beeinflussen.

Beispielsweise durch den Zusatz von Tensiden kann die Oberflächenspannung bzw. die Viskosität verringert werden, wodurch gleichzeitig die Ausschleppung reduziert wird.

Durch den Betrieb aller Bäder mit der geringsten notwendigen Chemikalienkonzentrationen (untere technische Grenzkonzentration) wie in der Abb. 3 dargestellt kann ebenfalls die Ausschleppung von Chemikalien reduziert werden.

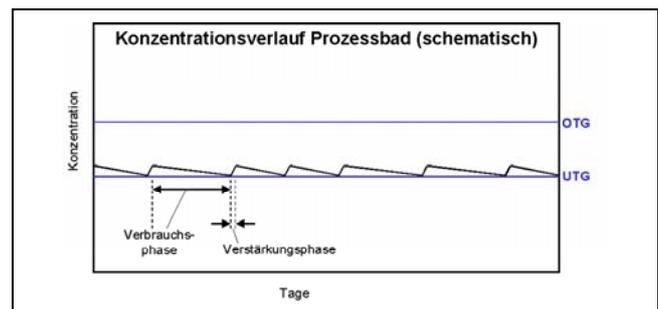


Abb. 3: schematischer Konzentrationsverlauf.
OTG: obere technische Grenzkonzentration,
UTG: untere technische Grenzkonzentration.

Optimierung des Konzentrationsverlaufes in der Prozesslösung:

Um unnötige Verschleppung zu vermeiden sind die technisch möglichen Konzentrationsbereiche unbedingt einzuhalten. (OTG: Obere technische Grenzkonzentration, UTG: Untere technische Grenzkonzentration). Je nach Fertigungspek-

trum kann es aber sein, dass die untere technische Grenzkonzentration für die Fertigung nicht ausreicht. Dann sind organisatorische Maßnahmen gefragt.

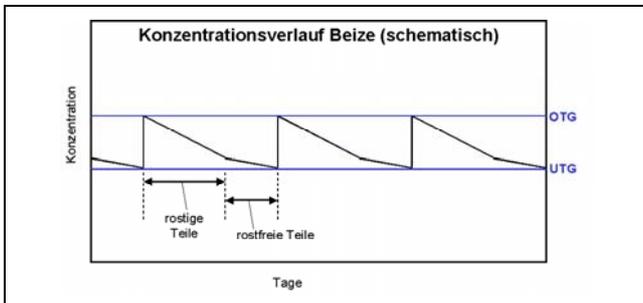


Abb. 4: schematischer Konzentrationsverlauf.
OTG: obere technische Grenzkonzentration,
UTG: untere technische Grenzkonzentration.

Durch geeignete Organisation der Auftragsreihenfolge kann beispielsweise der Beizkonzentrationsverlauf gemäß der Abb. 4: optimiert werden. Rostige Teile werden bei hoher Beizkonzentration behandelt, um eine hinreichend schnelle Reinigung zu erzielen. Durch die Behandlung nimmt die Konzentration im Beizbad ab. Mit relativ niedriger Beizkonzentration oberhalb der UTG können aber noch die rostarmen Teile behandelt werden. Mit Erreichen der UTG erfolgt die Badverstärkung und das Fertigungsspektrum kann wieder auf rostige Teile umgestellt werden.

Spültechnik:

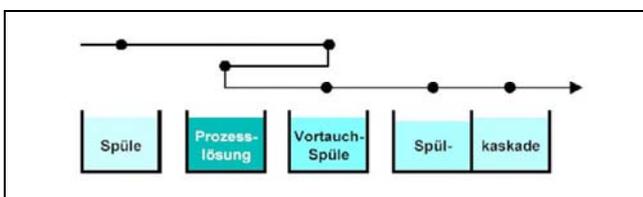


Abb. 5: Vortauchspüle / Öko-Spüle.

Ein Teil der Elektrolytausschleppung kann durch Verwendung einer Vortauchstandspüle vermieden werden. Die Badreihenfolge ist Abb. 5 zu entnehmen. Durch den Vortauchvorgang werden die in der Vortauchspüle angereicherten Chemikalien in das Prozessbad zurück geschleppt.

Die Vorteile der Verwendung einer Vortauchspüle bestehen in:

- der Rückschleppung von bis zu 50% der ausgeschleppten Chemikalien durch Vortauchen in einer Standspüle
- der Reduzierung der Ausschleppung
- der Reduzierung des Spülwasserbedarfs

Ein Nachteil besteht darin, dass neben den ausgeschleppten Chemikalien auch Schadstoffe zurück geschleppt werden. Die Verwendbarkeit einer Vortauchspüle ist im Einzelfall zu prüfen.

Vermeidung des „Kalbens“ von Prozessbädern:

Zum einwandfreien Betrieb der Beschichtung ist der Zusatz von gelösten Chemikalien erforderlich, um verbrauchte und ausgeschleppte Stoffe zu ersetzen. Wenn diese Lösungsmenge über der verdunsteten Flüssigkeitsmenge liegt, nimmt die Prozesslösung im Laufe der Zeit zu (Kalben). Die überschüssige Lösung ist zu entsorgen, obwohl sie alle für den Betrieb der Galvanik erforderlichen Chemikalien gemäß der Rezeptur enthält. Der in der Lösung gebundene Materialwert liegt in der Regel beträchtlich höher als die reinen Entsorgungskosten.

Durch Reduzierung des Wasseranteils in der zuzuführenden Chemikalienlösung (evtl. sogar Zugabe ungelöster Chemikalien) kann das Kalben reduziert werden.

3.2 Kapazitätserhöhende Maßnahmen

Am wirksamsten erweisen sich Maßnahmen, die nicht nur Material- und / oder Energieverluste reduzieren, sondern gleichzeitig zu einer Durchsatzsteigerung der Anlagen führen. Insbesondere sind hier die Vermeidung von Qualitätsausschuss, die Erhöhung der Stromausbeute sowie die Reduzierung der Beschichtungsdicke auf das Mindestmaß zu berücksichtigen.

Vermeidung von Qualitätsausschuss:

Die Vermeidung von Qualitätsausschuss (z.B. Fehlchargen) wirkt sich unmittelbar kapazitätserhöhend aus. In der Zeit, in der Fehlchargen produziert werden, könnte auch Gutware hergestellt werden.

In der Regel lassen sich zwar die Fehlteile aufarbeiten – durch eine zweite Vorbehandlung, eine zweite Beschichtung sowie eine zweite Nachbehandlung – und somit lässt sich der Materialwert der zu beschichtenden Teile zurückgewinnen, nicht aber die Wertschöpfung (für die Herstellung der Fehlteile benötigte Maschinenzeit, Personalzeit, Rüstzeit etc.). Die Aussage, durch die Wiederverwendung des Ausschusses entstehe kein Verlust, stimmt somit nicht, da die Wertschöpfungskosten unwiederbringlich verloren sind.

Erhöhung der Stromausbeute:

Die Eliminierung bestimmter Störstoffe aus dem Prozessbad führt dazu, dass die Stromausbeute bei der galvanischen Beschichtung auf erhöhtem Niveau stabilisiert werden kann.

Das Verfahren der Kühlkristallisation hat sich für diesen Zweck bewährt. Mittels Kristallisation können störende Salze selektiv aus der Prozesslösung eliminiert werden. Diese Störstoffe bilden sich zum Teil beim Lösen von Metallen oder Metalloxiden oder durch unerwünschte Reaktionen (Oxidation von Cyanid zu Carbonat). Durch Abkühlung der Lösung unter 5°C nimmt die Löslichkeit der meisten Salze ab. Die schwerlöslichen Salze können auf diesem Weg aus der Prozesslösung entfernt werden. Abb. 6 zeigt schematisch die technische Realisierung der Kühlkristallisation.

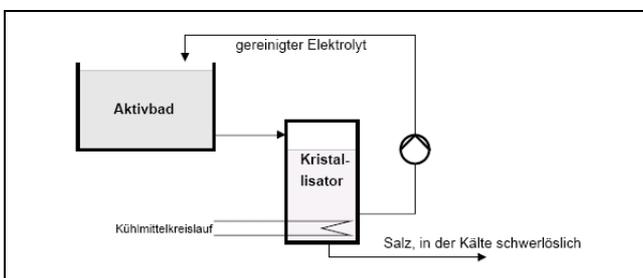


Abb. 6: Kristallisation von Störstoffen.

Die Wirksamkeit des Ausfrierens von Störstoffen soll am Beispiel einer Zink-Nickel-Beschichtung verdeutlicht werden. In einem frisch angesetzten alkalischen Zn-Ni-Bad können Stromausbeuten von ca. 80% erreicht werden. Während des Betriebes sinkt die Stromausbeute unter anderem wegen des sich bildenden Carbonats auf niedrigere Werte (bis unter 50 %) ab. Durch Ausfrieren von Carbonat kann die Stromausbeute auf einem Niveau von 60 % bis 65 % stabilisiert werden.

Durch Erhöhung der Stromausbeute kann die Metallabscheiderate gesteigert werden. Dieses ist gleichbedeutend mit einer Kapazitätserhöhung der Anlage.

Optimale Beschichtungsdicke:

Für die Beschichtungsdicke existieren zwei Grenzen. Die minimale Beschichtungsdicke wird durch den geforderten Korrosionsschutz definiert. Die maximale Beschichtungsdicke wird durch die Maßtoleranzen der beschichteten Fertigung vorgegeben.

Innerhalb dieser gegebenen Bandbreite hat die Beschichtung zu erfolgen. Ziel des Galvanikunternehmens muss es sein, die dünnste Beschichtungsdicke, die den Kundenanforderungen genügt, zu realisieren. Jede Beschichtung über das Mindestmaß hinaus bedeutet gleichzeitig eine Kapazitätsminderung der Beschichtungsanlage.

Die Erzielung der optimalen Schichtdicke ist ohne Investitionen zu erzielen. Dazu bedarf es lediglich einer exakten Überwachung der Prozessführung.

4 Prozessorientierte Kostenrechnung POK

Die prozessorientierte Kostenrechnung (POK) bietet die Möglichkeit, durch verursachungsgerechte Kostenzuordnung Verluste und Fehlzeiten zu bewerten und damit Optimierungspotenziale auszuweisen.

Durch eine detaillierte Stundensatzkalkulation lässt sich dies relativ einfach realisieren.

4.1 Durchschnittlicher Stundensatz

In mittelständischen Unternehmen ist es verbreitet, zur Kalkulation mittlere Stundensätze für ganze Produktionslinien zu verwenden. Der mittlere Stundensatz ergibt sich aus den über das vergangene Jahr ermittelten Kosten für die Produktionslinie bezogen auf die Leitungsstunden und wird für das Folgejahr um einen gewissen Prozentsatz (die Teuerungsrate) erhöht.

Die tatsächlich Inanspruchnahme der Maschinenkapazität durch einen speziellen Auftrag in Abhängigkeit der zu beschichtenden Oberfläche und der aufzutragenden Schichtdicke wird bei der Preiskalkulation häufig nicht hinreichend berücksichtigt.

Eine typische Vorgehensweise besteht in der Kalkulation von kg-Kosten basierend auf dem mittleren Stundensatz. Aus dem Stückgewicht der Rohteile (in kg/Stück), der realisierbaren Trommelfüllung (in Stück/Trommel) und der Trommeltaktzeit (in Trommeln/h) wird die pro Stunde beschichtete Rohwarenmenge (in kg/h) unabhängig von der Schichtdicke und der Oberfläche bestimmt. Die Division des durchschnittlichen Stundensatzes durch diese Rohwarenmenge liefert die Beschichtungskosten pro kg Rohware.

Eine vom Kunden geänderte Anforderung bezüglich der Schichtdicke kann bei diesem Ansatz nicht direkt berücksichtigt werden, höchstens indirekt durch Anpassung der Taktzeit. Geschieht dies nicht, kann es zu erheblichen Abweichungen bei den tatsächlichen

Beschichtungskosten kommen. Die Kapazitätswirkung der Oberfläche und der Schichtdicke kann bei dieser Art der Kalkulation nicht ausreichend genau berücksichtigt werden.

Die oben beschriebene Kalkulation funktioniert recht gut, wenn sich das Produktspektrum bzw. die eingesetzte Technik und die Kostenstruktur im Unternehmen nicht verändern. Solange der Marktpreis dieses Prinzip trägt, ist dieses Vorgehen möglich, zu empfehlen ist es jedoch nicht.

Durch die Mittelwertbildung werden zwar die Gesamtkosten vollständig und richtig abgebildet, für einzelne Aufträge gilt dies allerdings nicht. Nur die Aufträge, bei denen sich der Stundensatz genau in Höhe des Mittelwertes ergibt, sind exakt bewertet (siehe Abb. 7). Aufträge, die tatsächlich mit einem niedrigeren Stundensatz gefertigt werden, werden durch Verwendung des mittleren Stundensatzes kostenseitig zu hoch bewertet, Aufträge mit einem real höheren Stundensatz werden entsprechend unterbewertet.

Die scheinbar hohe Kostensituation für die überbewerteten Aufträge verdeckt hohe positive Deckungsbeiträge. Umgekehrt sind auch die reduzierten Deckungsbeiträge bei den unterbewerteten Aufträgen nicht ersichtlich.

Als Konsequenz der *Mittelwertbildung* können vorhandene Kostenreserven nicht ausgeschöpft werden. Sinkt der am Markt zu erzielende Preis für ein Produkt bzw. eine Produktgruppe, kann ein Unternehmen diesen basierend auf der Kalkulation mit dem mittleren Stundensatz unter Umständen vermeintlich nicht halten.

Problematisch wird die Situation auch dann, wenn sich das Produktspektrum beispielsweise durch geänderte Kundenanforderungen (Beschichtung des gleichen Teils aber mit höherer Schichtdicke) verändert. Unter diesen Umständen kann die Kalkulation mit einem mittleren Vorjahresstundensatz zu erheblichen Fehlern führen. Dies veranschaulicht Abb. 8 an dem Beispiel, dass die Bearbeitung neuer Teile erhöhten Aufwand im Vergleich zur Bearbeitung des bisherigen Teilespektrums bedeutet.

Lukrative Marktchancen werden dadurch möglicherweise verpasst, da sie nicht ersichtlich sind. Bei genauer Kenntnis des tatsächlichen

Deckungsbeitrages ist hier die Anpassung an die Marktsituation viel flexibler möglich.

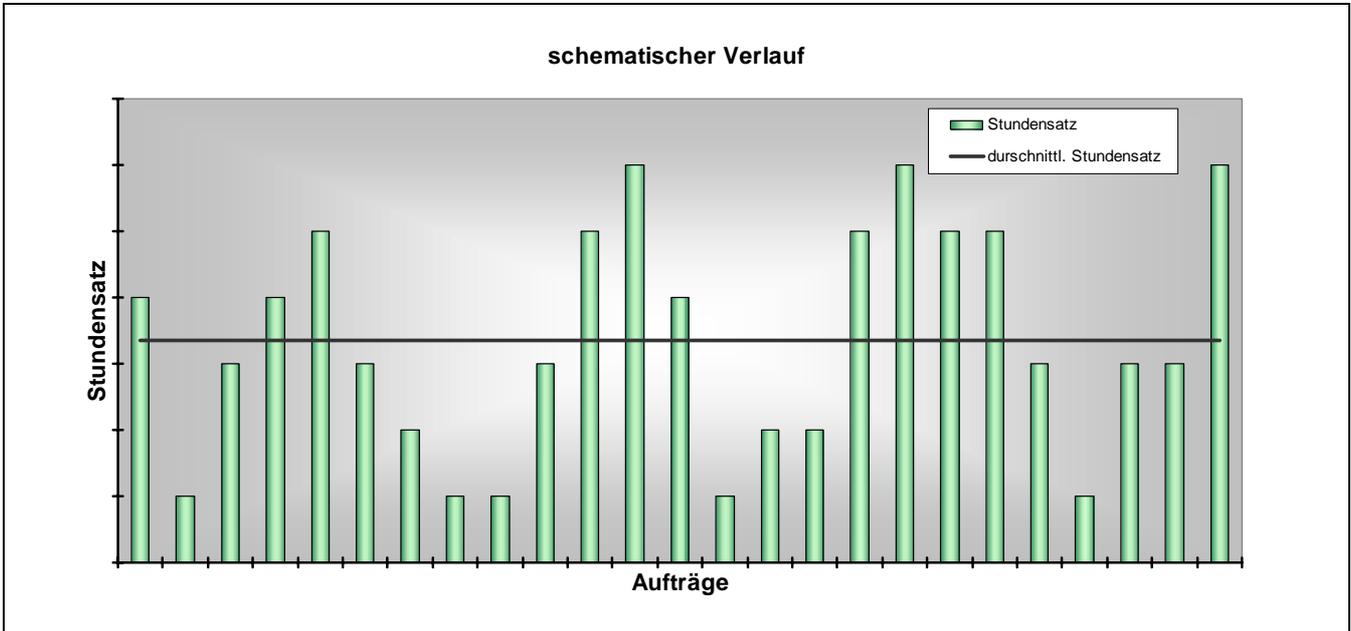


Abb. 7: Durchschnittlicher Stundensatz für ein historisches Auftragsprogramm.

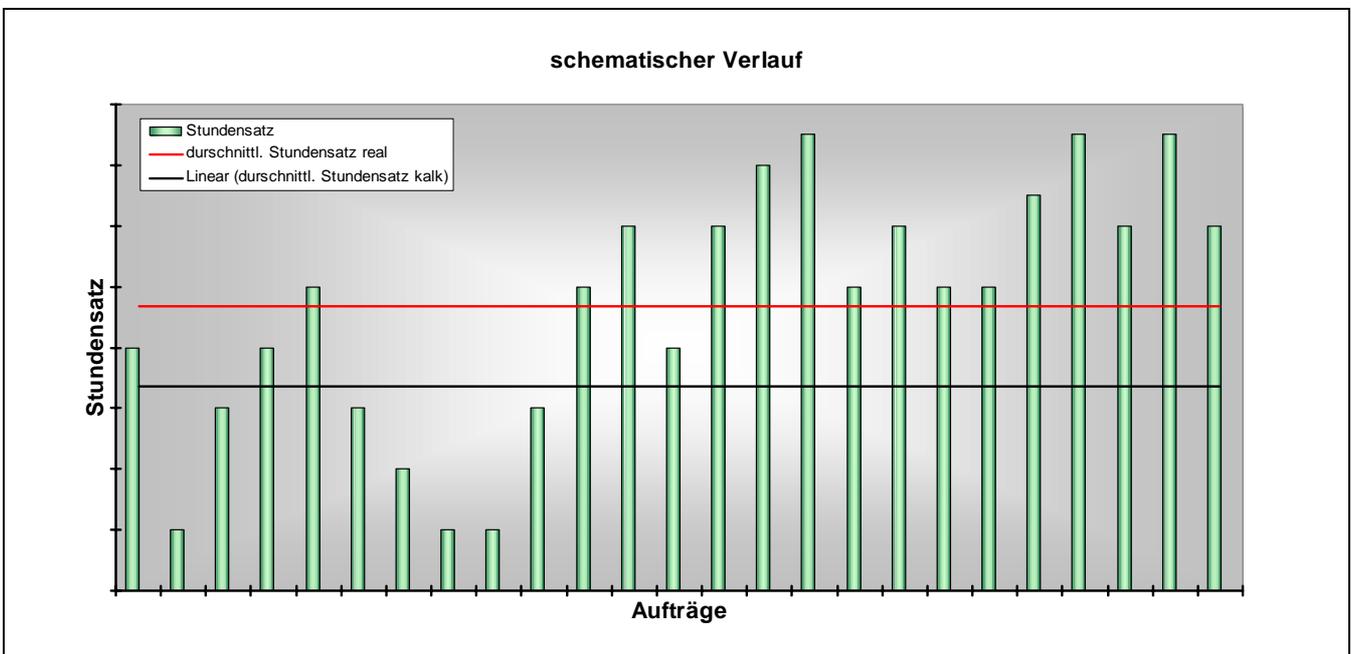


Abb. 8: Änderung des durchschnittlichen Stundensatzes mit veränderter Auftragslage.

Durch die Bearbeitung neuer Teile außerhalb des bisher bekannten Spektrums sind die Kosten für die Fertigung höher als für die bisher bearbeiteten Teile und damit auch die auftragsbe-

zogenen Stundensätze. Der sich daraus ergebende mittlere Stundensatz ist durch die obere (rote) Linie gekennzeichnet. Der durchschnittliche Vorjahresstundensatz ist durch die untere

(schwarze) Linie gekennzeichnet. Eine Kalkulation mit dem Vorjahresstundensatz führt im gezeigten Beispiel zu einer erheblichen Unterbewertung der Aufträge und damit zu Mindereinnahmen.

Eine verursachungsgerechte Zuordnung der Kosten zu einzelnen Produkten bzw. Produktgruppen bietet hier mehr Sicherheit und verhindert, dass ein ungünstiger Trend in der Entwicklung der Fertigungskosten zu spät erkannt wird.

4.2 Detaillierter Stundensatz

Durch Verwendung eines prozessabhängigen Flächen-Auftrags-Stundensatz kann oben genanntes Risiko reduziert werden.

Der prozessabhängige Flächen-Auftrags-Stundensatz vollzieht die exakten Verlauf des auftragsbezogenen Stundensatzes nach. Damit wird unmittelbar ersichtlich, wenn die Kosten sich verändern. Die Kalkulation des Verkaufspreises kann damit schnell aktualisiert und an den Kunden weitergegeben werden.

Außerdem ermöglicht die Kenntnis der genauen Kosten in Abhängigkeit vom Produkt bzw. von der Produktgruppe bereits beim Auftragseingang dessen Bewertung. Ist ein Auftrag nicht lukrativ, kann er eventuelle zu Gunsten eines Auftrages mit höheren Erlösen abgelehnt werden. Selbst wenn ein Auftrag aus Kundenbindungsgründen nicht abgelehnt werden kann, so ist zumindest bekannt, dass ein solcher Auftrag nicht gewinnbringend ist. Diese Kenntnis kann als Argumentationshilfe für weitere Vertragsverhandlungen mit dem Kunden genutzt werden.

Der flächenbezogene Auftragsstundensatz lässt sich gemäß des in Abb. 9 gezeigten Kalkulationsschema berechnen.

Die Herstellkosten setzen sich zusammen aus den Personalkosten, den Maschinenkosten, den

Vorbehandlungskosten, den flächen- und schichtdickenabhängigen Beschichtungskosten, den Nachbehandlungskosten sowie den Infrastrukturkosten (Energie-, Abwasser-, Abfallkosten) für die Herstellung des jeweiligen Produktes.

Der reine Personalstundensatz wird auf Grundlage der Fertigungs-, Hilfs- und Zusatzlöhne, der zuzuordnenden Gehälter, der Lohn- und Gehaltsnebenkosten, der gesetzlichen und freiwilligen Sozialkosten sowie der sonstigen Personalkosten bezogen auf die Personalkapazität in h/a ermittelt.

Der Maschinenstundensatz berechnet sich aus den Maschinenkosten bezogen auf die Maschinenkapazität in h/a. Die Maschinenkosten setzen sich aus den Abschreibungen für Abnutzung (AfA), den kalkulatorischen Zinsen, Reparatur- und Instandhaltungskosten, Werkzeugkosten und Raumkosten zusammen. Häufig werden die Energiekosten für den Betrieb der Maschine in den Maschinenstundensatz eingerechnet. Im gezeigten Schema werden die Energiekosten gesondert betrachtet.

Ein Zahlenbeispiel für die Berechnung der Personal- und Maschinenkosten sowie der zugehörigen Stundensätze ist im Anhang 7.2 dargestellt.

Im gezeigten Kalkulationsschema werden zwei Vorbehandlungsschritte in Abhängigkeit der Beschaffenheit des zu bearbeitenden Materials unterschieden. Dem Beispiel liegt die Annahme zu Grunde, dass die Materialart 2 nur gering verschmutzt ist, während Materialart 1 deutliche Rostspuren auf der Oberfläche zeigt, die einer stärkeren Behandlung bedürfen. Die beiden Materialarten werden mit unterschiedlich konzentrierten Lösungen vorbehandelt. Durch die unterschiedliche Konzentration in den Vorbehandlungsbädern ergeben sich hier verschiedene Kostensätze, die den unterschiedlichen Behandlungsaufwand repräsentieren.

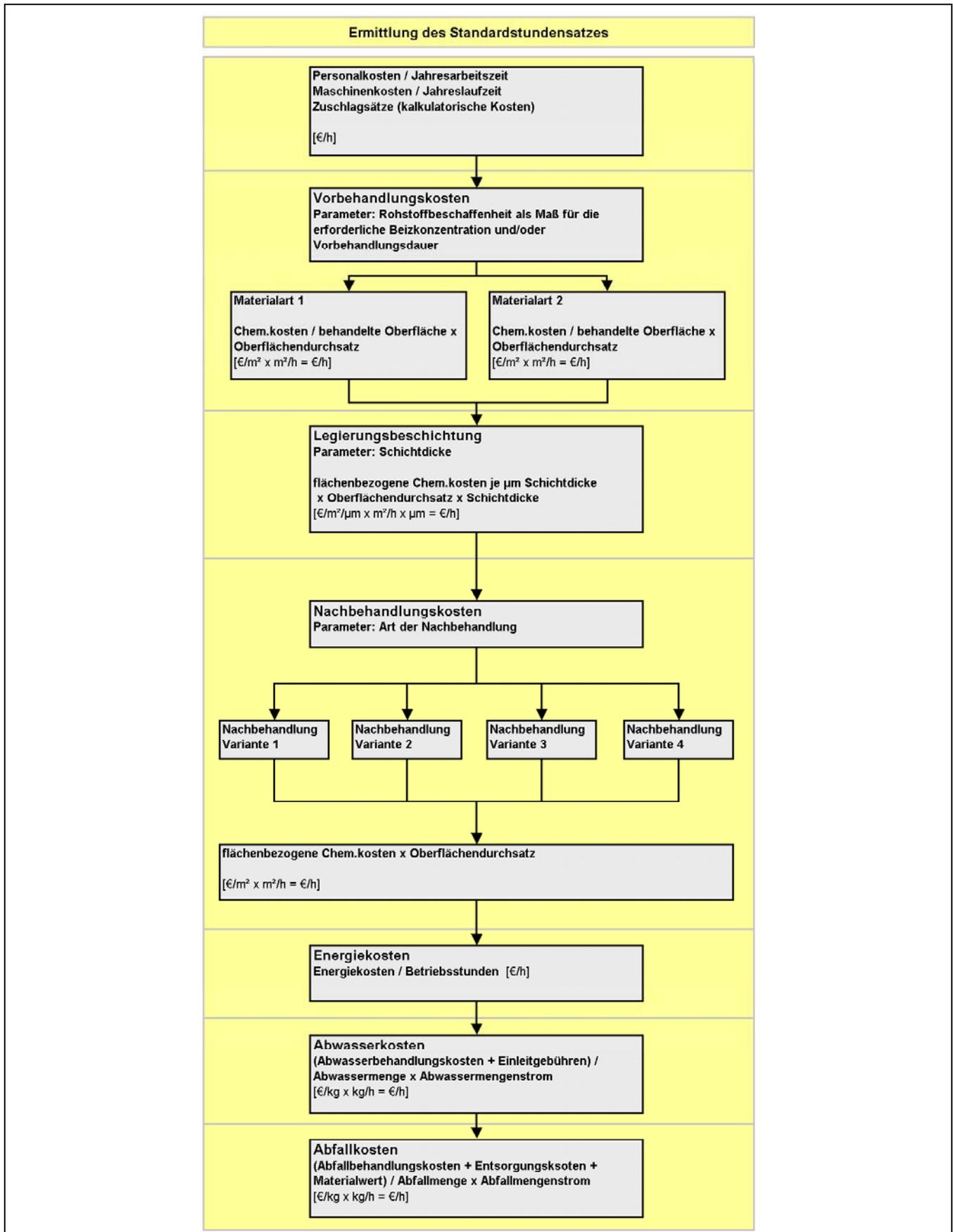


Abb. 9: Detaillierte Kalkulation des Stundensatzes.

Die zeitbezogenen Vorbehandlungskosten ergeben sich aus den spezifischen (flächenbezogenen) Chemikalienkosten [€/m^2] sowie dem Flächendurchsatz des zu beschichtenden Rohmaterials [m^2/h]. Eine Beispielrechnung ist im Anhang 7.3 dargestellt.

Die Beschichtung verläuft für beide vorbehandelten Materialarten gleich. Der Kostensatz (z.B. in €/h) für die galvanische Beschichtung berechnet sich als Produkt aus den flächenbezogenen Chemikalienkosten für die Beschichtung je μm aufgetragene Schichtdicke (z.B. in $\text{€}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$), der durchgesetzten Oberfläche (z.B. in m^2/h) und der geforderten Schichtdicke (z.B. in μm). Anhang 7.4 zeigt dies an einem Beispiel.

Die flächenbezogenen Nachbehandlungskosten sind für die Arten der Nachbehandlung (z.B. unterschiedliche Arten der Chromatierung sowie der Cr(VI)-freien Passivierung) zu unterscheiden. Im Kalkulationsschema (Abb. 9) werden vier Nachbehandlungsschritte unterschieden, die alternativ durchgeführt werden.

Die Nachbehandlungskostensätze berechnen sich aus den flächenbezogenen Chemikalienkosten [€/m^2] der jeweiligen Nachbehandlungsart und dem zugehörigen Flächendurchsatz [m^2/h] des zu behandelnden Materials. Ein Berechnungsbeispiel befindet sich im Anhang 7.5.

Zusätzlich sind noch die Infrastrukturkosten zu berücksichtigen. Der Energiebedarf sowie das Abwasser- und das Abfallaufkommen sind für die entsprechende Anlage verursachungsgerecht zu ermitteln.

Die Energiekosten teilen sich auf in die Kosten für elektrische Energie sowie in die Kosten für Dampf. Bezogen auf die Leistungsstunden lassen sich die stündlichen Energiekosten der jeweiligen Anlage berechnen.

Die stündlichen Abwasserkosten ergeben sich aus den Abwasserbehandlungskosten und den Einleitkosten bezogen auf die Leistungsstunden. Die stündlichen Abfallkosten entsprechend aus den Abfallbehandlungskosten, den Entsorgungskosten sowie dem im Abfall gebundenen Materialwert bezogen auf die Leistungsstunden der

entsprechenden Anlage. Eine Beispielrechnung für die Berechnung der zeitbezogenen Infrastrukturkosten befindet sich im Anhang 7.6.

Je nach Materialart und Nachbehandlungsart ergeben sich im dargestellten Beispiel unterschiedliche Stundensätze als Summe der Einzelkostensätze für die oben genannten Kostenarten.

Anhang 7.7 zeigt das mit Beispieldaten gefüllte Kalkulationsschema. In Abhängigkeit der eingesetzten Materialart ergeben sich für die vier verschiedenen Nachbehandlungsschritte vier unterschiedliche Gesamtstundensätze.

In Anhang 7.8 sind die Berechnungsergebnisse tabellarisch zusammengestellt. In der linken Spalte sind untereinander die Kostenarten aufgelistet. Nebeneinander sind zwei jeweils 8-spaltige Tabellenblöcke für die beiden Materialarten 1 und 2 aufgeführt. Jeder der beiden Tabellenblöcke unterscheidet die vier Nachbehandlungsarten. Für jede Nachbehandlungsart sind Plan- (orange hinterlegt) und Istwerte (hellblau hinterlegt) nebeneinander gestellt.

Die Summenzeile „Stundensatz“ zeigt den sich ergebenden Gesamtstundensatz für die jeweilige Prozessabfolge.

Die unteren 6 Zeilen verdeutlichen die Umrechnungsmöglichkeit auf Flächen-, Stück- bzw. kg-Kosten.

Besonders hervorgehoben sind gravierende Abweichungen der rückgemeldeten Istwerte von den Planvorgaben. Relative Abweichungen von mehr als 10 % sind gelb gekennzeichnet, Abweichungen von mehr als 20 % sind rot hervorgehoben.

In einem Pilotprojekt wurde obiges Schema zunächst auf eine Produktionslinie angewandt. Die Erweiterung des Baums auf die anderen Produktionslinien wird vom Unternehmen selbst durchgeführt. Von Vorteil ist hierbei, dass die eingesetzte Tabellenkalkulationssoftware zum eingesetzten Softwarestandard gehört.

5 Prozesskennzahlen PKZ

Prozesskennzahlen dienen dazu, die Effizienz der Prozesse darzustellen und diese für die Betriebsleitung sichtbar zu machen.

Der Produktionsbereich eines Unternehmens ist durch eine Vielzahl vernetzter Einzelaktivitäten gekennzeichnet. Die Anforderungen an die Kennzahlen bestehen in der komprimierten Darstellung dieser komplexen Zusammenhänge.

Einen Standardsatz von Kennzahlen, der für jedes Unternehmen einzusetzen ist, gibt es nicht. Jedes Unternehmen muss sich sein individuelles Indikatorentableau selbst zusammenstellen, welches die notwendigen Kennzahlen zur Steuerung des Unternehmens bzw. eines Unternehmensbereiches enthält. Abb. 10 zeigt ein für Galvanik-Betriebe bewährte Kennzahlensystem.

Die alleinige Betrachtung von Kennzahlen lässt jedoch kaum Schlüsse zu. Erst der betriebsinterne Vergleich mit den Kennzahlen vergangener Perioden bzw. mit Planwerten oder auch empirischen Größen, wie z.B. Branchendurchschnittswerten, liefert verlässliche Aussagen

über die Entwicklung eines Unternehmens, im Vergleich zur Vergangenheit oder auch im Verhältnis zu Wettbewerbern.

5.1 Indikatorenhierarchie

Im allgemeinen sollte ein Kennzahlensystem hierarchisch aufgebaut sein. Ausgehend von den Basisdaten werden die Informationen bis hin zur Spitzenkennzahl bzw. zum Spitzenkennzahlensatz (ca. 5 Kennzahlen) immer mehr verdichtet. Dabei können die Kennzahlen der höheren Ebenen einerseits rechnerisch aus den darunter liegenden Ebenen bestimmt oder auch durch qualitative Zusammenhänge hergeleitet werden.

Wenn zwischen den Kennzahlen der verschiedenen Ebenen arithmetische Beziehungen bestehen, ist die Analyse der Werte ausgehend von der Spitzenkennzahl hinunter zu den Kenngrößen tieferer Ebenen auf Grund der eindeutigen Beziehungen erleichtert. Bei Verwendung qualitativer Zusammenhänge müssen diese für die Interpretation der Ergebnisse grundsätzlich einbezogen werden. Bei Verwendung mathematischer Beziehungen sind die Zusammenhänge direkt in das Kennzahlensystem integriert und nachvollziehbar.

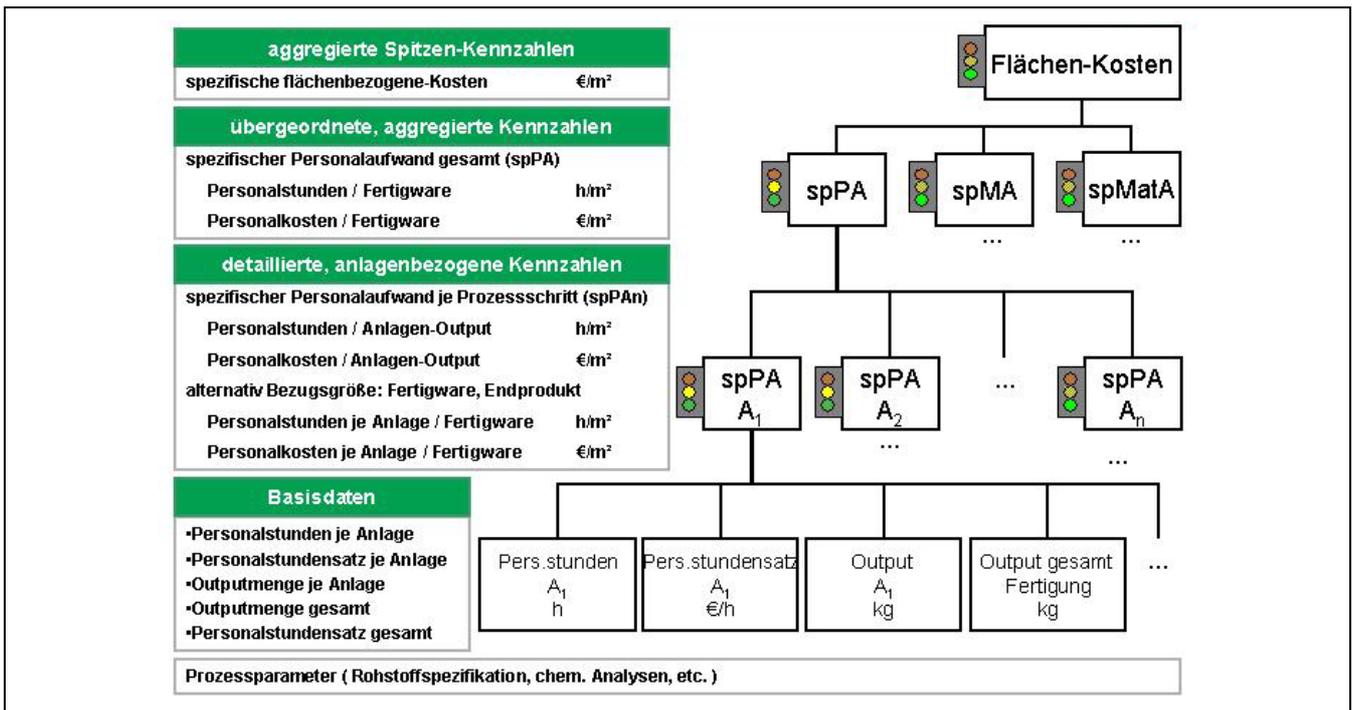


Abb. 10: Hierarchisches Kennzahlensystem.

Über eine Ampelfunktion können Abweichungen, die über einen vorher definierten Schwellwert hinaus gehen, automatisch hervorgehoben werden. Damit wird der Handlungsbedarf sofort an der Stelle angezeigt, an der ein Eingriff erforderlich ist. Eine solche Kennzahlenhierarchie inklusive der Ampelfunktion lässt sich beispielsweise mit der in den meisten Unternehmen verfügbaren Tabellenkalkulationssoftware realisieren. Ein Beispiel für ein Prozesskennzahlentableau befindet sich im Anhang 7.9.

5.2 Bezugsgröße Oberfläche

Die zu beschichtende Oberfläche stellt die geeignete Basis für Kennzahlen dar. Durch die Wahl der Oberfläche als Bezugsgröße sind unterschiedliche Teile unabhängig von Form und Gewicht miteinander vergleichbar. Über die flächenbezogenen Kenngrößen können die verschiedenen Produkte miteinander verglichen werden. Je Werkstück sind diese Kenngrößen zwar unterschiedlich. Doch bezogen auf die Fläche sind diese Werte bei gleicher Schichtdicke

konstant.

Unterschiedliche Methoden zur Oberflächenermittlung stehen zur Verfügung. Bei einfachen Bauformen (z.B. einfache Zylinder, Würfel etc.) können die Oberflächen durch direktes Ausmessen ermittelt werden. In der Regel wird allerdings ein vielfältiges, ständig wechselndes Teilespektrum gefertigt. In diesen Fällen sind die beschichteten Oberflächen indirekt über das Faradaysche Gesetz (Anhang 7.10) oder eine Chemikalienmengenbilanzierung (Anhang 7.11) abzuschätzen. Die abgeschiedene Metallmenge entspricht in erster Näherung der für die Abscheidung eingesetzten Metallmenge abzüglich der ausgeschleppten Metallmenge. Die indirekten Verfahren liefern keine exakten Ergebnisse, ermöglichen aber eine hinreichend genaue Abschätzung.

5.3 Indikatoren für operative Prozesse

Wichtige Kenngrößen für den Betrieb einer Produktionsanlage sind z.B. der spezifische Chemikalienverbrauch, der spezifische Chemikalienverlust, der spezifische Wasserbedarf, das spezifische Abwasservolumen oder auch der spezifische Energiebedarf.

Dabei können sowohl Kennzahlen für einzelne Produkte, Kennzahlen bezogen auf einen einzelnen Produktionsprozess oder Kennzahlen für den gesamten Produktionsstandort von Interesse sein. Durch den Aufbau eines hierarchischen Kennzahlensystems ist es möglich detaillierte Kennzahlen zur nächst höheren Ebene zu aggregieren oder umgekehrt eine aggregierte Kennzahl in ihre Bestandteile der vorgelagerten Stufe aufzulösen. So lässt sich beispielsweise der spezifische Personalaufwand jeder einzelnen Anlage eines Produktionsstandortes zu einem spezifischen durchschnittlichen Personalaufwand für den gesamten Standort zusammenführen und umgekehrt.

Der Anlagenbezug kann dabei nur hergestellt werden, wenn die entsprechenden Basisdaten (z.B. Personalstunden, Maschinenstunden, Ma-

Methoden der Oberflächenermittlung:

A) Direkte Vermessung der Bauteile

B) Indirekte Flächenermittlung:

1) Das Faradaysche Gesetz

$$n = \frac{\eta \cdot I \cdot t}{z \cdot F} = \frac{m^{Me}}{M_m^{Me}}$$

Abgeschiedene Legierungsmasse

$$m^{Me} = \frac{\eta \cdot I \cdot t}{z \cdot F} \cdot M_m^{Me}$$

außerdem gilt gemäß der Definition der Stoffdichte:

$$m^{Me} = A \cdot d \cdot \rho^{Me}$$

Daraus folgt für die Fläche:

$$A = \frac{\eta \cdot I \cdot t}{z \cdot F} \cdot \frac{M_m^{Me}}{d \cdot \rho^{Me}} [=] m^2$$

2) Chemikalienmengenbilanz

$$\dot{m}^{Me} = \dot{A} \cdot d_{Me} \cdot \rho_{Me} = \dot{m}_{Einsatz}^{Me} - c_0^{Me} \cdot \dot{V}_{EA}$$

Daraus folgt für die Fläche:

$$\dot{A} = \frac{\dot{m}_{Einsatz}^{Me} - c_0^{Me} \cdot \dot{V}_{EA}}{d_{Me} \cdot \rho_{Me}} [=] \frac{m^2}{h}$$

terialverbrauch etc.) verursachungsgerecht erfasst werden.

Anhang 7.9 zeigt ein für ein Galvanikunternehmen typisches, mit Beispieldaten gefülltes Kennzahlensystem. Das dargestellte Kennzahlensystem besteht aus drei Ebenen. Die untere Ebene besteht im wesentlichen aus Grunddaten für eine Produktionslinie. In einzelnen werden die Personalstunden pro Jahr, der Personalstundensatz, die Jahresbeschichtungsfläche, die Maschinenstunden, der Maschinenstundensatz, der jährlichen Energieeinsatz, Mengen- und Kostensätze für Chemikalien, Rohwassermengen und -kosten, Abfallmengen und -kosten sowie Abwassermengen und Abwasserkosten aufgeführt.

Aus diesen Basisdaten lassen sich in der mittleren Ebene erste Kennzahlen ableiten. So ergibt sich als Produkt der Personalstunden (z.B. in h/Jahr), des Personalstundensatzes (in €/h) bezogen auf die Beschichtungsfläche (Output in m²/Jahr) der spezifische, flächenbezogene Personalaufwand (in €/m²).

In ähnlicher Weise können der spezifische Maschinenaufwand, der spezifische Energieeinsatz, der spezifische Chemikalieneinsatz je Behandlungsstufe, der spezifische Brunnenwassereinsatz sowie die spezifischen Abwasser- und Abfallmengen und -kosten bestimmen.

Die Zusammenfassung der einzelnen Kostensätze liefert den mittleren Stundensatz, je nach Bezug für einzelne Produkte, Produktgruppen oder auch gemittelt über alle Produkte.

Durch Verknüpfung des oben genannten mittleren Stundensatzes mit der Jahresbeschichtungsfläche (Output) lässt sich in der obersten Ebene die Spitzenkennzahl „spezifische Flächenkosten“ ebenfalls je nach Bezug für einzelne Produkte, Produktgruppen oder gemittelt über das gesamte Produktspektrum berechnen.

Jedes Kennzahlenfeld stellt Ist- (hellblau hinterlegt) und Plandaten (orange hinterlegt) nebeneinander. Abweichungen der Istwerte von den Planwerten werden farbig hervorgehoben. Bei Abweichungen über 10 % werden die Kennzahlenwerte mit gelbem Hintergrund, bei Abweichungen größer als 20% mit rotem Hintergrund dargestellt.

Durch diese Kennzeichnung werden unmittelbar Verbesserungspotenziale angezeigt. Ausgehend von der Spitzenkennzahl können die verknüpften darunter liegenden Kennzahlen gezielt untersucht werden. Es ist aber nicht notwendig alle Kennzahlen zu analysieren, sondern lediglich die auffälligen.

Bei regelmäßiger Aktualisierung der Grunddaten liefert das Kennzahlentableau zeitnah und übersichtlich wichtige Hinweise, wenn Veränderungen in der Prozessführung notwendig sind.

Das in Anhang 7.9 dargestellt Kennzahlenschema liefert eine Spitzenkennzahl für genau eine Produktionslinie. Analog aufgebaute Schemata können für alle weiteren Produktionslinien eines Unternehmens aufgebaut werden.

Durch Verknüpfung der Spitzenkennzahlen der jeweiligen Produktionslinien können weitere werksbezogene Kennzahlen erzeugt werden.

Basierend auf dem oben beschriebenen Kennzahlensystem lässt sich jederzeit eine zuverlässige Aussage bezüglich der Effizienz der Anlage bzw. jeder einzelnen Produktionslinie treffen.

6 Weiterführende Literatur

- [1] Leitfäden zum bmb+f - Verbundvorhaben:
Umstellung bestehender galvanotechnischer Anlagen auf eine stoffverlustminimierende Prozesstechnik bei gleichzeitiger Kostensenkung
 LF1: "Stoffverlustminimierte Prozesstechnik - Schrittweise Systemumstellung" (0,4 MB)
 LF2: "Methoden zur Bestimmung und Verringerung von Stoffverlusten sowie Systemoptimierung" (1 MB)
 LF3: "Leitfaden zur ökologischen und ökonomischen Beurteilung und Optimierung" (0,5 MB)
 LF4: "Integrierte Prozessautomatisierung" (3,3 MB)
 LF5: "Neue Formen der Zusammenarbeit zwischen Galvanik und Fachfirma" (0,5 MB)
 LF6: "Leitfaden zur Abfallverwertung" (1,3 MB)
 Download unter: <http://www.dgo-online.de/>
- [2] Betriebliche Energie- und Stoffstrommanagementsysteme – Methoden, Praxiserfahrungen, Software – eine Marktanalyse; Landessanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.), Karlsruhe 2000
http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt3/industrie_und_gewerbe/stoffstrom_management/veroeffentlichung/LfU_Stoffstrommanagementsysteme.pdf
- [3] Draft Reference Document on Best Available Techniques for the Surface Treatment of Metals and Plastics (Surface treatment of metals), EIPPCB – European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (Hrsg.), Draft April 2004
- Download von BVT-Merkblättern / BREFs unter:
<http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>
 BVT = Beste Verfügbare Technik
 BREF = Best available techniques reference documents
 Kurzüberblick:
<http://www.umweltbundesamt.de/nfp-bat/kurzue.htm>
- [4] Entwurf des deutschen Beitrags zu den besten verfügbaren Techniken bei der „Behandlung metallischer und nichtmetallischer Oberflächen mit chemischen und elektrochemischen Verfahren.
<http://www.umweltdaten.de/nfp-bat/oberflaechenbehandlungvonmetallen.pdf>
- [5] Ressourcenkostenrechnung RKR[®] – Die beste Verbindung zwischen Betriebswirtschaft und Technologie, Die Effizienz-Agentur NRW, 2004
 Hauptbroschüre:
<http://www.efanrw.de/efared/broschueren/EFA-RKR-Hauptbroschuere.pdf>
 Branchenbroschüren:
<http://www.efanrw.de/efared/broschueren/EFA-RKR-Metallbearbeitung.pdf>
<http://www.efanrw.de/efared/broschueren/EFA-RKR-Kunststoffverarbeitung.pdf>
<http://www.efanrw.de/efared/broschueren/EFA-RKR-Chemie.pdf>

7 Anhang

Bei den im Anhang verwendeten Daten handelt es sich um verfremdete Daten. Die Daten lassen somit keine Rückschlüsse auf die beteiligten Unternehmen zu. Die verwendeten Daten dienen lediglich der Veranschaulichung der theoretischen Beschreibungen.

7.1 Formelzeichen und Einheiten / Abkürzungen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
A	beschichtete Oberfläche	m^2
\dot{A}	Flächendurchsatz (beschichtete Fläche pro Zeiteinheit)	$m^2/h = m^2/3600\text{ s}$
c_0^{Me}	Elektrolytkonzentration (Metallionen)	$kg/m^3 = g/l$
d, d_{Me}	Schichtdicke des Metallauftrags	$\mu m = 10^{-6}\text{ m}$
F	Faradaykonstante = 96.487	C/mol
It	Eingebrachte Ladung (Strom x Zeit)	$C = As$
m^{Me}	Masse des abgeschiedenen Metalls	kg
$\dot{m}_{Einsatz}^{Me}$	Metalleinsatzmassenstrom	$kg/h = kg/3600\text{ s}$
M^{Me}	Molmasse des Metalls	g/mol
n	Abgeschiedene Stoffmenge	mol
$spMA$	spezifischer Maschinenaufwand (Maschinenzeit	h/m^2 $€/m^2$

	bzw. -kosten bezogen auf die beschichtete Fläche)	
$spMatA$	spezifischer Materialaufwand (Materialmenge bzw. -kosten bezogen auf die beschichtete Fläche)	kg/m^2 $€/m^2$
$spPA$	spezifischer Personalaufwand (Personalzeit bzw. -kosten bezogen auf die beschichtete Fläche)	h/m^2 $€/m^2$
\dot{V}_{EA}	Volumenstrom der Elektrolytaus-schleppung	l/h
z	Ladungszahl	-
η	Stromausbeute	%
ρ^{Me}	Metалldichte	kg/m^3

Abkürzung	Erläuterung
A_1, A_2, \dots, A_n	Anlage 1, Anlage 2, ... Anlage n
BREF	Best available techniques reference document
BVT	Beste verfügbare Technik
OTG	Obere technische Grenzkonzentration
PKZ	Prozesskennzahl
POK	Prozessorientierte Kostenrechnung
SEM	Stoff- und Energiestrommanagement
UTG	Untere technische Grenzkonzentration

7.2 Personal- und Maschinenkosten (Beispiel)

Personalkosten / Jahresarbeitszeit
Maschinenkosten / Jahreslaufzeit
Zuschlagsätze (kalkulatorische Kosten)

 [€/h]

Personalkosten

	Plan			Ist
	jährlich	monatlich (φ)	täglich (φ)	jährlich
Personalkapazität	31680 h/a	2640 h/mon	87 h/d	30000
Anz. Mitarbeiter	12			
Anz. Mitarbeiter pro Schicht	4 MA/S			
Anzahl der Schichten	3 S/d			
max. Kapazität bei 8 h/Tag	2920 h/a	243 h/mon	8 h/d	
Urlaub, krank (35 Tage)	280 h/a	23 h/mon	0,77 h/d	

	Plan	
	1000000 €/a	31,57 €/h
Personalkosten	1000000 €/a	
Fertigungslöhne	1000000 €/a	
Hilfslöhne	0 €/a	
Zusatzlöhne	0 €/a	
Gehälter	0 €/a	
Lohn- und Gehaltsnebenkosten	0 €/a	
gesetzl. und freiwillige Sozialkosten	0 €/a	
sonstige Personalkosten	0 €/a	

	Ist	
	1000000 €/a	33,33 €/h
Personalkosten	1000000 €/a	
Fertigungslöhne	1000000 €/a	
Hilfslöhne	0 €/a	
Zusatzlöhne	0 €/a	
Gehälter	0 €/a	
Lohn- und Gehaltsnebenkosten	0 €/a	
gesetzl. und freiwillige Sozialkosten	0 €/a	
sonstige Personalkosten	0 €/a	

Maschinenkosten

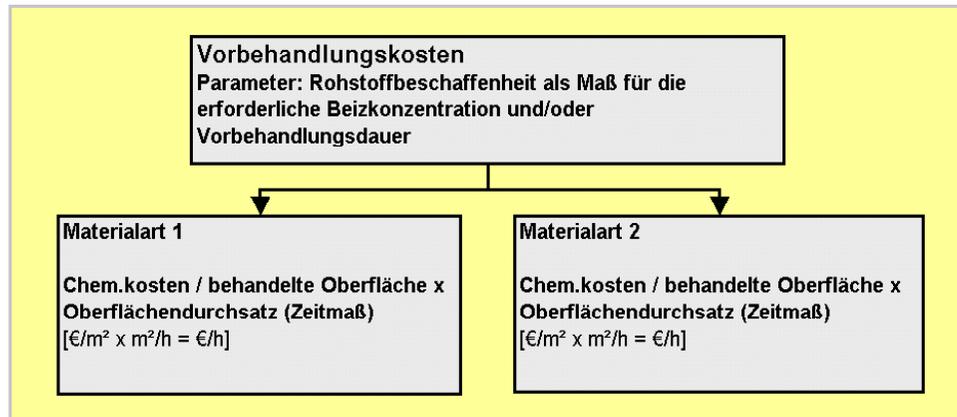
	Plan			Ist
	jährlich	monatlich (φ)	täglich (φ)	jährlich
Anlagenkapazität	8260 h/a	688 h/mon	22,63 h/d	8000
max. Kapazität	8760 h/a	730 h/mon	24 h/d	
Instandhaltung	500 h/a	41,67 h/mon	1,37 h/d	
theoretischer Produktivanteil (Tage/Woche)	1,00			

	Plan	
	1375000 €/a	166,465 €/h
Maschinenkosten	1375000 €/a	
Abschreibungen (AfA)	1200000 €/a	
kalkulatorische Zinsen	40000 €/a	
Reparatur- & Instandhaltungskosten	80000 €/a	
Werkzeugkosten	40000 €/a	
Raumkosten	15000 €/a	

	Ist	
	1415000 €/a	176,875 €/h
Maschinenkosten	1415000 €/a	
Abschreibungen (AfA)	1200000 €/a	
kalkulatorische Zinsen	40000 €/a	
Reparatur- & Instandhaltungskosten	120000 €/a	
Werkzeugkosten	40000 €/a	
Raumkosten	15000 €/a	

Energiekosten werden gesondert berücksichtigt !!!

7.3 Vorbehandlungskosten (Beispiel)



Vorbehandlung

Chemikalienkosten Plan (Basis: Rezeptur)

Abkochentf.	Menge	ME	Preis	WE/ME	Kosten	WE
Chemikalie Z	700 kg		1 €/kg		700,00 €	
Chemikalie Y	50 kg		10,00 €/kg		500,00 €	
Chemikalie T	8000 kg		0,5 €/kg		4000,00 €	
Summe Abkochentf.	8750 kg				5200,00 €	

Beize	Menge	ME	Preis	WE/ME	Kosten	WE
Chemikalie X	30000 kg		0,3 €/kg		9000,00 €	
Chemikalie W	12000 kg		0,2 €/kg		2400,00 €	
Chemikalie V	1000 kg		2,5 €/kg		2500,00 €	
Summe Beize	43000				13900,00 €	

Elektrolytische Entfettung	Menge	ME	Preis	WE/ME	Kosten	WE
Chemikalie U	2500 kg		2 €/kg		5000,00 €	
Summe Elektr. Entf.	2500				5000,00 €	

Gesamtkosten Vorbehandlungskemikalien

Anteilige Verbräuche	Anteil	Menge	Kosten
Materialart 1	65%	35263 kg	15665,00 €
Materialart 2	35%	18988 kg	8435,00 €
Gesamt	100%	54250 kg	24100,00 €
Bezug: Anlagenkapazität			8.260 h/a
stündl. Chem.kosten			2,92 €/h

Chemikalienkosten Ist

Abkochentf.	Menge	ME	Preis	WE/ME	Kosten	WE
Chemikalie Z	500 kg		1 €/kg		500,00 €	
Chemikalie Y	90 kg		10,00 €/kg		900,00 €	
Chemikalie T	8000 kg		0,50 €/kg		4000,00 €	
Summe Abkochentf.	8590 kg				5400,00 €	

Beize	Menge	ME	Preis	WE/ME	Kosten	WE
Chemikalie X	28000 kg		0,3 €/kg		8400,00 €	
Chemikalie W	15000 kg		0,2 €/kg		3000 €	
Chemikalie V	2000 kg		2,5 €/kg		5000,00 €	
Summe Beize	45000 kg				16400,00 €	

Elektrolytische Entfettung	Menge	ME	Preis	WE/ME	Kosten	WE
Chemikalie U	2300 kg		3 €/kg		6900,00 €	
Summe Elektr. Entf.	2300 kg				6900,00 €	

Gesamtkosten Vorbehandlungskemikalien

Anteilige Verbräuche	Anteil	Menge	Kosten
Materialart 1	70%	39123 kg	20090,00 €
Materialart 2	30%	16767 kg	8610 €
Gesamt	100%	55890 kg	28700,00 €
Bezug: Anlagenkapazität			8000 h/a
stündl. Chem.kosten			3,59 €/h

7.4 Legierungsbeschichtung (Beispiel)

Legierungsbeschichtung
Parameter: Schichtdicke

flächenbezogene Chem.kosten je µm Schichtdicke
x Oberflächendurchsatz x Schichtdicke
 [€/m²/µm x m²/h x µm = €/h]

Flächenbezogene Rohstoffkosten

Legierung		Dichte des abgeschiedenen Metalls		Einkaufspreis		Plan	Ist
Zink	7,1 g/cm³	7.100 kg/m³	2 €/kg	38000	40000 kg		
Nickel	8,9 g/cm³	8.900 kg/m³		76000	80000 €		
Nickeleinbaurate	14%			9,50	9,69 €/h		
Zinkanteil	86%						
Legierungsdichte	7,352 g/cm³	7352 kg/m³					

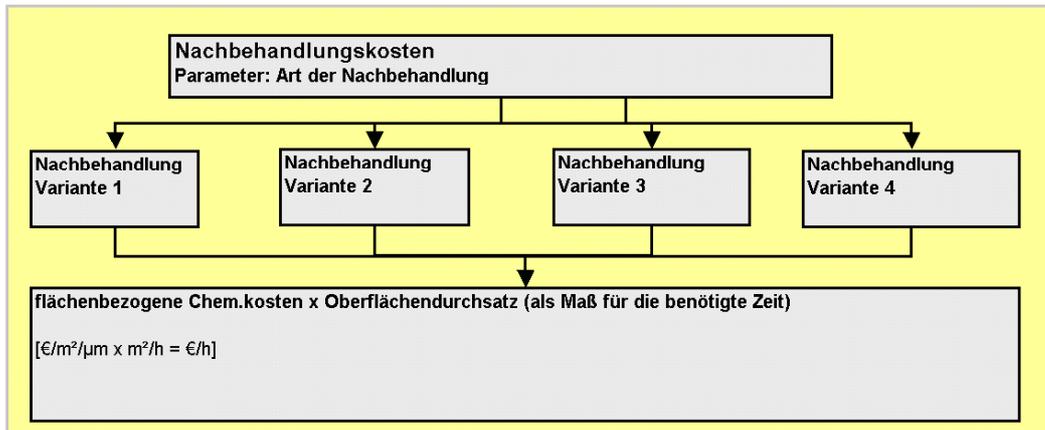
Chemikalie N	Einkaufspreis	Plan	Ist
	3,5 €/kg	80000	82000 kg
	Kosten	280000	287000 €
		35,00	34,75 €/h

Weitere Chemikalienkosten	Preise [€/kg]	Plan		Ist	
		Rezeptmengen Mengen [kg]	Chem.Kosten	Bestellmengen Mengen [kg]	Chem.Kosten
Chemikalie 1	3,00	4.500	13.500	4.500	13.500 €/a
Chemikalie 2	4,00	12.000	48.000	14.000	56.000 €/a
Chemikalie 3	5,00	8.000	40.000	8.400	42.000 €/a
Chemikalie 4	6,00	1.600	9.600	1.800	10.800 €/a
Chemikalie 5	0,80	25.000	20.000	25.000	20.000 €/a
Summe		51.100	131.100	53.700	142.300 €/a
Bezug: Anlagenkapazität			8.000		8.260 h/a
spez. Chemikalienkosten			16,39		17,23 €/h

	Plan	Ist
Beschichtungsfläche	960.000	877.872 m²
Schichtdicke	10,0	10,0 µm
Legierungsauftrag	70.579	64.541 kg

Schichtdicke in µm	spezifisches Schichtgewicht kg/(m²xµm)	Nickelkosten g/(m²xµm)	Nickelkosten €/(m²xµm)	Zinkkosten €/(m²xµm)	weitere Chem.kosten €/(m²xµm)	spezifische Legierungskosten €/m²xµm
Plan	1	0,00735	7,35	0,0360	0,0126	0,0137
Ist	1	0,00735	7,35	0,0358	0,0091	0,0162

7.5 Nachbehandlungskosten (Beispiel)



Leistungsstunden	
Plan	Ist
8260	8000
Beschichtungsfläche	
Plan	Ist
960.000	877.872 m²

Behandlungsanteile	Anteil Plan	Fläche Plan [m²]	Anteil Ist	Fläche Ist [m²]
Nachbehandlun Variante 1	25%	240000	50%	438936
Nachbehandlun Variante 2	45%	432000	25%	219468
Nachbehandlun Variante 3	20%	192000	20%	175574
Nachbehandlun Variante 4	10%	96000	5%	43894
	100%		100%	

Chemikalienkosten Plan						
Nachbehandlung Variante 1						
	Menge	ME	Preis	WE/ME	Kosten	WE
Chemikalie A	12000 kg		3,00 €/kg		36000,00 €	
Chemikalie B	13000 kg		1,00 €/kg		13000,00 €	
Summe Nachbehandlung Variante 1	25000 kg				49000,00 €	
spezifische Nachbehandlungskosten					0,2042 €/m²	
stündl. Nachbehandlungskosten					23,7298 €/h	
Nachbehandlung Variante 2						
Chemikalie C	10000 kg		1,50 €/kg		15000,00 €	
Chemikalie D	1000 kg		0,50 €/kg		500,00 €	
Summe Nachbehandlung Variante 2	11000 kg				15500,00 €	
spezifische Nachbehandlungskosten					0,0359 €/m²	
stündl. Nachbehandlungskosten					4,1700 €/h	
Nachbehandlung Variante 3						
Chemikalie E	5000 kg		2,00 €/l		10000,00 €	
Chemikalie F	300 kg		0,50 €/kg		150,00 €	
Summe Nachbehandlung Variante 3	5300 kg				10150,00 €	
spezifische Nachbehandlungskosten					0,0529 €/m²	
stündl. Nachbehandlungskosten					6,1441 €/h	
Nachbehandlung Variante 4						
Chemikalie G	2400 kg		17,10 €/kg		41040,00 €	
Chemikalie H	500 kg		3,50 €/kg		1750,00 €	
Summe Nachbehandlung Variante 4	2900 kg				42790,00 €	
spezifische Nachbehandlungskosten					0,4457 €/m²	
stündl. Nachbehandlungskosten					51,8039 €/h	

Summe Chemikalien Nachbehandlung Plan		
	Menge	Kosten
Summe	44.200 kg	117.440 €
spezifische Chemikalienkosten		0,12 €/m²
stündl. Chemikalienkosten		14,22 €/h

Chemikalienkosten Ist						
Nachbehandlung Variante 1						
	Menge	ME	Preis	WE/ME	Kosten	WE
Chemikalie A	25000 kg		3,00 €/kg		75000,00 €	
Chemikalie B	25000 kg		1,00 €/kg		25000,00 €	
Summe Nachbehandlung Variante 1	50000 kg				100000,00 €	
spezifische Nachbehandlungskosten stündl.						0,2278 €/m²
Nachbehandlungskosten						25,0000 €/h
Nachbehandlung Variante 2						
	Menge	ME	Preis	WE/ME	Kosten	WE
Chemikalie C	6000 kg		1,50 €/kg		9000,00 €	
Chemikalie D	600 kg		0,50 €/kg		300,00 €	
Summe Nachbehandlung Variante 2	6600 kg				9300,00 €	
spezifische Nachbehandlungskosten stündl.						0,0424 €/m²
Nachbehandlungskosten						4,6500 €/h
Nachbehandlung Variante 3						
	Menge	ME	Preis	WE/ME	Kosten	WE
Chemikalie E	5300 kg		2,00 €/kg		10600,00 €	
Chemikalie F	350 kg		0,50 €/kg		175,00 €	
Summe Nachbehandlung Variante 3	5650 kg				10775,00 €	
spezifische Nachbehandlungskosten stündl.						0,0614 €/m²
Nachbehandlungskosten						6,7344 €/h
Nachbehandlung Variante 4						
	Menge	ME	Preis	WE/ME	Kosten	WE
Chemikalie G	1300 kg		17,10 €/kg		22230,00 €	
Chemikalie H	250 kg		3,50 €/kg		875,00 €	
Summe Nachbehandlung Variante 4	1550 kg				23105,00 €	
spezifische Nachbehandlungskosten stündl.						0,5264 €/m²
Nachbehandlungskosten						57,7625 €/h
Summe Chemikalien Nachbehandlung Ist						
	Menge				Kosten	
Summe	63.800 kg				143.180 €	
spezifische Chemikalienkosten						0,16 €/m²
stündl. Chemikalienkosten						17,90 €/h

7.6 Infrastrukturkosten (Beispiel)

Energiekosten Energiekosten / Betriebsstunden [€/h]
Abwasserkosten (Abwasserbehandlungskosten + Einleitgebühren) / Abwassermenge x Abwassermengenstrom [€/kg x kg/h = €/h]
Abfallkosten (Abfallbehandlungskosten + Entsorgungskosten + Materialwert) / Abfallmenge x Abfallmengenstrom [€/kg x kg/h = €/h]

	Plan	Ist	
Leistungsstunden	8.260	8.000	h/a
Flächendurchsatz	960.000	877.872	m²/a

Energiekosten Strom	Plan	Ist	
Strompreis	0,055	0,055	€/kWh
Leistungsaufnahme	210	200	kV
Energieverbrauch (Strom)	1.734.600	1.600.000	kWh/a
Energiekosten	95.178	87.793	€/a
spezifische Stromkosten	0,099	0,100	€/m²
stündl. Stromkosten	11,52	10,97	€/h

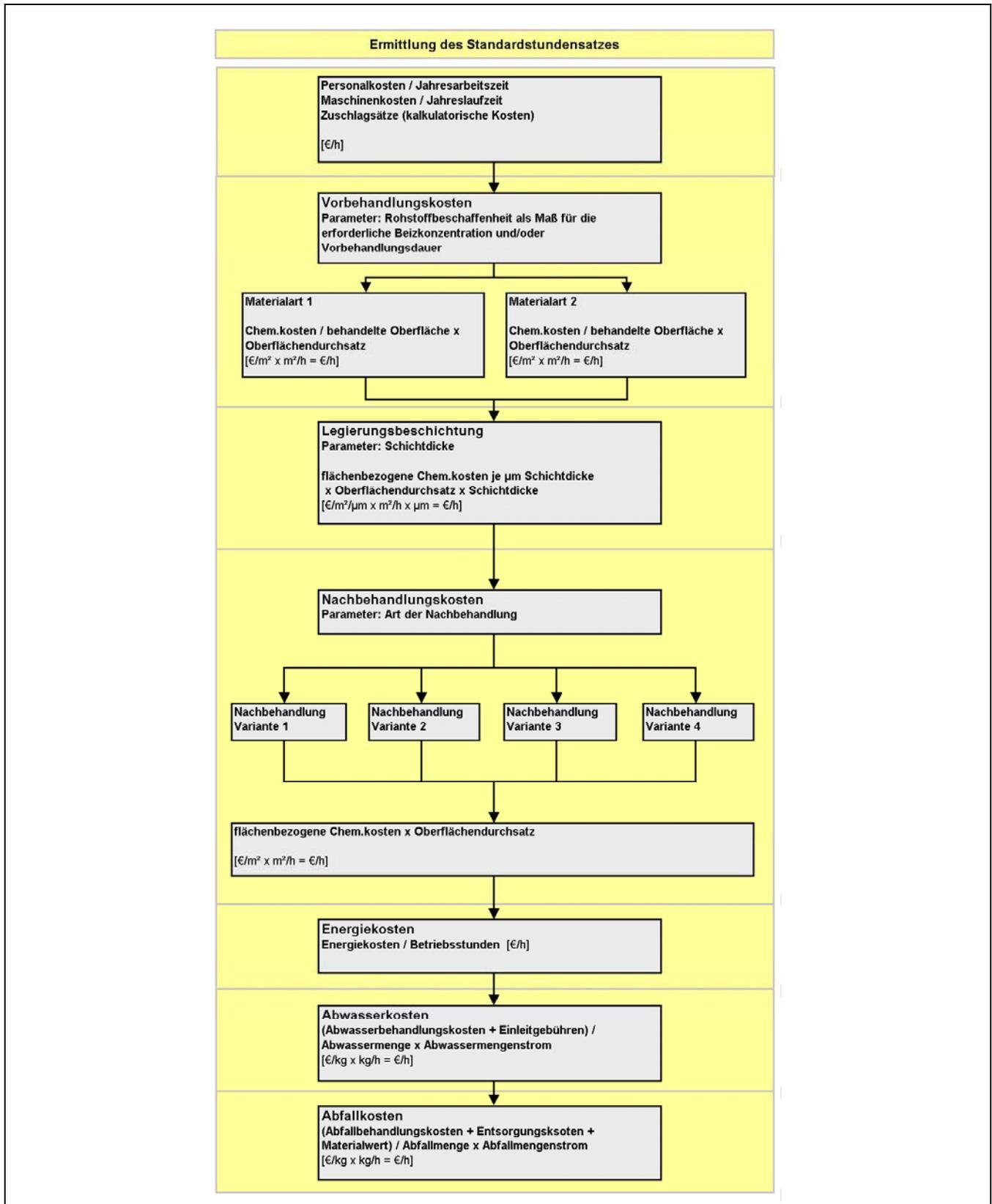
Energiekosten Dampf	Plan	Ist	
Dampfpreis	20,00	20,00	€/t
Dampfmenge	1.000	900	t/a
Dampfkosten	20.000	18.000	€/a
spezifische Dampfkosten	0,021	0,021	€/m²
stündl. Dampfkosten	2,42	2,25	€/h

Brunnenwasser	Plan	Ist	
Preis	0,03	0,03	€/m³
stündlicher Brunnenwasserbedarf	1,5	1,5	m³/h
jährliche Brunnenwassermenge	12.390	12.000	m³/a
Brunnenwasserkosten	372	360	€/a
spezifische Brunnenwasserkosten	0,00038719	0,00041008	€/m²
stündl. Brunnenwasserkosten	0,045	0,045	€/h

Abwasserkosten	Plan	Ist	
Abwasseraufkommen	15.000	16.500	m³/a
spez. Abwasserbehandlungskosten	5	5	€/m³
Abwasserbehandlungskosten	75.000	82.500	€/a
Einleitungsgebühr	1	1	€/m³
Einleitkosten	15.000	16.500	€/a
Gesamtabwasserkosten	90.000	99.000	€/a
spez. Abwasserkosten	0,094	0,113	€/m²
stündl. Abwasserkosten	10,90	12,38	€/h

Abfallkosten	Plan	Ist	
Abfallaufkommen	50.000	55.000	kg/a
Venwurf (durch "Kalben")	20.000	22.000	kg/a
Materialwert	80.000	88.000	€/a
spez. Abfallbehandlungskosten	0,00	0,00	€/kg
Abfallbehandlungskosten			€/a
spez. Entsorgungs-/Verwertungskosten	0,1	0,1	€/kg
spez. Entsorgungs-/Verwertungskosten (Prozesbad-Lsg.)	0,2	0,2	€/kg
Entsorgungskosten	9000	9900	€/a
Gesamtabfall	89.000,00	97.900,00	€/a
spez. Abfallkosten	0,093	0,112	€/m²
stündl. Abfallkosten	10,77	12,24	€/h

7.7 Zusammenfassung Stundensatzkalkulationsschema (Beispiel)



Personalstundensatz [€/h]

	Plan	Ist
Personalfaktor	4	4
Personalstundensatz [€/h]	31,57	33,33
GesamTPS [€/h]	126,26	133,33
Maschinenstundensatz [€/h]		
Plan	166,46	176,88 €/h

Beschichtete Oberfläche

	Plan	Ist	
	100.000	90.000	Trommeln/a
	9,6	9,8	m ² /Trommel
	960.000	877.872	m ² /a
	116,22	109,73	m ² /h

Materialart 1

	Plan	Ist
Flächenanteile	50%	50%
Vorbereitungskosten	15665,00 €	20090 €
flächenbez. Vorbeh.kosten	0,033 €/m ²	0,046 €/m ²
stündl. Vorbereitungskosten	3,79 €/h	5,02 €/h

Materialart 2

	Plan	Ist
Flächenanteile	50%	50%
Vorbereitungskosten	8435,00 €	8610 €
spez. Vorbeh.kosten	0,018 €/m ²	0,020 €/m ²
stündl. Vorbereitungskosten	2,04 €/h	2,15 €/h

	Plan	Ist
Schichtdicke	10	10 µm
sp. Legierungsk.	0,0623	0,0611 €/m ² /µm
stündl. Beschichtungskosten	72,44	67,03 €/h

Nachbehandlung Variante 1	Plan	Ist
Anteil beh. Fläche	25%	50%
behandelte Fläche	240.000 m ²	438.936 m ²
spez. Chromatierungskosten	0,2042 €/m ²	0,2278 €/m ²
stündl. Chrom.kosten	23,73 €/h	25,00 €/h

Nachbehandlung Variante 2	Plan	Ist
Anteil beh. Fläche	45%	25%
behandelte Fläche	432.000 m ²	219.468 m ²
spez. Chromatierungskosten	0,04 €/m ²	0,0424 €/m ²
stündl. Chrom.kosten	4,17 €/h	4,6500 €/h

Nachbehandlung Variante 3	Plan	Ist
Anteil beh. Fläche	20%	20%
behandelte Fläche	192.000 m ²	175.574 m ²
spez. Chromatierungskosten	0,05 €/m ²	0,0614 €/m ²
stündl. Chrom.kosten	6,14 €/h	6,7344 €/h

Nachbehandlung Variante 4	Plan	Ist
Anteil beh. Fläche	10%	5%
behandelte Fläche	96.000 m ²	43.894 m ²
spez. Passivierungskosten	0,45 €/m ²	0,5264 €/m ²
stündl. Passivierungskosten	51,80 €/h	57,7625 €/h

Energiekosten	Plan	Ist
spez. Stromkosten	0,099 €/m ²	0,100 €/m ²
stündl. Stromkosten	11,52 €/h	10,97 €/h
spez. Dampfkosten	0,021	0,021
stündl. Dampfkosten	2,42	2,25

Abwasserkosten	Plan	Ist
spez. Abwasserkosten	0,094 €/m ²	0,113 €/m ²
stündl. Abwasserkosten	10,90 €/h	12,38 €/h

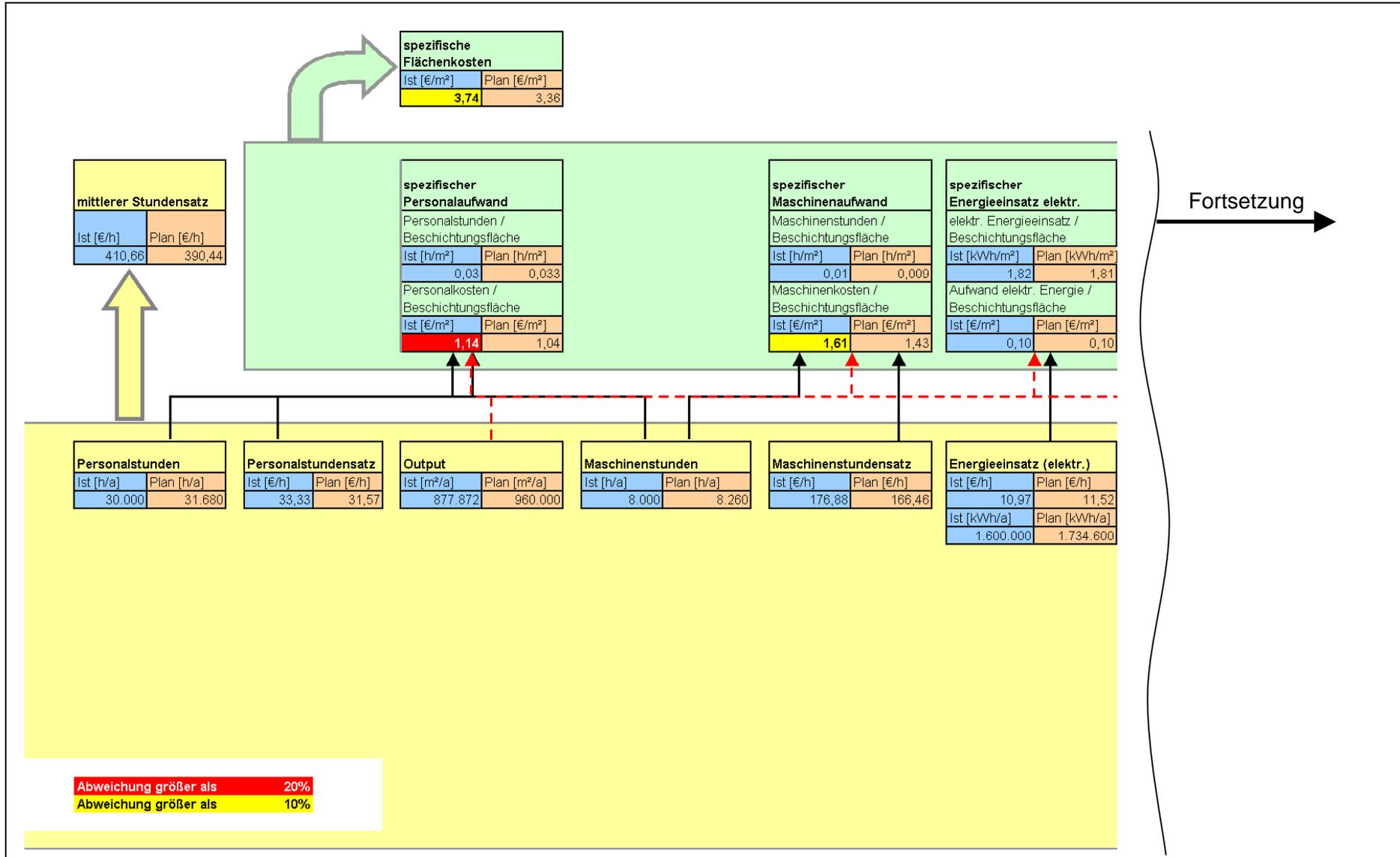
Abfallkosten	Plan	Ist
spez. Abfallkosten	0,093 €/m ²	0,112 €/m ²
stündl. Abfallkosten	10,77 €/h	12,24 €/h

7.8 Ergebnistabelle Stundensatzkalkulation (Beispiel)

		Materialart 1 (besondere Vorbehandlung)							
		Nachbehandlung							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		Plan	Ist	Plan	Ist	Plan	Ist	Plan	Ist
Personalkosten	€/h	126,26	133,33	126,26	133,33	126,26	133,33	126,26	133,33
Maschinenkosten	€/h	166,46	176,88	166,46	176,88	166,46	176,88	166,46	176,88
Vorbehandlung	€/h	3,79	5,02	3,79	5,02	3,79	5,02	3,79	5,02
Beschichtung	€/h	72,44	67,03	72,44	67,03	72,44	67,03	72,44	67,03
Schichtdicke μm		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
spez. Leg.kosten $\text{€}/(\text{m}^2 \times \mu\text{m})$		0,062	0,061	0,062	0,061	0,062	0,061	0,062	0,061
Nachbehandlung		23,73	25,00	4,17	4,65	6,14	6,73	51,80	57,76
Energiekosten (elektrisch)	€/h	11,52	10,97	11,52	10,97	11,52	10,97	11,52	10,97
Energiekosten (Dampf)	€/h	2,42	2,25	2,42	2,25	2,42	2,25	2,42	2,25
Abwasserkosten	€/h	10,90	12,38	10,90	12,38	10,90	12,38	10,90	12,38
Stundensatz	€/h	428,30	445,10	408,74	424,75	410,72	426,83	456,38	477,86
Flächendurchsatz	m^2/h	116	106	116	106	116	106	116	106
Kosten pro m^2	€/m ²	3,69	4,19	3,52	4,00	3,53	4,01	3,93	4,49
Durchsatz (Beispiel)	Stück/h	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500
Kosten pro Stück	€/Stück	0,1224	0,1272	0,1168	0,1214	0,1173	0,1220	0,1304	0,1365
Durchsatz (Beispiel)	kg/h	420	420	420	420	420	420	420	420
Kosten pro kg	€/kg	1,02	1,06	0,97	1,01	0,98	1,02	1,09	1,14
Abweichung größer als		10%							
Abweichung größer als		20%							

		Materialart 2 (normale Vorbehandlung)							
		Nachbehandlung							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		Plan	Ist	Plan	Ist	Plan	Ist	Plan	Ist
Personalkosten	€/h	126,26	133,33	126,26	133,33	126,26	133,33	126,26	133,33
Maschinenkosten	€/h	166,46	176,88	166,46	176,88	166,46	176,88	166,46	176,88
Vorbehandlung	€/h	2,04	2,15	2,04	2,15	2,04	2,15	2,04	2,15
Beschichtung	€/h	72,44	67,03	72,44	67,03	72,44	67,03	72,44	67,03
Schichtdicke	µm	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
spez. Leg.kosten	€/(m ² ×µm)	0,062	0,061	0,062	0,061	0,062	0,061	0,062	0,061
Nachbehandlung		23,73	25,00	4,17	4,65	6,14	6,73	51,80	57,76
Energiekosten	€/h	11,52	10,97	11,52	10,97	11,52	10,97	11,52	10,97
Energiekosten (Dampf)	€/h	2,42	2,25	2,42	2,25	2,42	2,25	2,42	2,25
Abwasserkosten	€/h	10,90	12,38	10,90	12,38	10,90	12,38	10,90	12,38
Stundensatz	€/h	426,55	442,23	406,99	421,88	408,97	423,96	454,63	474,99
Flächendurchsatz	m ² /h	116	106	116	106	116	106	116	106
Kosten pro m ²	€/m ²	3,67	4,16	3,50	3,97	3,52	3,99	3,91	4,47
Durchsatz (Beispiel)	Stück/h	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500
Kosten pro Stück	€/Stück	0,1219	0,1264	0,1163	0,1205	0,1168	0,1211	0,1299	0,1357
Durchsatz (Beispiel)	kg/h	420	420	420	420	420	420	420	420
Kosten pro kg	€/kg	1,02	1,05	0,97	1,00	0,97	1,01	1,08	1,13

7.9 Kennzahlenschema (Beispiel)



Fortsetzung

spezifischer Energieeinsatz (Dampf)		spezifischer Chemikalieneinsatz Vorbehandlung		spezifischer Chemikalieneinsatz Beschichtung		spezifischer Chemikalieneinsatz Nachbehandlung		spezifischer Frischwassereinsatz		spezifisches Abwasseraufkommen		spezifisches Abfallaufkommen	
Dampfeinsatz / Beschichtungsfläche		Chemikalien Vorb. / Beschichtungsfläche		Chemikalien Besch. / Beschichtungsfläche		Chemikalien Nachb. / Beschichtungsfläche		Frischwassereinsatz / Beschichtungsfläche		Abwassermenge / Beschichtungsfläche		Abfallmenge / Beschichtungsfläche	
Ist [t/m²]	Plan [t/m²]	Ist [kg/m²]	Plan [kg/m²]	Ist [kg/m²]	Plan [kg/m²]	Ist [kg/m²]	Plan [kg/m²]	Ist [m³/m²]	Plan [m³/m²]	Ist [m³/m²]	Plan [m³/m²]	Ist [m³/m²]	Plan [m³/m²]
0,001	0,001	0,064	0,057	0,434	0,384	0,073	0,046	0,014	0,013	0,019	0,016	0,063	0,057
Aufwand Dampf / Beschichtungsfläche		Aufwand Chemi. Vorb. / Beschichtungsfläche		Aufwand Chemi. Besch. / Beschichtungsfläche		Aufwand Chemi. Nachb. / Beschichtungsfläche		Frischwasseraufwand / Beschichtungsfläche		Abwasserkosten / Beschichtungsfläche		Abfallkosten / Beschichtungsfläche	
Ist [€/m²]	Plan [€/m²]	Ist [€/m²]	Plan [€/m²]	Ist [€/m²]	Plan [€/m²]	Ist [€/m²]	Plan [€/m²]	Ist [€/m²]	Plan [€/m²]	Ist [€/m²]	Plan [€/m²]	Ist [€/m²]	Plan [€/m²]
0,021	0,021	0,033	0,025	0,562	0,524	0,163	0,122	0,000	0,000	0,11	0,094	0,11	0,093

Energieeinsatz (Dampf)		Vorbereitung		Beschichtung		Nachbehandlung		Brunnenwassereinsatz		Abwasser		Abfall	
Ist [€/h]	Plan [€/h]	Ist [€/h]	Plan [€/h]	Zink		Ist [€/h]	Plan [€/h]	Ist [€/h]	Plan [€/h]	Ist [€/h]	Plan [€/h]	Ist [€/h]	Plan [€/h]
2,25	2,42	3,59	2,92			17,90	14,22	0,05	0,045	12,38	10,90	12,24	10,77
Ist [t/a]	Plan [t/a]	Ist [kg/a]	Plan [kg/a]			Ist [kg/a]	Plan [kg/a]	Ist [m³/a]	Plan [m³/a]	Ist [m³/a]	Plan [m³/a]	Ist [m³/a]	Plan [m³/a]
900	1.000	55.890	54.250	40.000	38.000	63.800	44.200	12.000	12390	16.500	15.000	55.000	50.000
				Nickelchemikalien									
				Ist [€/h]	Plan [€/h]								
				34,75	35,00								
				Ist [kg/a]	Plan [kg/a]								
				287.000	280.000								
				Sonst. Chemikalien									
				Ist [€/h]	Plan [€/h]								
				17,23	16,39								
				Ist [kg/a]	Plan [kg/a]								
				53.700	51.100								
				Summe Chemikalien									
				Ist [€/h]	Plan [€/h]								
				61,66	60,89								
				Ist [kg/a]	Plan [kg/a]								
				380.700	369.100								

7.10 Berechnung der beschichteten Oberfläche (Faradaysches Gesetz)

Abscheidung der Legierung

$$\Rightarrow \frac{10000 \text{ Ah/h}}{10,9 \text{ Trommeln/h}} = 917 \text{ Ah/Trommel}$$

theoretische Abscheidung

Stromausbeute	η	65%
Strom*Zeit (Ladungsmenge)	It	917 Ah/Trommel
Ladungszahl	z	2
Faradaykonstante	F	96487 C/mol
Molmasse(Zn)	$M_m(\text{Zn})$	65,4 g/mol
Molmasse(Ni)	$M_m(\text{Ni})$	58,7 g/mol
Anteil Zn		86%
Anteil Ni		14%
Molmasse(Zn/Ni)	$M_m(\text{Zn/Ni})$	64,5 g/mol

Abscheidung nach Faraday'schem Gesetz

$$n = \frac{\eta \cdot I \cdot t}{z \cdot F} = \frac{m(\text{Zn / Ni})}{M_m(\text{Zn / Ni})}$$

abgeschiedene Masse

$$\Rightarrow m(\text{Zn / Ni}) = \frac{\eta \cdot I \cdot t}{z \cdot F} \cdot M_m(\text{Zn / Ni})$$

$$\Rightarrow \begin{aligned} m(\text{Zn/Ni}) &= 90.000 \text{ Trommeln/a} \\ m(\text{Zn}) &= 717,1 \text{ g/Trommel} \\ m(\text{Ni}) &= 616,7 \text{ g Zn /Trommel} \\ &= 100,4 \text{ g Ni /Trommel} \end{aligned}$$

bei einer Schichtdicke d von [µm]	10	1,00E-05 m
und einer Legierungsichte ρ von		7.352 kg/m³

ergibt sich eine Beschichtungsfläche A von

$$A = \frac{m(\text{Zn / Ni})}{d \cdot \rho(\text{Zn / Ni})}$$

$$\Rightarrow A = 9,8 \text{ m}^2/\text{Trommel}$$

Fläche pro Jahr	$A_{\text{jährlich}}$	877.872 m²/a
Fläche pro Stunde	$A_{\text{stündlich}}$	106 m²/h
bei einer Schichtdicke von:		10 µm

7.11 Berechnung der beschichteten Oberfläche (Massenbilanz)

$$\dot{F} = \frac{\dot{V}_{Me}}{d_{Me}} = \frac{\dot{m}_{Me}}{d_{Me} \cdot \rho_{Me}} = \frac{\dot{m}_{Einsatz}^{Me} - \dot{m}_{EA}^{Me}}{d_{Me} \cdot \rho_{Me}} = \frac{\dot{m}_{Einsatz}^{Me} - c_0^{Me} \cdot \dot{V}_{EA}}{d_{Me} \cdot \rho_{Me}}$$

\dot{F} = Flächendurchsatz

d_{Me} = mittlere Dicke des abgeschiedenen Metalls

ρ_{Me} = Dichte des abgeschiedenen Metalls

\dot{m}_{Me} = Massenstrom des abgeschiedenen Metalls

$\dot{m}_{Einsatz}^{Me}$ = Massenstrom Chemikalieneinsatz

\dot{m}_{EA}^{Me} = Massenstrom Elektrolytasschleppung

c_0^{Me} = Elektrolytkonzentration

\dot{V}_{EA} = Volumenstrom Elektrolytasschleppung

Massenstrom Chemikalieneinsatz

Jahresverbrauch (Zink) an Chemikalien aus Messungen		56.500 kg
Jahresverbrauch (Nickel) an Chemikalien aus Bestellmengen		9.240 kg
Volumenstrom Elektrolytasschleppung		
		100,00 m³/a
Elektrolytkonzentration Zn c₀	10 g/l	10 kg/m³
Elektrolytkonzentration Ni c₀	2 g/l	2 kg/m³
ausgeschleppte Zinkmenge		1000,00 kg/a
ausgeschleppte Nickelmenge		200,00 kg/a

Abschätzung der Schichtdicke reinen Zinks (theoretisch)

$$d_{Zn} = \frac{d_{Le} \cdot \rho_{Le} - \chi \cdot d_{Le} \cdot \rho_{Le}}{\rho_{Zn}} = \frac{(1 - \chi) \cdot d_{Le} \cdot \rho_{Le}}{\rho_{Zn}}$$

mittlere Dicke des abgeschiedenen Metalls	10 µm	1,00E-05 m
Dichte des abgeschiedenen Metalls		
Zink	7,1 g/cm³	7.100 kg/m³
Nickel	8,9 g/cm³	8.900 kg/m³
Nickeleinbaurate (χ)		14%
Legierungsdichte	7,352 g/cm³	7.352 kg/m³
dz_n =	8,905 µm	8,905E-06 m
Flächendurchsatz		877.786,78 m²/a
realer Trommeldurchsatz / a		90.000 Trommeln/a
Fläche je Trommelfüllung		9,8 m²/Trommel

Veröffentlichung der LfU-Reihe „Industrie und Gewerbe“ (ISSN 0949-0485)

Titel	Band	Jahr der Herausgabe	Preis (falls lieferbar)
Regelwerke und beste verfügbare Techniken zur Luftreinhaltung sowie Ersatz von Abfällen in der Zementindustrie	1	1999	kostenlos
Entwicklung der Emission krebserzeugender Schadstoffe 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 €
Holzhackschnitzel-Heisanlage	5	2001	9 €
Energie- und Stoffstromoptimierung in der betrieblichen Praxis der Lohnlackierung	6	2002	8 €
Mitverbrennung von Abfällen in Zement- und Kohlekraftwerken in Baden-Württemberg (Kurzfassung)	7	2003	kostenlos
Stoffströme in Druckereien optimieren	8	2003	8 €
Mit der Pinch-Technologie Prozesse und Anlagen optimieren	9	2004	9 €