

# Systemtechnische Methodik zur Planung und Optimierung umweltrelevanter Prozesse – Fallbeispiel Feuerverzinken

R. Ackermann, J. Buchgeister, ITC

## Einleitung

Systemtechnische Methoden haben eine große Tradition in der Bearbeitung komplexer technisch/technologischer Probleme im industriellen Umfeld [1, 2]. Hier werden wesentliche Einflussfaktoren bestimmt und Optimierungskriterien abgeleitet.

In der Produkt- oder Verfahrensentwicklung bzw. -optimierung stehen die Unternehmen vor einer Vielfalt von Analysemöglichkeiten, Prinzipien und Bewertungsmethoden, mit denen der Entscheidungsprozeß unterstützt werden kann. Die rein ökonomische Entscheidungsdimension bildet die Basis, jedoch ranken sich eine Vielzahl von weiteren Entscheidungsdimensionen wie zum Beispiel ökologische, soziologische, technische, design- oder materialbezogene Dimensionen um sie herum. Gleichzeitig wird die Zeit für die Entscheidungsfindung immer kürzer, da sich die Zyklen für die Produktions- oder Produktentwicklung deutlich verkürzen. Dies führt dazu, dass eine sichere und gleichzeitig transparente und nachvollziehbare Entscheidungsfindung immer schwieriger zu realisieren ist. Damit werden aber die Entscheidungsprozesse behindert und das Risiko von Fehlentscheidungen mit den entsprechenden Verlusten steigt.

Im Rahmen von zwei BMBF-Vorhaben [3, 4] wurde die Einführung einer stoffverlustminimierten Prozesstechnik in einer Feuerverzinkerei und anderen galvanotechnischen Betrieben mit systemanalytischen Methoden begleitet. Dabei wurden die geplanten Ver-

änderungen der Prozesstechnik mit dem vorher identifizierten Ist-Zustand unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten verglichen. Das Ziel war es, u.a. für den bestehenden Feuerverzinkungsprozess die ökonomisch und ökologisch vorteilhaftesten Varianten zur Realisierung vorzuschlagen und den Projekterfolg nach der Realisierung zu beurteilen. In dieser Darstellung liegt der Schwerpunkt auf dem Vorgehen und der ökologischen und ökonomischen Beurteilung. Dieses Vorgehen ist in die Erarbeitung der VDI-Richtlinie 4090 „Systemtechnische Methodik zur Planung und Steuerung umweltrelevanter Prozesse im betrieblichen Bereich“ eingeflossen, welche momentan als Gründruck vorliegt [5].

## Vorgehen

Entsprechend der Vorgehenslogik der VDI-Richtlinie 4090 wird das Vorgehen zur Planung und Optimierung umweltrelevanter Prozesse in 7 Schritte unterteilt (siehe Abb. 1).

Innerhalb der einzelnen Schritte des Vorgehensmodells werden die umweltrelevanten Prozesse schrittweise analysiert und alternative Konzepte erarbeitet und umgesetzt.

Fallbeispiel Feuerverzinken: Das Feuerverzinken ist ein weitverbreitetes Verfahren zum Korrosionsschutz von Stahlbauteilen. In der Bundesrepublik Deutschland wurden 1995 in 200 Betriebsstätten ca. 1,6 Millionen Tonnen Stahl mit ca. 130.000 Tonnen Zink beschichtet. Für die einwandfreie Feuerverzinkung ist

eine metallisch blanke und fettfreie Oberfläche erforderlich. Diese Qualität wird in den Vorbehandlungsbädern erzeugt. Den dort eingesetzten Stoffen und anfallenden Abfällen wird aus Sicht des Umweltschutzes eine große Bedeutung beigemessen, da deren Produktion sowie deren Verwertung und Beseitigung sehr umweltrelevante Prozesse darstellen (Anstoß und Situationsanalyse – Bedarf einer Analyse).

Der zentrale Untersuchungsgegenstand – das zu behebende „Problem“ – ist zunächst die bestehende Prozesskette, die als Ist-Zustand („Referenzsystem“) definiert wird. Das Kernsystem selbst besteht aus einer diskreten Anzahl miteinander vernetzter Prozesse. Durch die Festlegung der Systemgrenzen werden die zu analysierenden Prozesse und Prozessketten im Hinblick auf die ursprüngliche Fragestellung determiniert. Die anschließende Modellierung gibt basierend auf Formeln und Parametern die qualitativen Aspekte einer Prozesskette als kausale Wirkzusammenhänge wieder.

Fallbeispiel Feuerverzinken: Es wird die bestehende Prozesskette des Feuerverzinkens zugrunde gelegt. Diese besteht aus 5 Prozessschritten: Vorarbeit, Vorbehandlung, Trocknung, Verzinkung und Nacharbeit. Die Schritte Vorarbeit und Nacharbeit sind bei der weiteren Untersuchung ausgeblendet worden, da diese hier auf der einen Seite wenig Handlungsspielräume haben und zum anderen die Umweltrelevanz gemeinsam mit dem Unternehmen als gering zu den anderen Prozessen eingeschätzt wurde.

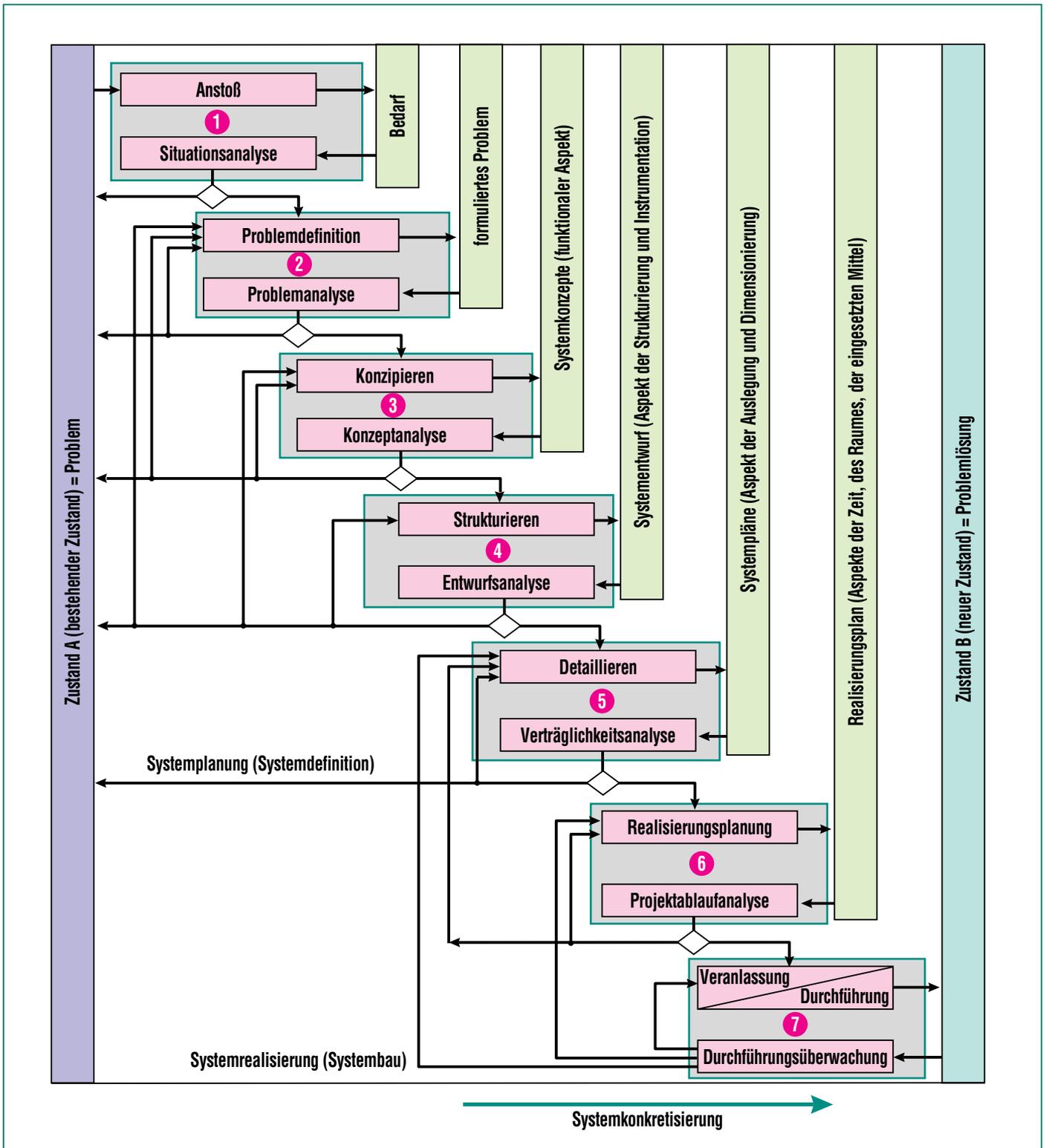


Abb. 1: Vorgehenslogik zur Verfahrensverbesserung von einem bestehenden Zustand (Problem) zu einem veränderten Zustand (Problemlösung) nach VDI 4090 [5].

Ausgehend vom Ist-Zustand werden die optionalen Anlagenzustände entwickelt (Soll-Modelle). Wesentliche Grundlage des Vergleichs des Ist-Zustands mit den möglichen Soll-Zuständen bildet die Nutzengleichheit der Zustände des betrachteten Systems. Innerhalb der Modellierung werden dabei die vernetzten, partiell unterbestimmten und rückgekoppelten Kernsystemmodelle mit Hilfe sequentieller Berechnungsroutinen unter Berücksichtigung der Massenerhaltung bilanziert. Durch unterschiedliche Parameterbelegungen der Modelle können verschiedene Szenarien erzeugt werden. Die von den modellierten Prozessketten generierten Ergebnisse sind im Zuge der Modellvalidierung auf formale und inhaltliche Plausibilität sowie Richtigkeit zu überprüfen.

**Fallbeispiel Feuerverzinken:** Als Soll-Zustände sind verschiedene Varianten der Kreislaufführung von Prozesswässern untersucht worden. Beispielsweise wurde die Abtrennung von verbrauchter Prozesslösung aus der Entfettung durch thermische Spaltung der Entfettungslösung erprobt. Dieser Regenerierungsprozess der Entfettungslösung ist als Soll-Modell in die Untersuchung der gesamten Feuerverzinkung einbezogen worden. Er stellt einen komplexen, optionalen Zustand des Prozesses der Vorbehandlung mit Aufbereitung der Entfettungslösung dar.

Die Ergebnismengen eines Soll- und des Ist-Modells liefern die Datengrundlage für die ökologische und ökonomische Beurteilung der einzelnen Optimierungs-

maßnahmen, die als Soll-Ist-Vergleich erfolgt. D.h. für die Modellierungsergebnisse werden die Differenzen von „SOLL – IST“ gebildet.

**Fallbeispiel Feuerverzinken:** Nach Rücksprache mit den beteiligten Unternehmen wurden 4 Konzeptvariationen in die engere Wahl einbezogen, wobei besonderer Wert auf die Wasserkreislaufführung gelegt wurde. Dabei sind auch Aspekte wie berufliche Qualifikation und optimale Personalausnutzung einbezogen worden, die jedoch nicht quantifiziert wurden. Auf Grund der Tatsache, dass vorrangig ungelernete Arbeiter die Anlagen betreuen, stellt sich die Einführung anspruchsvoller Regelungssysteme als fast unmöglich dar. Diese „nichttechnischen“ Einflüsse sind neben im Voraus schwer quantifizierbaren Einflüssen wie die Prozessqualität und -sicherheit Basis der unternehmerischen Entscheidung.

### Ökologische Beurteilung

Die ökologische Beurteilung basiert auf der Methodik der Ökobilanzierung, deren methodische Elemente der Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung für die ökologische Analyse genutzt werden [6, 7, 8, 9]. Der Untersuchungsrahmen wird somit über den eigentlichen Bereich der zu untersuchenden Kernsystemprozesse ausgedehnt (siehe Abb. 2), und stellt das Kern- und Mantelsystem dar.

Innerhalb der Sachbilanz werden die mit den Kernsystem- und Mantelsystemmodellen verbundenen Stoff- und Energieflüsse

ermittelt. Dadurch werden die Stoff- und Energieflüsse des Kernsystems lebenswegbezogen auf Emissionen in die Umwelt und die Inanspruchnahme von Ressourcen zurückgeführt. Eine Problemverlagerung in das Mantelsystem kann somit identifiziert und vermieden werden. Die anschließende Wirkungsabschätzung verdichtet diese Sachbilanzdaten und aggregiert sie zu Wirkungskategorien der anthropogenen Umweltbeeinflussung. Zur Bewertung der Wirkungskategorien untereinander wurde ein Verfahren entwickelt, welches auf einem Vorschlag des Umweltbundesamtes beruht und eine objektive, gegenseitige Abwägung der Ergebnisse für die einzelnen Wirkungsindikatoren ermöglicht [8]. Eine eindeutige Rangfolge der analysierten Optimierungsansätze bzgl. ihrer ökologischen Vorteilhaftigkeit ist jedoch nicht für jeden Anwendungsfall zu erwarten.

**Fallbeispiel Feuerverzinken:** Für das Mantelsystem der Feuerverzinkung ergaben sich 9 vorkettenbasierte und 8 nachkettenbasierte Lebenswegabschnitte. Die ökologische Beurteilung ergab nicht für alle berücksichtigten Wirkungskategorien Entlastungen. Der Grund hierfür ist eine in der Optimierung verursachte Verschiebung von stofflich vorherrschenden Emissionen (Abwasser, Abfall, Abgas) zu energetischem Mehrbedarf [10]. Dieser energetische Mehrbedarf ist zwangsläufig mit Umweltbelastungen verbunden.

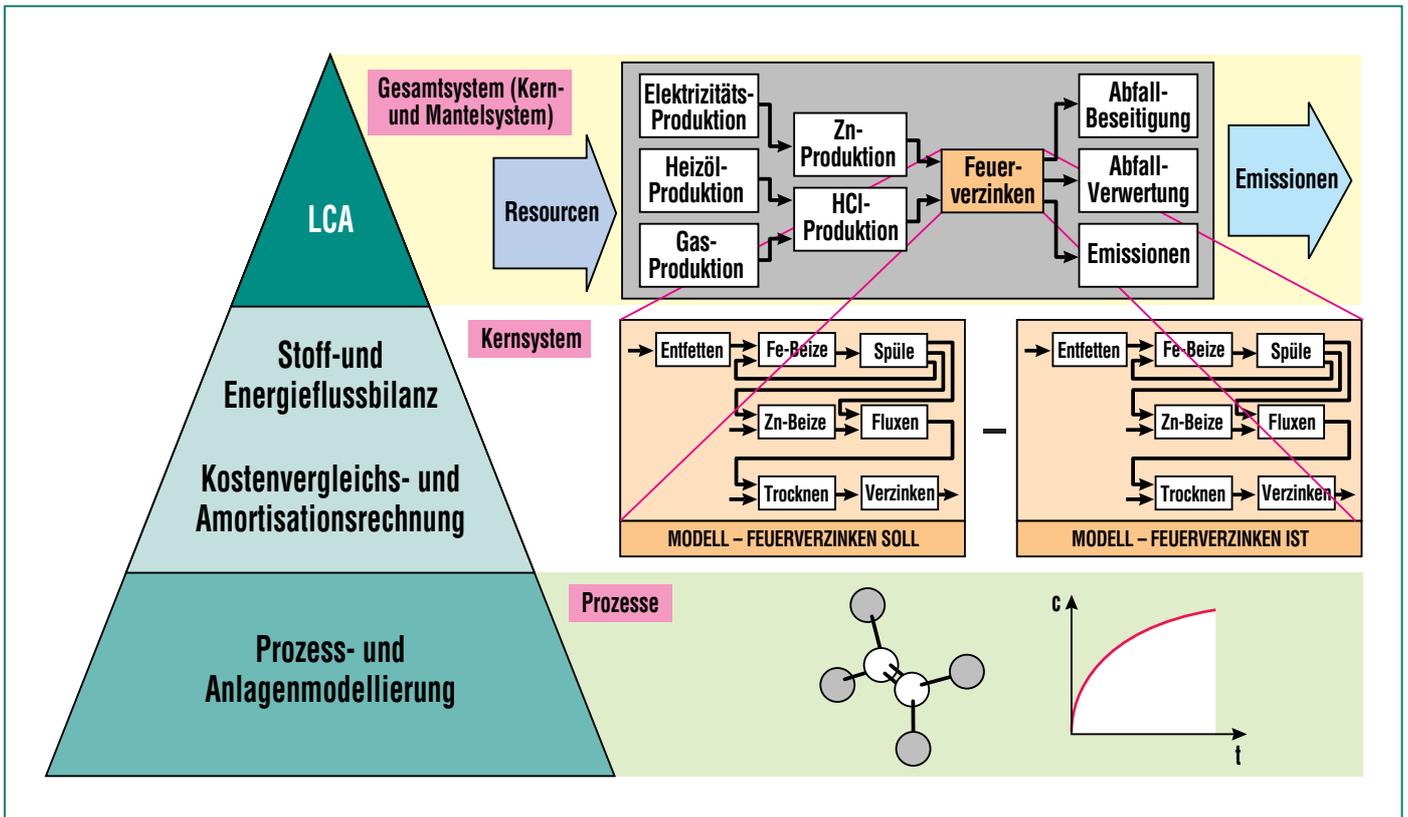


Abb. 2: Ebenen der ökologischen und ökonomischen Beurteilung [3, 4] (der Begriff der LCA steht für Life Cycle Assessment und wird als englische Entsprechung des deutschen Wortes Ökobilanz verwendet).

### Ökonomische Beurteilung

Die ökonomische Beurteilung und Optimierung basiert auf einer prozessorientierten Kostenvergleichs- und Amortisationsrechnung. Das bedeutet, im Rahmen der betrieblichen Stoff- und Energieflussanalyse wird jedem Prozess des Kernsystems genau eine Kostenstelle zugeordnet. Die Kostenvergleichsrechnung stellt den Gesamtkosten des Ist-Zustands die Gesamtkosten der jeweiligen Soll-Zustände gegenüber. Der vorteilhafteste Zustand ist gekennzeichnet durch die geringsten Gesamtkosten bzw. die geringsten spezifischen Kosten.

Fallbeispiel Feuerverzinken: Im realisierten Zustand werden deutliche Einsparungen ausgewiesen. Den gestiegenen Kapitalkosten und Instandhaltungskosten für die Installation und Betrieb der Regenerierungsprozesse stehen deutliche Kosteneinsparungen beim Einkauf der Einsatzstoffe sowie bei der Entsorgung der Abfälle gegenüber. Diese Einsparungen sind auf die Stoffkreislaufschließung in der Vorbehandlung zurückzuführen. Bei den Personalkosten wurden keine Veränderungen zwischen realisiertem Zustand und Ist-Zustand erzielt. Insgesamt werden durch Optimierungsmaßnahmen Kosteneinsparungen in Höhe von ca. 52.000 €/10.000 t Zink errechnet.

### Zusammenfassung

Fallbeispiel Feuerverzinken: Die konkrete Umsetzung der als konzeptionelle Möglichkeiten untersuchten Varianten orientiert sich sowohl nach der ökologischen und ökonomischen Beurteilung als auch an der unternehmerischen Entscheidung. Das bedeutet, es werden weitere technische Aspekte wie z.B. die Reproduzierbarkeit berücksichtigt. Ebenfalls änderte sich während der analytischen Arbeit das Aufgabenportfolio der Feuerverzinker. Daraus resultierten sich ändernde Umsätze, die wiederum Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben. Hier zeigte sich, dass die Rechenmodelle eine gute Anpassung

sungsfähigkeit erfordern, damit die neuen Bedingungen schnell und mit geringem Aufwand Berücksichtigung finden konnten. Schwierig wurde es in Bezug auf die Nutzengleichheit. Eine formelle Nutzengleichheit hätte gewährleistet werden können, jedoch wären die Ergebnisse nicht mehr praxisrelevant. Der Grund hierfür ist, dass sich Anwendungsgrenzen aufzeigen, die die Aufgabenstellung „Entscheidungshilfen mit möglichst objektiven Kriterien zu geben“ in der Umsetzung erschwert.

Das Vorgehensmodell als Basis für die systemtechnische Methodik zur Planung und Optimierung umweltrelevanter Prozesse er-

weist sich als anwendbar und nützlich für die Beurteilung und Optimierung insbesondere komplexer Fragestellungen. Eine ausschließliche Beschränkung auf ökologische und ökonomische Kriterien für die Beurteilung und Optimierung eines Prozesses erscheint nicht sinnvoll, da die unternehmerische Entscheidung im Vordergrund steht.

Die Ergebnisse der ökologischen und ökonomischen Beurteilung sind vor der Formulierung einer Handlungsempfehlung auf weitere Verbesserungspotentiale zu prüfen. Im Sinne eines kontinuierlichen und iterativen Verbesserungsprozesses können die bereits vorhandenen Modelle ent-

sprechend angepasst oder neue Modelle daraus abgeleitet werden. Dafür sollte auf das vorhandene Wissen betrieblicher und externer Experten zurückgegriffen werden.

## Literatur

- [1] G. Patzak, *Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken*; Berlin u.a.; Springer-Verlag, 1982
- [2] R. Haberfellner, P. Nagel, M. Becker, A. Büchel, H. von Massow, *Systems Engineering – Methodik und Praxis*, W.F. Daenzer, F. Huber, (Hrsg.), Verlag Industrielle Organisation Zürich (1999)
- [3] *BMBF-Verbundvorhaben Stoffkreislaufschließung bei abtragenden Verfahren in Prozesslösungen Teilvorhaben 14: Ökologische und ökonomische Beurteilung und Optimierung Förderkennzeichen 01ZH9507/2*
- [4] *BMBF-Verbundvorhaben Umstellung bestehender galvanotechnischer Anlagen auf eine stoffverlustminimierte Prozesstechnik: Teilvorhaben 1: Ökologische und ökonomische Beurteilung und Optimierung Förderkennzeichen 01RK9719/3*
- [5] *VDI 4090 – Systemtechnische Methodik zur Planung und Steuerung umweltrelevanter Prozesse in der betrieblichen Praxis – Grundlagen und Allgemeines*; 2003, Düsseldorf; Richtlinienentwurf VDI Koordinierungsstelle Umwelttechnik (Weißdruck in Vorbereitung)
- [6] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: ISO 14040 – Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen, Deutsche Fassung, Berlin 1999*
- [7] G. Fleischer, R. Ackermann, R. Schilling, *AbfallwirtschaftsJournal 5 (1993), Nr.5 S. 379-396*
- [8] J. Hildenbrand, *Vergleichende Darstellung von Auswertungsmethoden in Ökobilanzen, Diplomarbeit; TU Berlin, Fachgebiet Systemumwelttechnik; Berlin 1999*
- [9] J. Buchgeister, A. Fritzsche, G. Horvath, A. Wittkowsky, *Härterei Technische Mitteilungen (2001), Nr. 1 S. 30-35, Carl-Hanser-Verlag*
- [10] M. Huckshold, J. Hildenbrandt, R. Ackermann, G. Fleischer, H. Külker, *Metalloberfläche (2000) 6, Carl-Hanser-Verlag*