

Strategische Planung von Logistiknetzwerken in der Entsorgungswirtschaft

Peter Meyer¹, Uwe Clausen²

¹Fraunhofer IML, Abteilung Entsorgungslogistik, Dortmund

²Fraunhofer IML, Geschäftsbereich Logistik, Verkehr und Umwelt, Dortmund

Strategic planning of logistic networks in waste management

Abstract

Logistics serves for the planning, control, and monitoring of material flows in the supply, the production, and the distribution of commodities as well as in the disposal of waste. It is an essential element of any product's life cycle. Always being focused on is the increase of efficiency with regard to economy, quality, and service. However, efficiency in total is nowadays examined under the aspect of sustainability. In the focus are also methods to increase the economic and ecological efficiency of complex logistic networks by means of location and allocation planning.

Abstract deutsch

Die Logistik dient der Planung, Steuerung und Überwachung von Materialflüssen sowohl bei der Beschaffung, Produktion und Distribution von Gütern als auch bei der Entsorgung von Abfällen. Sie ist integraler Bestandteil des Produktlebenszyklus. Im Fokus steht von jeher die Steigerung der Effizienz hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Qualität und Service. Doch Effizienz wird heute insgesamt unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit verstanden. Die Bundesvereinigung Logistik (BVL) e. V. forderte unlängst die Akteure der Logistikbranche auf, über die Umsetzung nachhaltiger Maßnahmen nachzudenken. Der Bundesverband Deutscher Postdienstleister (BvDP) e. V. diskutierte diesbezüglich Strategien zum effizienten Ressourceneinsatz im KEP-Bereich. Speditions- und Handels-, aber auch Entsorgungsunternehmen prüfen derzeit die Steigerung der Umweltverträglichkeit der von ihnen angebotenen Logistikdienstleistung (so hat die DHL gemeinsam mit Triaz das »Grüne Paket« entwickelt, der Otto-Versand durch seine Umweltstrategie sowohl Kosten als auch Umweltbelastungen signifikant gesenkt etc.). Dabei liegt das Augenmerk auch Verfahren zur Steigerung der ökonomischen und ökologischen Effizienz komplexer Logistiknetzwerke durch Standort- und Zuordnungsplanung.

Keywords

Logistik, Netzwerke, Standortplanung, Zuordnungsplanung, Entsorgungswirtschaft

1 Einleitung

Die Standort- und Zuordnungsplanung entstammt dem Operations Research und dient als mathematisches Verfahren u. a. der Optimierung von Logistiknetzwerken. Dabei ordnet sie anhand eines Bewertungskriteriums Güter ausgehend von einem Ausgangspunkt über verschiedene Stufen eines Logistiknetzwerkes hinweg einem Endpunkt zu. Die Zuordnungsplanung wird überwiegend von Logistikunternehmen in der Distributions- und Handelslogistik angewendet. Sie optimiert die Zuordnung von Produkten aus-

Abfallforschungstage 2006 www.wasteconsult.de

gehend vom Hersteller über Zentral- und Regionallager bzw. über den Groß- und Einzelhandel bis hin zum Endkunden. In Ansätzen wird sie inzwischen auch von Herstellern in der Beschaffungs- und Produktionslogistik eingesetzt. Hierbei dient sie der Zuordnung von Rohstoffen ausgehend von den Lieferanten über die Produktion von Halbzeugen, Bauteilen und Baugruppen hinweg bis hin zum Hersteller fertiger Endprodukte. Darüber hinaus wird die Methode von Entsorgungsunternehmen eingesetzt. Hierbei dient sie der Zuordnung von Abfällen ausgehend vom Anfallort über die Sortierung, Demontage, Aufbereitung und Behandlung hinweg bis hin zur Verwertung oder Beseitigung. Das Ziel ist dabei vornehmlich, unter Einbeziehung logistischer, fertigungs- und verfahrenstechnischer Prozesse kostenminimale Materialflüsse zu realisieren. (DOMSCHKE ET AL., 1998)

Die Standort- und Zuordnungsplanung kann heuristisch oder exakt vorgenommen werden. Ihre Anwendung erfordert sowohl Projektdaten (z. B. kundenspezifische Standort-, Kunden- und Kosteninformationen) als auch Geodaten (z. B. digitale Straßenkarten, Schienen- und Wasserwege). Die Daten werden eingangs in ein mathematisches Modell überführt. (MICHAELIS ET AL., 2001)

2 Standort- und Zuordnungsplanung in der Praxis

Das Fraunhofer IML hat zur Lösung von Standort- und Zuordnungsproblemen zwei Softwareprogramme entwickelt. Beide liefern exakte Lösungen. Eins ist auf die Beschaffung, Produktion und Distribution, eins auf die Redistribution und Entsorgung ausgelegt. Die folgenden Beispiele veranschaulichen die jeweilige Anwendung.

2.1 Beschaffung, Produktion und Distribution

Am 5. August 2003 erfolgte durch Konica Corporation und Minolta Co., Ltd. die Gründung der Holdinggesellschaft Konica Minolta Holdings, Inc. Ihr Hauptziel war, die jeweiligen Stärken der Unternehmen zu vereinen, um eine starke Stellung innerhalb der Branche zu gewährleisten. Die Gründung hatte unmittelbare Auswirkungen auf die Logistik der zuvor eigenständigen Unternehmen. In Deutschland war davon die ebenfalls neu gegründete Konica Minolta Business Solutions Deutschland GmbH betroffen. Sie benötigte eine einheitliche Distributionsstruktur sowohl für Neu- als auch für Gebrauchtgeräte. Ihre Planung erfolgte durch das Fraunhofer IML mit Methoden des Operations Research. Das Ziel war, auf der Basis der vorhandenen Absatzschwerpunkte, des geforderten Servicegrades sowie der Lager- und Transportkosten die optimale Anzahl der Lager zu ermitteln, die optimalen Standorte der Lager zu identifizieren und eine Zuordnung der Lager zu den Kunden vorzunehmen. Das Ergebnis wies die für Konica Minolta Business Solutions Deutschland GmbH optimale Distributionsstruktur hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Qualität und Service aus.

2.2 Redistribution und Entsorgung

Seit Inkrafttreten der Verpackungsordnung am 12. Juni 1991 bietet die Glasindustrie in Deutschland ein flächendeckendes System zur Rücknahme und Verwertung von Altglas an. Die GGA Gesellschaft für Glasrecycling und Abfallvermeidung mbH betreibt dieses System im Auftrag der Glasindustrie. Sie organisiert zusammen mit Kooperationspartnern aus der Entsorgungswirtschaft die Sammlung und den Transport des Altglases ausgehend von den Sammelcontainern über die Aufbereitungsanlagen hin zu den Glashütten. Darüber hinaus übernimmt sie die Kalkulation der Kosten, schließt die Verträge mit den Kooperationspartnern und übernimmt das finanzielle Risiko, das aus der Schwankung von Angebot und Nachfrage resultiert.

In Deutschland fallen ca. 2,08 Millionen Tonnen Altglas pro Jahr an. Das Altglas wird flächendeckend in ca. 300.000 Sammelcontainern an ca. 100.000 Standorten gesammelt. Lastkraftwagen holen es auf festgelegten Routen ab und bringen es zu den Aufbereitungsanlagen. Das aufbereitete Altglas wird zu den Glashütten transportiert und dort zu neuen Flaschen verarbeitet. Altglas ist damit der wichtigste Rohstoff für neue Glasverpackungen. Jede Flasche besteht heute zu rund 70 - 75% aus Altglas.

Gewachsene Strukturen machten im Jahr 2000 eine Reorganisation der Transporte notwendig. Sie erfolgte durch das Fraunhofer IML mit Methoden des Operations Research. Das Ziel war die Berechnung der optimalen Zuordnung des Altglases ausgehend von 8.272 Sammelgebieten (PLZ-Gebieten) über 23 Aufbereitungsanlagen hin zu 28 Glashütten. Die Berechnung erfolgte unter Berücksichtigung aller relevanten Restriktionen (3 Glasfarben, maximale Kapazität der Anlagen, minimaler Durchsatz der Anlagen zur Gewährleistung eines wirtschaftlichen Betriebs etc.). Abschließend wurde abhängig von den Transportkosten, den Transportwegen, den Transportmengen und den Fixkosten für eine Standortschließung bzw. -aktivierung das kostenminimale Standortnetz bestimmt. Das Ergebnis wies eine Kostenersparnis von ca. 38 Prozent aus.

3 Planung von ökoeffizienten Logistiknetzwerken

Inzwischen steigt das Interesse, eine Zuordnungsplanung anhand mehrerer, speziell ökonomischer und ökologischer Kriterien vorzunehmen, nicht-lineare Funktionen der Kosten und Umweltlasten logistischer, fertigungs- und verfahrenstechnischer Prozesse einzubeziehen und dabei über mehrere Güter gleichzeitig zu optimieren, für die gemeinsame Restriktionen, z. B. Kapazitätsbeschränkungen eines Produktions- oder Entsorgungsstandortes, gelten. Durch diese Kombination, d. h. durch die mehrkriterielle Optimierung komplexer, nicht-linearer Mehrgüter-Flussprobleme, sind besonders hohe ökonomische und ökologische Einsparungen in Logistiknetzwerken der Beschaffung, Produktion, Distribution und Entsorgung zu realisieren.

Hier setzt das Fraunhofer IML an. Es greift, aufbauend auf einer Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer UMSICHT, das mathematische Verfahren der Zuordnungsplanung auf und verknüpft es mit existierenden Ansätzen zur Bewertung in Ökobilanzen. Das Ziel liegt in der Beantwortung folgender Fragestellungen: Welches ist die ökonomisch und ökologisch beste Zuordnung von Gütern ausgehend von einem Ausgangspunkt über verschiedenen Stufen eines Logistiknetzwerkes hinweg bis hin zu einem Endpunkt? Hierin enthalten: Welche Mengen welcher Güter sollen ausgehend von welchen Ausgangspunkten über welche Stufen welchen Endpunkten zugeführt werden? Welche Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasser) bzw. welche Transportmittel sollen eingesetzt, welche Umschlagstandorte genutzt werden?

Das Ergebnis ist eine Methode, die den genannten Anforderungen Rechnung trägt (MEYER ET AL., 2005). Sie wird unter dem Namen ECO2L[®] (sprich: Ecotool) im Auftrag von Industrie- und Dienstleistungsunternehmen eingesetzt.

Die Methode erfordert eingangs die Definition der Rahmenbedingungen, d. h. der Entscheidungsfragen, der Entscheidungsschranken und des Entscheidungsziels. Sie beinhaltet die Systemanalyse, die konzeptionelle und mathematische Modellierung, die Bewertung der Ökonomie, der Ökologie und der Ökoeffizienz sowie die Optimierung selbst. Die Methode wird nachfolgend exemplarisch für Logistiknetzwerke der Entsorgung (Entsorgungsnetzwerke) skizziert. Abschließend wird ein Praxisbeispiel zur Validierung erörtert.

3.1 Grundlagen

3.1.1 Entscheidungsfragen

Folgende Entscheidungsfragen sind zu klären:

Welche Mengen welcher Abfälle sollen ausgehend von welchen Anfallstellen welchen Entsorgungsanlagen (Sortier-, Demontage-, Aufarbeitungs-, Aufbereitungs-, Behandlungs- und Beseitigungsanlagen) zugeführt werden? Welche Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasser) bzw. welche Transportmittel sollen für welche Mengen welcher Abfälle eingesetzt, welche Umschlagstandorte für welche Mengen welcher Abfälle genutzt werden?

Die Klärung der Entscheidungsfragen erfolgt für eine definierte Periode. Zeitliche Aspekte innerhalb dieser Periode bleiben unberücksichtigt. Sammel-, Transport-, Umschlag-, Lager-, Sortier-, Demontage-, Aufarbeitungs-, Aufbereitungs-, Behandlungs- und Beseitigungsprozesse werden folglich innerhalb, nicht aber zu bestimmten Zeiten innerhalb dieser Periode vorgenommen.

3.1.2 Entscheidungsschranken in der Logistik

Die Entscheidungsschranken in der Logistik resultieren aus den nachfolgend genannten Eigenschaften der Anfallstellen, Transportmittel, Transportrelationen und Umschlaganlagen.

- Abfallarten und Abfallmengen

Die Anfallstellen werden durch die Abfallarten und Abfallmengen charakterisiert, die in einer definierten Periode anfallen. Die Abfallarten und Abfallmengen sind gleich bleibend, bekannt und in der Periode, in der sie anfallen, vollständig zu entsorgen.

- Art und Anzahl der Transportmittelklassen

Die Abfalltransporte zwischen den Anfallstellen und den Entsorgungsanlagen können auf den Verkehrsträgern Straße, Schiene und Wasser realisiert werden. Für jeden Verkehrsträger werden Transportmittelklassen definiert (z. B. Straße: Sammelfahrzeug, Lkw zum Ferntransport, Schiene: Traktion elektrisch, Traktion mit Diesel, Wasser: Binnenschiff, Seeschiff) Jede Transportmittelklasse verfügt über beliebig viele Transportmittel.

- Kapazitätsober- und -untergrenzen

Kapazitätsober- und -untergrenzen existieren für alle Transportmittel und Umschlaganlagen. Bei den Transportmitteln beziehen sie sich auf die einzelnen eintretenden Abfallarten. Bei den Umschlaganlagen beziehen sie sich sowohl auf die Summe aller als auch auf die einzelnen eintretenden Abfallarten. Kapazitätsober- und -untergrenzen sind in einer definierten Periode konstant und durch das jeweilige Transportmittel bzw. die jeweilige Umschlaganlage gegeben. Die Kapazitäten reichen in Summe zum Transport und zum Umschlag aller Abfallarten und -mengen aus.

- Veränderung der Stoff- und Energiemengen

Die Abfallmengen, die in ein Transportmittel, in eine Transportrelation oder in eine Umschlaganlage eintreten, sind stets gleich der Abfallmengen, die aus dem Transportmittel, der Transportrelation oder der Umschlaganlage wieder austreten. Die eintretenden Abfallmengen sind Gegenstand der Optimierung.

- Stoffstrombündelung und -teilung

Die Abfallarten, die in ein Transportmittel, in eine Transportrelation oder in eine Umschlaganlage eintreten, sind stets gleich der Abfallarten, die aus dem Transportmittel, der Transportrelation oder der Umschlaganlage wieder austreten. Die ein- und austretenden Abfallarten sind bekannt.

3.1.3 Entscheidungsschranken in der Verfahrenstechnik

Die Entscheidungsschranken in der Verfahrenstechnik resultieren aus den nachfolgend genannten Eigenschaften der Entsorgungsanlagen.

- Kapazitätsober- und -untergrenzen

Kapazitätsober- und -untergrenzen existieren für alle Entsorgungsanlagen. Sie beziehen sich sowohl auf die Summe aller als auch auf die einzelnen eintretenden Abfallarten. Kapazitätsober- und -untergrenzen sind in einer definierten Periode konstant und durch die jeweilige Entsorgungsanlage gegeben. Die Kapazitäten reichen in Summe zur Entsorgung aller Abfallarten und -mengen aus.

- Veränderung der Stoff- und Energiemengen

Die Abfallmengen, die in eine Entsorgungsanlage eintreten, sind nicht zwangsläufig gleich der Sekundärprodukt-, Sekundärrohstoff-, Sekundärenergie- und Abfallmengen, die aus der Entsorgungsanlage wieder austreten. Die eintretenden Abfallmengen sind Gegenstand der Optimierung. Die austretenden Sekundärprodukt-, Sekundärrohstoff-, Sekundärenergie- und Abfallmengen sind über das prozentuale Verhältnis zu den eintretenden Abfallmengen definiert.

- Stoffstrombündelung und -teilung

In Entsorgungsanlagen werden die eintretenden Abfallarten den jeweils selben Prozessen unterzogen. Im Ergebnis entstehen Sekundärprodukte, Sekundärrohstoffe, Sekundärenergien und Abfälle. Die eingehenden Abfallarten und die Arten austretender Sekundärprodukte, Sekundärrohstoffe, Sekundärenergien und Abfälle sind bekannt.

3.1.4 Entscheidungsziel

Das Entscheidungsziel ist, die Entscheidungsfragen bei Einhaltung der Entscheidungsschranken zu klären und die Entsorgung der Abfallarten und -mengen mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit und die Umweltverträglichkeit zu optimieren.

3.2 Modellierung

3.2.1 Systemanalyse

Einleitend ist die Systemanalyse vorzunehmen. Sie dient der Festlegung der Systemgrenzen sowie der Definition relevanter Prozesse (Sammlung, Transport, Umschlag, Lagerung, Sortierung, Demontage, Aufarbeitung, Aufbereitung, Behandlung und Beseitigung), Objekte (Abfälle, Sekundärprodukte, Sekundärrohstoffe, Sekundärenergien, Betriebsstoffe und Emissionen) sowie Verknüpfungen (Input, Output und Emission).

3.2.2 Konzeptionelle Modellierung

Anschließend ist die konzeptionelle Modellierung durchzuführen. Dabei werden Modellbausteine genutzt, die in Form einer Bausteinbibliothek zur Verfügung stehen. Die Modellbausteine beinhalten die in der Systemanalyse definierten Prozesse, Objekte und Verknüpfungen. Die zusätzlich zur konzeptionellen Modellierung erforderlichen Speicherterme beinhalten Quellen und Senken, die außerhalb der Systemgrenzen liegen. Im Ergebnis können Logistiknetzwerke in allgemeingültiger Form konzeptionell modelliert und visualisiert werden.

Die Schritte der Systemanalyse und der konzeptionellen Modellierung sind zwar zur ökonomischen, nicht jedoch zur ökologischen Bilanzierung ausreichend. Während die Ein- und Ausgangsgrößen eines Entsorgungsnetzwerkes über Kosten und Erlöse unmittelbar bewertet werden können, sind mittelbar umweltbeeinflussenden Größen zunächst in unmittelbar umweltbeeinflussende Größen umzuwandeln. Hierzu werden Vorketten, Gutschriften und nachgeschaltete Prozesse eingeführt.

Vorketten sind dem Entsorgungsnetzwerk vorgeschaltete Prozesse zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen. Hierzu zählen z. B. vorgeschaltete Prozesse zur Erzeugung und Bereitstellung von Diesel, der als Treibstoff zur Sammlung und zum Transport von Abfällen erforderlich ist.

Gutschriften resultieren aus den Umweltwirkungen der Herstellung derjenigen Produkte, Stoffe und Energien, die durch erneute Zuführung von Sekundärprodukten, -rohstoffen und -energien in den Wirtschaftskreislauf ersetzt und damit nicht neu hergestellt werden. Bei der thermischen Behandlung von Abfällen sind solche Gutschriften z. B. für Chlorwasserstoff, elektrische und thermische Energie zu betrachten. Die Umweltwirkungen der Herstellung von primärem Chlorwasserstoff bzw. primärer elektrischer und thermischer Energie werden hierzu bilanziert und dem Entsorgungsnetzwerk zugeschrieben.

Nachgeschaltete Prozesse sind zwar gemäß Systemanalyse und konzeptioneller Modellierung kein originärer Bestandteil eines Entsorgungsnetzwerkes, werden aber durch die Entsorgung von Abfällen in Entsorgungsnetzwerken erforderlich. Bei der thermischen Behandlung von Abfällen sind solche Prozesse z. B. für Emissionen in das Wasser zu berücksichtigen. Die Umweltwirkungen der Abwasseraufbereitung werden hierzu bilanziert und den Umweltwirkungen des Entsorgungsnetzwerkes zugeschrieben.

Die Abbildung 1 veranschaulicht die konzeptionelle Modellierung. Charakteristisch ist, dass es sich um ein Mehrgüter-Flussproblem handelt, dass die Abfälle die Prozesse eines Entsorgungsnetzwerkes ausschließlich in eine Richtung durchlaufen, sich also ein gerichteter Graph ergibt und dass sie dabei einzelne Stufen des Entsorgungsnetzwerkes überspringen können.

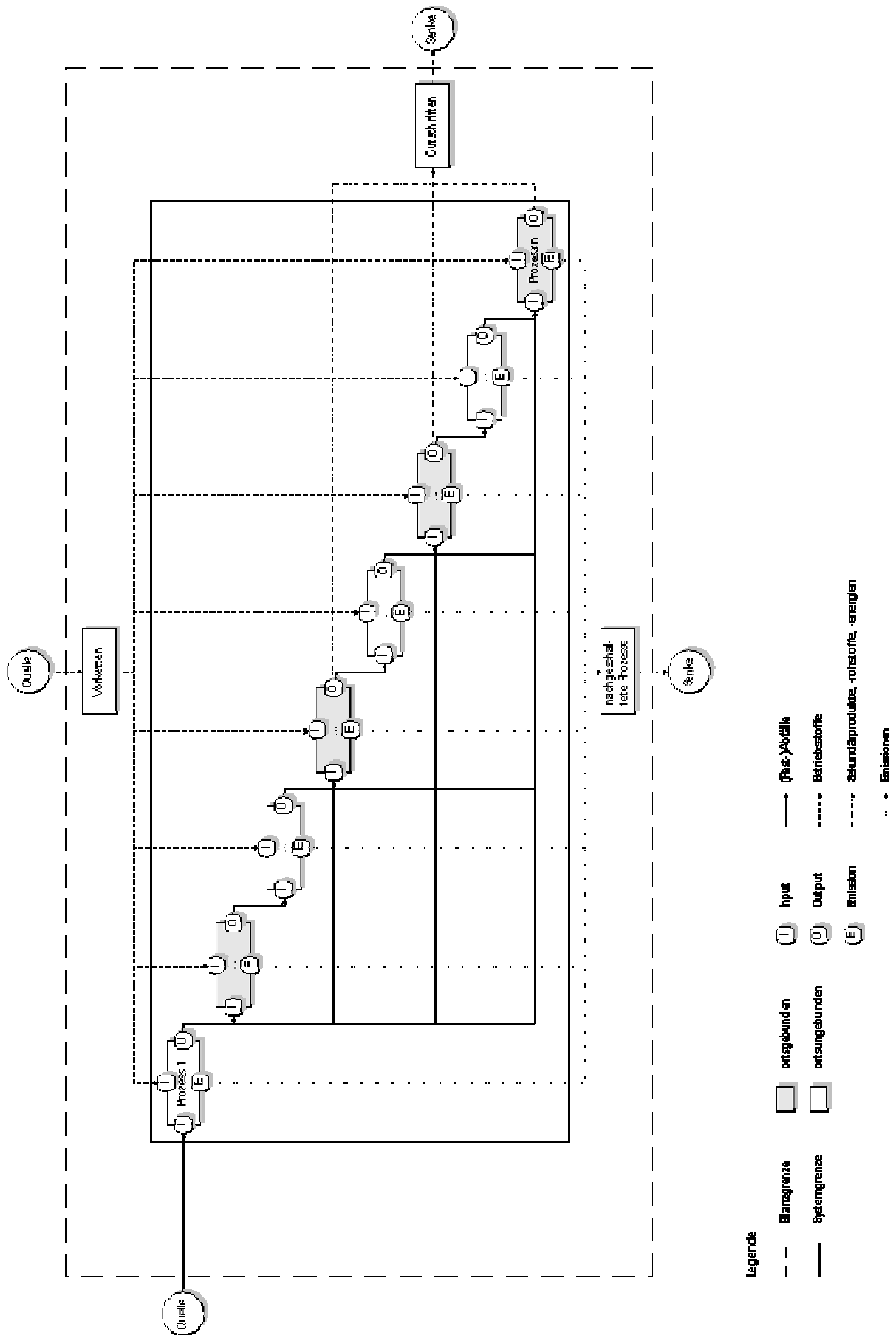


Abbildung 1 Konzeptionelle Modellierung

3.2.3 Mathematische Modellierung

Die mathematische Modellierung kann anhand eines graphentheoretisch oder eines nicht-graphentheoretisch orientierten Ansatzes erfolgen. Ersterer ist anschaulich, im Bereich des Operations Research weit verbreitet und kann, aus Sicht des Anwenders, mit geringem Expertenwissen modifiziert werden. Letzterer ist weniger anschaulich, befindet sich, speziell mit Blick auf nicht-lineare Mehrgüter-Flussprobleme, z. T. noch in der Entwicklung und kann, wiederum aus Sicht des Anwenders, nur mit großem Expertenwissen angepasst werden. Den Vorteilen entsprechend wird die mathematische Modellierung anhand eines graphentheoretisch orientierten Ansatzes vorgenommen.

Vereinfacht dargestellt wird ein Graph bestimmt, dessen Knoten die Anfallstellen bzw. Anlagen und dessen Kanten die Transportrelationen bzw. Transportprozesse zwischen den Anfallstellen bzw. Anlagen darstellen. Darüber hinaus werden eine künstliche Quelle sowie eine künstliche Senke eingeführt. Dies dient der Vereinfachung und gewährleistet, dass durch die mathematische Modellierung keine Lösungsverfahren ausgeschlossen werden, die eine künstliche Quelle sowie eine künstliche Senke bedürfen. Insgesamt weist der Graph damit bis zu 10 Stufen auf (künstliche Quelle, Anfallstellen, Umschlag-, Sortier-, Demontage-, Aufarbeitungs-, Aufbereitungs-, Behandlungs- und Beseitigungsanlagen sowie künstliche Senke). Diese werden mit $S = 0, \dots, 10$ gekennzeichnet. Die künstliche Quelle (Stufe 0) spiegelt keinen realen Vorgang wider. Sie ist lediglich Ausgangspunkt aller anfallenden Abfallarten und -mengen. Deshalb wird sie durch je eine Kante mit den einzelnen Anfallstellen verbunden. Von den Anfallstellen bzw. Anlagen der Stufen 1-8 kann zu allen Anlagen aller nachfolgenden Stufen 2-9 transportiert werden. Zur künstlichen Senke (Stufe 10) hingegen führen nur von den Beseitigungsanlagen ausgehende Kanten.

3.3 Bewertung

3.3.1 Bewertung der Ökonomie

Die zur Optimierung erforderlichen Kosteninformationen sind der Kostenrechnung des Betreibers – bei einem Betreiberkonsortiums den Kostenrechnungen der Konsortialpartner – zu entnehmen. Im letztgenannten Fall gelten die Kosten bzw. Preise erbrachter Teilleistungen als Mindestinformationen. Sie dienen als Eingabeparameter für die Kostenarten-, Kostenstellen- und Kostenträgerrechnung des Betreiberkonsortiums. Bezieht sich die Optimierung des Entsorgungsnetzwerkes auf einen Abfall bzw. einen Entsorgungsauftrag, ist sie der Netzwerkkalkulation gleichzusetzen. Entsprechend sind durch Konsolidierungs- bzw. Primärkostenrechnung konsolidierte Kosteninformationen heranzuziehen. Bezieht sich die Optimierung des Entsorgungsnetzwerkes hingegen auf alle Abfälle bzw. Entsorgungsaufträge, ist sie der Netzwerkergebnisrechnung gleichzu-

setzen. Die konsolidierten Kosteninformationen sind demnach mittels Nettoergebnisrechnung zusammenzufassen. (HESS ET AL., 2002)

3.3.2 Bewertung der Ökologie

In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Methoden zur Bewertung von Umweltwirkungen entwickelt und angewendet. Da sich diese Methoden zur Ableitung der Gewichtung von Umweltwirkungen auf unterschiedliche Wertmaßstäbe stützen, ist es nicht möglich, einen Ansatz wissenschaftlich objektiv als grundsätzlich bestgeeignet zu beurteilen. Solange es keinen gesellschaftlichen Konsens über die zu verwendenden Wertmaßstäbe und damit verbunden die zu verwendende Bewertungsmethode gibt, wird der Methodenpluralismus bestehen bleiben. Die Auswahl einer Methode ist folglich stets auf den Anwendungsfall auszurichten. Dieser kann politisch, wirtschaftlich oder wissenschaftlich (z. B. durch eine anstehende Gesetzesänderung, eine zu treffende Investitionsentscheidung oder eine zu verifizierende Theorie) motiviert sein. Kriterien zur Auswahl sind u. a. Vollständigkeit, Transparenz, Praktikabilität und Objektivität.

Die Eingrenzung des Untersuchungsraumes und der damit verbundene Ausschluss von Bewertungsmethoden erfordert ein notwendiges Kriterium. Als solches ist die Aggregation der Bewertungsergebnisse zu einer Kennzahl zu verstehen. Entsprechend werden monokriterielle Bewertungsmethoden und multikriterielle Bewertungsmethoden mit einer Kennzahl vertiefend betrachtet.

Monokriterielle Methoden zielen auf die Bewertung einer Umweltwirkung ab. Ihre Anwendung ist möglich, sofern die zu untersuchenden Systeme lediglich in einer Umweltwirkung (markante) Unterschiede aufweisen oder aber die Methode selbst eine Beschränkung auf eine Umweltwirkung vorgibt. Im Zusammenhang mit entsorgungslogistischen Fragestellungen sind als monokriterielle Methoden im Wesentlichen die Methode des Material Input per Service Unit und die Methode des Kumulierten Energieaufwandes anwendbar.

Multikriterielle Methoden zielen auf die Bewertung mehrerer Umweltwirkungen ab. Multikriterielle Methoden mit einer Kennzahl überführen hierzu multidimensionale Umweltwirkungsprofile in eine eindimensionale Form. Damit wird als Ergebnis der Bewertung ein einziger Wert angegeben. Im Verlauf der Bewertung werden die Werte einzelner Umweltwirkungen normiert, gewichtet und aggregiert. Im Zusammenhang mit entsorgungslogistischen Fragestellungen sind als multikriterielle Methoden mit einer Kennzahl im Wesentlichen die Methode der ökologischen Knappheit, das Tellus-Modell, die Methode der Toxizitätsäquivalente, die Methode der Environmental Priority Strategies 2000 (EPS 2000) und die Methode des Eco-Indicators 99 anwendbar.

Zur Auswahl der Methode wird die Nutzwertanalyse herangezogen. Sie beruht auf der Festlegung von Gewichtungsfaktoren als Maß für den Nutzen der zu erfüllenden Anforderung in Bezug auf den Gesamtnutzwert. Die Methode des Eco-Indicator 99 besitzt im Ergebnis die höchste Wertigkeit.

Die Methode des Eco-Indicator 99 gliedert sich in drei Schritte. Im ersten Schritt wird eine Stoff- und Energiebilanz erstellt. Diese wird im zweiten Schritt über Schadensmodelle in Schadenskategorien (damage to resources, damage to ecosystem quality, damage to human health) überführt. Im dritten und letzten Schritt erfolgt die Normalisierung und Gewichtung der Schadenskategorien sowie die Aggregation zu einer Kennzahl, dem so genannten Eco-Indicator 99. (GOEDKOOP ET AL., 2000)

3.3.3 Bewertung der Ökoeffizienz

Entsprechend der eingangs formulierten Zielsetzung erfolgt die Modellierung, Bilanzierung und Optimierung von Entsorgungsnetzwerken nach ökonomischen und ökologischen Kriterien. Die Optimierung wird dabei unter Verwendung eines einkriteriellen Algorithmus durchgeführt. Die ökonomischen und ökologischen Kriterien sind damit in einer Zielfunktion zu einer Zielgröße zusammenzufassen. Diese Vorgehensweise orientiert sich an gängigen Verfahren zur Lösung multikriterieller Problemstellungen. (MEYER ET AL., 2002)

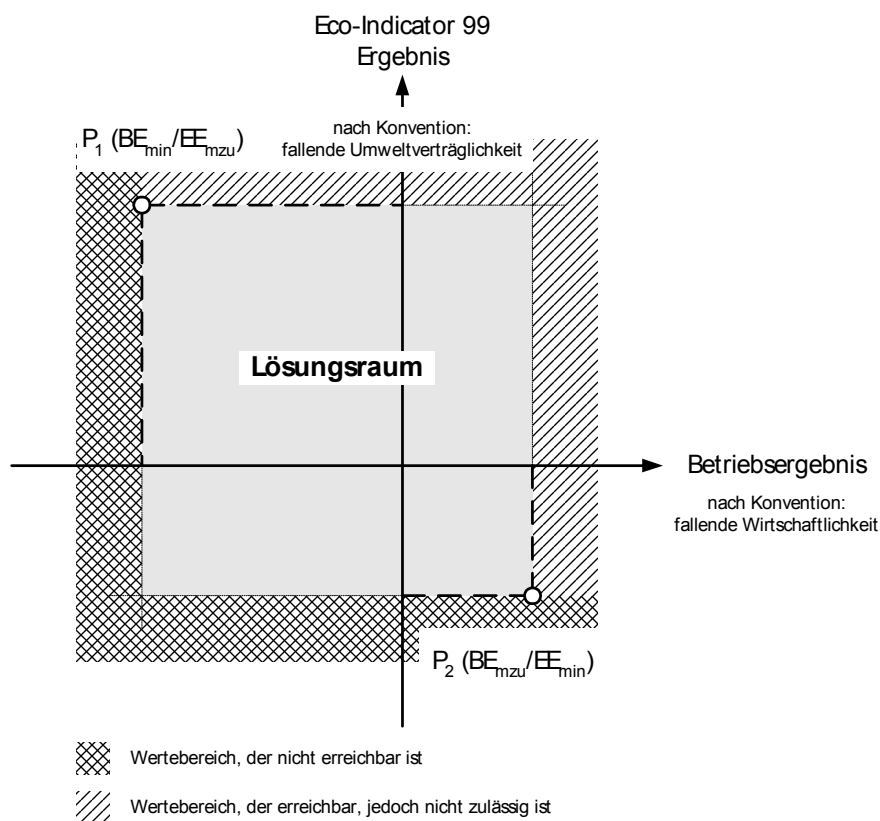


Abbildung 2 Lösungsraum

Einleitend werden die Minima mathematisch exakt ermittelt (Abbildung 2). Die Maxima werden im Sinne oberer Grenzwerte im Anschluss daran festgelegt. Hierzu wird das Entsorgungsnetzwerk jeweils einmal und ausschließlich hinsichtlich eines Kriteriums minimiert, d. h. es wird die hinsichtlich eines Kriteriums beste Lösung gesucht. Die Werte des jeweils anderen Kriteriums werden dabei als Information mitgeführt. Sie gehen jedoch nicht in die Zielfunktion und damit nicht in die Optimierung ein.

An der Stelle, an der das Netzwerkergebnis sein Minimum erreicht, nimmt das Eco-Indicator 99 Ergebnis seinen per Definition maximal zulässigen Wert an. Dieser Wert wird als oberer Grenzwert festgelegt. Eine Lösung, die von dem minimalen Netzwerkergebnis abweicht und gleichzeitig einen größeren Wert für das Eco-Indicator 99 Ergebnis liefert, als dies bei dem minimalen Netzwerkergebnis der Fall ist, wird in der Konsequenz als ungültig angesehen.

An der Stelle, an der das Eco-Indicator 99 Ergebnis sein Minimum erreicht, nimmt das Netzwerkergebnis seinen per Definition maximal zulässigen Wert an. Dieser Wert wird als oberer Grenzwert festgelegt. Eine Lösung, die von dem minimalen Eco-Indicator 99 Ergebnis abweicht und gleichzeitig einen größeren Wert für das Netzwerkergebnis liefert, als dies bei dem minimalen Eco-Indicator 99 Ergebnis der Fall ist, wird in der Konsequenz als ungültig angesehen.

Die beiden Wertepaare dienen zur Normierung der Wertebereiche, zur Bildung der systemspezifischen Kennzahlen und damit zur Bildung der Zielgröße als Maß für die Ökoeffizienz.

3.4 Optimierung

Einleitend wird die Gewichtung der Schadenskategorien vorgenommen. Hierzu werden die Werte für die Gewichtungsfaktoren einzelner Schadenskategorien festgelegt. Die Gewichtung erfolgt einmalig und muss im Verlauf der Optimierung beibehalten werden. Andernfalls verlieren die Ergebnisse ihre Gültigkeit.

Der Gewichtung der Schadenskategorien folgt die Optimierung des betrachteten Entsorgungsnetzwerkes hinsichtlich des Netzwerkergebnisses. Die Lösung der Optimierung liefert sowohl den minimalen Wert des Netzwerkergebnisses als auch den per Definition maximal zulässigen Wert des Eco-Indicator 99 Ergebnisses. Diese Werte werden in Form von Grenzwerten als Grundlage zur Normierung und Gewichtung herangezogen. Die Lösung der Optimierung beinhaltet darüber hinaus bereits elementare Informationen für den Netzbetreiber. Sie gibt Auskunft über die betriebswirtschaftlich optimale Zuordnung und liefert zeitgleich Erkenntnisse über die Umweltverträglichkeit bzw. Hochwertigkeit der entsprechenden Lösung.

Der Optimierung hinsichtlich des Netzwerkergebnisses schließt sich die Optimierung hinsichtlich des Eco-Indicator 99 Ergebnisses an. Die Lösung der Optimierung liefert sowohl den minimalen Wert für das Eco-Indicator 99 Ergebnis als auch den per Definition maximal zulässigen Wert des Netzwerkergebnisses. Diese Werte werden wiederum in Form von Grenzwerten als Grundlage zur Normierung und Gewichtung herangezogen. Die Lösung der Optimierung beinhaltet darüber hinaus ebenfalls elementare Informationen für den Netzbetreiber. Sie gibt Auskunft über die umweltverträglichste bzw. hochwertigste Zuordnung und liefert zeitgleich Erkenntnisse über die Betriebswirtschaftlichkeit der entsprechenden Lösung.

Den beiden einleitenden Optimierungsläufen schließt sich die Normierung der Wertebereiche und damit die Bildung der systemspezifischen Kennzahlen an. Hierzu wird für jedes Ergebnis die maximal zulässige Abweichung von seinem Minimum bestimmt. Diese wird als systemspezifische Bezugsgröße festgelegt und zur Bildung der Kennzahlen herangezogen.

Der Bildung der Kennzahlen folgt die Gewichtung der Kennzahlen. Hier ist festzulegen, ob der Fokus der Optimierung eher auf der Ökonomie, gleichermaßen auf der Ökonomie und der Ökologie oder eher auf der Ökologie liegt. Entsprechend sind die Gewichtungsfaktoren der Kennzahlen zu wählen. Die Gewichtungsfaktoren dürfen, im Gegensatz zu denen der Schadenskategorien, vor jeder kombinierten ökonomischen und ökologischen Optimierung geändert werden. Die Ergebnisse behalten ihre Gültigkeit.

Im Anschluss an die Bildung bzw. Gewichtung der Kennzahlen wird die kombinierte ökonomische und ökologische Optimierung des betrachteten Entsorgungsnetzwerkes vorgenommen. Alle ermittelten Lösungen sind eindeutig definiert durch das Netzwerk selbst, durch die Gewichtungsfaktoren der Schadenskategorien und die Gewichtungsfaktoren der Kennzahlen. Sie sind damit reproduzierbar.

Der letzte Schritt beinhaltet die Darstellung und Interpretation des Optimierungsergebnisses. Hierbei wird neben der Zielgröße sowohl die Netzwerk- als auch die Eco-Indicator 99 Ergebniskennzahl (respektive das Netzwerk- als auch das Eco-Indicator 99 Ergebnis) separat ausgewiesen. Dadurch können Ökoeffizienz, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit getrennt voneinander bewertet und mit der anderer Zuordnungen, z. B. der Zuordnung des Ist-Zustandes, verglichen werden. Auf Basis der Darstellung und Interpretation des Optimierungsergebnisses ist abschließend die Aussprache einer Handlungsempfehlung möglich.

3.5 Validierung

Zur Validierung der entwickelten Methode wurde u. a. die Steigerung der ökonomischen und ökologischen Effizienz eines Logistiknetzwerkes der Entsorgungswirtschaft analy-

siert. Der Betrachtungsgegenstand war eine Teilfraktion des hausmüllähnlichen Gewerbeabfalls. Der Betrachtungsraum war ein Gebiet bestehend aus dem Bundesland Nordrhein-Westfalen in Deutschland (Anfallort des betrachteten Abfalls und Standort einiger Entsorgungsanlagen) sowie der Provinz Gelderland in den Niederlanden (ebenfalls Standort einiger Entsorgungsanlagen).

Konkret wurde die Frage beantwortet, welche Mengen des betrachteten Abfalls bei welcher Gewichtung von Ökonomie und Ökologie mit welchen Verkehrsmitteln (Straße, Schiene) bzw. Transportmitteln (Straße: Sammelfahrzeug, Lkw zum Ferntransport, Schiene: Traktion mit Diesel) über welche Umschlagstandorte welchen Entsorgungsanlagen (Aufbereitungs-, Behandlungs- und Beseitigungsanlagen) bestmöglich zuzuordnen sind. Insgesamt standen 54 Umschlagstandorte, eine Aufbereitungsanlage, 18 Behandlungs- und 39 Beseitigungsanlagen zur Auswahl. Das Logistiknetzwerk wurde hierzu nach einmaliger Modellierung mit jeweils unterschiedlicher Gewichtung von Ökonomie und Ökologie optimiert.

Im Ergebnis konnten einerseits Wechselwirkungen zwischen Kosten und Umweltbelastungen quantifiziert, andererseits Lösungen in einem Portfolio dargestellt werden. Darüber hinaus konnten den Lösungen die erforderlichen logistischen, fertigungs- und verfahrenstechnischen Ressourcen zugeordnet werden.

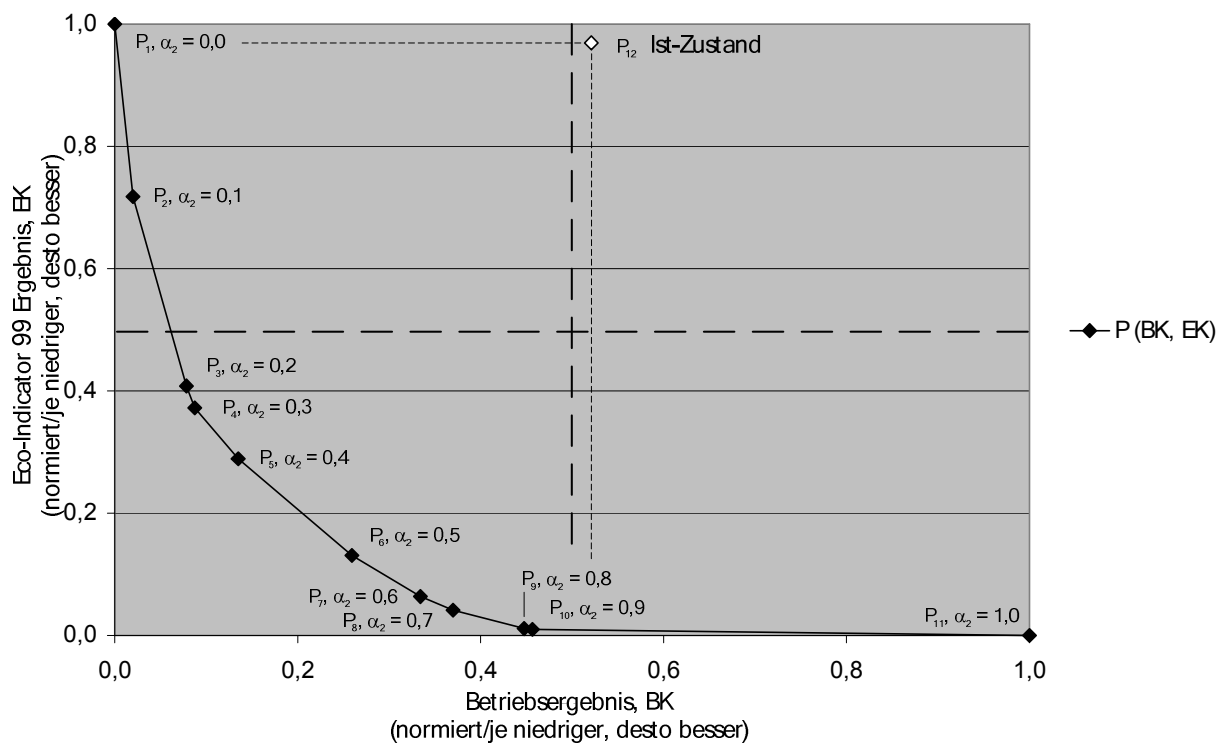


Abbildung 3 Portfolio

Das Ergebnis zeigt darüber hinaus, dass der Ist-Zustand keiner optimalen Lösung entspricht, es im Umkehrschluss also möglich ist, Kosten zu senken und gleichzeitig Um-

weltbelastungen zu reduzieren. Es belegt konkret, dass eine Senkung der Kosten z. B. um 1,2 Mio. € pro Jahr bei gleichzeitiger Einsparung u. a. von 8.420 t CO₂ pro Jahr möglich ist (Abbildung 3).

4 Zusammenfassung

Die entwickelte Methode kann als strategisches Instrument von Wirtschaftsunternehmen zur Planung neuer sowie zur Optimierung existierender Logistiknetzwerke herangezogen werden. Gleichzeitig ermöglicht sie die Prüfung ökonomischer und – sofern gewünscht – ökologischer Auswirkungen der Einbindung neuer Standorte, neuer Verfahren sowie alternativer Verkehrsträger. Der Politik kann sie als Entscheidungsgrundlage zur Lenkung von Stoffströmen dienen, z. B. zur Ermittlung optimaler Recyclingquoten gemäß EU-Recycling-Strategie. Entscheidend für den Erfolg ist: Die optimale Lösung bei jeweiliger Gewichtung der Kosten und Umweltbelastungen wird objektiv dargestellt, Kosten und Umweltbelastungen werden separat ausgewiesen. Der Anwender kann folglich die ohnehin stets subjektive Einschätzung treffen, wie viel ihm die Einsparung von Kosten bzw. die Reduzierung von Umweltbelastung wert ist und für welche Handlungsoption er sich entscheidet.

5 Literatur

- | | | |
|-----------------------------|------|--|
| Domschke, W.; Drexl, A.; | 1998 | Einführung in Operations Research. 4. Aufl., Berlin Heidelberg New York : Springer, 1998. – ISBN 3-540-64587-X. |
| Michaelis, E.; | 2001 | Lösung von Zuordnungs- und Umladeproblemen mit exakten Algorithmen. In: Bányai, T. (Hrsg.); Cselényi, J. (Hrsg.): Modelling and Optimisation of Logistic Systems: Theory and Practice. Miskolc Universität, 2001. – ISBN 963-661-510-1. |
| Meyer, P.; | 2005 | Methode zur Steigerung der ökonomischen und ökologischen Effizienz von Logistiknetzwerken der Entsorgungswirtschaft. Dortmund: Praxiswissen, 2005 – zugl. : Dortmund, Universität, Fakultät Maschinenbau, Diss., 2004. – ISBN 3-89957-023-5. |
| Hess, T.; | 2002 | Netzwerkcontrolling : Instrumente und ihre Werkzeugunterstützung. Wiesbaden: Gabler, 2002. – zugl. Göttingen, Universität, Habilitationsschrift, 2001. – ISBN 3-8244-9094-3. |
| Goedkoop, M.; Spiensma, R.; | 2000 | PRé Consultants B.V. (Hrsg.): The Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact |

Assessment : Methodology Report. 2. edit. Amersfoort: PRé Consultants B.V., 2000.

Meyer, P.; 2002 Entwicklung eines Modells zur Beschreibung und Bewertung von Entsorgungssystemen. Dortmund, Universität, Fachbereich Chemietechnik, Diss., 2002.

Anschrift der Verfasser

Dr.-Ing. Peter Meyer
Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen
Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 2-4
D-44227 Dortmund
Telefon +49 231 97 43 367
Email peter.meyer@iml.fraunhofer.de
Website: www.iml.fraunhofer.de