



Doctoral Thesis

Developing a method for economic and ecologic optimization of manufacturing processes based on material flow analysis (MFA)

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Doctor of Social and Economic Sciences
of the Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering

Dissertation

Entwicklung einer Methode zur ökonomischen und ökologischen Optimierung von Produktionsprozessen mittels Materialflussanalyse (MFA)

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der sozial und Wirtschaftswissenschaften
eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für
Bauingenieurwesen
von

Dipl.-Ing. Markus Müller
Matrikelnummer 0226913
Seidengasse 32/2/8
1070 Wien

Gutachter: O.Univ.Prof. Dr. Dipl.natw. Paul H. Brunner
Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement
und Abfallwirtschaft
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/226
A-1040 Wien

Gutachter: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Roland Pomberger
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und
Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben
Franz-Josef-Straße 18
A-8700 Leoben

Wien, April 2013

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Hrn. Prof. Brunner der mich bei dieser Arbeit von Anfang an betreut und stets unterstützt hat. Seine Inputs, Anregungen und Motivation ermöglichten mir das Erstellen dieser Arbeit. Ich möchte mich auch bei Prof Pomberger für den Input in der finalen Phase meiner Arbeit bedanken.

Bei der Firma ISOVOLTA AG möchte ich mich bedanken, da es mir ermöglicht wurde, meine Dissertation nebenberuflich abzuwickeln. Darüber hinaus konnte ich im Zuge meiner Tätigkeit auch gleich die erste Anwendung der Methode vornehmen und so diese durch die gewonnene Erfahrung weiterzuentwickeln. Ich möchte darauf hinweisen, dass die in dieser Arbeit abgebildeten Daten und Abläufe in keinem Zusammenhang zu den tatsächlichen Daten und Abläufe der Produktion der Firma ISOVOLTA AG stehen.

Oliver Cencic gilt mein Dank für die Unterstützung bei der Verwendung von STAN und seiner ständigen Hilfsbereitschaft.

Natürlich möchte ich mich auch bei meinen Eltern, Karin und Johann und meiner Großtante Ida bedanken, die mir während meiner gesamten Ausbildung zur Seite standen. Großer Dank gilt meinem Bruder Ernst nicht nur für die ständige Unterstützung während dieser Arbeit, sondern auch für den Hinweis auf die Software STAN, welcher ausschlaggebend für den Beginn meiner Dissertation war.

Der größte Dank geht an meiner Freundin Marlies, die mir durch Ihre Unterstützung, Motivation und Verständnis während dieser Zeit das Erstellen dieser Arbeit erst ermöglicht hat.

Ich möchte mich auch bei Helmut Findenig für die Unterstützung in der finalen Phase meiner Dissertation bedanken.

Abschließend möchte ich mich noch bei all meinen Freunden bedanken, die mir durch Ihr Verständnis und gute Ratschläge in dieser Zeitspanne stets zur Seite standen.

Kurzfassung

Aus Gründen der Volatilität der Rohstoffmärkte, der Ressourcenschonung und des Umweltschutzes gewinnt die effiziente Nutzung von Ressourcen – insbesondere auch wegen der daraus resultierenden Kostensenkung - einen zunehmend höheren Stellenwert bei der Produktion von Gütern. Die Herausforderung für Unternehmen besteht darin, zu erkennen, bei welchen Prozessen in Produktionssystemen das größte Potential für ökologische und ökonomische Optimierungsmaßnahmen besteht, und wie sich systemimmanente Unsicherheiten auf die Optimierung auswirken. Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, mit der komplexe Produktionssysteme über transparente, nachvollziehbare Modelle abgebildet werden und hinsichtlich mehrerer Ziele optimiert werden können. Die Modelle sollen die relevanten Material- und Kostenflüsse sowie den Zeitaufwand zur Produktion erfassen und auf einheitliche Weise darstellen. Sie sollen den Produzenten in die Lage versetzen, diejenigen Prozesse im Produktionssystem zu identifizieren, die ein hohes Optimierungspotential aufweisen, und die zur Verbesserung der Ressourceneffizienz am meisten beitragen können. Im Weiteren sollen auch die Auswirkungen von Unsicherheiten in den Eingabewerten auf das Resultat der Optimierung beurteilt werden können. Die entwickelte Methode besteht aus drei MFA Modellen, welche mit Hilfe der Software STAN erstellt werden. In diesen werden nicht nur die Materialflüsse, sondern auch die Produktionskosten und die benötigten Produktionszeiten dargestellt. Damit werden erstmals Materialflussanalyse und Kostenanalyse über STAN verknüpft. Im ersten Modell wird der gesamte Prozess der Herstellung eines Produktes mit der Stückzahl 1 im Sinne eines Lebenszyklusansatzes dargestellt. Im zweiten Modell werden die Eingabewerte mit Unsicherheiten versehen, und im dritten wird ein Halbfabrikat über einen aussagekräftigen Zeitraum abgebildet. Aus diesen drei detailgenauen Ansätzen ergeben sich Resultate, aus denen Optimierungspotential und die Auswirkung von Unsicherheiten in den Eingabewerten quantitativ ersichtlich sind. Die entwickelte Methode wurde anhand eines aufwändigen, mehrere Prozessketten umfassenden Herstellungsverfahrens eines hochentwickelten Produktes der Flugzeugindustrie getestet. Dabei zeigte sich, dass sie sich einerseits sehr gut zur Analyse und Darstellung von Produktionssystemen eignet, andererseits die Identifizierung, Quantifizierung und Realisierung von Optimierungspotenzialen hinsichtlich Ressourceneffizienz, Kosten und zeitlicher Abläufe erlaubt. Durch die in STAN mögliche Berücksichtigung der stofflichen Ebene könnten zukünftig auch Fragen der Umweltverträglichkeit des Produktionsprozesses sowie einzelner Edukte und Produkte beurteilt werden. Die weitere Entwicklung von STAN stellt deshalb eine wertvolle Basis dar zur Unterstützung produktionstechnischer Entscheide hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Ressourcenschonung und Umweltschutz.

Abstract

Volatility of commodity markets, availability of resources, and protection of the environment demand the efficient use of resources for manufacturing of goods. The entrepreneurial challenge is to analyze which processes in a production system have the highest potential for optimization in view environmental, economic, and resource criteria. Also important is the effect of uncertainties in the production process. The aim of this work is to develop a method for mapping complex production systems by transparent and understandable models instrumental for optimizing the production system. To reach this objective, the models must comprise all relevant material flows, cost flows and the needed production time, including uncertainties. Such models enable producers to identify those processes that have the highest potential for improvement. Based on the software STAN, three Material Flow Analysis (MFA) models are created. For the first time, cost analysis and production time are linked to material flows and stocks by STAN. In the first model, the whole production system for manufacturing one unit is depicted. In the second model the effect of data uncertainties in input flows is investigated. The third model covers a semi-product over a defined period of time. These three highly detailed models allow identifying the potential for optimization as well as the impact of uncertainties in the input values. The method developed was tested on a complex manufacturing system for an advanced product of the aircraft industry. The results show the feasibility of this method for analysis and representation of production systems. As envisaged, the models allow the identification, quantification and realization of optimization potentials for production systems in terms of resource efficiency, cost and time. The inclusion of economic parameters such as costs and time in STAN performed by this thesis represents an important step in decision support for efficient production systems. Due to the option of STAN to include the level of substances, too, this method can be further advanced to address issues of environmental protection.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung, Ziele und Fragestellung.....	1
2	Theoretische Grundlagen und Begriffsdefinition	4
2.1	Materialflussanalyse.....	4
2.1.1	Begriffsdefinition	4
2.1.2	Methodik der Materialflussanalyse.....	10
2.1.3	Software zur Materialflussanalyse	11
2.2	Ökonomische Grundlagen.....	13
2.3	Definition der Unsicherheiten	17
2.4	Bisherige Versuche zur ökologischen und ökonomischen Darstellungen mittels MFA.....	18
3	Beschreiben der Methode zur ökologischen und ökonomischen Optimierung von Produktionssystemen	21
3.1	Ziel der Methode	21
3.2	Definitionen in der Methode zur Optimierung von Produktionssystemen ...	22
3.2.1	Begriffsdefinitionen	22
3.2.2	Systemgrenzen.....	24
3.3	Daten für die Anwendung.....	24
3.4	Aufbau der Methode in STAN	25
3.4.1	Darstellung der Materialflüsse	25
3.4.2	Darstellung der Kostenflüsse.....	25
3.4.3	Darstellung des Zeitaufwandes im Produktionssystem.....	28
3.4.4	Vorgehensweise bei der Erstellung eines Modells in STAN	29
3.5	Prinzipieller Aufbau der Methode	30
3.5.1	Referenzprodukt	30
3.5.2	Risikoabschätzung durch Eingabe von Unsicherheiten	31
3.5.3	Halbfabrikate über Beobachtungszeitraum	32
3.6	Kennzahlen	33
3.6.1	Ökologische Kennzahlen	33
3.6.2	Ökonomische Kennzahlen.....	35

4	Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis	38
4.1	Referenzprodukt.....	39
4.1.1	Darstellung der Massenflüsse des Referenzproduktes.....	39
4.1.2	Darstellung der Kostenflüsse des Referenzproduktes	46
4.1.3	Kennzahlen Referenzprodukt	52
4.2	Referenzprodukt mit Unsicherheiten	53
4.3	Halbfabrikate über einen Beobachtungszeitraum.....	55
4.3.1	Darstellung des Produktionssystems.....	55
4.3.2	Zeitliche Verläufe der einzelnen Halbfabrikate	58
4.3.3	Darstellung der Zeitaufwände zur Produktion der Halbfabrikate.....	63
4.3.4	Kennzahlen der Halbfabrikate.....	68
4.4	Ergebnisse aus dem Praxisbeispiel.....	69
5	Bewertung der Ergebnisse der Anwendung, Resümee	70
5.1	Modell Referenzprodukt	70
5.2	Modell mit Unsicherheiten	71
5.3	Modell Halbfabrikate über Beobachtungszeitraum.....	72
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	73
6.1	Zielerreichung	79
6.2	Nutzen für ein Unternehmen	80
6.3	Empfehlungen zur Weiterentwicklung	81
7	Literaturverzeichnis.....	83
8	Abbildungsverzeichnis	85
9	Formelverzeichnis.....	86
10	Tabellenverzeichnis.....	87
11	Abkürzungsverzeichnis.....	88

1 Einleitung, Ziele und Fragestellung

Das Ziel eines jeden Produktionsunternehmens ist es, bei minimalem Input einen maximalen Output zu generieren. Durch eine genaue Kenntnis des Produktionssystems können Unternehmen Maßnahmen setzen, um dies zu erreichen.

Da mit dieser Arbeit die Ressourceneffizienz gesteigert werden kann, liefert diese Arbeit auch einen Beitrag für das Projekt der Europäischen Union Europa 2020, welches eine Steigerung der Ressourceneffizienz beinhaltet.¹

Ziel dieser Arbeit ist es eine Methode zu entwickeln, mit der ein Produktionssystem mittels Materialflussanalyse detailgenau in Form von Modellen abgebildet wird. Die Materialflussanalyse zeigt sehr gut, in welchen Bereichen welche Güter und Mengen sich durch die Produktion bewegen. Dadurch sollen Verschwendungen schnell zu erkennen sein. Diese Tatsache ist die wesentliche Entscheidungsgrundlage zur Wahl der Methodik der Stoffflussanalyse als Grundlage zur Weiterentwicklung zu einer Methode zur Optimierung von Produktionsprozessen. Die durch die Methode der Materialflussanalyse entstehenden Abbildungen sollen so zu einem besseren Verständnis der Produktionsabläufe führen und darüber hinaus noch aufzeigen, an welchen Stellen in der Fertigung Optimierungsmaßnahmen sinnvoll und effizient sind. Die aus diesen Darstellungen abgeleiteten Handlungsweisen haben als Primärziel die Kostensenkung und als Sekundärziel die Ressourcenschonung und den Umweltschutz. Es ist bei der Umsetzung darauf zu achten, ob die Sekundärziele mit den Primärzielen ohne zusätzlichen Aufwand einhergehen. Die Zuordnung der betriebswirtschaftlichen Ziele als Primärziele und der volkswirtschaftlichen Ziele als Sekundärziele resultiert aus der Anwendung in Unternehmen. Bis jetzt wurde noch keine Methode geschaffen in der in einem Modell Arbeitszeit-, Kosten-, und Materialflüsse in Abhängigkeit zueinander abgebildet werden und zur Optimierung eines Produktionssystems herangezogen werden.

Die Abbildung des Produktionssystems erfolgt mit der Software STAN (STofffluss-ANalyse). STAN ist ein Datenbank basierendes Computerprogramm aus der Abfallwirtschaft. In diesem können Güter-, Stoff- und Energieflüsse inklusive deren Abhängigkeiten zueinander dargestellt und bilanziert werden. Als Zusatzfunktion ist noch die Möglichkeit der Eingabe von Unsicherheiten und die Auswirkung derer zu

¹ Vgl. (Europäische Kommission, 2011)

sehen. STAN bilanziert sowohl auf Stoff- und Güterebene als auch auf der Energieebene. Die Bilanzierung auf Stoffebene wird in dieser Methode nicht verwendet und kann als Möglichkeit der Erweiterung für die Anwendung gesehen werden. Der Grund dafür liegt zum einen darin, dass diese Funktion schon Thema zahlreicher früherer Arbeiten war, die durch das Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft erschienen sind. Zum anderen darin, dass in dieser Arbeit nicht umwelttechnische Aspekte sondern Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit im Vordergrund stehen. Lösemittel oder giftige Stoffe im Produktionsprozess über eine Stoffebene abzubilden und so zu verfolgen, könnte eine Erweiterung der Anwendung sein. Es wird in dieser Arbeit versucht eine Verknüpfung zwischen Material-, Kosten-, und Zeitflüssen mit Hilfe der Software STAN herzustellen.

Alternative Softwares zur Abbildung solcher Systeme sind unter anderem Umberto und GaBi diese beiden können jedoch keine Stoffebenen bilanzieren. Durch diese Tatsache und das es sich hierbei um keine Freeware handelt, ist die Entscheidung auf STAN gefallen.

Zu sehen, wie Materialien und Güter durch ein Unternehmen fließen, gibt Aufschluss über das gesamte Produktionssystem. Die Bewertung dieser Flüsse mit Zeit- und Kostenflüssen ermöglicht ein begründetes Priorisieren von geplanten Maßnahmen.

Die entwickelte Methode wird bei einem Produkt der Firma ISOVOLTA AG getestet und dadurch optimiert. Die hier angegebenen Werte und Abläufe stehen in keinem Zusammenhang zu den realen Produktionsablauf der Firma ISOVOLTA AG. Durch die Anwendung zeigte sich, dass diese Methode zu einem besseren Verständnis des Produktionsprozesses führte und Verbesserungspotentiale aufzeigte.

Die ISOVOLTA Group ist als international führender Hersteller von Elektroisoliermaterialien, technischen Laminaten und Verbundwerkstoffen weltweit präsent. 18 Produktions- und Vertriebsstandorte in 12 Ländern auf drei Kontinenten setzen auf die langjährigen Erfahrungen in der Synthese und Umwandlung von Rohstoffen zu hoch zuverlässigen, intelligenten Materialien. Material- und Technologie-Know-how, Flexibilität und Innovationsfreude bestimmen die Produktentwicklung und prägen die partnerschaftlichen Kundenbeziehungen.²

Hans Schnitzer beschreibt die Stoffstromverfolgung als Instrument zum vorsorgenden integrierten Umweltschutz. Durch diesen produktionsintegrierten Umweltschutz werden durch ein Vermeiden von Verschwendungen auch Kosten gesenkt. Diese Darstellung von Emissionsströmen zeigt die Herkunft und Höhe dieser Ströme. Im weiteren Verlauf werden Möglichkeiten der betrieblichen Umweltvorsorge aufgezeigt, welche auch zu einer Kostensenkung führen.³

Susanne Kytzia beschäftigte sich schon in der Vergangenheit mit der Verbindung von Material- und Geldflüsse zur Bewertung von Unternehmen.

Shinichiro Nakamura und Yasusshi Khodo behandelten in ihrem Buch Waste Input – Output Analysis mit der Auswirkung der Input – Output Analyse von Materialflussanalysen jedoch nicht mit dem Ablauf von Prozessen in einem System.⁴

Die Fragestellung bezieht sich auf die Verwendung der Software STAN zur Erstellung der Modelle. Wie kann STAN dazu verwendet werden, um von Produktionssystemen Material- und Kostenflüsse abzubilden? Warum ist STAN die dazu am besten geeignete Softwarelösung? Wie kann die Funktion der Unsicherheiten in STAN zur Risikoabschätzung herangezogen werden? Wie kann man in einem Unternehmen diese Darstellung nutzen, um Produktionssysteme zu optimieren? Wie kann die Software optimiert werden, um die Abbildung zu erleichtern? Wie gut geeignet ist die Software STAN ohne Optimierung zur Darstellung von Produktionssystemen?

² (Isovolta AG)

³ Vgl. (Schnitzer, 1998)

⁴ Vgl. (Nakamura & Yasushi, 2009)

2 Theoretische Grundlagen und Begriffsdefinition

Hier werden die für die Methode relevanten Grundlagen und Begriffe beschrieben, da eine nicht konsistente Begriffswahl zu sehr vielen Missverständnissen in der Methode und der Auslegung der erhaltenen Abbildungen und Daten führen kann.

2.1 Materialflussanalyse

Da die Zielgruppe für die Anwendung der entwickelten Methode nicht aus dem Bereich der Abfallwirtschaft kommt, werden die relevanten Begriffe aus der Abfallwirtschaft hier detailliert beschrieben.

2.1.1 Begriffsdefinition

Die folgenden Begriffe sind aus der ÖNORM S 2096-1 entnommen, welche für die Abfallwirtschaft entwickelt wurde aber auch auf nicht-abfallwirtschaftliche Systeme und Prozesse angewendet werden kann.

„Stoff

Material, das aus identischen Einzelteilen besteht und entweder ein chemisches Element (Einzelteil Atom, z.B. Natrium, Kohlenstoff oder Kupfer) oder eine chemische Verbindung in reiner Form (Einzelteil Molekül, NH₃, CO₂, Kupfersulfat ist.

Keine Stoffe sind z.B. Trinkwasser, da es nicht nur aus reinem Wasser besteht sondern auch Kalzium und viele Spurenelemente, oder PVC, da es neben polymerisiertem Vinylchlorid auch Additive enthält.

Gut

Material, das aus einem oder mehreren Stoffen besteht und handelbar ist.

Der Handelswert von Gütern kann je nach Betrachter sowohl positiv (z.B. PVC, Butanon, PVDF) als auch negativ (z.B. Abfall, verdampftes Lösemittel) sein. In besonderen Fällen gibt es Güter, die keinen monetären Wert

aufweisen, d.h. sie verhalten sich wertmäßig neutral. Beispiele dafür sind Luft, Kfz-Abgase oder Niederschlag.⁵

Material

Übergeordneter Begriff für ein Gut oder einen Stoff

Der Begriff Material wird dann verwendet, wenn Güter und Stoffe betrachtet werden, oder wenn man sich noch nicht festlegen will, auf welcher Ebene (Güter oder Stoffe) eine Untersuchung durchgeführt werden soll.

Material schließt Rohmaterialien sowie alle durch biologische oder chemische Prozesse veränderten Substanzen ein.

Prozess

Vorgang der Umwandlung (biologisch, chemisch, physikalisch), des Transportes oder der Lagerung von Gütern oder Stoffen

Beispiele für Prozesse sind: Vorgänge in einer Anlage (z.B. Abfallverbrennungsanlage, Papierfabrik), Dienstleistungen (z.B. Abfallsammlung), Ablagerung von Abfällen (z.B. Deponierung).

Die Vorgänge innerhalb eines Prozesses werden in der Regel nicht betrachtet, der Prozess wird oft als Blackbox bezeichnet. Sollen die Prozessvorgänge näher untersucht werden, kann der Prozess in mehrere Subprozesse untergliedert werden.

Lager

Bestand von Gütern oder Stoffen innerhalb eines Prozesses

Zwei Beispiele für Lager sind:

- *Der Bestand an Abfall im Bunker im Prozess Abfallverbrennungsanlage. Neu eingebrachter Restmüll ergibt einen Lageraufbau, die Verbrennung von Restmüll führt zum Lagerabbau.*
- *Der Bestand an Bauinfrastruktur (z.B. Gebäude). Neu erstellte Gebäudeteile ergeben einen Lageraufbau, der Abriss von Gebäudeteilen führt zu einem Lagerabbau.⁶*

⁵ (ÖNORM S 2096-1, 2005) S. 3

Fluss, Strom

Bewegung der untersuchten Güter oder Stoffe zwischen Prozessen oder in das System hinein oder aus dem System heraus mit der Einheit z.B. Masse oder Volumen pro Zeit

Materialflüsse in einen Prozess werden als Inputs (Edukte), solche aus einem Prozess als Output (Produkte) bezeichnet.

In der Praxis wird jedoch häufig die Einheit Masse pro Zeit und Querschnitt (kann auch als Flux bezeichnet werden) betrachtet (z.B. der Güterumsatz in Tonnen pro Jahr und Betrieb, der Anfall an Restmüll pro Jahr und Gemeinde). Es wird jedoch empfohlen, den Begriff Fluss zu verwenden und gleichzeitig immer die zugehörige Einheit anzugeben (Masse pro Zeit, Masse pro Zeit und Querschnitt).⁷

System

Als System wird die Summe aller Prozesse, Lager und Flüsse gesehen, die zueinander in einer Beziehung sind und auch die Abgrenzung nach außen. Die Flüsse innerhalb eines Systems können Güter-, Stoff-, Material- und Energieflüsse sein. Nur die im System befindlichen Prozesse und Flüsse werden bilanziert. Ein System kann z.B. ein Betrieb sein. Jeder im System auftretende hat sowohl einen Ziel- als auch einen Herkunftsprozess, dadurch ist die eindeutige Definition gewährleistet.⁸

Systemgrenze

zeitliche und räumliche Abgrenzung des zu untersuchenden Systems⁹

als zeitliche Grenze wird der gewünschte Beobachtungszeitraum gewählt. Dieser liegt bei Unternehmen in der Regel zwischen einem Monat und einem Jahr. Die räumliche Abgrenzung erfolgt über die natürlichen Grenzen des Unternehmens. Es werden nur die Flüsse, Prozesse und Lager bilanziert die sowohl in den zeitlichen als auch in den räumlichen Systemgrenzen liegen.¹⁰

⁶ (ÖNORM S 2096-1, 2005) S. 3f

⁷ (ÖNORM S 2096-1, 2005) S. 4

⁸Vgl. (ÖNORM S 2096-1, 2005) S. 4

⁹ (ÖNORM S 2096-1, 2005) S. 4

¹⁰Vgl. (ÖNORM S 2096-1, 2005) S. 4

Die Wahl der Systemgrenzen ist aufgrund der Tatsache, dass nur innerhalb bilanziert wird, sehr entscheidend für das Ergebnis der Materialflussanalyse. Bei Prozessen und Flüssen bei denen die Datenlage Mängel aufweist ist es ratsam diese außerhalb der Systemgrenzen zu positionieren.

Stoffflussanalyse (SFA); Stoffstromanalyse

Identifizierung und Quantifizierung aller relevanten Flüsse von Stoffen in einem zeitlich und räumlich exakt abgegrenzten System sowie Bilanzierung der Stoffe innerhalb eines Systems

Das untersuchte System kann ein Einzelprozess oder eine Verknüpfung vieler Prozesse einschließlich der Unterprozesse sein.

Die Stoffflussanalyse kann auch ein Einzelprozess oder eine Verknüpfung vieler Prozesse einschließlich der Unterprozesse sein.

Die Stoffflussanalyse kann auch als eine Input-Output-Analyse – im internationalen Sprachgebrauch auch PIOT (physical input output tables) genannt – betrachtet werden. Die Input-Output-Analyse beschreibt die produktionsmäßigen Beziehungen zwischen den Teilbereichen der Wirtschaft und die Untersuchungen der wechselseitigen Zusammenhänge zwischen Inputs und Outputs.

Güterflussanalyse

Identifizierung und Quantifizierung aller relevanten Flüsse von Gütern in einem zeitlich und räumliche exakt abgegrenzten System sowie Bilanzierung der Güter innerhalb eines Systems.

Im Unterschied zur Stoffflussanalyse werden in einer Güterflussanalyse ausschließlich Güterflüsse untersucht.

Materialflussanalyse

Identifizierung und Quantifizierung aller relevanten Flüsse von Materialien in einem zeitlich und räumlich exakt abgegrenzten System sowie Bilanzierung der Materialien innerhalb eines Systems

Gemäß der Definition des Begriffs „Material“ kann der Begriff „MFA“ sowohl für Güter- als auch für Stoffbilanzen verwendet werden.¹¹

Bilanz

Gegenüberstellung der innerhalb der zeitlichen Systemgrenzen in ein System gelangenden Flüsse an Gütern und Stoffen (Import) und der entsprechenden Flüsse aus dem System hinaus (Export) unter Berücksichtigung etwaiger Lagervänderungen

Bei der Bilanzierung wird das Massenerhaltungsgesetz berücksichtigt.

funktionale Einheit

Bezugsgröße, auf welche die Flüsse des betrachteten Systems bezogen werden können

Damit wird sichergestellt, dass die Ergebnisse der Stoffflussanalyse vergleichbar werden. Die funktionale Einheit (z.B. pro Einwohner, pro Flächeneinheit, pro Produktionseinheit, pro Transporteinheit) muss in Abhängigkeit von den Zielen und vom Untersuchungsrahmen gewählt werden und muss letztlich eindeutig und messbar sein.

¹¹ (ÖNORM S 2096-1, 2005) S. 5

Transferkoeffizient (k_x)

Anteil des gesamten in den Prozess eingeführten Gutes oder Stoffes, der in den Output x transferiert wird.

Die Summe der Transferkoeffizienten aller Outputs eines Materials muss immer 1 ergeben und wird über die Transferfunktion beschrieben. Dabei sind allfällige Transfers ins Lager (Lageraufbau) bei der Summenbildung als „Outputs“ bzw. aus dem Lager (Lagerabbau) heraus als „Inputs“ zu berücksichtigen. Je nach Fragestellung kann in Einzelfällen für die Berechnung der Transferkoeffizienten nur ein Teilinput betrachtet werden. Der Transferkoeffizient ist dimensionslos.

Transferfunktion

Verteilung eines Inputs an Gütern oder Stoffen innerhalb eines Prozesses auf verschiedene Outputs des Prozesses, wobei eine Lageveränderung zu berücksichtigen ist.“¹²

¹² (ÖNORM S 2096-1, 2005) S. 5

2.1.2 Methodik der Materialflussanalyse

Bei der Erstellung einer Materialflussanalyse wird analog zur Erstellung einer Stoffflussanalyse vorgegangen. Diese Vorgehensweise ist in der ÖNORM S 2096-2 beschrieben. Der Ablauf der Vorgangsweise ist in Abbildung 1 dargestellt.

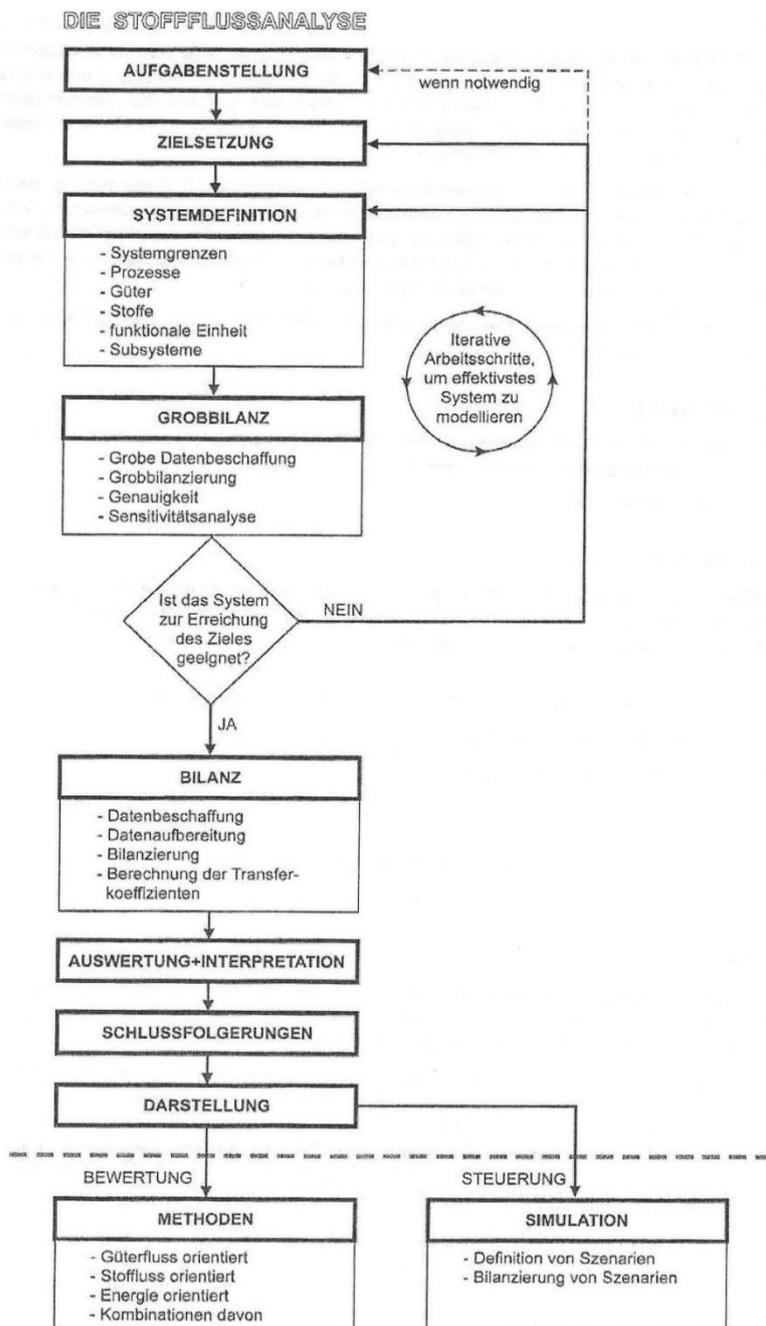


Bild 1 – Methodisches Vorgehen zur Erstellung einer Stoffflussanalyse

Abbildung 1 Methodisches Vorgehen zur Erstellung einer Stoffflussanalyse¹³

¹³ (ÖNORM S2096-2, 2005) S. 4

2.1.3 Software zur Materialflussanalyse

In diesem Kapitel werden Programme zur Materialflussanalyse vorgestellt

2.1.3.1 *Umberto*

Umberto ist ein Programm zur Darstellung von Material- und Energieflusssystemen und wurde 1994 in Deutschland entwickelt. Bei Umberto können die Daten eingegeben und bilanziert werden. Eine Funktion von Umberto ist Kosten dem System hinzuzufügen. Umberto ist auch darauf ausgelegt, Optimierungsstellen im System zu finden. Die Stoffebene kann mit Umberto nicht abgebildet werden.¹⁴

2.1.3.2 *GaBi*

GaBi steht für **G**anzheitliche **B**ilanzierung und ist eine Software zur Bilanzierung und Darstellung von Material-, Güter-, und Kostenflüssen. Mit der Kostenfunktion kann in den Kostenflüssen die Aufteilung in die Bestandteile nach deren Herkunft graphisch dargestellt werden. Mit der Software GaBi ist es nicht möglich Stoffströme zu bilanzieren.¹⁵

2.1.3.3 *STAN*

STAN steht für **S**tofffluss**A**nalyse und ist eine kostenlose Software, entwickelt am Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft an der TU Wien. Das Programm wurde entwickelt zur Erstellung von Material-, Güter-, und Stoffflussanalysen. Die Software wurde ursprünglich für die Abfallwirtschaft zur Anwendung der ÖNORM S 2096 (Stoffflussanalyse – Anwendung in der Abfallwirtschaft) entwickelt. Das Programm verfügt über eine grafische Benutzeroberfläche, mittels dieser ein Modell mithilfe vorgefertigter Komponenten (Prozesse, Flüsse, Lager) erstellt werden kann. Mit STAN können zeitliche Entwicklungen über mehrere Perioden abgebildet werden. Nach Erstellung des Modells können Transferkoeffizienten, Stoff-, Güter- und Energieflüsse für alle Perioden eingegeben werden. Die fehlenden Werte werden über die Berechnungsfunktion mithilfe einer Massenbilanz errechnet. Diese wird über alle Ebenen und Perioden erstellt. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt über die Darstellung eines Sankey-Diagramms.¹⁶

Die Funktion des Rechnens mit Datenunsicherheiten ermöglicht die Auswirkung von Datenunsicherheiten darzustellen. Da STAN nur mit normalverteilten Unsicherheiten

¹⁴ Vgl. (Brunner & Rechberger, 2004) S. 89

¹⁵ Vgl. (Brunner & Rechberger, 2004) S. 114f

¹⁶ Vgl. (Cencic, 2012), (Cencic O. , 2007)

rechnen kann, können einmalig auftretende Ereignisse wie z.B. Unfälle, unvorhergesehene Stillstände nur sehr schwer in die Berechnung mit einbezogen werden. Bei der Berechnung führt die Software mit mathematisch – statistischen Werkzeugen eine Fehlerfortpflanzungsrechnung, einen Datenausgleich und die Identifikation grober Fehler durch.¹⁷

STAN wurde als Software für diese Methode gewählt, da durch die Möglichkeit der Bilanzierung auch auf Stoffebene die Entwicklungsfreiheit der Methode am höchsten ist. Es besteht die Möglichkeit, je nach Bedarf nahezu beliebig viele Ebenen darzustellen. Die Tatsache, dass es sich bei der Software um eine Freeware handelt, war aufgrund der kleinen Einstiegsbarriere genauso ein Entscheidungsgrund wie die einfache Möglichkeit der Verbreitung der Methode nach Fertigstellung.

2.1.3.4 Microsoft Excel

Microsoft Excel ist ein Tabellenkalkulationsprogramm und Teil von Microsoft Office. Es ist möglich, Microsoft Excel für Materialflussanalysen zu verwenden, obwohl es nicht speziell dafür programmiert wurde. Microsoft Excel kann jedoch nur für Systeme mit weniger als 20 Prozessen sinnvoll eingesetzt werden. Der Vorteil ist, dass die meisten User mit dem Umgang mit Microsoft Excel bereits vertraut sind. Der größte Nachteil ist der hohe Aufwand, der beim Erstellen eines Modells anfällt.¹⁸

Microsoft Excel ist als alternative aus den genannten Gründen nicht geeignet, wird jedoch zur Darstellung von in STAN nicht verfügbaren aber benötigten Auswertungen und Graphiken verwendet.

¹⁷ (Cencic, 2012), (Cencic O. , 2007)

¹⁸Vgl. (Brunner & Rechberger, 2004) S. 86ff

2.2 Ökonomische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die ökonomischen Grundlagen beschrieben, die zum Verständnis der Methode notwendig sind.

Materielle Güter

- (a) *Verbrauchsgüter: Güter, die bei der Bedürfnisbefriedigung oder im Produktionsprozess verbraucht werden, z.B. Nahrungsmittel, Brennstoffe, elektrische Energie und Rohstoffe*
- (b) *Gebrauchsgüter: Güte, die bei der Bedürfnisbefriedigung oder bei der Produktion über einen längeren Zeitraum hinweg genutzt werden, z.B. Fernsehgeräte, Haushaltsmaschinen, Gebäude und maschinelle Anlagen im Produktionsprozess¹⁹*

Kosten

„Werteinsatz zur Leistungserstellung.

Unter „Werten“ sind sowohl materielle Güter, die verbraucht werden (z.B. Material), zu verstehen als auch unverbrauchbare immaterielle Werte (z. B. Ideen, Patente, Organisationsleitungen).²⁰

Personalkosten

Personalkosten setzen sich aus Personaleinzelkosten (Fertigungslöhne) und den Personalgemeinkosten (Hilfslöhne, Gehälter und freiwilligen Sozialkosten) zusammen.²¹

¹⁹ (Kistner & Steven, 2002) S. 4

²⁰ (Kemmetmüller & Bogensberger, 2004) S. 376

²¹ Vgl. (Wöhe & Döring, 2008) S. 938

Arbeitsplatz

„Der Arbeitsplatz ist der räumliche Bereich, in dem die Elementarfaktoren des Produktionsprozesses unmittelbar zusammenwirken und im Rahmen der Erzeugnisherstellung eine genau definierte Aufgabe realisieren (Arbeitsgänge, Arbeitsverrichtungen). Der Arbeitsplatz wird bestimmt durch den Ort des Zusammenwirkens – gekennzeichnet durch den jeweils stationären Elementarfaktor (bzw. die stationären Elementarfaktoren) und durch seine qualitativen und quantitativen Voraussetzungen (Kapazitätseigenschaften), die die Grundlage für die Lösung der Arbeitsaufgaben bilden.“²²

Produktionsprozess

Es findet eine Unterteilung in drei Typen statt:

- Stoffgewinnende Prozesse (Rohstoffförderung): Diese stehen immer ganz am Beginn einer Produktion (global betrachtet).
- Stoffumwandelnde Prozesse: Hier werden tiefgreifende Veränderungen vorgenommen welche zu der Erzeugung anderer Stoffe führen.
- Stoffverformende Prozesse: In diesen Prozessen wird die Form, Abmessung oder die Oberflächenbeschaffenheit verändert.²³

Produktionssystem

Als Produktionssystem wird die Summe aller Produktionsprozesse und Subsysteme verstanden, die zum gewünschten Halbfabrikat oder Endprodukt führen.

²² (Nebi, 2011) S. 426

²³ Vgl. (Nebi, 2011) S. 58

Bei Rohstoffen und Hilfsstoffen wird das Wort Stoffe verwendet, obwohl es sich per Definition aus der Stoffflussanalyse um Materialien handelt (siehe 2.1.1 Begriffsdefinition), da diese Methode Anwendung in der Produktionswirtschaft finden wird, wo die Definitionen der Kosten und Leistungsrechnung verwendet werden.

Rohstoffe

„Es handelt sich um Materialien, die entweder in ihrer ursprünglichen Form oder in mechanisch bzw. chemisch abgewandelter Art die Ausgangs- oder Grundstoffe der Erzeugnisse bilden (Hauptbestandteil). Sie werden bestimmend für Wesen und Ausstattung des Produktes, in der Regel sind sie Kostenträger-Einzelkosten.“²⁴

Hilfsstoffe

„Sie werden ebenfalls unmittelbar für das Erzeugnis verwendet, stellen aber mehr eine Ergänzung zu den Werkstoffen dar (Nebenbestandteil)“²⁵

Hilfsstoffe werden auf Grund der unterschiedlichen Bestimmungen zur Lagerung und Entsorgung in feste und flüssige Hilfsstoffe (Lösemittel) unterteilt. In Abbildung 2 wird die Verteilung der Stoffe im Produktionssystem zum leichteren Verständnis graphisch dargestellt.

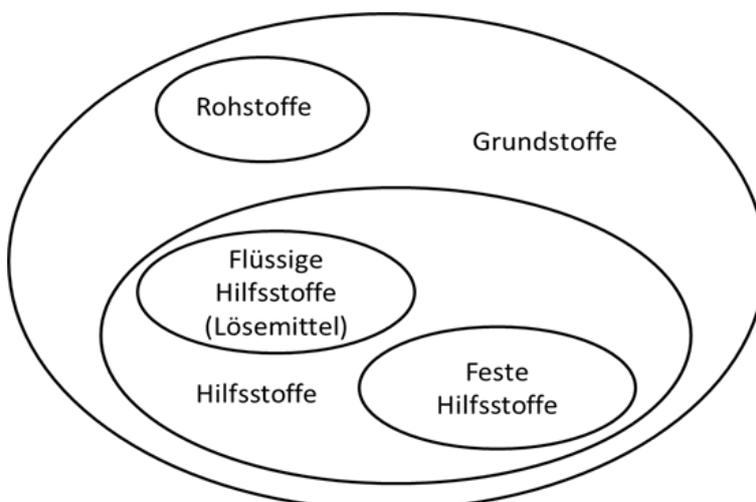


Abbildung 2 Edukte im Produktionssystem

²⁴ (Wilkens, 2004) S. 42

²⁵ (Wilkens, 2004) S. 42

ERP System

ERP Systeme werden beschrieben, da diese in der Anwendung der Methode in der Praxis die Grundlage und Basis der Daten bilden. Aus diesem System werden die Daten für die Erstellung der Modelle verwendet und es wird ein Plausibilitätscheck bei den Ergebnissen mithilfe des ERP Systems durchgeführt (Vergleich der Kalkulation des ERP Systems mit dem Ergebnis des Modells).

ERP-Systeme (Enterprise Resource Planning) sind primär für die Geschäftsprozessunterstützung und die Abrechnung entwickelt worden. Integraler Bestandteil eines solchen Systems ist die operative Planung. Eine gemeinsame Nutzung betrieblicher Objekte wie Kostenstellen, Kostenrahmen usw. gleichermaßen für Planung und Ist-Abrechnung ist nahe liegend. In den etablierten ERP-Systemen sind zahlreiche Planungsfunktionalitäten enthalten. Absatzplanung, Budgetierung, auf Kostenwerten oder Produktionsplanung sind einige Beispiele. Die SAP hat beispielsweise einen hohen Aufwand in ein Planungssystem auf der Basis von Transaktionssystemen über verschiedene Module hinweg gesteckt.

ERP-Systeme unterstützen in der Regel eine fest definierte Anzahl von Methoden und Modellen. So offerieren diverse Anbieter wie beispielsweise SAP spezielle Module für die Prozesskostenrechnung in Form einer Planungsrechnung an. Eine Anpassung an Anforderungen außerhalb des Standards ist hingegen in den seltensten Fällen zu empfehlen: die Modifikation durch Programmierung ist aufwändig, benötigt Expertenwissen und ist wartungsintensiv.

Die durchgängige Unterstützung der Gesamtplanung setzt voraus, dass praktisch alle Teilmodule einer Produktfamilie im Einsatz sind. Im Mittelpunkt steht in der Regel die Ergebnisrechnung, in der die Teilplanungen zusammenfließen.²⁶

²⁶ (Chamoni, 2010) S. 368

2.3 Definition der Unsicherheiten

Die Unsicherheiten werden in der Software STAN über eine Normalverteilung mit Mittelwert und Standardabweichung mit einem Konfidenzintervall von 95% angegeben. Nicht normalverteilte Werte müssen um in STAN abgebildet werden zu können in Normalverteilte Werte transferiert werden.

Normalverteilung:

Die Normalverteilung ist die zentrale stetige Verteilung in der Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik. Recht häufig kann beispielsweise angenommen werden, dass Messfehler normalverteilt sind.²⁷

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Formel 1 Dichtefunktion der Normalverteilung

σ ...Standardabweichung

μ ...Erwartungswert

Konfidenzintervall:

Beim Konfidenzintervall handelt es sich um einen Bereich, in dem mit der Wahrscheinlichkeit des Intervalls alle Werte in diesem Bereich liegen.²⁸

Konfidenzintervall: $1-\alpha$

α steht für die Irrtumswahrscheinlichkeit²⁹

²⁷ (Steland, 2007) S. 108

²⁸ (Steland, 2007)S. 153

²⁹ (Hartung, Elpelt, & Klösener, 2005) S. 129f

2.4 Bisherige Versuche zur ökologischen und ökonomischen Darstellungen mittels MFA

Folgende zwei Arbeiten beschäftigen sich mit der Darstellung der Geld- und Güterflüsse in einer Materialflussanalyse. Schrack respektive Kytzia ist es gelungen, Gelder und Güter in einer Materialflussanalyse darzustellen.

Material- und Kosteneffizienz in der Abfallwirtschaft durch Weiterentwicklung der Materialflusskostenrechnung von Mag. Daniela Schrack:

Die Materialflusskostenrechnung wird hauptsächlich im Umweltcontrolling verwendet. Ziel ist es hier auch durch eine Steigerung der Materialeffizienz die Kosten zu senken. Anwendung findet die Materialflusskostenrechnung hauptsächlich in der Abfallwirtschaft.³⁰

In Abbildung 3 ist ein Beispiel für eine Materialflusskostenrechnung zu sehen. Die Ziele sind hier auch, durch eine Visualisierung die Verbräuche aufzuzeigen und dadurch die Motivation für eine Senkung zu erzeugen. Bei der Materialflusskostenrechnung werden sowohl die Produkt als auch die Non - Produktflüsse mit Kosten versehen. Die Materialflusskostenrechnung ist für Unternehmen der Produktionswirtschaft gut geeignet Ineffizienzen aufzudecken.³¹

³⁰ Vgl. (Schrack, 2012) S. 43

³¹ Vgl. (Schrack, 2012) S. 43ff

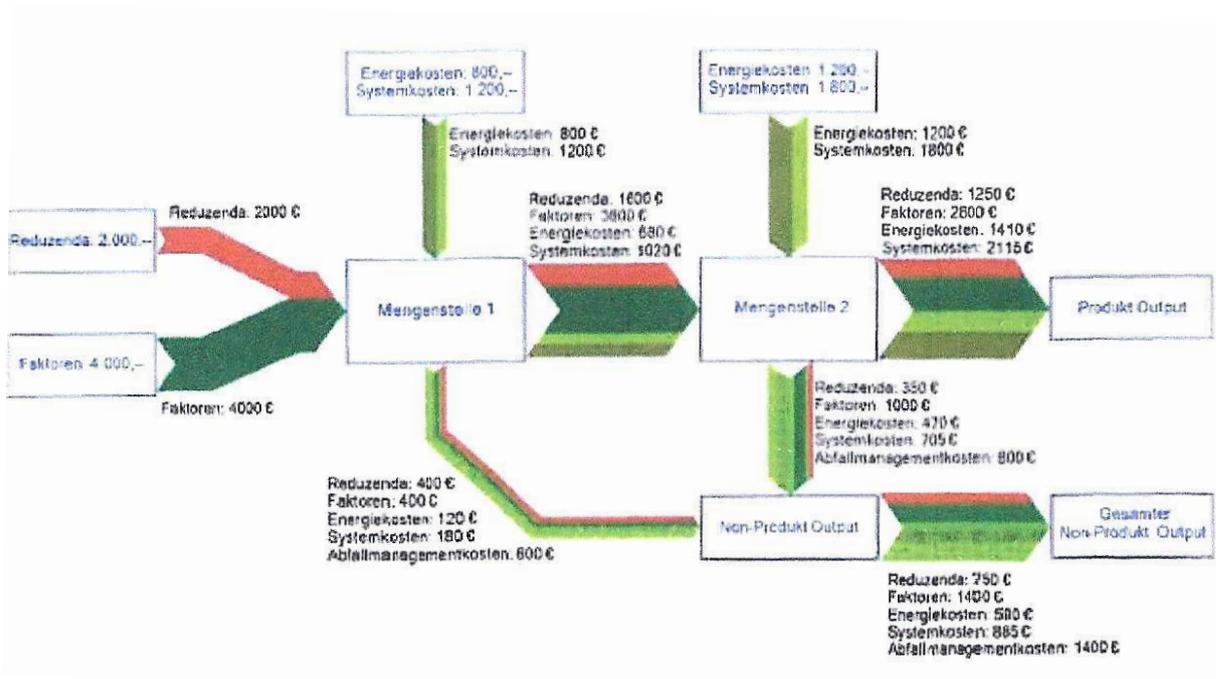


Abbildung 3 Materialflusskostenrechnung Beispiel³²

Dieser Ansatz gibt dem Non – Produkt auch Kosten. Die Gesamtkosten ergeben sich aus der Summe des Produkt - Outputs und des Non – Produkt – Outputs. Dies ist der Grund, warum sich die Methode für die Optimierung von Produktionsprozessen nicht eignet. Die Kosten, die durch Verschnitt und Ausschuss entstehen, müssen im Halbfabrikat bis zum Ende des Produktes mitgetragen werden. Die Verknüpfung der Non – Produkte mit Kosten führt zu einer fehlerhaften Betrachtung, da die Kosten der Halbfabrikate durch Weglassen der Ausschusskosten verfälscht werden. Dieser Fehler in der Betrachtung steigt mit der Komplexität des Modells.

³² (Schrack, 2012) S. 47

Wie kann man Stoffhaushaltssysteme mit ökonomischen Daten verknüpfen? von Dr. Susanne Kytzia

Es werden ökonomische Daten anhand von Wohngebäuden in Stoffhaushaltssystemen eingebracht. In Abbildung 4 ist das Ergebnis zu sehen. Diese Arbeit zeigt die Bedeutung der Geldflüsse in diesem System. Anhand dieses Beispiels wird gezeigt, dass das Einfließen von ökonomischen Daten in ein Stoffhaushaltssystem durchaus sinnvoll ist.³³

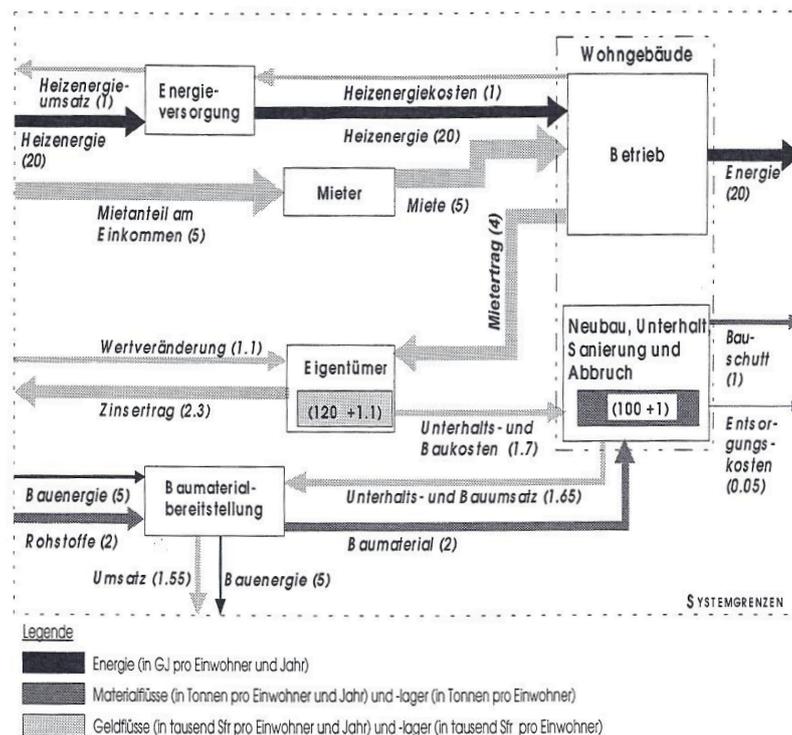


Abbildung 4 Stoffhaushaltssystem Wohnen mit ökonomischen Daten³⁴

In dieser Arbeit fließen im Modell sowohl Material-, Energie- als auch Geldflüsse. Letztere in Form von Kosten und Erträgen. Durch das Fließen von Erträgen stellt sich die Frage, wie die Erträge auf die Kostenträger aufgeteilt werden. Die Tatsache, dass bei der Produktionsprozessoptimierung die Erträge nicht beachtet werden, schließt diesen Ansatz endgültig aus. Das wesentliche Ziel bei der Produktionsprozessoptimierung muss immer die Kostenminimierung und nicht Ertragsmaximierung sein, da der Ertrag durch eine Produktionsprozessoptimierung nicht gesteigert werden kann sondern nur die Produktionskosten gesenkt werden kann.

³³ Vgl. (Kytzia, 1998) S. 69ff

³⁴ (Kytzia, 1998) S. 73

3 Beschreiben der Methode zur ökologischen und ökonomischen Optimierung von Produktionssystemen

Der Hauptbestandteil der Methode ist die Darstellung eines Produktionssystems über eine Materialflussanalyse. Es gilt nicht nur die Materialflüsse im Modell abzubilden, sondern zusätzlich auch noch die ökonomischen Daten des Produktionssystems in das Modell einfließen zu lassen.

3.1 Ziel der Methode

Die Ziele der Methode liegen darin, ein Produktionssystem über möglichst detailgenaue Modelle abzubilden und daraus übersichtliche und leichtverständliche Abbildungen zu erzeugen. Diese Darstellungen sollen zu einem besseren Verständnis des Produktionssystems führen und Angriffspunkte von effizienten Optimierungsmaßnahmen aufzeigen. Das Resultat sollte ein leicht verständliches und transparentes Entscheidungsinstrument sein.

Durch die Eingabe von Unsicherheiten wird analysiert, ob sich diese Modelle für eine Risikoabschätzung eignen. Es wird eruiert, wie genau durch diese Eingabe der Unsicherheiten, Aussagen über die Auswirkung von Risiken im System lokalisiert werden können.

Das Primärziel dieser Optimierungsmaßnahmen soll in der Kostensenkung liegen und die Sekundärziele in der Ressourcenoptimierung und einem verbesserten Umweltschutz. Es wird speziell darauf geachtet, ob durch die Erreichung der Primärziele die Sekundärziele mit erreicht werden.

Die in STAN vorhandene Möglichkeit Stoffe in einer Materialflussanalyse in getrennten Ebenen darzustellen wird bei dieser Arbeit nicht verwendet, da es zu diesem Thema schon Arbeiten vom Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft gibt. Es ist aber auf jeden Fall möglich, diese Methode mit dieser Funktion noch zusätzlich zu verknüpfen und so zu erweitern.

3.2 Definitionen in der Methode zur Optimierung von Produktionssystemen

Die Definitionen in diesem Kapitel werden speziell für die Anwendung getroffen. Die Grundlage dieser Definitionen bildet die Anwendung der Methode in der Praxis. Die Erarbeitung der optimalen Definitionen ist ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit. Aufgrund der Unterschiede in den Unternehmen muss die Gültigkeit der Definition vor jeder Anwendung geprüft werden und gegebenenfalls müssen die Definitionen unternehmensspezifisch angepasst werden.

3.2.1 Begriffsdefinitionen

Produktionsprozess

Ein Produktionsprozess in der Methode ist ein Arbeitsplatz inklusive Personal und Produktionsanlage. Dieser muss Transferkoeffizienten, mindestens einen Input und einen Output Fluss besitzen.

Lager

Bei einem Lager handelt es sich um einen physischen Lagerplatz im Produktionssystem an dem Materialien zwischengelagert werden. Kosten für die Lagerung werden in der Methode nicht berücksichtigt, da die Erhebung dieser Kosten einen zu hohen Aufwand bei zu geringem Nutzen aufweisen würde. Allokation der Lagergesamtkosten zu den Lagerkosten der einzelnen Halbfabrikate und Rohstoffe stellt sich als schwierig heraus. Da die Lagerkosten in den Overheadkosten enthalten sind, ist es schwierig, diese aus diesen heraus zurechnen. Da das Ziel ohnehin ist, den Lagerstand so gering wie möglich zu halten, ist aus der genauen Kenntnis der Lagerkosten kein Nutzen zu generieren.

Subsystem

Bei einem Subsystem handelt es sich um zusammengefasste Produktionsprozesse und Lager. Der Zweck dieses System liegt darin, den Produktionsprozess übersichtlicher zu gestalten.

Produktionssystem

Beim Produktionssystem handelt es sich um das Gesamtmodell inklusive aller Subsysteme und Produktionsprozesse. Beim Produktionssystem kann es sich um ein Herstellungsverfahren eines Endproduktes wie auch eines Halbfabrikates handeln. Die Abgrenzung erfolgt über die Systemgrenzen.

Prozesskosten

In den Prozesskosten sind alle Kosten, die beim Arbeiten an einem Arbeitsplatz entstehen, enthalten (Betriebskosten, Personalkosten, Energiekosten). Anschaffungskosten für die Anschaffung der Anlage sind in diesen Kosten nicht enthalten. Die Definition der Prozesskosten muss für jede Anwendung der Methode getrennt getroffen werden. Es ist ratsam, sich bei der Definition der Kosten auf die betriebsinterne Kostendefinition zu beziehen. Die größte mögliche Akzeptanz wird erreicht, wenn die Kosten dem ERP-System entnommen werden können, da diese dadurch sehr schnell und einfach überprüfbar sind.

Anschaffungskosten

Aufwände für die Anschaffung von Anlagen, Maschinen und Gebäuden werden unter Anschaffungskosten verstanden. Diese Kosten werden in der Ebene, in der die Prozesskosten entnommen werden, nicht berücksichtigt und daher werden diese auch im Modell nicht berücksichtigt. Diese Kosten fließen zu einem späteren Zeitpunkt in das Ergebnis ein.

Rohstoffkosten, Hilfsstoffkosten und Lösemittelkosten

Unter diesen Kosten werden die Einkaufskosten verstanden, das heißt, alle Kosten, die entstehen um das Material vom Lieferanten zum Produktionsprozess zu bekommen. Lagerungskosten im Unternehmen werden bei diesen Kosten nicht berücksichtigt. Wie auch bei den Produktionskosten müssen diese Kosten vor jeder Anwendung definiert werden und es ist ratsam, sich auf die betriebsinterne Kostendefinition zu beziehen. Gleich wie bei den Prozesskosten ist das ERP System die optimale Quelle für die Daten dieser Kosten.

3.2.2 Systemgrenzen

Die örtlichen Systemgrenzen werden analog zu den physischen Systemgrenzen der Produktionshalle gezogen und beziehen sich nur auf den Produktionsprozess. Alle Materialien, die für die Produktion als Hilfsstoffe oder Rohstoffe benötigt werden, werden in den Systemgrenzen berücksichtigt. Alle Flüsse und Lager für Gebäudeerrichtung, Bau der Anlagen, Betriebsstoffe wie Kühlwasser, Heißwasser und Dampf werden nicht berücksichtigt. Der Grund liegt zum einen im fehlenden Nutzen und zum anderen darin, dass die Energiekosten in den Prozesskosten bereits enthalten sind.

Die zeitlichen Systemgrenzen werden immer vor der Anwendung auf das jeweilige Produktionssystem abgestimmt definiert und sind in dieser Arbeit mit 10 Perioden zu je einem Monat festgelegt.

3.3 Daten für die Anwendung

Bei den Daten für die Anwendung steht die Nachvollziehbarkeit dieser im Vordergrund. Daher werden die Daten- wenn möglich - aus dem ERP-System des Unternehmens entnommen. Diese Datenbeschaffung macht ein einfaches und schnelles „Füllen“ des Modells mit Daten möglich.

Falls diese Methode in einem Unternehmen Anwendung findet, in welchem kein ERP System mit den benötigten Daten vorhanden ist, müssen die Daten empirisch ermittelt werden. Ganz wichtig zu beachten ist:

Die Qualität der Daten steht in direkter Proportion zur Qualität des Entscheidungsinstrumentes!

3.4 Aufbau der Methode in STAN

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Methode in der Software aufgebaut wird und wie die Kosten dargestellt werden, beginnend mit der Darstellung der Kosten bis hin zur Vorgehensweise bei der Erstellung der Modelle in STAN. Grundlegend wird jeder in STAN dargestellte Prozess als Arbeitsplatz gesehen, jedes Lager als physischer Lagerplatz und jeder Fluss als Materialbewegung.

3.4.1 Darstellung der Materialflüsse

Der Produktionsverlauf und der Materialfluss wird durch die Materialflüsse dargestellt. Die Materialflüsse bilden die Basis des Modells, auf dem die weiteren Ebenen aufgebaut werden. Beim Material - Fluss wird darauf geachtet, dass die Abläufe ähnlich dem tatsächlichen Produktionsfluss abgebildet werden.

3.4.2 Darstellung der Kostenflüsse

Um eine ökonomische Darstellung des Produktionssystems zu erhalten, müssen auch die Kosten dargestellt werden. Für diese Darstellung stehen zwei Varianten zur Verfügung. In Variante 1 werden die Kosten als zusätzliche Materialflüsse eingefügt, in Variante 2 wird die in der Software STAN vorhandene Energieebene zu einer Kostenebene umfunktioniert. Dafür wird eine neue Einheit € eingeführt und mit einem J gleichgesetzt. Die Wahl der Geldeinheit ist beliebig. Die Geldeinheit muss jedoch mit einer Energie beschreibenden Einheit gleichgesetzt werden, da die Kosten in der Energieebene dargestellt werden. Durch die in der Software festgelegte Beziehung zwischen diesen beiden Ebenen kann nach der Modellierung sehr schnell zwischen Material und Kostenebene hin und her geschaltet werden.

In Abbildung 5 ist ein Produktionsprozess mit Variante 1 dargestellt. Hier werden die Kosten als Materialflüsse eingezeichnet. Nachteil dieser Variante ist, dass bei einer größeren Anzahl von Prozessen diese Darstellung unübersichtlich wird. Ein weiterer Nachteil ist, dass Geld die Einheit kg besitzt und daher die Bilanz der Materialien durch die Kostenflüsse verfälscht wird. Dies ist durch den Vergleich der Import- und Exportwerte von Variante 1 und 2 ersichtlich.

In Abbildung 6 und Abbildung 7 sind die Kosten über die Energieebene dargestellt. In der Software kann zwischen diesen beiden Ebenen hin und her geschaltet werden. Dadurch erhält man für jedes Produktionssystem zwei Darstellungen, eine von den Materialbewegungen und eine von den Kostenbewegungen. Der Vorteil liegt in der übersichtlichen und leicht verständlichen Darstellung. Der Nachteil besteht darin, dass die Energieebene für die Darstellung der Energieflüsse im Produktionssystem nicht verwendet werden kann. Da die Vorteile gegenüber den Nachteilen überwiegen und es auch nicht Ziel der Methode ist Energieflüsse darzustellen, wird die Variante 2 weiter verfolgt.

Beschreiben der Methode zur ökologischen und ökonomischen Optimierung von Produktionssystemen

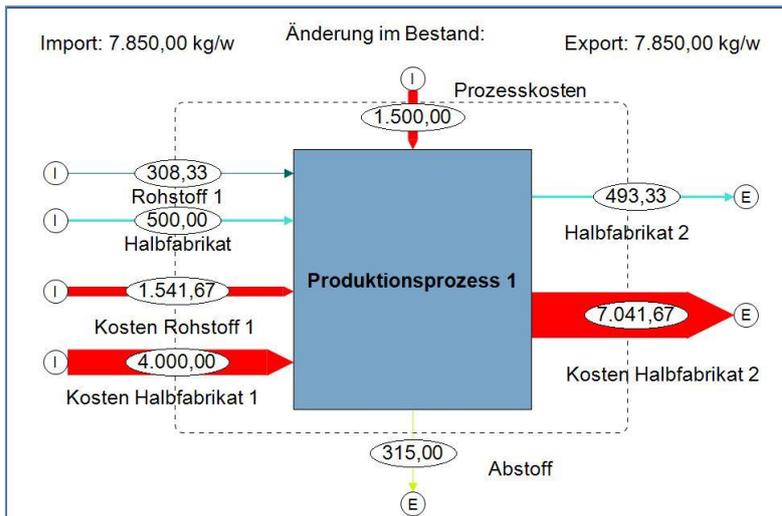


Abbildung 5 Variante 1 Darstellung der Güter- und Geldflüsse

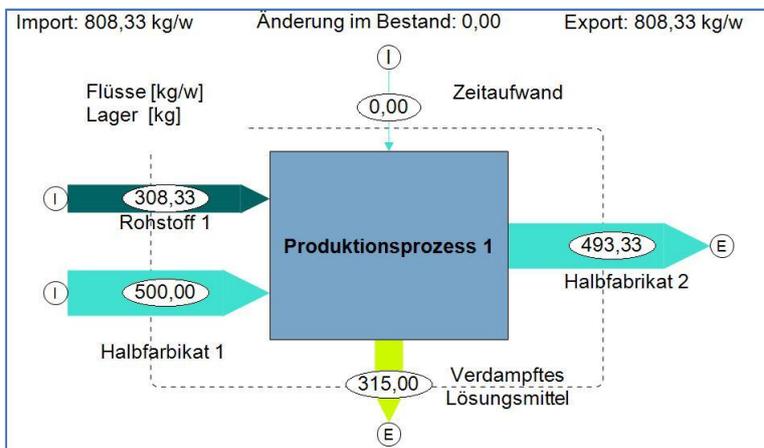


Abbildung 6: Variante 2 Darstellung der Güterflüsse

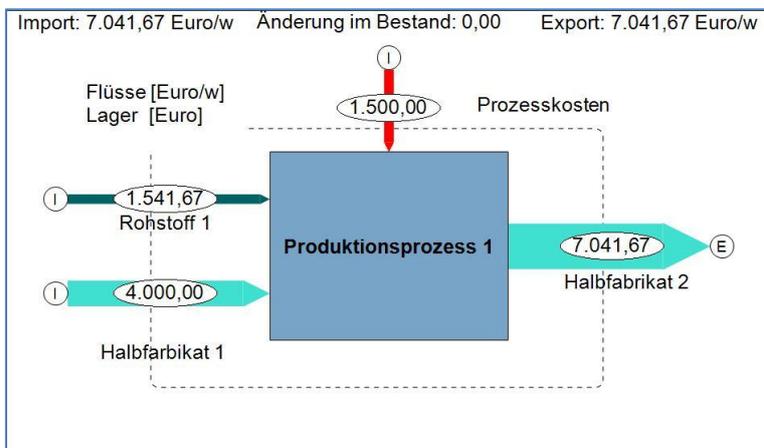


Abbildung 7 Variante 2 Darstellung der Geldflüsse

3.4.3 Darstellung des Zeitaufwandes im Produktionssystem

Die Ressourcenauslastung ist ein wesentlicher Teil der Produktionsplanung und auch der Produktionskosten. Unter Ressourcenauslastung wird das Verhältnis vorhandener zu verwendeter Ressourcen verstanden. Ziel ist es, eine möglichst konstante Auslastung über einen bestimmten Zeitraum zu erhalten. Um diese Auslastung in einer STAN Darstellung ersichtlich zu machen, wird eine zusätzliche Ebene eingeführt, welche den Namen Zeit bekommt. In dieser Ebene wird der Zeitaufwand der einzelnen Produktionsschritte dargestellt, somit ist ersichtlich, wie viele Stunden Produktionsaufwand ein Produkt mit sich „trägt“ und wie viel Zeit die Produktion des jeweiligen Halbfabrikates an den einzelnen Arbeitsplätzen in Anspruch nimmt.

In Abbildung 8 wird der Zeitaufwand des Herstellprozesses von Halbfabrikat 2 dargestellt. Der Wert vom Fluss Halbfabrikat 1 stellt die bisher benötigte Zeit dar. Der Fluss Zeitaufwand zeigt die notwendige Zeit für die Produktion der angegebenen Menge an Halbfabrikat 2 bei diesem Arbeitsplatz. Der Fluss Halbfabrikat 2 stellt die gesamte aufgewendete Zeit zur Produktion der gegebenen Menge an Halbfabrikat 2 dar. Der Fluss Rohstoff 1 ist Null und wird daher ausgeblendet da angenommen wird, dass für die Einbringung eines Rohstoffes keine Produktionszeit der eigenen Produktion benötigt wird. Der Zeitaufwand für Lagerung und interne Anlieferung wird in diesem Modell aufgrund einer Vereinfachung vernachlässigt.

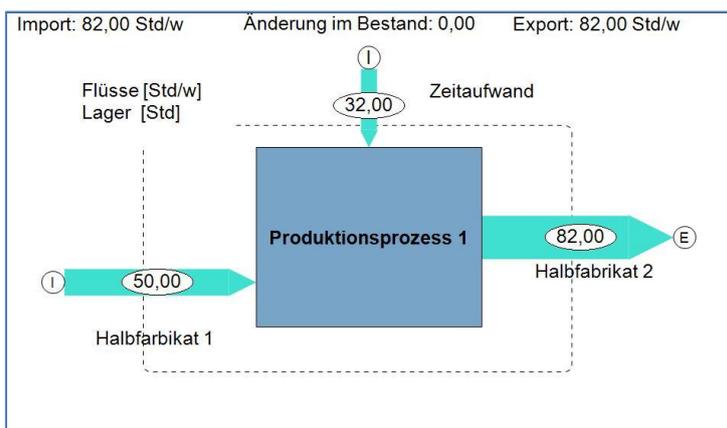


Abbildung 8 Darstellung Zeitaufwand

Durch diese Darstellung der Zeitaufwände können Aussagen über die Auslastung der einzelnen Produktionsmaschinen getroffen werden. Es ist in dieser Darstellung auf die Periodendauer zu achten, da es sich um ein statisches System handelt und

daher keine Aussagen darüber gemacht werden können ob, die Zeitaufwände am Periodenanfang oder am Periodenende benötigt werden. Durch die Verkürzung der Periodendauer steigt die Aussage der Zeitaufwände, jedoch auch die Komplexität des Gesamtsystems. Es muss ein Kompromiss zwischen Aussagekraft der Zeitflüsse und der Komplexität des Modells gefunden werden. Zu beachten ist, dass mit der Komplexität des Modells der Modellierungsaufwand steigt.

3.4.4 Vorgehensweise bei der Erstellung eines Modells in STAN

Dieses Kapitel soll als kurzer Leitfaden und als Unterstützung zur Anwendung dieser Methode dienen.

1. Definieren der Systemgrenzen und Kosten
2. Definieren der benötigten Einheiten, Ebenen und Perioden in der Software
3. Abbilden der für das Produktionssystem benötigten Prozesse und Lager
4. Abbilden der Flüsse im Produktionssystem. Diese stellen die Verbindung der Prozesse dar.
5. Eingabe von Werten in der Güterebene
6. Testen des Modells durch einen Berechnungsdurchlauf in der Güterebene
7. Beheben der Bugs im Modell
8. Eingabe der Werte in der Kostenebene
9. Testen des Modells durch Berechnungsdurchlauf in allen Ebenen und Perioden
10. Beheben der Bugs im Modell
11. Plausibilitätscheck des Modells mithilfe des ERP Systems (Vergleich Kalkulation des ERP Systems mit den Werten aus dem Modell)
12. Mit den aus dem Modell erhaltenen Darstellungen Optimierungspotential im Produktionssystem suchen

Diese Vorgehensweise erleichtert das Aufbauen der Modelle und das Finden von Fehlern, die beim Modellieren entstehen. Bei der Anwendung der Methode in der Praxis wird nach dieser beschriebenen Vorgehensweise vorgegangen. Diese wurde im Zuge einer praktischen Anwendung erarbeitet und basiert auf der aus der Norm beschriebenen Vorgehensweise von Abbildung 1 „Methodisches Vorgehen zur Erstellung einer Stoffflussanalyse“.

3.5 Prinzipieller Aufbau der Methode

In dieser Methode werden, um einen möglichst guten Einblick in das Produktionssystem zu erhalten, drei Modelle erstellt. Im ersten Modell wird der Produktionsverlauf von einem Referenzprodukt mit der Stückzahl 1 abgebildet, im zweiten Modell werden die Auswirkungen von Unsicherheiten im Modell des Referenzproduktes analysiert und im dritten Modell wird ein Halbfabrikat mit hoher Stückzahl über einen Aussagekräftigen Zeitraum beobachtet, um Einblicke in den quantitativen Materialfluss des Produktionssystems zu erhalten.

3.5.1 Referenzprodukt

Die Auswahlkriterien des Referenzproduktes stehen in starker Abhängigkeit zur Zielsetzung der Anwendung der Methode. Als Referenzprodukt wird entweder ein Produkt gewählt, bei dem der Produktionsablauf optimiert werden soll, oder ein Produkt, durch welches auf andere Produkte aus dem Portfolio des Unternehmens geschlossen werden kann. Bei diesem Modell werden alle benötigten Rohstoffe und Halbfabrikate auf die Menge eines produzierten Stückes zurückgerechnet. Hier wird ein Ablaufschema des Produktionssystems modelliert, wobei die benötigte Produktionszeit nicht relevant ist. Ziel ist, aus diesem Modell eine übersichtliche Darstellung des Produktionssystems zu erhalten, daher werden Produktionsprozesse, die örtlich an der gleichen Stelle stattfinden, in Subsysteme zusammengefasst. Input dieses Systems sind alle für die Herstellung des Produktes benötigten Stoffe. Abfälle und das fertige Produkt sind der Output. Erkenntnisse über die Verläufe der Material- und Kostenflüsse im Produktionssystem sind das gewünschte Ergebnis.

Bei den Prozesskosten wird von einer Standardproduktionsmenge auf ein Stück linear zurückgerechnet, da sonst die Rüstkosten das gesamte Modell verfälschen würden. Gleich wird bei den Kosten für Rohstoffe und Entsorgung vorgegangen.

Durch die gewonnenen Abbildungen soll auf potentielle Kontrollpunkte für Ausschuss geschlossen werden können. Darüber hinaus ist schnell ersichtlich, ob im Produktionsprozess Handling-Probleme durch große Massenflüsse auftreten können, und wenn ja, ab welchen Produktionsschritten dies der Fall ist. Durch das Ablaufschema ist auch sofort der optimale Materialfluss durch die Produktionsstätte ersichtlich.

Zur Bewertung der gesetzten Maßnahmen und zum Erfassen der Ausgangssituation werden die in Kapitel 3.6 beschriebenen Kennzahlen für einen Vorher - Nachher - Vergleich herangezogen. Resultate von der Anwendung in der Praxis dieses Modells findet man in Kapitel 4.1 Referenzprodukt.

3.5.2 Risikoabschätzung durch Eingabe von Unsicherheiten

Durch diese Modelle können Schwerpunkte für den Einkauf gesetzt, Toleranzen in den Fertigungsvorschriften definiert und auch die Priorität der einzelnen Rohstoffe festgelegt werden. Eine Strategie für die Entwicklung zur Findung von Ersatzrohstoffen kann durch die definierte Priorität der Rohstoffe fixiert werden.

In diesem Modell wird das Ablaufschema des Referenzproduktes in den Inputwerten mit Unsicherheiten versehen. Es werden sowohl auf der Güterebene als auch auf der Kostenebene Inputflüsse mit Unsicherheiten versehen.

Dadurch werden mehrere Szenarien berechnet, um Erkenntnisse über die Auswirkung von Unsicherheiten in der Güter- und Kostenebene zu erlangen. In der Güterebene ist jedoch sehr darauf zu achten, dass dadurch nur die Auswirkung auf die Masse ersichtlich ist und nicht auf andere physikalische Eigenschaften.

Die Höhe der Unsicherheiten und die Wahl der betroffenen Flüsse werden bei jeder Anwendung individuell bestimmt. Aus den Ergebnissen dieser Szenarien werden die Produkte auf Grund ihrer Auswirkung auf das Endprodukt kategorisiert. Durch diese Kategorisierung können strategische Entscheidungen für den Einkauf getroffen werden und die Fertigungstoleranzen angepasst werden um dadurch den Ausschuss durch Fehlproduktionen zu minimieren.

Resultate von der Anwendung in der Praxis dieser Modelle findet man in Kapitel 4.2 Referenzprodukt mit Unsicherheiten.

3.5.3 Halbfabrikate über Beobachtungszeitraum

Durch die Auswertung der quantitativen Massen- und Kostenflüsse eines Halbfabrikates über einen aussagekräftigen Zeitraum kann auf die Qualität der Planung geschlossen werden. Die Anzahl und Dauer der Perioden werden vor jeder Anwendung individuell definiert und von der Planungsdauer im Unternehmen abhängig gemacht. Es ist wichtig darauf zu achten, dass durch die Wahl der Periodendauer keine Kompensation von Güterbewegungen zustande kommt.

Zusätzlich zu den STAN Darstellungen der einzelnen Perioden werden hier noch die zeitlichen Verläufe der Produktionsmengen und des Lagerstandes sowohl auf der Massen- als auch auf der Kostenebene in Excel dargestellt.

In der dritten Ebene werden die Zeitaufwände der einzelnen Produktionsschritte dargestellt. Dadurch ist sowohl der gesamte Zeitaufwand eines produzierten Halbfabrikates, als auch der benötigte Zeitaufwand an den einzelnen Arbeitsplätzen ersichtlich. Durch Letzteres ist sehr leicht die Auslastung der einzelnen Arbeitsplätze erkennbar.

Durch die Berechnung der Kennzahlen in Kapitel 3.6 werden die Ursachen für die Kosten des Produktionsprozess der Halbfabrikate sichtbar. Aus diesen Kennzahlen können Strategien zur Kostensenkung entwickelt und nach der Anwendung bewertet werden.

Resultate von der Anwendung dieses Modells in der Praxis findet man in Kapitel 4.2 Referenzprodukt mit Unsicherheiten.

3.6 Kennzahlen

Durch die Berechnung von Kennzahlen wird am Beginn die Ausgangssituation dargestellt und über die gewünschte Entwicklung werden die Ziele für die Optimierung definiert. Nach den gesetzten Maßnahmen werden mit den Kennzahlen diese bewertet.

3.6.1 Ökologische Kennzahlen

Die Ökologischen Kennzahlen beziehen sich immer auf die Produktmasse. Unter Produktmasse wird das zu verkaufende Produkt oder Halbfabrikat verstanden. Durch diese Kennzahlen sollen Aussagen über die Auswirkung auf die Umwelt getroffen werden. Bei großen Abfallmengen wird die Umwelt stärker belastet als bei kleinen. Eine Bewertung der errechneten Kennzahlen kann nur durch einen Vergleich mit einer verwandten Industrie getroffen werden. Die Kennzahlen dienen primär dazu, umgesetzte Maßnahmen durch einen Vorher – Nachher Vergleich zu bewerten.

Materialeinsatz ökologisch:

Es wird das Verhältnis zwischen der Masse aller für die Produktion benötigten Materialien und der Masse des Endproduktes gebildet. Bei der Produktmasse (Masse des Endproduktes) werden nur die Rohstoffe des Produktes die auch im Produkt verbleiben, berücksichtigt.

$$\text{Materialeinsatz ökologisch} = \frac{\text{Gesamtmasse}}{\text{Produktmasse}}$$

Formel 2 Materialeinsatz ökologisch

Hilfsstoffanteil:

Diese Kennzahl gibt Auskunft darüber, welche Abstoffmenge (Stoffe, die für die Produktion benötigt werden, aber danach nicht im Produkt verbleiben und keine Rohstoffe sind) für die Produktion benötigt wird.

$$\text{Hilfsstoffanteil} = \frac{\text{Hilfsstoffmenge}}{\text{Produktmasse}}$$

Formel 3 Hilfsstoffanteil

Lösemittelanteil:

Da die Entsorgung von Lösemitteln sowohl in flüssiger als auch in gasförmiger Form mit sehr vielen behördlichen Auflagen verbunden ist, wird diese Kennzahl berechnet.

$$\text{Lösemittelanteil} = \frac{\text{Lösemittelmenge}}{\text{Produktmasse}}$$

Formel 4 Lösemittelanteil

Rohstoffabfallanteil:

Diese Kennzahl ist das Verhältnis der Menge an Rohstoffe, die als Abfall entsorgt werden müssen, aber zur Produktion benötigt werden und der Produktmasse

$$\text{Rohstoffabfallanteil} = \frac{\text{Rohstoffabfallmenge}}{\text{Produktmasse}}$$

Formel 5 Rohstoffabfallanteil

Zu beachten ist, dass durch ein Senken der Kennzahl einer Kennzahl eine andere Kennzahl automatisch ansteigt, da die Summe aller Kennzahlen 100% ergeben muss.

3.6.2 Ökonomische Kennzahlen

Diese Kennzahlen beziehen sich auf die Gesamtkosten. Aufgrund der Kennzahlen kann die Verteilung der Kosten im Produkt erkannt werden, über diese Verteilung können Strategien zur Optimierung festgelegt werden. Nach dem Umsetzen der beschlossenen Maßnahmen können die Kennzahlen zur Bewertung herangezogen werden. Für einen Vergleich mit anderen Industrien mit ähnlichen Produkten können die Kennzahlen auch herangezogen werden. Die Kennzahlen werden in Prozent angegeben.

Materialeinsatz ökonomisch:

Durch diese Kennzahl wird die Abhängigkeit der Gesamtkosten von den Rohstoffkosten ermittelt. Dadurch kann festgestellt werden, wie stark die Gesamtkosten von den Rohstoffkosten abhängig sind.

$$\text{Materialeinsatz ökonomisch} = \frac{\text{Rohstoffkosten}}{\text{Gesamtkosten}}$$

Formel 6 Materialeinsatz ökonomisch

Prozesskostenanteil:

Als Argumentationsgrundlage für eine Optimierung des Produktionsprozesses direkt bei den einzelnen Arbeitsplätzen kann diese Kennzahl verwendet werden. Bei einem hohen Prozesskostenanteil muss versucht werden, durch eine Prozessoptimierung die Prozesskosten und damit die Gesamtkosten zu senken.

$$\text{Prozesskostenanteil} = \frac{\text{Prozesskosten}}{\text{Gesamtkosten}}$$

Formel 7 Prozesskostenanteil

Lösemittelkostenanteil:

Diese Kennzahl gibt Auskunft über die Rolle der Lösemittelkosten im Produktionsprozess. Lösemittel sind ein mit sehr vielen Auflagen für Lagerung und Entsorgung verbundener Hilfsstoff. Bei einem zusätzlich noch hohen Lösemittelkostenanteil muss eine Strategie für einen Ersatzstoff gefunden werden.

$$\text{Lösemittelkostenanteil} = \frac{\text{Lösesmittelkosten}}{\text{Gesamtkosten}}$$

Formel 8 Lösemittelkostenanteil

Fester Hilfskostenanteil:

Das Verhältnis der festen Hilfsstoffkosten zu den Gesamtkosten gibt Auskunft über ein mögliches Optimierungspotential bei Kosten der nicht direkt in das Endprodukt einfließenden Materialien.

$$\text{Fester Hilfsstoffkostenanteil} = \frac{\text{Feste Hilfsstoffkosten}}{\text{Gesamtkosten}}$$

Formel 9 Fester Hilfsstoffkostenanteil

Hilfsstoffkostenanteil:

Die Hilfsstoffkosten ergeben sich aus der Summe der Lösemittelkosten und der festen Hilfsstoffkosten. Die Kennzahl zeigt, wie stark sich die für die Produktion notwendigen - aber nicht im Produkt enthaltenen – Stoffe in den Gesamtkosten niederschlagen.

$$\text{Hilfsstoffkostenanteil} = \frac{\text{Hilfsstoffkosten}}{\text{Gesamtkosten}}$$

Formel 10 Hilfsstoffkostenanteil

Entsorgungskostenanteil:

Der Entsorgungskostenanteil ergibt sich aus dem Verhältnis Entsorgungskosten und Gesamtkosten.

$$\text{Entsorgungskostenanteil} = \frac{\text{Entsorgungskosten}}{\text{Gesamtkosten}}$$

Formel 11 Entsorgungskostenanteil

Zu beachten ist, dass durch das Senken einer Kennzahl eine andere Kennzahl automatisch ansteigt, da die Summe aller Kennzahlen 100% ergeben muss.

4 Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

Für den Test dieser Methode in der Praxis wurde diese bei der Firma ISOVOLTA AG am Standort Wiener Neudorf angewendet und getestet. Die Ergebnisse des Tests trugen zum einen im Unternehmen zum besseren Verständnis des Produktionsprozesses bei und zum anderen gaben sie der Methode den letzten Feinschliff. Getestet wurde für ein Produkt der Luftfahrtindustrie. Die Daten und Darstellungen im folgenden Teil stehen jedoch aufgrund der Wahrung der Betriebsgeheimnisse in keinem Zusammenhang zu den tatsächlichen Produktionsabläufen. Alle hier wiedergegebenen Darstellungen und Daten stehen in keinem Zusammenhang zum tatsächlichen Produktionsprozess der Firma ISOVOLTA in Wiener Neudorf.

Produktionssysteme sind in der Praxis nicht immer auf den ersten Blick übersichtlich und leicht verständlich. Vor allem für Vorstandsmitglieder und Mitglieder der Geschäftsführung ist es wichtig, einen Überblick über die Produktionssysteme zu haben, da diese die strategischen Entscheidungen treffen. Aufgrund dessen ist das Hauptziel, ein übersichtliches und transparentes Entscheidungsinstrument zu schaffen. In der Anwendung in der Praxis wird überprüft, ob die entwickelte Methode diese Eigenschaften aufweist.

In diesem Kapitel werden alle drei Modelle beschrieben und dargestellt. Es wird auch eine Interpretation über die Aussage der Abbildungen abgegeben. Beim Aufbau der Modelle wird wie in Kapitel 3.4.4 beschrieben vorgegangen. Als erster Schritt wird abgegrenzt, welches System dargestellt werden soll. Bei dieser Abgrenzung ist zu beachten, dass ein Kompromiss zwischen Komplexität des Modells und Modellierungsaufwand gefunden werden muss. Einheiten und Perioden werden nach denen im Unternehmen verwendeten Einheiten und Perioden verwendet. Über die Ebenen wird bestimmt was alles dargestellt werden soll (Materialflüsse, Kostenflüsse und Zeitflüsse). Anschließend werden alle für den Produktionsprozess benötigten Prozesse und Lager abgebildet, wobei beim Modell Referenzprodukt keine Lager abgebildet werden. Durch diese Darstellung ist schon ein Ablaufschema des Produktionssystems ersichtlich. Durch die Verbindung der Prozesse mit den Flüssen wird das Schema fertig gestellt. Nun werden alle Ebenen mit Werten versehen. Durch einen Berechnungsdurchlauf nach Fertigstellung jeder einzelnen Ebene können Fehler im Modell frühzeitig erkannt werden. Zum Abschluss wird versucht,

mit den aus dem Modell erhaltenen Abbildungen Optimierungspotentiale im Produktionsprozess zu finden.

4.1 Referenzprodukt

Bei der Wahl des Referenzproduktes (Auswahlkriterien) fiel die Entscheidung auf ein Standardprodukt mit durchschnittlichen Produktionskosten, da dadurch Aussagen getroffen werden konnten, die auch für andere Produkte zutreffen. Des Weiteren handelt es sich bei dem Produktionssystem der praktischen Anwendung um eine Klein- und Kleinst-Serienfertigung aus einem großen Produktportfolio. Daher war das Ziel der Auswahl, ein Produkt zu finden, mit großen Ähnlichkeiten zu möglichst vielen anderen Produkten. Die Nummerierung der Halbfabrikate erfolgte beim Aufbau des Modells und bei der Anonymisierung. Die Nummern wurden zufällig vergeben.

Die Periodendauer wird in diesem Modell mit einem Stück gleichgesetzt. Als Einheiten dafür werden für Güter kg verwendet und für Kosten €. Durch die einheitliche Farbwahl der verschiedenen Materialarten wird ein schnelles Erkennen ermöglicht.

4.1.1 Darstellung der Massenflüsse des Referenzproduktes

Diese Darstellung dient als Grundlage zur Verbesserung des Materialflusskonzeptes. Das Lagerkonzept wird aufgrund der Vielfalt und Massen der zu bewegenden Hilfs- und Rohstoffe optimiert. Eine solche Optimierung sieht zum Beispiel vor, Lagerorte örtlich näher an Produktionsprozesse zu verlegen. Der Materialfluss kann durch eine Positionsänderung von Maschinen optimiert werden. Ziel ist es hier, möglichst kurze Wege zu schaffen.

In Abbildung 6 werden die Massenflüsse für den gesamten Produktionsablauf des Referenzproduktes gezeigt. Auf der linken Seite und von oben kommen die Rohstoffe und Hilfsstoffe in das System. Auf der rechten Seite verlässt das Endprodukt das System. Abfälle und verbrauchte Hilfsstoffe werden in der Wastemanagementbox und in der thermischen Nachverbrennung gesammelt. Die Massenflüsse werden in kg pro produziertem Stück Endprodukt dargestellt. Durch die Massenflüsse kann auf Handlingsprobleme in der Produktion geschlossen werden. Ab Halbfabrikat 5 und Halbfabrikat 11 ist hier ein problemloses Handling nicht mehr

möglich. Es ist daher dafür Sorge zu tragen, dass ab diesen Produktionsschritten Hebezeuge zur Unterstützung im Handling bereitstehen. Des Weiteren wird diese Darstellung dafür genutzt, um den optimalen Materialfluss durch die Produktion zu ermitteln. Die Aufstellung der Maschinen ist idealerweise so zu wählen, dass direkte Wege mit wenig Kreuzungen entstehen.

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

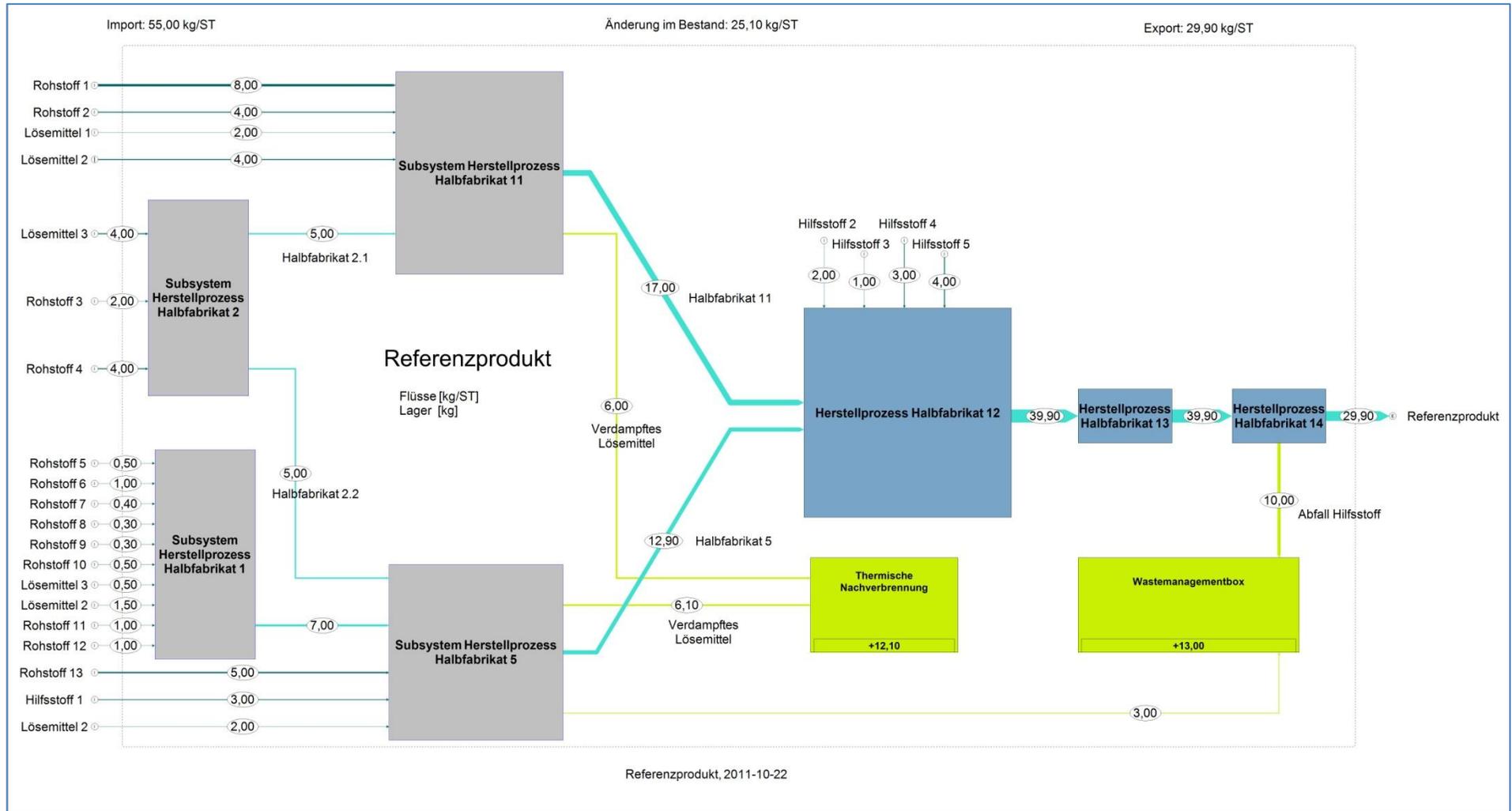


Abbildung 9 Güterfluss Referenzprodukt

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

In diesem Subsystem (Abbildung 10) werden mehrere Arbeitsplätze dargestellt die örtlich im gleichen Raum vorzufinden sind. Es werden hier 10 Rohstoffe und Hilfsstoffe in 3 Produktionsprozessen zu einem Halbfabrikat verarbeitet. Hier können Vorteile durch ein intelligentes Lagersystem erwartet werden. Automatische Dosierung der Rohstoffe mit einer geringen Abweichung senkt den Rohstoffverbrauch der einzelnen Rohstoffe und verringert die Wahrscheinlichkeit für Ausschuss durch Fehler in der Zusammensetzung. Es ist aufgrund der hohen Rohstoffvielfahl eine Optimierung des Produktionsprozesses durch eine Senkung der Rohstoffentnahme – Zeiten wahrscheinlich. Die tatsächlichen Vorteile können erst nach Umsetzung eines derartigen durch einen Vorher – Nachher Vergleich ermittelt werden.

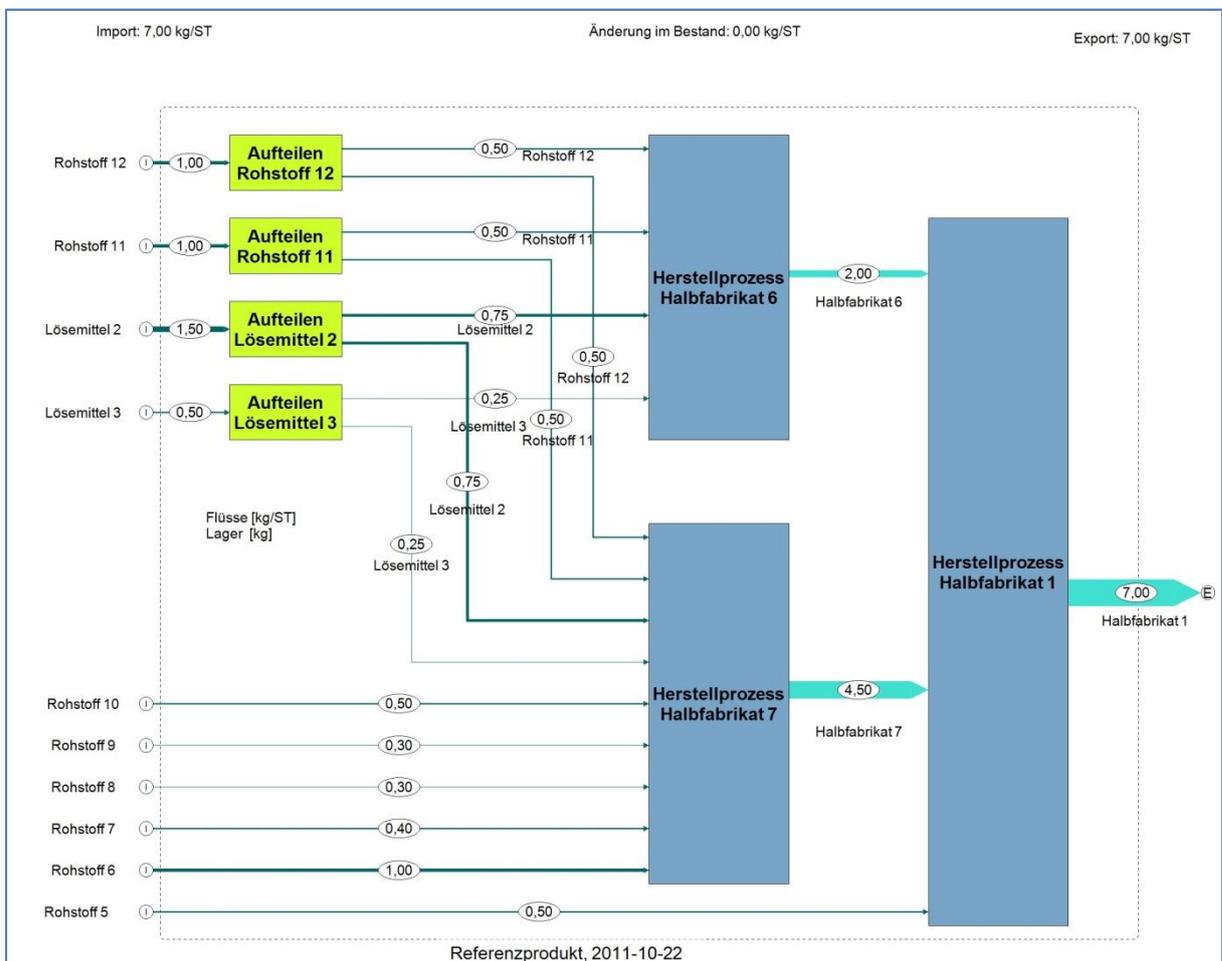


Abbildung 10 Güterfluss Herstellprozess Halbfabrikat 1

Bei diesem Herstellprozess (Abbildung 11) wird ein Halbfabrikat aus zwei Rohstoffen und einem Lösemittel hergestellt. Am Ende dieses Prozesses wird das Halbfabrikat für die weitere Verarbeitung mengenmäßig auf 2 Teile aufgeteilt. Es ist hier auf jeden Fall darauf zu achten, dass hier durch die Aufteilung der Produktionsfluss nicht unterbrochen werden muss. Durch die Einbringung von Lösemittel bei diesem Prozess ist auf die Einhaltung der gesetzlichen Richtlinien zum Umgang mit explosionsgefährdeten Stoffe zu achten.

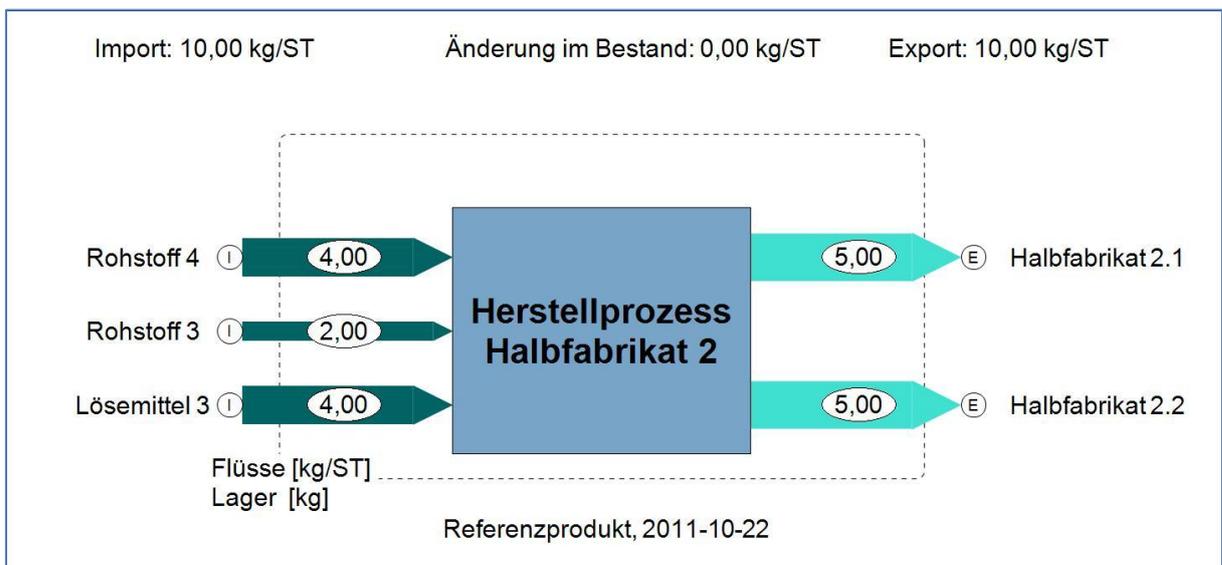


Abbildung 11 Güterfluss Herstellprozess Halbfabrikat 2

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

Halbfabrikat 5 (Abbildung 12) setzt sich aus Halbfabrikat 3 und Halbfabrikat 4 zusammen. Es sollte Ziel der Planung sein, dass diese beiden Halbfabrikate möglichst zeitnah zum Produktionsprozess von Halbfabrikat 5 fertig gestellt werden, um den benötigten Platzbedarf so zu minimieren. Die Voraussetzung für diese Optimierung ist natürlich die Verfügbarkeit von Halbfabrikat 8 und Halbfabrikat 2. Darüber hinaus wird dieser Produktionsbereich auf eine möglichst geradlinige Durchführung optimiert um dadurch die Rüstzeiten und die daraus resultierenden Maschinenstillstand – Zeiten gering zu halten.

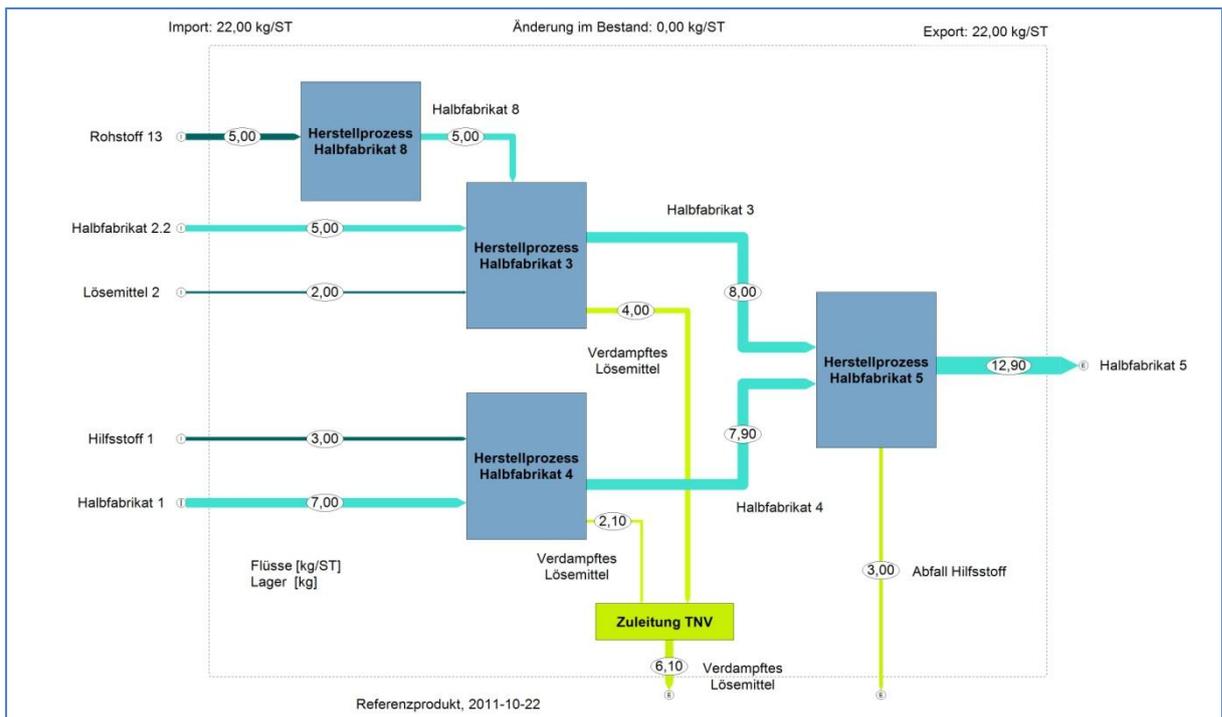


Abbildung 12 Güterfluss Herstellprozess Halbfabrikat 5

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

Die Erkenntnis aus Abbildung 13 ist, dass durch das hohe Gewicht der einzelnen Halbfabrikate die Wege kurz gehalten werden. Es wird auf eine Nähe der Herstellprozesse von Halbfabrikat 10 und Halbfabrikat 11 zur TNV (Thermischen Nachverbrennung) Wert gelegt. Eine „Just in Sequence“ Produktion wird hier aufgrund der hohen Massen Vorteile ergeben, da dadurch Lagerfläche und Handlingsaufwand minimiert werden können.

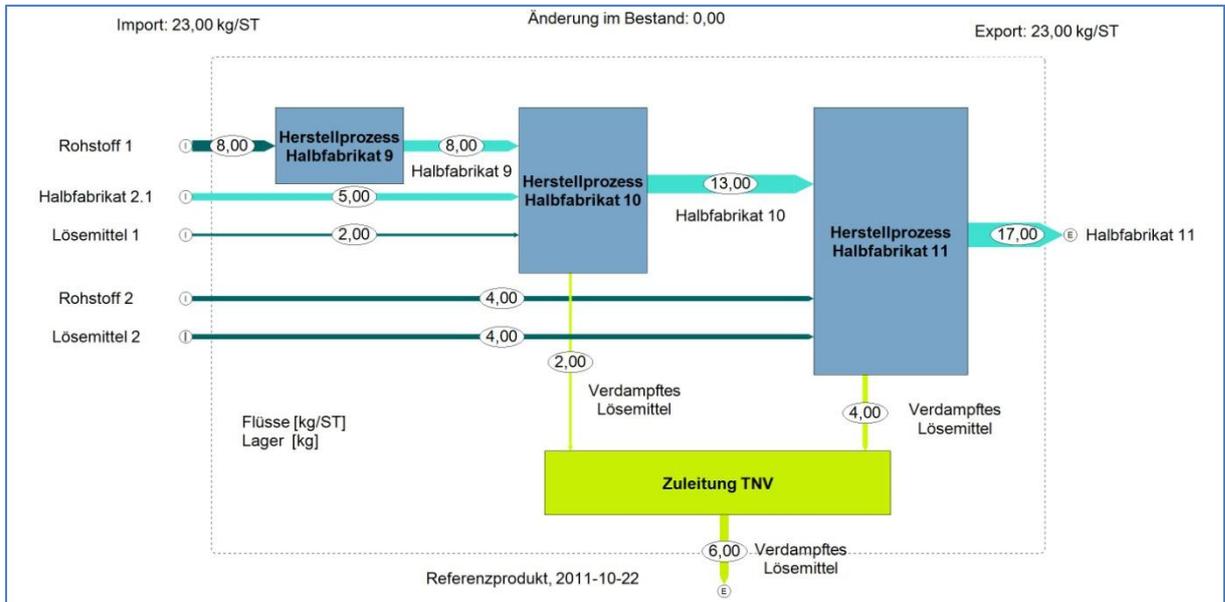


Abbildung 13 Güterfluss Herstellprozess Halbfabrikat 11

4.1.2 Darstellung der Kostenflüsse des Referenzproduktes

Im Produktionsablaufschemata werden nun anstelle der Güter die Kostenflüsse dargestellt. Es wird versucht, aufgrund dieser Darstellung Optimierungs- und Einsparungspotentiale zu finden. Es wird darüber hinaus noch versucht, den Nutzen dieser Potentiale aufzuzeigen. Durch diese Abbildung kann sehr schnell ein Überblick über das Produktionssystem gewonnen werden und erkannt werden, an welchen Stellen hohe Kosten entstehen. (Durch die Sankey Darstellung ist dies schnell ersichtlich.)

Aus Abbildung 14 kann der Nutzen der Einführung einer Kontrolle vor dem Herstellprozess von Halbfabrikat 12 abgeleitet werden. Durch die Einbringung von Ausschussmaterial in diesen Produktionsschritt entstehen überproportional hohe Kosten. Durch die Optimierung können die Ausschusskosten gegenüber der Variante der Kontrolle nach Herstellprozess 12 um 62% gesenkt werden.

Die weiteren Erkenntnisse aus dieser Darstellung liegen in der Erkennung, an welchen Stellen im Produktionssystem Kosten entstehen und durch die Sankey Darstellung die Auswirkung dieser Kosten. So kann schnell erkannt werden, dass die Entsorgungskosten im Vergleich zu den Gesamtkosten sehr gering ausfallen. Der Einfluss der beiden Hauptrohstoffe (Rohstoff 1 und Rohstoff 13), welche über 20% der Gesamtkosten ausmachen, ist schnell zu erkennen.

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

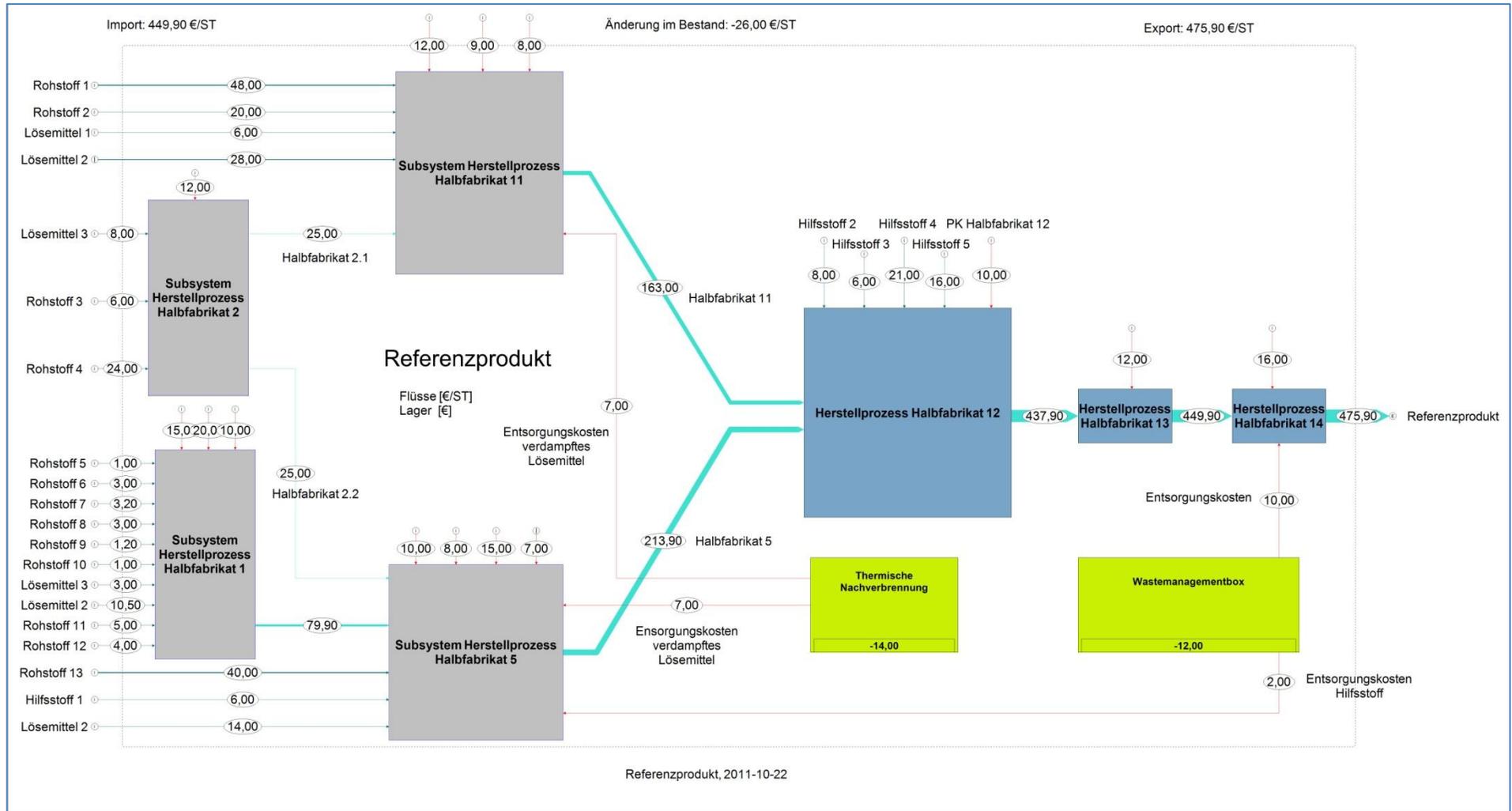


Abbildung 14 Referenzprodukt Kosten

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

In diesem Subsystem (Abbildung 15) ist klar ersichtlich, dass vor dem Herstellprozess für Halbfabrikat 1 eine Kontrolle der zuvor produzierten Halbfabrikate durchzuführen ist. Durch die Verschiebung der Kontrolle vor dem Herstellprozess von Halbfabrikat 1 können die durch Halbfabrikat 7 verursachten Fehlproduktionen von Halbfabrikat 1 um 67% gesenkt werden. Mit einem Anteil von 24% an den Gesamtkosten dieses Halbfabrikats wird hier nicht primär eine Optimierung des Produktionsprozesses angestrebt, sondern versucht, die Kosten von Rohstoff 4, der bei diesem Subsystem einen Anteil von 48% besitzt, zu senken.

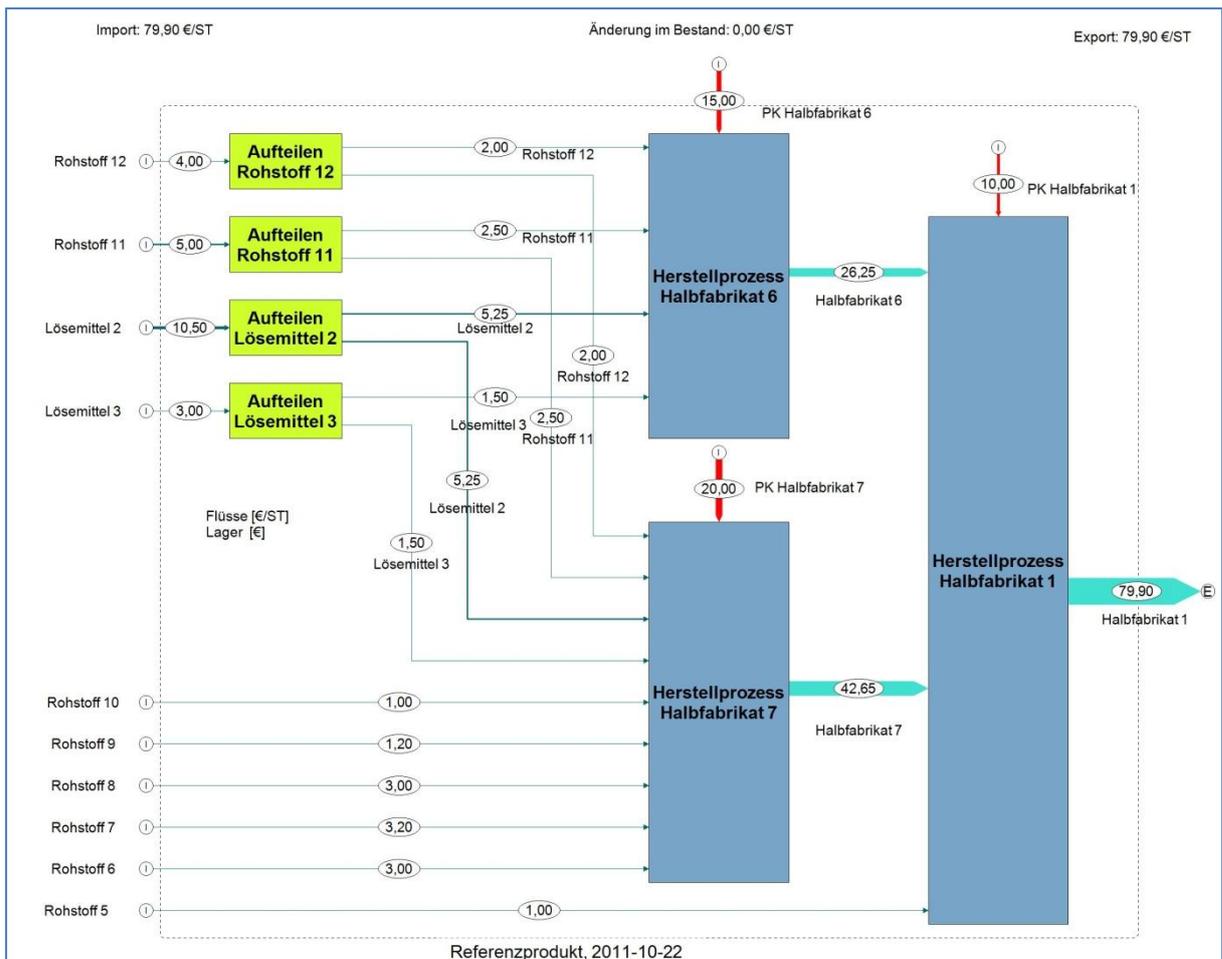


Abbildung 15 Herstellprozess Halbfabrikat 1 Referenzprodukt Kostenebene

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

Aus Abbildung 16 geht hervor, dass der Rohstoff 4 eine wesentliche Rolle bei den Herstellkosten dieses Halbfabrikats spielt. Die Rolle der Prozesskosten ist in diesem Herstellprozess keine wesentliche. Eine Senkung der Herstellkosten von Halbfabrikat 2.1 und 2.2 kann am einfachsten durch eine Senkung der Kosten des Rohstoffes 4 erreicht werden.

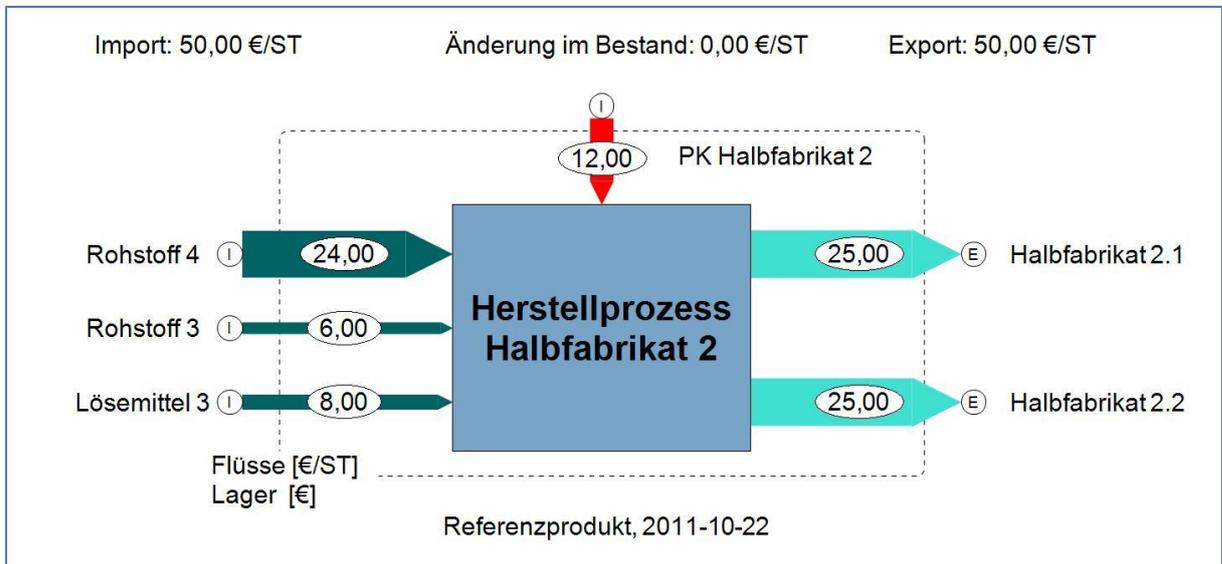


Abbildung 16 Herstellprozess Halbfabrikat 2 Referenzprodukt Kostenebene

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

Im Subsystem zur Herstellung von Halbfabrikat 5 (Abbildung 17) ist der letzte Prozessschritt entscheidend. Daher sollte vor diesem eine Qualitätskontrolle durchgeführt werden, um Ausschuss durch die Vorprodukte zu vermeiden. Durch diese Vorkontrolle können Ausschusskosten, welche durch die Vorprodukte entstehen, um bis zu 49% gesenkt werden. Eine Senkung der Prozesskosten führt hier zu keiner schnellen und großen Einsparung, da diese nur einen Anteil von 18% an den Herstellkosten von Halbfabrikat 5 besitzen.

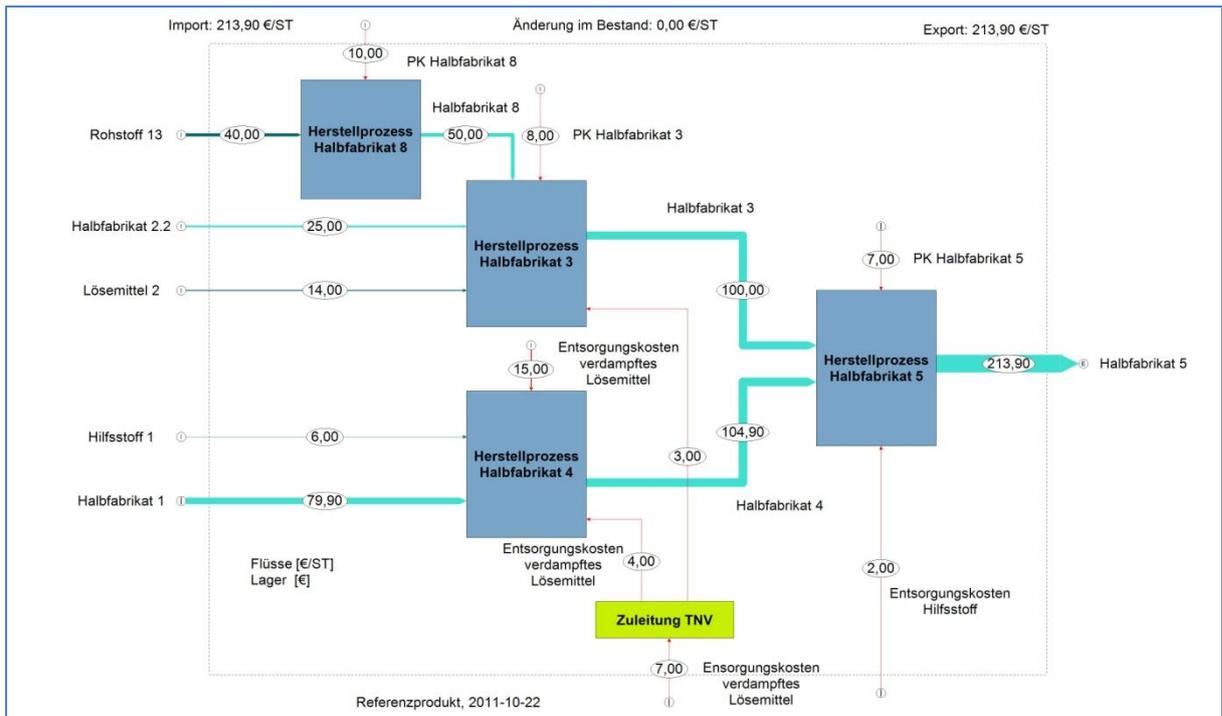


Abbildung 17 Herstellprozess Halbfabrikat 5 Referenzprodukt Kostenebene

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

Das in Abbildung 18 dargestellte Subsystem zur Herstellung von Halbfabrikat 11 wird ebenfalls mit einer Kontrolle vor Herstellprozess 11 versehen. Die Prozesskosten spielen mit 17% keine wesentliche Rolle, daher konzentriert man sich auf Rohstoff 4, der mit einem Kostenanteil von 29% einen hohen Anteil an den Gesamtkosten dieses Halbfabrikats besitzt.

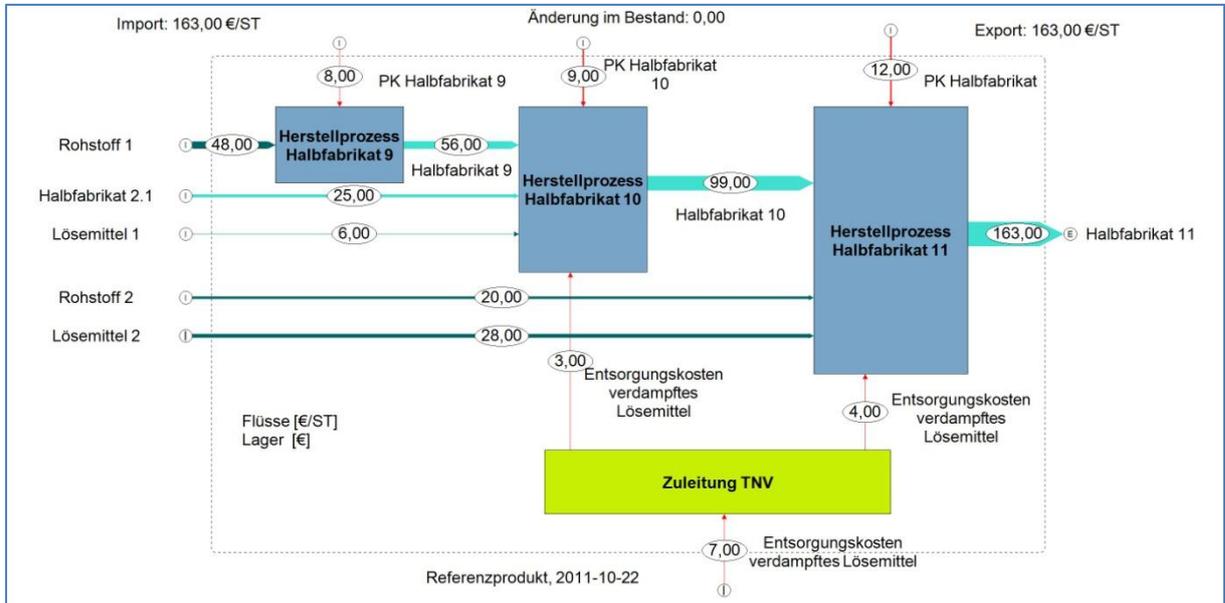


Abbildung 18 Herstellprozess Halbfabrikat 11 Referenzprodukt Kostenebene

4.1.3 Kennzahlen Referenzprodukt

Durch die Berechnung der Kennzahlen wird eine Ausgangssituation ermittelt. Anhand dieser wird als erstes eine Optimierungsstrategie mit Zielen der Kennzahländerung festgelegt. Danach werden Maßnahmen gesetzt und durch eine neuerliche Berechnung der Kennzahlen bewertet. Die hier berechneten Kennzahlen stehen mit der Fertigung bei der Firma ISOVOLTA AG in keinem Zusammenhang.

Ökologische Kennzahlen

Materialeinsatz ökologisch	276%
Hilfsstoffanteil	125%
Lösemittelanteil	60%
Rohstoffabfallanteil	50%

Tabelle 1 Ökologische Kennzahlen

Durch diese Kennzahl ist klar ersichtlich, dass zur Herstellung dieses Produktes fast die dreifache Masse als die des Endproduktes verwendet werden muss. Der Lösemittelanteil beträgt ebenfalls beachtliche 60%. Die Bewertung der Kennzahlen kann nur über den Vergleich mit verwandten Industrien getroffen werden. Die Kennzahlen können, wenn kein Vergleich möglich ist, nur zur Bewertung von gesetzten Optimierungsmaßnahmen verwendet werden.

Ökonomische Kennzahlen:

Materialeinsatz ökonomisch	33%
Prozesskostenanteil	34%
Hilfsstoffkostenanteil	28%
Lösemittelkostenanteil	15%
Fester Hilfsstoffkostenanteil	13%
Entsorgungskostenanteil	5%

Tabelle 2 Ökonomische Kennzahlen

Aus den ökonomischen Kosten geht hervor, dass die Rohstoff-, Prozess- und Hilfsstoffkosten bei diesem Produkt annähernd gleich verteilt sind. Über die Verteilung dieser Kosten können Maßnahmen zur Kostensenkung priorisiert werden.

4.2 Referenzprodukt mit Unsicherheiten

Durch Erkenntnisse aus der Auswirkung von Unsicherheiten in den Eingangsgrößen können Strategien für die Sicherung des Produktionsprozesses und der Sicherung des Ergebnisses getroffen werden. Diese Risikoabschätzung macht das Risiko kalkulierbar und somit bietet sich die Möglichkeit, Strategien zur Minimierung dieses zu entwickeln.

Die Unsicherheiten werden in der Software STAN über Normalverteilung berechnet, daher muss immer eine normalverteilte Unsicherheit angegeben werden. Um die Auswirkung von Unsicherheiten in den Eingangsgrößen zu sehen, werden mehrere Szenarien durchgespielt.

Szenario 1: 10% Unsicherheit in der Güterflussebene

Hier werden alle Input - Güterflüsse der Rohstoffe, Hilfsstoffe und Lösemittel mit einer Unsicherheit von $\pm 10\%$ versehen. Diese stellt die Unsicherheit dar, welche durch Fertigungsungenauigkeiten ausgelöst werden können dar. Die Aussage dieses Szenarios bietet eine Hilfestellung bei der Festlegung der Fertigungstoleranzen in den Fertigungsvorschriften. Dieses Szenario eignet sich, um Auswirkungen von Fertigungsungenauigkeiten abschätzen zu können.

Szenario 2: 10% Unsicherheiten in allen Einkaufspreisen

Hier werden alle Kosten pro kg von Input - Strömen der Rohstoffe, Hilfsstoffe und Lösemittel mit einer Unsicherheit von $\pm 10\%$ versehen. Damit werden die Schwankungen der Einkaufspreise simuliert. Mithilfe dieses Szenarios kann festgelegt werden ab welchen Schwankungen der Einkaufspreise von der Einkaufs- abteilung reagiert werden muss.

Szenario 3: 45% Unsicherheit bei den beiden Hauptrohstoffen

Eine Schwankung von 45% der Einkaufspreise der beiden Hauptrohstoffe kann zustande kommen, wenn diese von einem Monopolisten bezogen wird und es verabsäumt wurde, einen alternativen Lieferanten oder Rohstoff zu finden. Durch dieses Szenario kann simuliert werden, wie stark die Abhängigkeit von Monopolisten, welche die Preise sprunghaft erhöhen können, tatsächlich ist.

Szenario 4: 20% Unsicherheit in den Prozesskosten

Durch dieses Szenario wird eine Schwankung der Abläufe in der Produktion simuliert. Durch dieses Szenario wird auch die Abweichung von Herstellkosten, welche durch längere Produktionszeiten entstehen simuliert.

	Unsicherheit Referenzprodukt	
	Güterebene	Kostenebene
Szenario 1	3,70%	1%
Szenario 2	0%	1,8%
Szenario 3	0%	6,4%
Szenario 4	0%	1,9%

Tabelle 3 Auswirkung der Unsicherheiten

Tabelle 3 zeigt die Auswirkung der Unsicherheiten der einzelnen Szenarien auf das Endprodukt. Es ist ersichtlich, dass die Auswirkung von Szenario 3 mit einer Erhöhung der Herstellkosten um 6,4% das Ergebnis deutlich senken kann. Es muss hier das Ergebnis des Produktes beim Verkauf mit dieser Schwankung gegenübergestellt werden, um eine Abschätzung des Risikos zu erreichen.

4.3 Halbfabrikate über einen Beobachtungszeitraum

Es wird der Prozess eines Halbfabrikates über einen Beobachtungszeitraum dargestellt. Um diese Darstellung übersichtlich zu machen, wird dieses System wieder in Subsysteme unterteilt. Die Wahl des Halbfabrikates hängt von der Stückzahl und der Aussagekraft ab. Aus Produkten, welche in Serienproduktion hergestellt werden, können die meisten Erkenntnisse gewonnen werden. Die Wahl der Periodenlänge steht im direkten Zusammenhang mit der Planungsdauer, bei einer Monatsplanung wird die Periodendauer mit einem Monat festgelegt. Die Anzahl der Perioden ist so zu wählen, dass ein Aussagekräftiger Beobachtungszeitraum zustande kommt und wurde in diesem Modell mit 10 Monaten festgelegt.

4.3.1 Darstellung des Produktionssystems

Bei diesen Abbildungen sind nicht nur der Materialfluss, sondern auch die Lagerstellen im Produktionsprozess dargestellt. Hier wird ersichtlich, dass an fünf Stellen im Produktionsprozess Zwischenlager vorhanden sind. Über die Güterflüsse (Abbildung 19) kann auf die benötigten Lagergrößen geschlossen werden und über die Kostenflüsse auf das dadurch entstandene Working Capital geschlossen werden (Abbildung 20). Zusätzlich sind auch noch die anfallenden Entsorgungskosten die trotz dem kleinen Verhältnis zum Endprodukt in absoluten Zahlen, mit über 50 T€ pro Monat sehr hoch ausfallen. (Abbildung 20)

Die in Abbildung 19 dargestellten Materialflüsse zeigen die in einer Periode durch die Produktion zu bewegendes Güter. Über diese Güterbewegungen werden Rückschlüsse auf die Auslegung der benötigten Transportmittel und Hebezeuge getroffen.

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

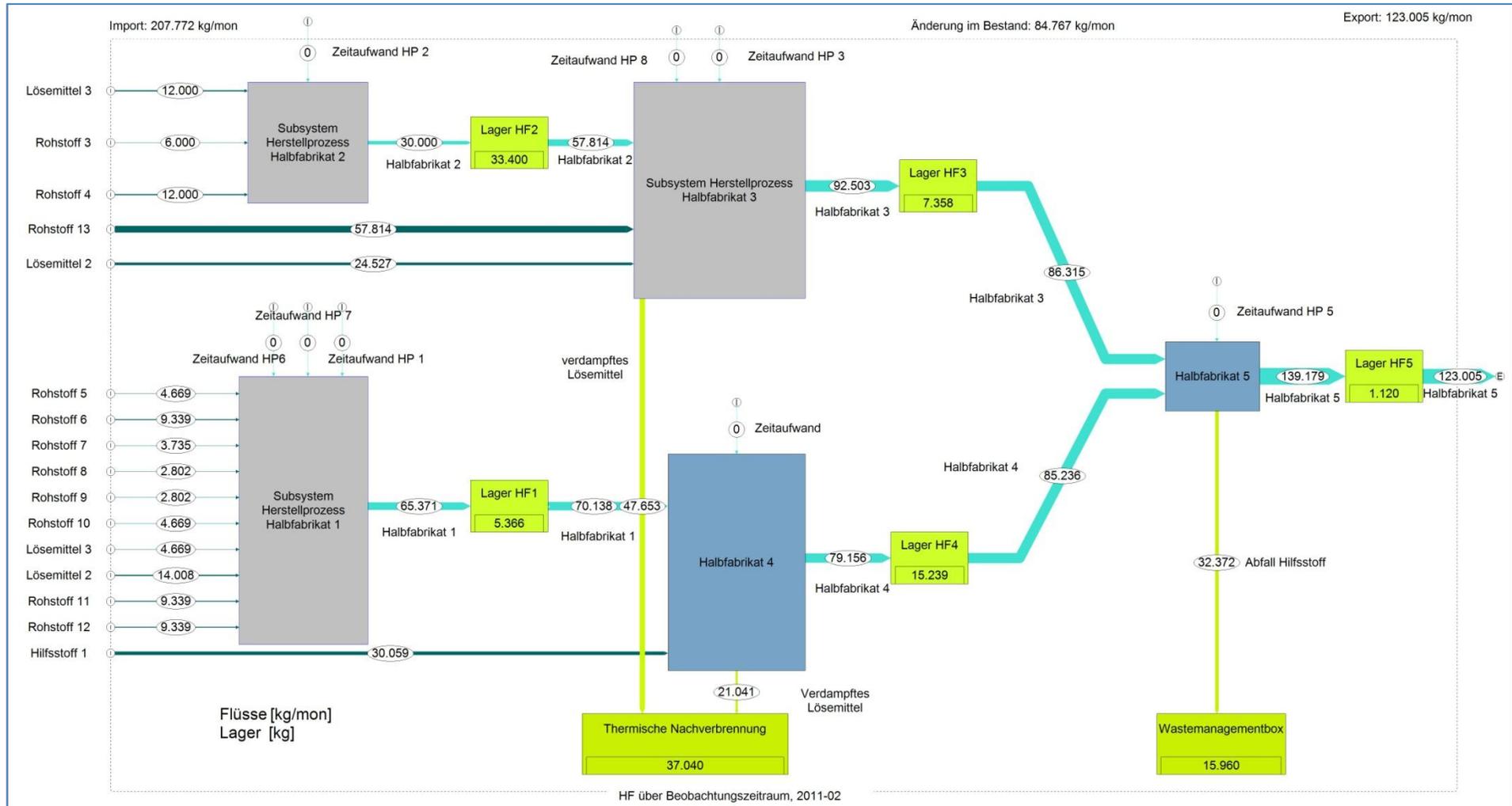


Abbildung 19 Zeitlicher Verlauf STAN Güterebene

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

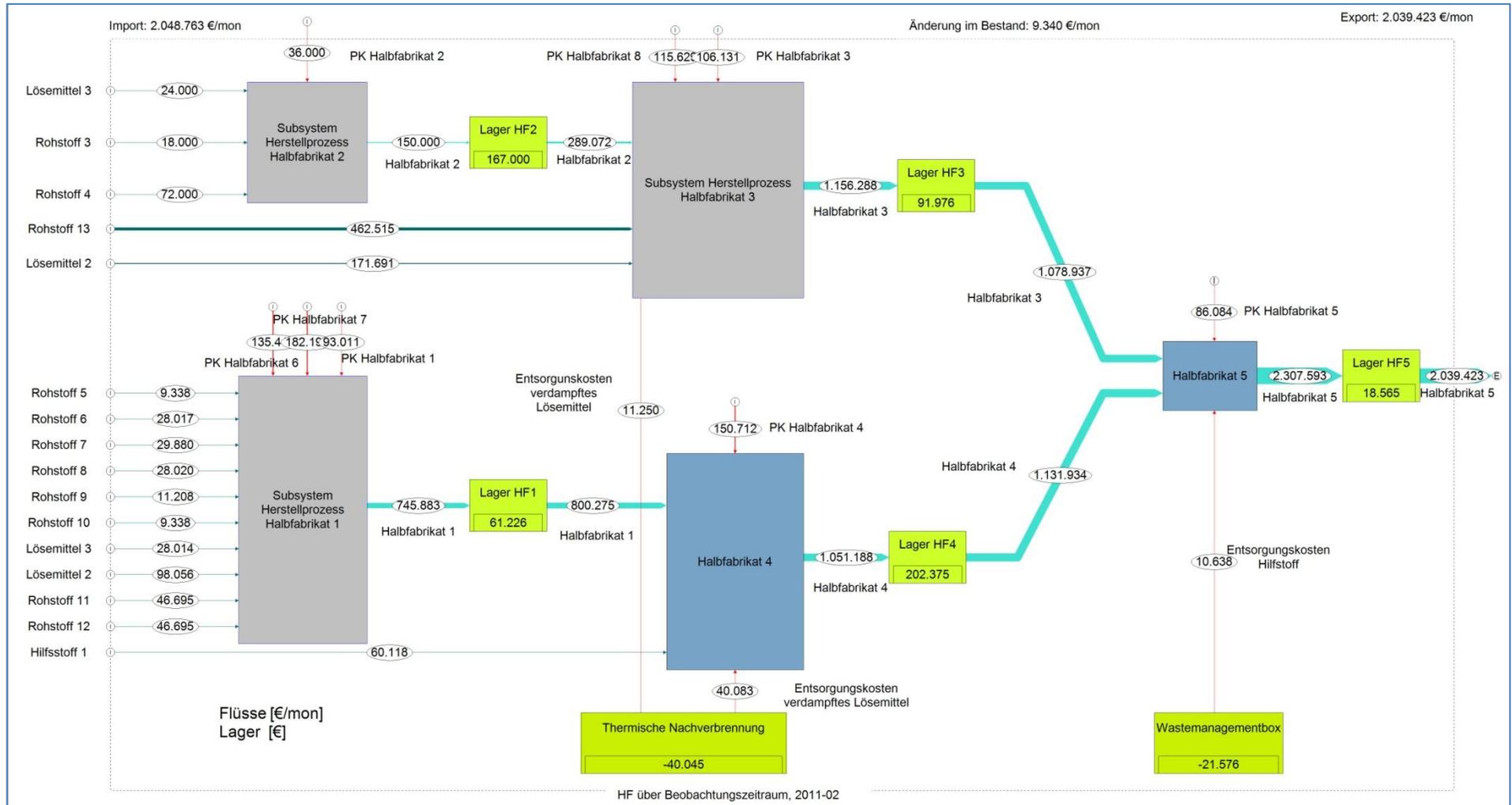


Abbildung 20 Zeitlicher Verlauf STAN Kostenebene

4.3.2 Zeitliche Verläufe der einzelnen Halbfabrikate

Hier werden über eine bestimmte Dauer die Güterzugänge, Abgänge und der Lagerstand dargestellt. Auf der linken, vertikalen Achse, sind die Güterbewegungen in kg aufgetragen und auf der rechten Achse der Wert der bewegten Materialien in €. Über die durchgehende Linie ist der Lagerstand ersichtlich.

Ziel ist es, eine gleichmäßige Verteilung der Produktionsmengen über den Zeitraum zu erhalten. An der Regelmäßigkeit der Auslastung kann beim Verlauf von Halbfabrikat 1 noch einiges verbessert werden. Dies kann durch die Produktionsplanung in der Arbeitsvorbereitung erreicht werden. Zu beachten ist bei diesem Halbfabrikat, dass durch den in Periode 5 mit über 80 Tonnen sehr hohen Lagerstand, sehr große Lagerflächen zur Verfügung stehen müssen, die in anderen Perioden ungenutzt bleiben.

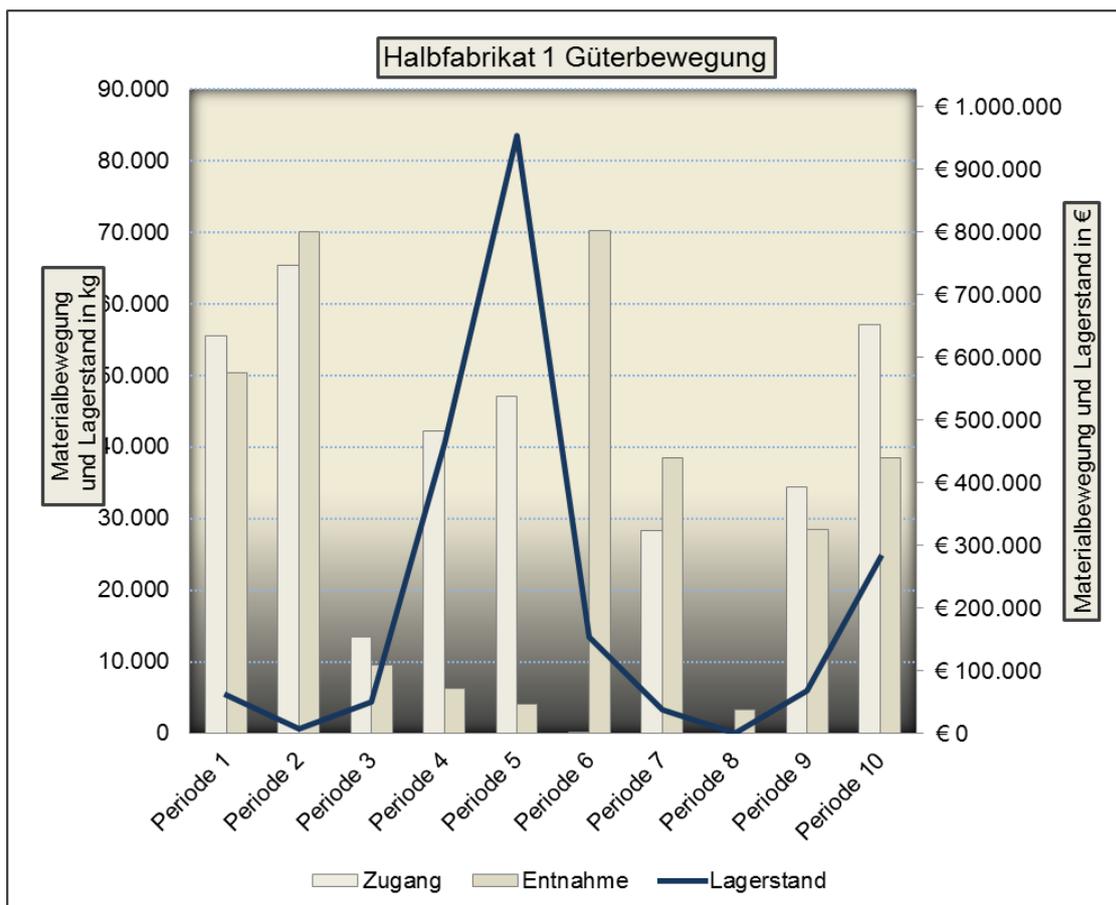


Abbildung 21 Halbfabrikat 1 Güterbewegung

Bei Halbfabrikat 2 können pro Schicht 10.000kg erzeugt werden. Daher ist ersichtlich, dass in den Schichten immer durchgearbeitet wurde und offensichtlich keinerlei Probleme aufgetreten sind. Durch den wie bei Halbfabrikat 1 sehr stark schwankenden Lagerstand über die Perioden muss auch hier sehr oft ungenutzter Lagerplatz vorhanden sein.

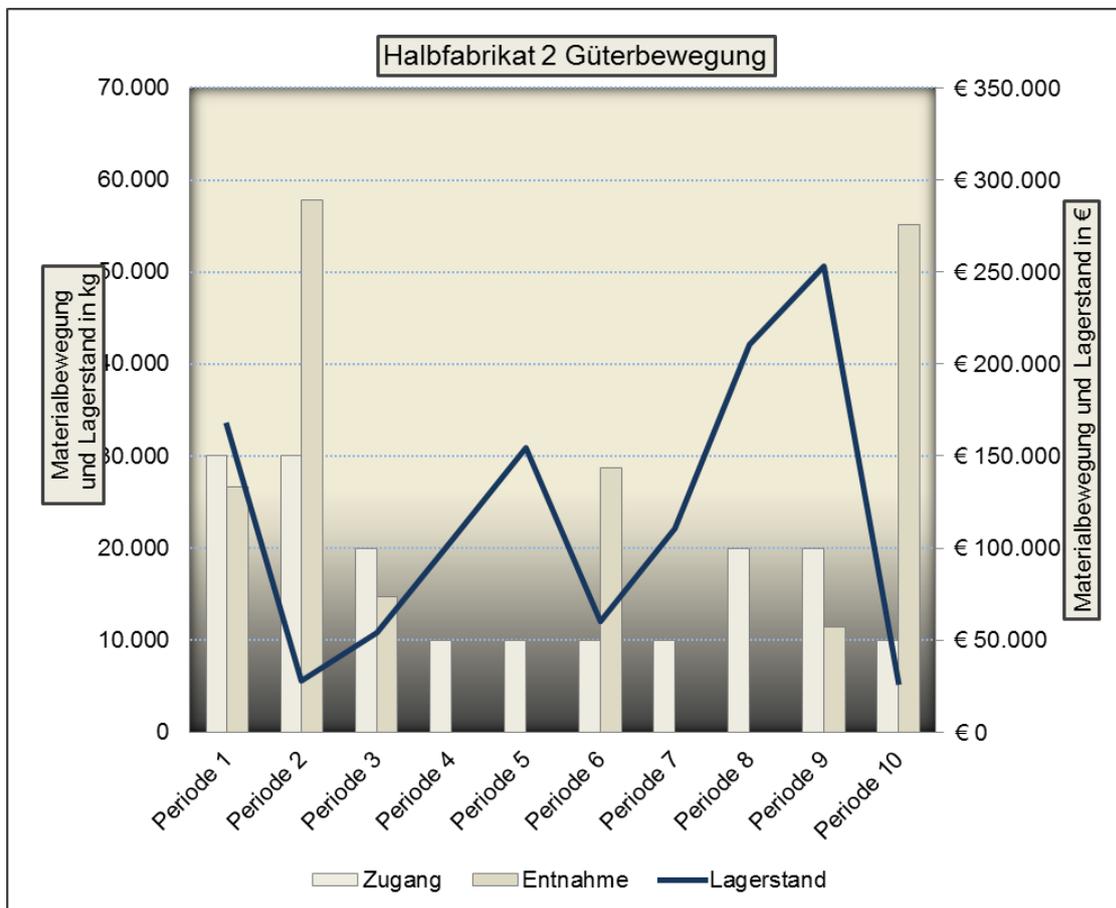


Abbildung 22 Halbfabrikat 2 Güterbewegung

Bei Halbfabrikat 3 gibt es große Schwankungen in den Produktionsmengen. Dafür bleibt das Working Capital auf einem niedrigen Niveau. Hier muss geprüft werden, ob die Mitarbeiter in der Produktion ausgelastet sind und wie diese Schwankungen durch die Produktion ausgeglichen wurden. Über den Nutzungsgrad und der Produktivität der einzelnen Maschinen muss die Wirtschaftlichkeit einer so stark schwankenden Auslastung geprüft werden.

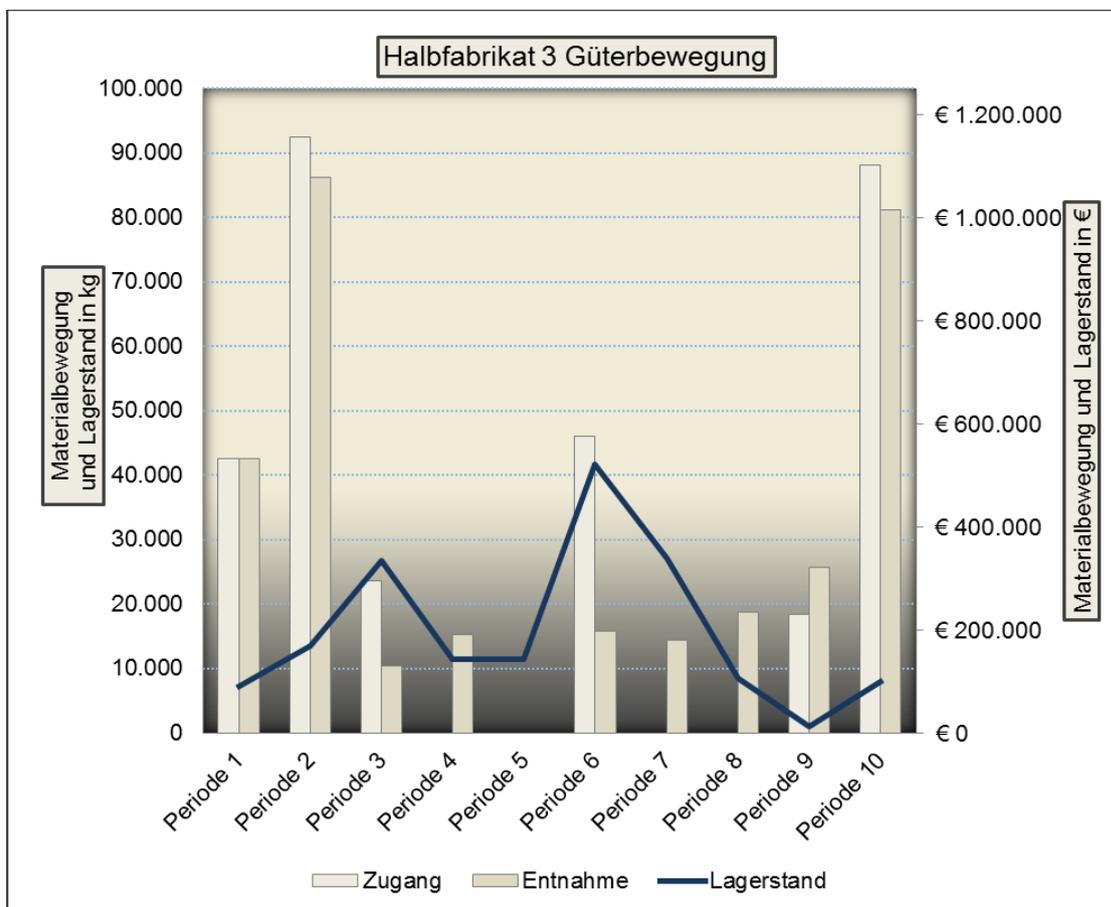


Abbildung 23 Halbfabrikat 3 Güterbewegung

Beim Halbfabrikat 4 steigt das Working Capital durch die unregelmäßige Zu- und Entnahme sehr hoch an. Hier kann durch die Produktionsplanung in Zukunft entgegengewirkt werden. Dies kann durch Maßnahmen in der Planungsstrategie erreicht werden. Es muss darauf geachtet werden, dass das gewünschte Halbfabrikat erst produziert wird, wenn es benötigt wird.

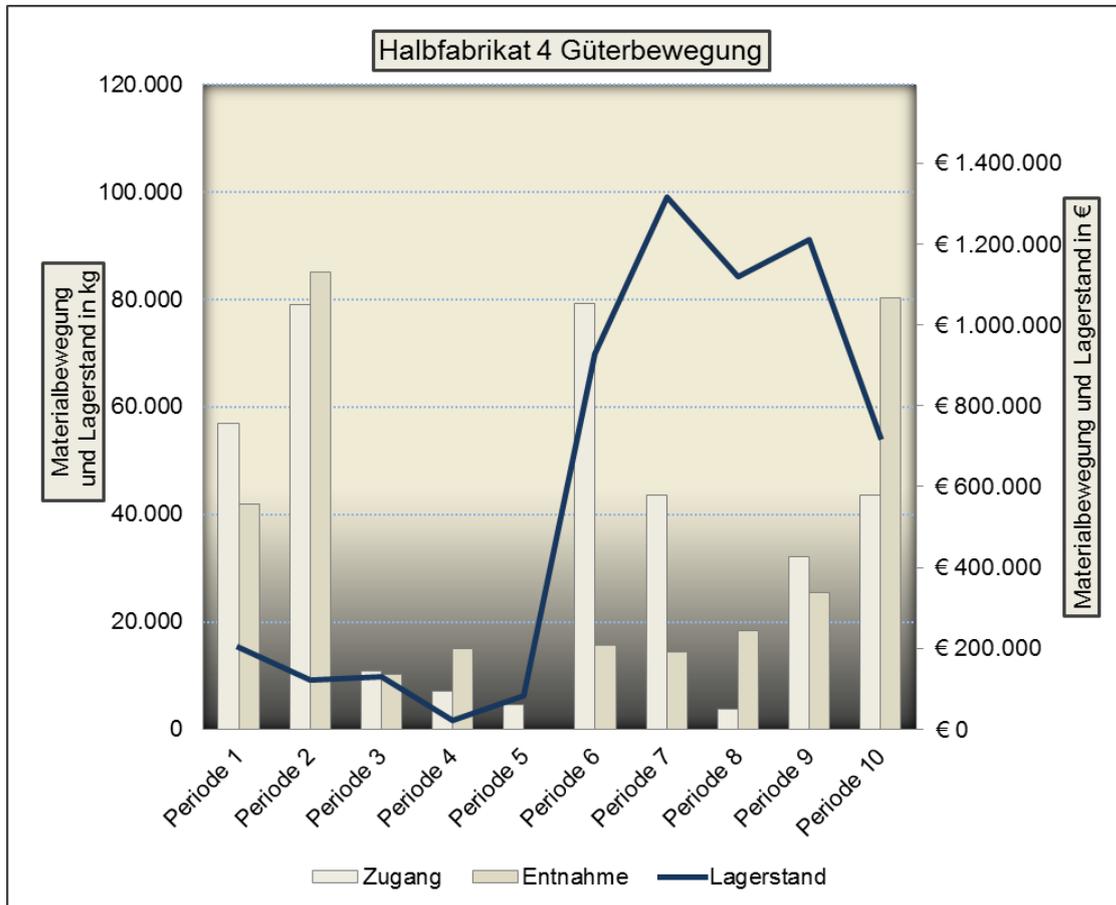


Abbildung 24 Halbfabrikat 4 Güterbewegung

Halbfabrikat 5 weist bei einer sehr unterschiedlichen Produktionsmenge ein sehr geringes Working Capital und geringen Lagerstand auf. Hier muss wie beim Verlauf von Halbfabrikat 3 die Auslastung der Produktion und der Ausgleich der Schwankungen geprüft werden.

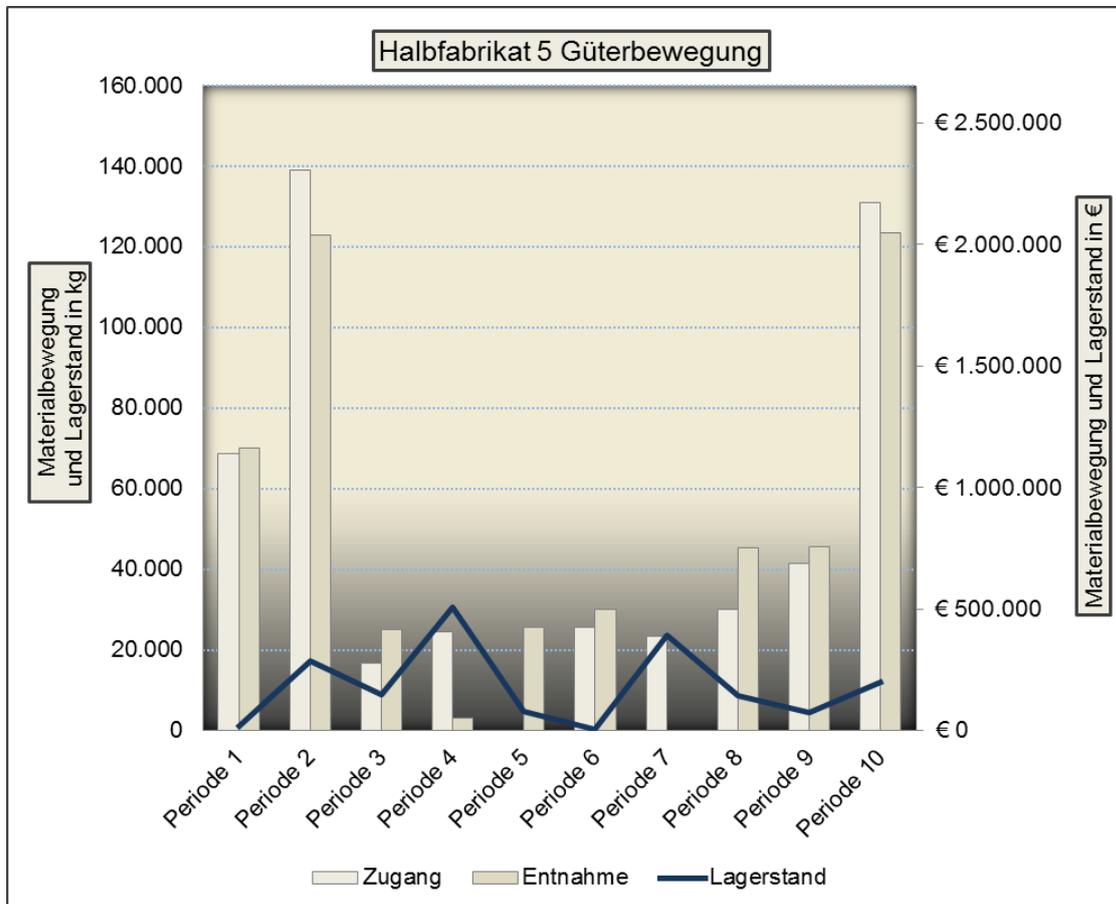


Abbildung 25 Halbfabrikat 5 Güterbewegung

4.3.3 Darstellung der Zeitaufwände zur Produktion der Halbfabrikate

In diesem Kapitel werden die in der Produktion notwendigen Zeitaufwände dargestellt. Die Flüsse „Zeitaufwand“ zeigen den Zeitaufwand an den jeweiligen Arbeitsplätzen. Die Flüsse der Halbfabrikate stellen die Zeit dar, die für die Menge des jeweiligen Halbfabrikates schon aufgebracht werden musste.

Abbildung 26 ist eine Übersicht des gesamten Ablaufschemas der Produktion von Halbfabrikat 5. Durch diese Darstellung wird gezeigt, an welchen Stellen im Produktionsprozess der Zeitaufwand zur Herstellung hoch ist und an welchen Stellen die Auslastung der Arbeitsplätze gering ist.

Die in Abbildung 26 ersichtliche Änderung im Bestand von -260h bedeutet, dass in dieser Periode für die Produktion des benötigten Materials in Summe 260h mehr Produktionszeit aufgewendet wurde als in dieser Periode geleistet wurde. Dies kann zum Beispiel bei einem Lagerabbau zustande kommen, da die Produktionszeit des lagernden Materials schon in vorherigen Perioden aufgewendet wurde.

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

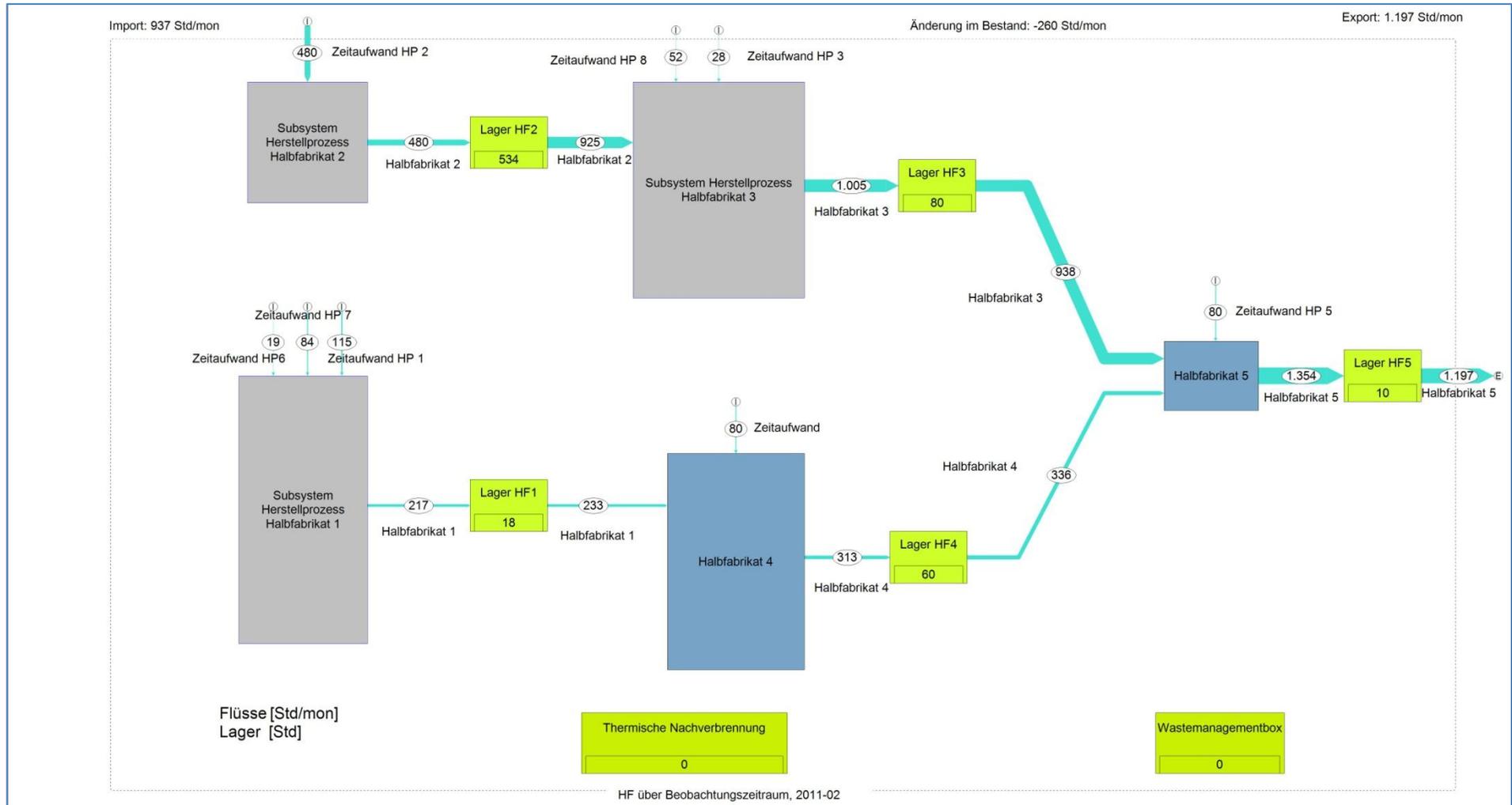


Abbildung 26 Zeitaufwand Halbfabrikate Gesamt

Aus Abbildung 27 geht hervor, dass der Zeitaufwand von Herstellprozess 1 fast gleich hoch ist wie der Zeitaufwand von Herstellprozess 6 und 7 gemeinsam. Dadurch ist die Durchführung von Herstellprozess 6 und 7 durch eine Person von großem Vorteil. Es ist jedoch darauf zu achten, dass zwei Mitarbeiter für eine Schicht von 8 Stunden kein ganzes Monat vollkommen ausgelastet sind und nur ein Mitarbeiter wäre überlastet. Deshalb muss für diese beiden Mitarbeiter noch eine wertschöpfende Tätigkeit zum Auffüllen der restlichen Arbeitszeit gefunden werden.

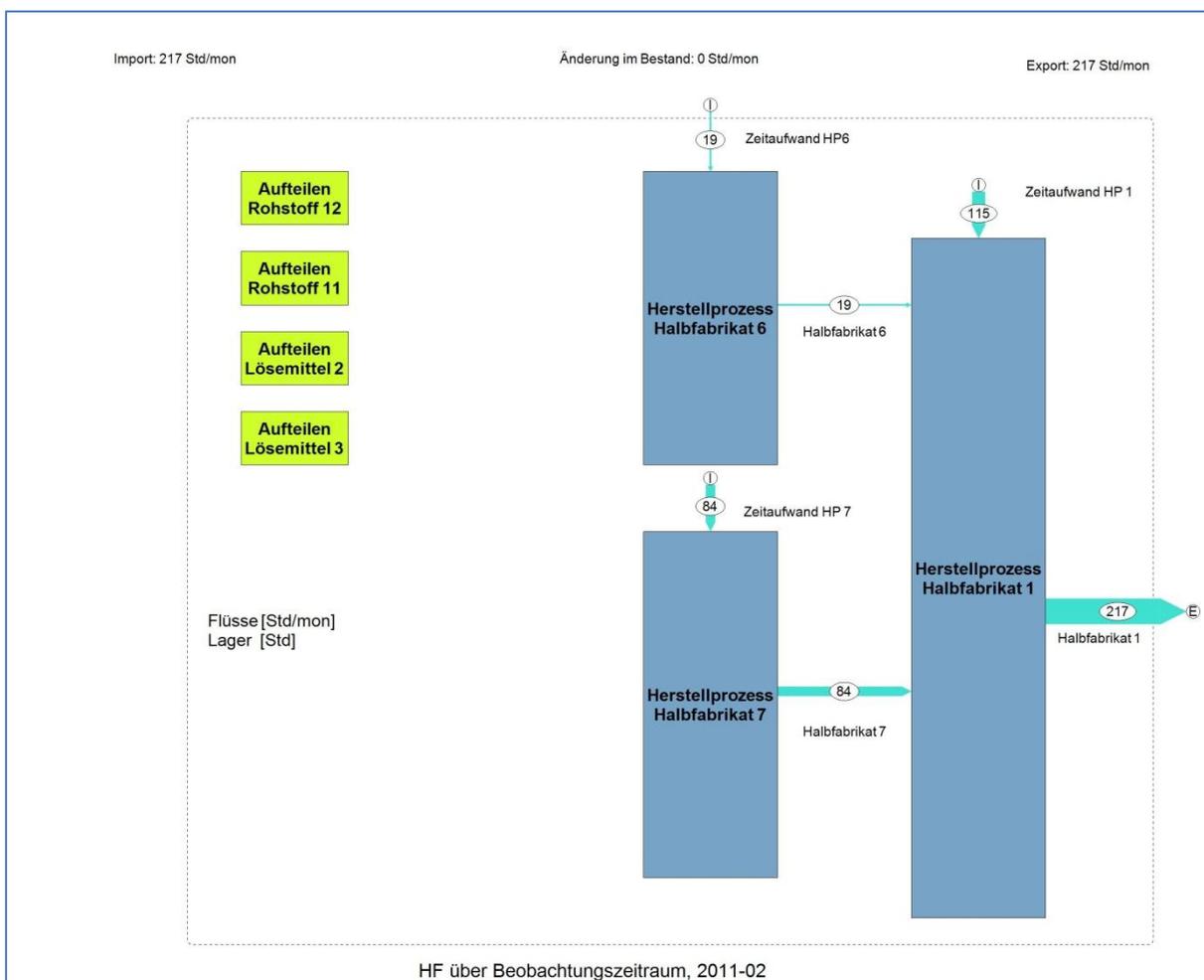


Abbildung 27 Zeitaufwand Halbfabrikat 1

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

In Abbildung 28 wird ersichtlich, dass dieser Arbeitsplatz mit drei Schichten pro Tag und fünf Tagen pro Woche ($8 \times 3 \times 5 \times 4 = 480 \text{h}$) voll ausgelastet ist. Es besteht das Risiko, dass bei Erkrankung eines Produktionsmitarbeiters und den daraus resultierenden Schichtausfall, die benötigte Produktionsmenge nicht mehr produziert werden kann.

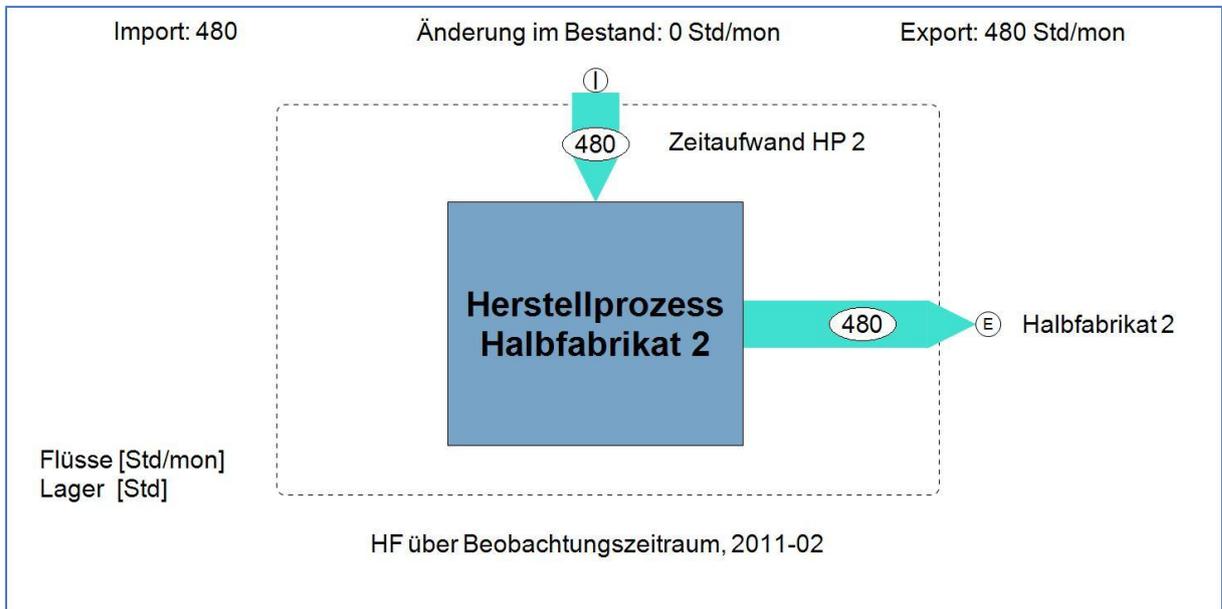


Abbildung 28 Zeitaufwand Halbfabrikat 2

Beispiel für die Anwendung der Methode in der Praxis

Aus Abbildung 29 ist ersichtlich, dass die Auslastung an den beiden Arbeitsplätzen minimal ist. Es wird versucht, die Arbeitskräfte der beiden Arbeitsplätze an anderen Arbeitsplätzen einzusetzen. Es muss im Vorhinein geprüft werden, ob an diesen Arbeitsplätzen auch andere Halbfabrikate gefertigt werden können.

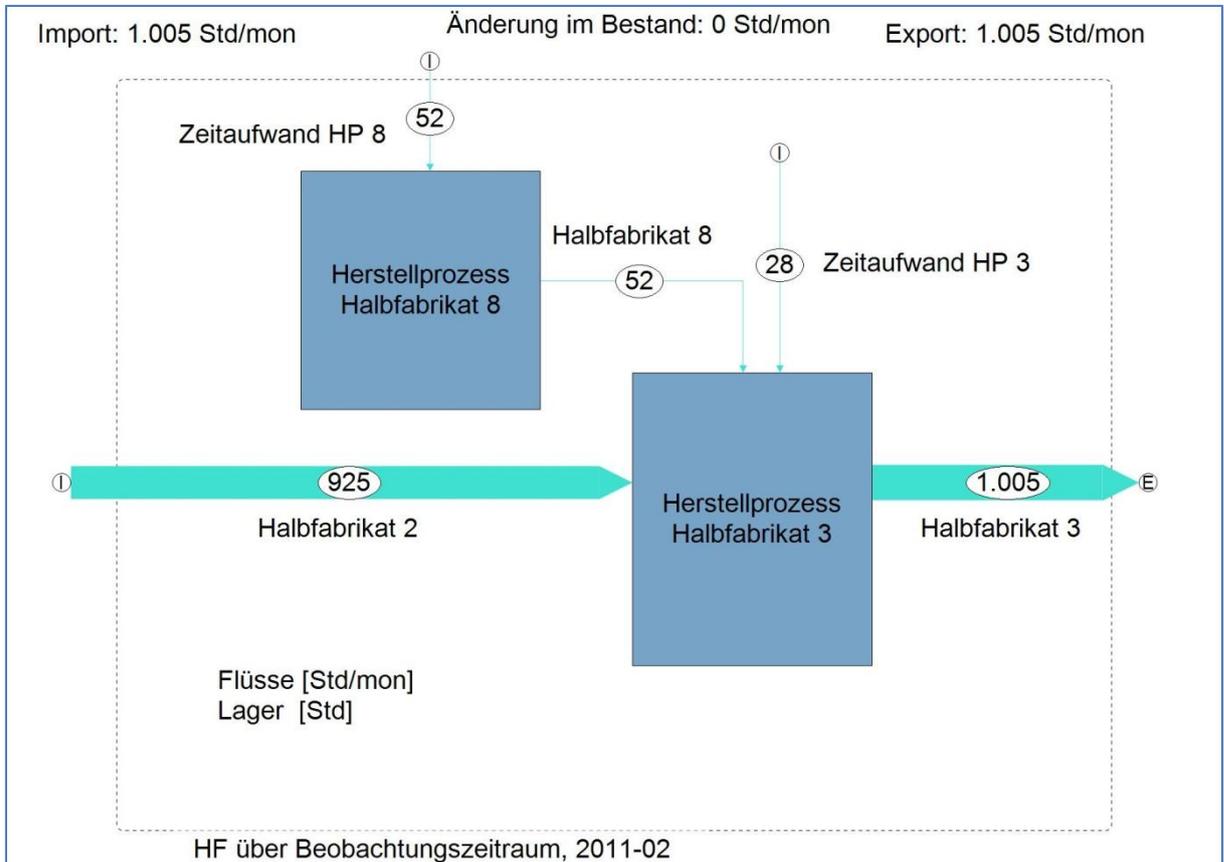


Abbildung 29 Zeitaufwand Halbfabrikat 3

4.3.4 Kennzahlen der Halbfabrikate

Hier werden die Kennzahlen für alle Halbfabrikate über den Beobachtungszeitraum ermittelt. Die Kennzahlen werden den Kennzahlen des Endproduktes (EP) gegenübergestellt.

Ökologische Kennzahlen

	HF1	HF2	HF3	HF4	HF5	EP
Materialeinsatz ökologisch	140%	167%	150%	200%	125%	276%
Hilfsstoffanteil	40%	67%	50%	100%	25%	125%
Lösemittelanteil	40%	67%	50%	40%	0%	60%
Rohstoffabfallanteil	0%	0%	0%	0%	0%	50%

Tabelle 4 Ökologische Kennzahlen der Halbfabrikate

Der Rohstoffabfallanteil wird nur in jenen Halbfabrikaten ausgewiesen, in denen der Abfall tatsächlich anfällt. Hier wird in keinem der angeführten Halbfabrikate Rohstoffabfall produziert, daher besitzt diese Kennzahl hier keine Aussagekraft.

Ökonomische Kennzahlen

	HF1	HF2	HF3	HF4	HF5	EP
Materialeinsatz ökonomisch	27%	60%	55%	20%	36%	33%
Prozesskostenanteil	56%	24%	24%	57%	43%	34%
Hilfsstoffkostenanteil	17%	16%	18%	19%	18%	28%
Lösemittelkostenanteil	17%	16%	18%	13%	15%	15%
fester Hilfsstoffkostenanteil	0%	0%	0%	6%	3%	12%
Entsorgungskostenanteil	0%	0%	3%	4%	4%	5%

Tabelle 5 Ökonomische Kennzahlen der Halbfabrikate

Durch diese Kennzahlen ist ersichtlich, dass Halbfabrikat 1, 4 und 5 für eine Optimierung des Prozesses, welche zu einer Senkung der Prozesskosten beitragen würde, am besten wären. Bei Halbfabrikat 2 und 3 ist die Einkaufsabteilung gefragt um die Rohstoffpreise neu zu verhandeln, da dadurch das größte Potential der Kosteneinsparung gegeben ist.

4.4 Ergebnisse aus dem Praxisbeispiel

Durch das Praxisbeispiel ist klar ersichtlich, dass die Stellen im Produktionsprozess, wo sich eine Optimierung sehr stark auswirkt, deutlich gezeigt werden. Darüber hinaus kann diese Darstellung als wertvolle Hilfe für die Erstellung eines Materialflusskonzeptes herangezogen werden. Durch die optimale Wahl der Kontrollpunkte (z.B. Kontrollpunkt vor der Zusammenführung zweier kostenintensiver Rohstoffe und nicht nach deren Vereinigung (siehe Kapitel 4.1.2)) können die Ausschusskosten gesenkt werden.

Bei den Szenarien mit den Unsicherheiten in den Inputgrößen zeigt sich, dass die Auswirkung von Schwankungen sowohl in der Güterebene als auch in der Kostenebene nicht die vermuteten Auswirkungen auf das Endprodukt aufweisen. Eine Risikoabschätzung und Strategieplanung kann dadurch sehr schnell festgelegt werden.

Durch den dritten Teil der Methode kann die Planung optimiert werden und mit Hilfe der Auswertung der zeitlichen Verläufe können Wartungstermine optimal in den Produktionsablauf eingebunden werden. Durch die Festlegung einer optimalen Produktionsplanungsstrategie können die Lagerstände und das Working Capital gering gehalten werden.

Die Software STAN kann in der jetzigen Version (2.5) bereits für die Erstellung der Modelle und daraus resultierenden Abbildungen verwendet werden. Durch eine Erweiterung von STAN kann die Anwendung der Methode optimiert werden, ist jedoch nicht zwingend erforderlich. Mögliche Erweiterungen der Software STAN werden in Kapitel 6.3 beschrieben.

Durch die Tatsache, dass STAN eine Freeware Software ist, ist es das optimale Werkzeug um diese Methode zur Darstellung von Produktionssystemen mittels Materialflussanalyse, um Optimierungspotentiale zu finden, für Unternehmen attraktiv zu machen.

5 Bewertung der Ergebnisse der Anwendung, Resümee

In diesem Kapitel wird zuerst zusammengefasst, welche Ergebnisse aus dem Praxisbeispiel gewonnen werden konnten und danach werden die gewonnenen Ergebnisse bewertet.

Das Praxisbeispiel zeigt ganz klar, dass die Methode sich sehr gut eignet, um ein Produktionssystem detailgenau mit den einzelnen Prozessschritten abzubilden und daraus leichtverständliche Abbildungen zu generieren. Es ist leicht und schnell ersichtlich, an welchen Stellen im Produktionssystem Optimierungsmaßnahmen große Auswirkungen haben. Die Ergebnisse sind für Experten aus Prozesstechnik und Produktion nicht überraschend, jedoch sind die entstandenen Abbildungen eine große Hilfe, um der Geschäftsführung zu verdeutlichen, an welchen Stellen Kosten entstehen. Die entstandenen Abbildungen können sehr gut als Entscheidungsinstrument für Investitionsplanung zur strategischen Prioritätensetzung von Aufgaben und Projekten zur Optimierung des Produktionssystems verwendet werden.

5.1 Modell Referenzprodukt

Ziel dieses Modelles ist es, eine Gesamtübersicht über das Produktionssystem zu erhalten. Ein schnelles Verständnis des Produktionssystems ist der primäre Nutzen, der aus diesem Modell entstandenen Abbildungen. Diese Ziele wurden eindeutig erreicht, da durch diese Darstellungen die Kontrollpunkte zur Ausschusserkennung leicht und effizient festgelegt werden können. Die Darstellung über das Sankey-Diagramm ermöglicht eine schnelle Einschätzung wo im System hohe Kosten entstehen und erlaubt ein Abschätzen der Kosten auf einen Blick. Durch die Anordnung der einzelnen Prozesse kann auf den optimalen Materialfluss in der Produktion geschlossen werden. Dabei ist das Ziel, einen möglichst geradlinigen Durchlauf des Materials durch die Produktion zu erlangen.

Konkret konnten die zwei kostentreibenden Rohstoffe daher sehr leicht identifiziert werden. Durch dieses rasche Erkennen kann besonders auf den Durchlauf dieser beiden Rohstoffe durch das System geachtet werden. Dies ermöglicht ein rasches Entgegenwirken bei Verschwendung wie z.B. übermäßigem Verschnitt.

Durch die Berechnung der Kennzahlen ist schnell das Verhältnis der Prozesskosten zu den Rohstoff und Hilfsstoffkosten ersichtlich. Daher ist auch klar, ob an den Einkaufskosten oder an den Prozesskosten Optimierungspotentiale gesucht werden sollen. Im konkreten Beispiel sind die Kosten annähernd gleich verteilt. Es ist darauf zu achten, dass durch die Senkung einer Kostenart die anderen Kostenarten steigen, da es sich um eine Verteilung handelt. Da die Kosten hier annähernd gleichverteilt sind, sollten die Hilfsstoffkosten gesenkt werden, da diese Materialien den geringsten Einfluss auf das Endprodukt aufweisen.

5.2 Modell mit Unsicherheiten

Dieses Modell eignet sich durch die leichte und schnelle Eingabe von Unsicherheiten sehr gut, um Szenarien zu erstellen und so Erkenntnisse über Unsicherheiten in den Eingabewerten zu erhalten. Es wurden Szenarien in der Kostenebene als auch in der Güterebene erstellt.

Durch die Szenarien in der Güterebene konnte gezeigt werden, wie sich die Ungenauigkeiten im Fertigungsprozess auf das Endprodukt auswirken. Eine zehnpromtente Unsicherheit in den Rohstoff Inputwerten auf Güterebene führt nur zu einer Unsicherheit von unter vier Prozent im Endprodukt. Diese Werte können mit den Lieferspezifikationen abgeglichen werden und dadurch Fehlproduktionen und daraus resultierende Kundenreklamationen vermieden werden.

In der Kostenebene wurden 2 Szenarien erstellt. Zum einen wurden alle Inputwerte also Rohstoff- und Hilfsstoffkosten mit einer Unsicherheit von zehn Prozent versehen. Diese Unsicherheit resultiert im Endergebnis nur mit einer Unsicherheit von 1,8%. Durch diese kleine Unsicherheit im Endprodukt kann davon ausgegangen werden, dass eine zehnpromtente Unsicherheit in den Inputwerten das Ergebnis des Produktes nicht maßgeblich beeinträchtigt.

Eine Unsicherheit bei den Einkaufspreisen von 45% der beiden kostenintensivsten Rohstoffe hat allerdings eine Auswirkung von 6,6% Steigerung der Herstellkosten. Dies führt zu einer erheblichen Schmälerung des Gewinns.

Kleine Schwankungen, wenn auch bei allen Rohstoffen, haben bei weitem nicht die Auswirkung wie große Schwankungen bei den zwei Hauptrohstoffen. Durch diese

Erkenntnisse geht hervor, dass es sinnvoll wäre bei jedem Rohstoffe Alternativen von anderen Lieferanten zu haben, um bei einer massiven Preiserhöhung einen Lieferantenwechsel in Betracht ziehen zu können.

5.3 Modell Halbfabrikate über Beobachtungszeitraum

Das Ziel war, über eine definierte Anzahl von Perioden den Produktionsprozess darzustellen, um einen Einblick über die Massenflüsse und auch Kostenflüsse durch das Produktionssystem zu erlangen, welches dieses Modell auch erreicht hat. Durch die resultierenden Abbildungen und Auswertung kann sehr gut ein Überblick erhalten werden, an welchen Stellen hohe Massenflüsse und hohe Lager entstehen. Die Güterflüsse lassen schnell und einfach darauf schließen, wie die Güterbewegungen stattfinden sollten. Durch die Darstellung der Kosten können die Mitarbeiter sensibilisiert werden, dass die Ware, die täglich bewegt wird, einen erheblichen Wert besitzt. Aufgrund der zeitlichen Verläufe kann in der Planung Anstoß zu einer Änderung der Planung, um Lagerstände möglichst gering zu halten, gegeben werden. Durch die berechneten Kennzahlen ist sehr gut ersichtlich, wie sich die Kosten der einzelnen Halbfabrikate im Vergleich zum Endprodukt zusammensetzen.

Durch das mögliche gegenüberstellen von Kosten- und Materialflüssen werden die Materialflüsse schnell ersichtlich bewertet. Dadurch kann schnell der optimale Fluss durch die Produktion ermittelt werden.

STAN eignet sich aufgrund der Möglichkeit der Bilanzierung auf Stoffebene als einzige Software für diese Anwendung, da die Zeitflüsse über die Stoffebene dargestellt werden. Die Kostenflüsse werden über die Energieebene abgebildet. Die einfache und leichtverständliche Benutzeroberfläche ermöglicht ein schnelles Erstellen der Modelle.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurde zuerst eine Methode entwickelt, um Güter-, Stoff-, und Kostenflüsse in Abhängigkeit zueinander in beliebigen Produktionssystemen darzustellen. Zusätzlich wurden noch ökonomische und ökologische Kennzahlen definiert, um dieses Produktionssystem zu bewerten. Danach wurde diese Methode anhand eines Praxisbeispiels angewendet und dadurch auf die Tauglichkeit in der Industrie geprüft.

Methode zur ökologischen und ökonomischen Optimierung von Produktionssystemen mittels Materialflussanalyse

Bei dieser Methode handelt es sich um die Darstellung eines Produktionssystems mithilfe der Stoffflussanalyse Software STAN. Es werden die Materialflüsse von einem Referenzprodukt und von Halbfabrikaten über einen Beobachtungszeitraum dargestellt. Es werden nicht nur die Materialflüsse dargestellt, sondern beim Referenzprodukt werden Material- und Kostenflüsse abgebildet. Bei den Halbfabrikaten werden zusätzlich zu den Material- und Kostenflüssen auch noch die für die Produktion benötigten Zeitaufwände dargestellt.

Durch das Einfügen des von Unsicherheiten im System Referenzprodukt, kann über eine Szenarien Planung eine Risikoabschätzung durchgeführt werden. Unter Risiken werden hier Risiken durch Unsicherheiten im Produktionssystem verstanden (z.B. Erhöhung der Herstellkosten durch Schwankungen in Einkaufs- und oder Prozesskosten, Toleranzüberschreitung des Endproduktes in der Masse durch Schwankungen in den Inputgrößen). Durch diese Risikoabschätzung kann eine Strategie für Projekte zur Optimierung festgelegt werden.

Über die definierten Kennzahlen können die Optimierungsmaßnahmen in allen Systemen bewertet werden. Ein großer Vorteil von diesen Kennzahlen ist auch die Möglichkeit der Bestimmung von zu erreichenden Zielwerten einer Optimierung. Bei den Halbfabrikaten wird über den Zeitraum der Beobachtung der Lagerstand und die zu und abgeführte Menge dargestellt.

Anwendung der Methode in der Praxis

In Abbildung 30 und Abbildung 31 (siehe auch Abbildung 9 und Abbildung 14) sind die Güter- und Kostenflüsse des Referenzproduktes dargestellt. Aufgrund dieser Abbildungen werden Optimierungsmaßnahmen im Produktionsprozess gefunden. Darüber hinaus dienen diese Darstellungen für ein leichteres Verständnis des Produktionssystems.

Die Güterflussdarstellung dient dazu, den Materialfluss in Produktionsstätte zu optimieren. Es kann schnell erkannt werden, ab welchem Zeitpunkt das Handling aufgrund der Masse problematisch werden kann. Es werden Maßnahmen gesetzt wie z.B. automatisches Dosiersystem, Hebezeuge, usw., um die Handlings Zeiten zu minimieren und daraus resultierend auch die Durchlaufzeiten und dadurch die Kosten zu senken.

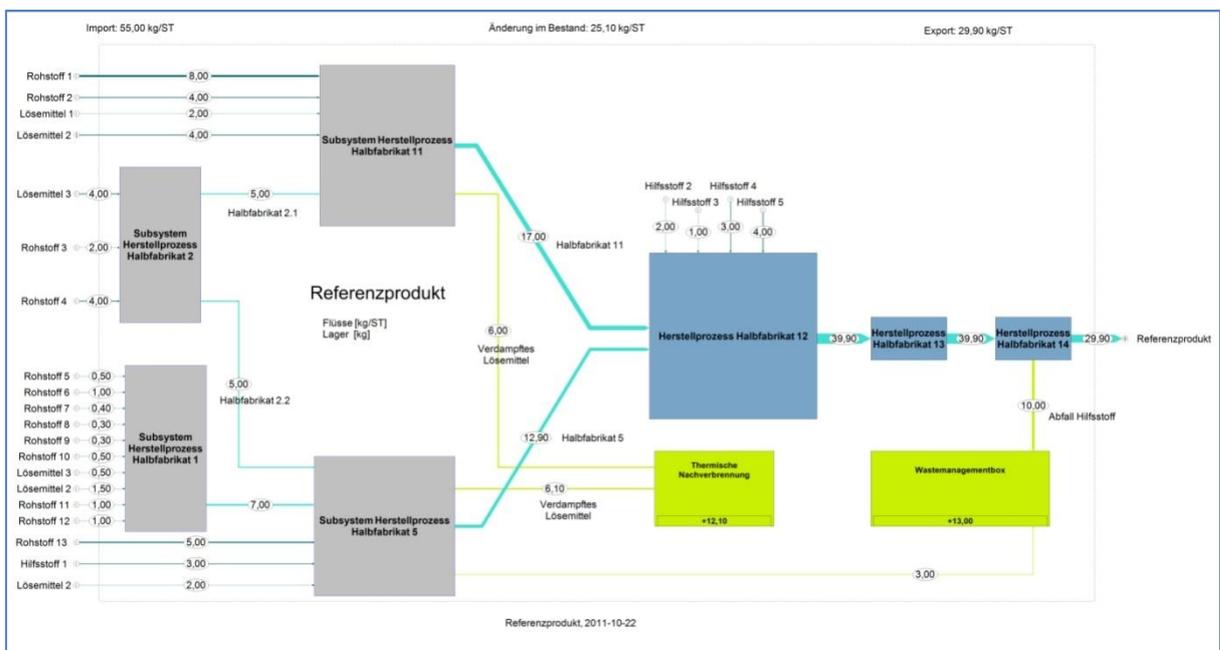


Abbildung 30 Güterflüsse Referenzprodukt

Die Abbildung der Kostenflüsse wird in erster Linie herangezogen, um Kontrollpunkte für Ausschuss zu definieren. Durch eine optimale Lage dieser Kontrollpunkte können die Ausschusskosten pro Kontrollpunkt um bis zu 62% im Vergleich zum Kontrollpunkt an der nicht optimalen Stelle gesenkt werden. Diese Senkung betrifft den Ausschuss der durch Fehler vor dem optimalen Kontrollpunkt entsteht. Darüber hinaus kann durch diese Darstellung aufgrund der leichten Erkennbarkeit der Entstehung der Kosten die Strategie für Optimierungsprojekte festgelegt werden.

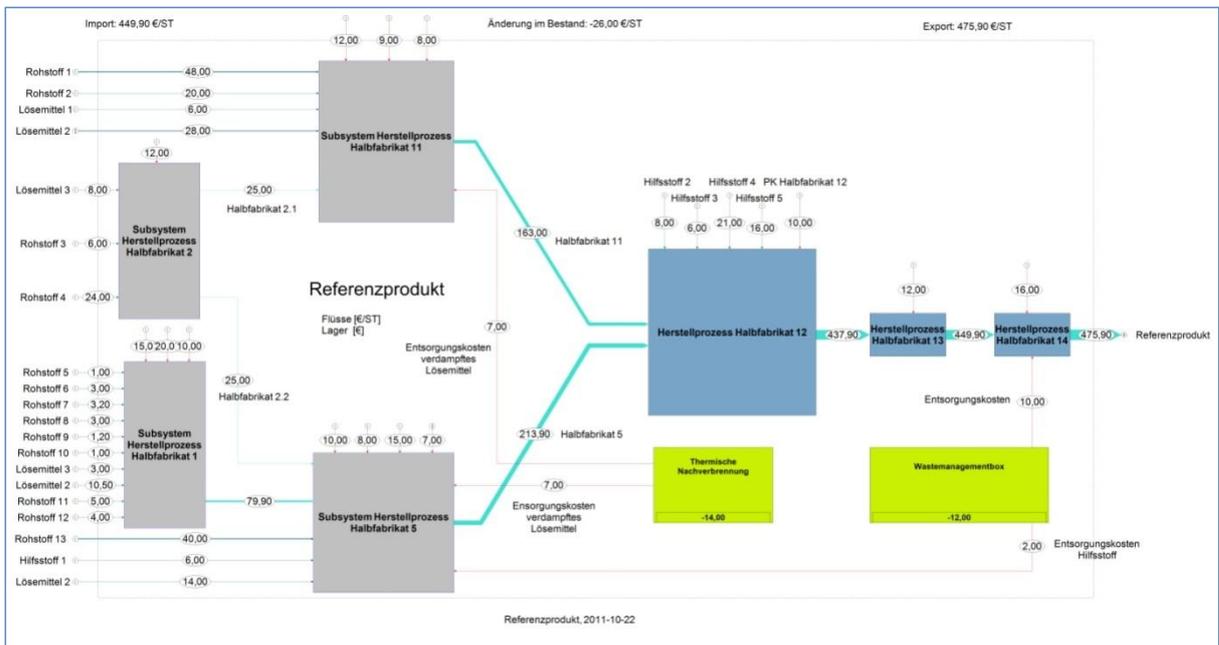


Abbildung 31 Kostenflüsse Referenzprodukt

Durch das Einbringen von Unsicherheiten in das Modell Referenzprodukt kann mittels Szenarien-Planung eine Abschätzung getroffen werden über die Priorität von Projekten zur Preisstabilisierung der einzelnen Rohstoffe. Sie kann auch als Unterstützung bei der Erstellung der Fertigungsvorschriften gesehen werden. In Tabelle 3 ist ersichtlich, wie sich die Szenarien auf das Endprodukt auswirken. In Szenario 1 ist eine Unsicherheit von 10% in der Güterebene vorhanden, in Szenario 2 ist eine 10% Unsicherheit bei allen Einkaufspreisen vorhanden, in Szenario 3 wird bei den beiden Hauptrohstoffen eine Unsicherheit von 45% angegeben und in Szenario 4 werden alle Prozesskosten mit einer Unsicherheit von 20% versehen. Es ist ersichtlich, dass die die Unsicherheiten von Szenario 3 am stärksten auf das Endprodukt wirken. Daher müssen Strategien entwickelt werden, um dem Eintreten dieser Szenarien entgegen zu wirken. Die Basis dieser Unsicherheiten sind die Herstellkosten. Diese sind als 100% anzusehen und schwanken z.B. bei Szenario 2 um $\pm 1,8\%$.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

	Unsicherheit Referenzprodukt	
	Güterebene	Kostenebene
Szenario 1	3,70%	1%
Szenario 2	0%	1,8%
Szenario 3	0%	6,4%
Szenario 4	0%	1,9%

Tabelle 6 Auswirkung der Unsicherheiten

In Abbildung 32 werden die Güterflüsse einer Periode eines Halbfabrikates über eine definierten Beobachtungszeitraum dargestellt. Durch diese Darstellung kann erkannt werden welche Mengen in dem definierten Zeitraum durch die Produktionsstätte transportiert werden müssen. Durch diese Mengendarstellung kann auch der benötigte Lagerplatz abgeschätzt und der optimale Materialfluss definiert werden.

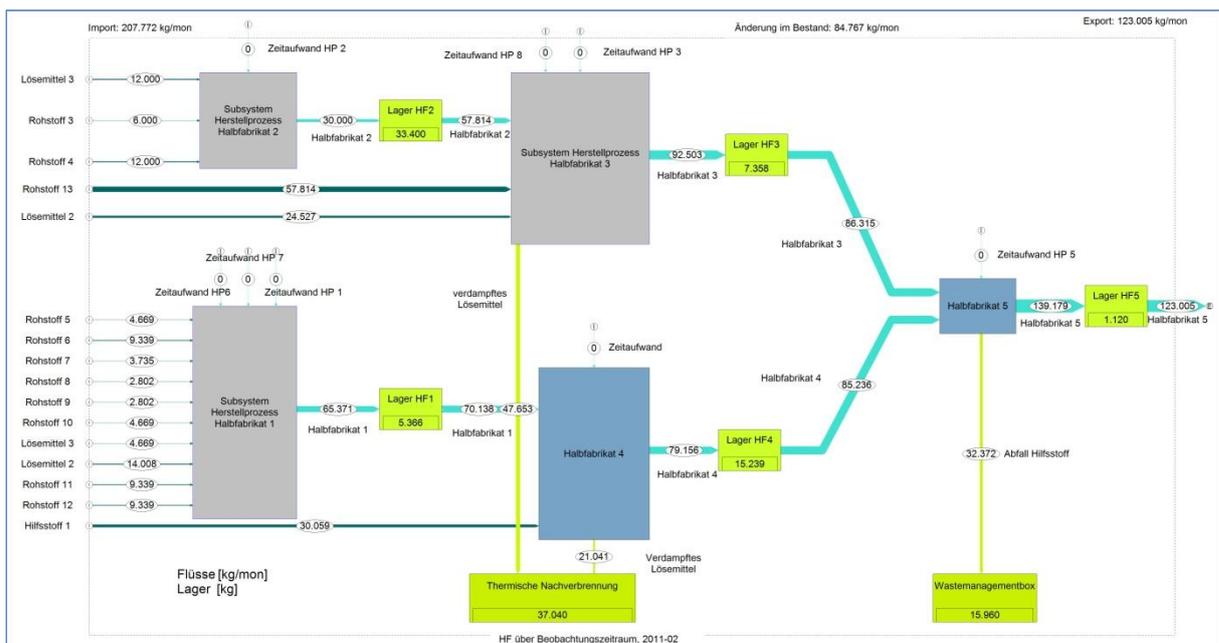


Abbildung 32 Güterflüsse Halbfabrikate

Durch die Darstellung der Materialbewegungen und Lagerstände (Abbildung 33) kann der benötigte Platzbedarf und die Gleichmäßigkeit der Arbeitsleistung am jeweiligen Arbeitsplatz abgeschätzt werden. Im gleichen Diagramm sind auch noch die Kostenflüsse und das Working Capital erkennbar. Über diese Darstellung kann auf den Nutzungsgrad der einzelnen Arbeitsplätze geschlossen werden. Bei starken Schwankungen der Ausbringung muss die Produktivität geprüft werden und es muss auch geprüft werden, ob die Mitarbeiter an diesem Arbeitsplatz andere wertschöpfende Tätigkeiten zum Füllen der Tagesarbeitszeit verrichten können.

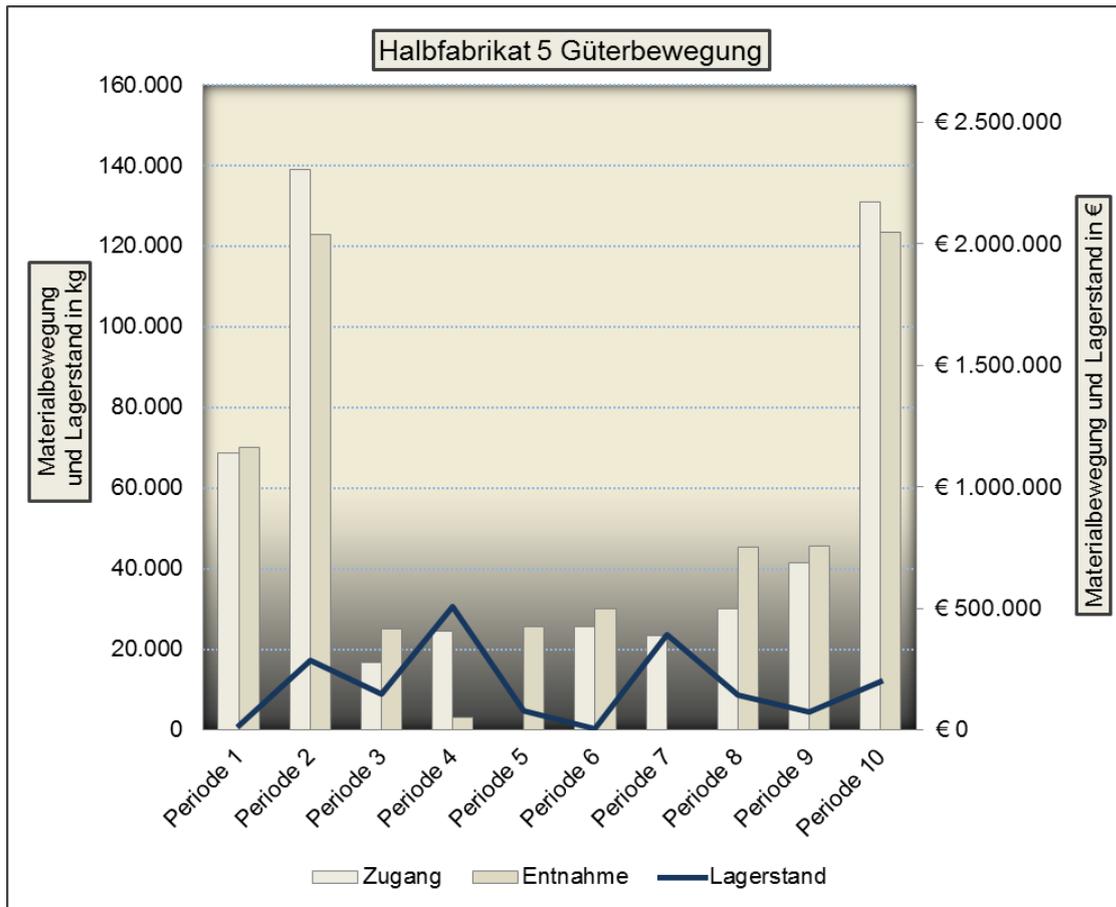


Abbildung 33 Halbfabrikat 5 Güterbewegung

Im letzten Teil der Methode werden die Zeitaufwände für die produzierten Halbfabrikate dargestellt (Abbildung 34). Durch diese Darstellung ist zum einen die Auslastung der einzelnen Arbeitsplätze erkennbar und zum anderen die für die Herstellung dieser Mengen benötigte Gesamtarbeitszeit an allen Produktionsmaschinen. Bei den im Lager liegenden Materialien ist die Zeit die zur Produktion benötigt wird interessant, da so abgeschätzt wird, wie groß der zeitliche Vorsprung der einzelnen Arbeitsplätze ist.

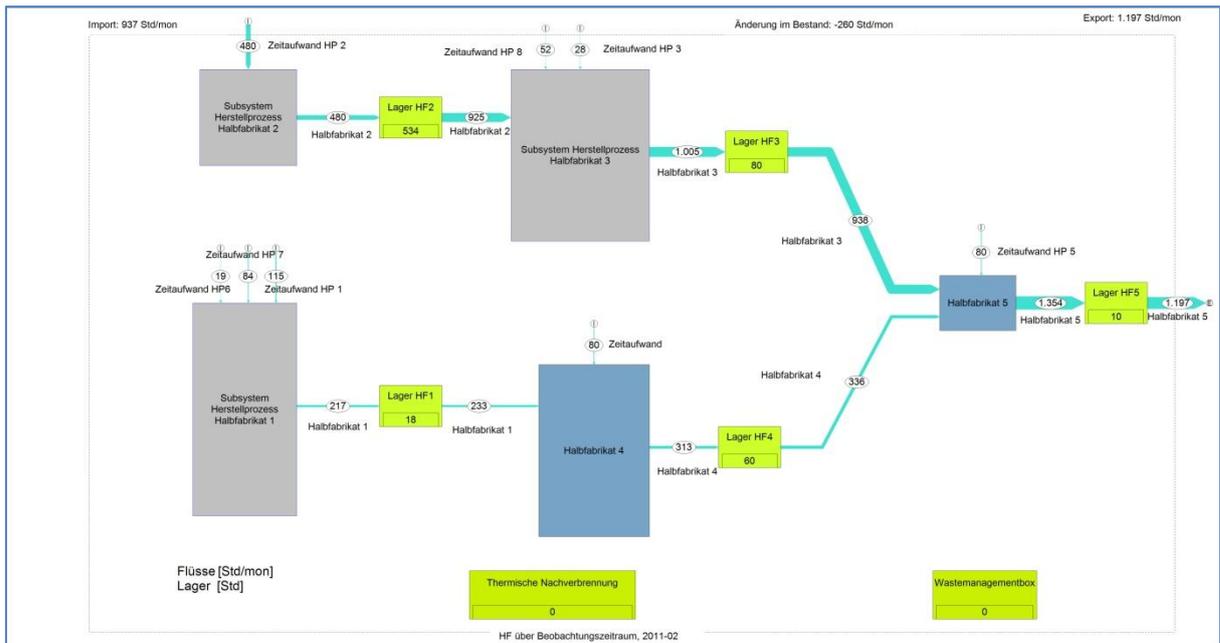


Abbildung 34 Zeitaufwände Halbfabrikate

Schlussfolgerung

Durch diese Methode wird das Verständnis des Produktionssystems für die Geschäftsführung erhöht, es besteht dadurch die Möglichkeit, in kürzester Zeit einen Einblick in ein meist sehr kompliziertes Produktionssystem zu erlangen. Durch die Tatsache, dass es sich bei der Software um eine Freeware handelt, sind die Einstiegsbarrieren von Unternehmen für erste Versuche sehr gering. Es ist jedoch zu beachten, dass die Modellierung bei großen Produktionssystemen zeitaufwändig ist und ein großes Know-how über die Abläufe im Produktionssystem erfordert. Dieser einmalige Aufwand lohnt sich jedoch, da das Grundmodell bei sich ändernden Daten trotzdem immer wieder verwendet werden kann. In jedem Unternehmen sollten die Produktionssysteme für ein allgemeines Verständnis graphisch dargestellt werden. Diese Methode ist eine Möglichkeit, das Produktionssystem nicht nur über die Materialbewegungen, sondern auch über die Kostenbewegungen darzustellen. Zusätzlich bietet diese Methode noch die Möglichkeit, eine Strategieentwicklung durch eine Risikoabschätzung über eine Szenarien-Planung.

6.1 Zielerreichung

Die Eignung der Software STAN zur Erstellung von detailgenauen Modellen von Produktionssystemen und daraus leicht verständlichen Darstellungen zu generieren ist vorhanden. Durch Verwendung der Energieebene als Kostenebene können auch die Kostenflüsse im Produktionssystem sehr übersichtlich dargestellt werden.

Der Grund für die Wahl der Software STAN wurde durch die einfache Verfügbarkeit getroffen und die Tatsache, dass es sich um eine Freeware handelt. Aufgrund der guten Performance wurden danach aber keinen weiteren Softwarelösungen getestet.

STAN kann als Materialflussanalyse Software sehr gut zur Darstellung von Produktionssystemen verwendet werden. Durch die Benutzung der Energieebene als Kostenebene wurde auch eine ökonomische Sichtweise auf das Produktionssystem geschaffen. Durch die Tatsache, dass STAN eine Freeware ist, war die Einstiegsbarriere am geringsten, und durch die Möglichkeit der Bilanzierung in der Stoffebene verfügt STAN über das größte Entwicklungspotential für eine solche Methode. Über die aus der Funktion der Unsicherheiten abgebildeten Szenarien kann eine sehr gute Risikoabschätzung auf von außen kommenden und schwer beeinflussbaren Faktoren getätigt werden. Die Darstellungen von STAN ergeben eine Diskussionsgrundlage, bei der sehr schnell Optimierungspotentiale erkannt werden können. Durch eine mögliche Anbindung an ein ERP System könnte die Modellierung erheblich beschleunigt werden. STAN kann aber auch ohne Optimierungsmaßnahmen problemlos zur Optimierung von Produktionssystemen eingesetzt werden.

6.2 Nutzen für ein Unternehmen

Es werden hier die Aussagen, die durch die Anwendung getroffen werden können, festgehalten und beschrieben, wie diese Aussagen einem Unternehmen nutzen können. Dieser Nutzen bezieht sich auf das Potential von der entwickelten Methode vor einer Weiterentwicklung der Software STAN.

In Tabelle 7 ist dargestellt welche Aussagen und Schlüsse aus welchen Modellen und Ebenen gewonnen werden können. Aufgrund dieser kann der optimale Produktionsablauf definiert und umgesetzt werden.

Model	Ebene	Aussagen
Referenzprodukt	Güter	Verständnis des Produktionsablaufes
		Erkennen des optimalen Materialflusses
	Kosten	Erkennen an welchen Stellen hohe Kosten entstehen
Unsicherheiten	Güter	Auswirkung von Fertigungsungenauigkeiten auf die Masse des Endproduktes
	Kosten	Auswirkung von Schwankungen der Einkaufskosten auf die Kosten des Endproduktes
		Auswirkung von Schwankungen der Prozesskosten auf die Kosten des Endprodukt
Halbfabrikate	Güter	tatsächlicher Materialfluss durch das Produktionssystem
		Lager bedarf vor den einzelnen Produktionsmaschinen in kg oder t
	Kosten	tatsächliche Kostenflüsse durch das Produktionssystem
		Working Capital an den einzelnen Arbeitsplätzen in €
Zeit	Auslastung der einzelnen Arbeitsplätze	
	minimale Durchlaufzeit des Produktes	

Tabelle 7 Nutzen für ein Unternehmen

6.3 Empfehlungen zur Weiterentwicklung

Bei einer Weiterentwicklung der Software sollte unbedingt eine Extra-Kostenebene und eine Zeitaufwandsebene eingeführt werden. Damit könnten in Zukunft Kosten-, Energie-, und Zeitaufwandsflüsse eines Produktionssystems betrachtet werden.

Eine Funktion, durch die Flüsse nach ihren enthaltenen Materialien und Kosten dargestellt werden können, wäre hilfreich, um schnell zu erkennen, wo sich welche Stoffe im System bewegen (Abbildung 35 und Abbildung 36).



Abbildung 35 Aufteilung in der Güterebene



Abbildung 36 Aufteilung in Kostenebene

Des Weiteren sollte noch eine Funktion geschaffen werden um Lagerstände und Zu- und Abgänge über die Zeit in der Software darstellen zu können (analog zum zeitlichen Verlauf von Flusswerten).

Um Kennzahlen schnell und einfach ermitteln zu können wäre dies ein hilfreiches Tool in der Software. Die Kennzahlen sollten aus dem Verhältnis von zwei oder mehreren Flüssen errechnet werden können. Eine graphische Darstellung über den zeitlichen Verlauf dieser Kennzahlen wäre zur Bewertung von Optimierungsmaßnahmen sehr hilfreich.

Bei der Eingabe der Unsicherheiten sollte die Möglichkeit bestehen, mehrere Verteilungen wählen zu können und darüber hinaus noch einen oberen und einen

unteren Grenzwert der Unsicherheiten festlegen zu können, da meist von einem gleichbleibenden oder steigendem Preis ausgegangen werden muss und in den seltensten Fällen von einem sinkenden Preis.

Eine weitere potentielle Weiterentwicklung wäre eine Anbindung von STAN an ein ERP – System. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die Darstellungen schneller generieren zu können. Dies würde zu einer regelmäßigen Anwendung dieser Methode führen.

7 Literaturverzeichnis

Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2004). *Material Flow Analysis*. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC.

Cencic, D. O. (2012). STAN - Hilfetexte. Wien: Technischen Universität Wien, Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft.

Cencic, O. (2007). STAN - Freeware für Stoffflussanalysen nach Önorm S 2096. (C. Engelhardt-Nowitzki, O. Nowitzki, & B. Krenn, Hrsg.) *Management mittels komplexer Materialflüsse mittels Simulation*, S. 85-95.

Chamoni, P. (2010). *Analytische Informationssysteme*. Berlin: Springer.

Europäische Kommission, .. (April 2011). *European Commission*. Abgerufen am 18. April 2013 von http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/resource_efficiency/de.pdf

Hartung, J., Elpelt, B., & Klösener, K.-H. (2005). *Statistik Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. München: Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH.

Isovolta AG, .. (kein Datum). www.isovolta.com. Abgerufen am 18. April 2013 von <http://www.isovolta.com/unternehmen.php>

Kemmettmüller, W., & Bogensberger, S. (2004). *Handbuch der Kostenrechnung 8. Auflage*. Wien: Facultas Verlags- Buchhandels AG.

Kistner, K.-P., & Steven, M. (2002). *Betriebswirtschaftslehre im Grundstudium 1*. Heidelberg: Physica-Verlag.

Kytzia, S. (1998). Wie kann man Stoffhaushaltssysteme mit ökonomischen Daten verknüpfen. In U. u. Lichtensteiger, *Ressourcen im Bauwesen; Aspekte einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung im Bauwesen* (S. 69-80). Zürich: vdf Hochschulvlg.

Nakamura, S., & Yasushi, K. (2009). *Waste Input-Output Analysis*. Tokyo: Springer Science+Business Media B.V.

Nabl, T. (2011). *Produktionswirtschaft*. München: Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH.

ÖNORM S 2096-1. (01. 01 2005). *Stoffflussanalyse Teil 1: Anwendung in der Stoffflussanalyse - Begriffe* . Wien, Österreich: Österreichisches Normungsinstitut.

ÖNORM S2096-2. (01. 01 2005). *Stoffflussanalyse Teil 2 Anwendung in der Abfallwirtschaft - Methodik* . Wien, Österreich: Österreichisches normungsinstitut.

Schnitzer, H. (12. August 1998). Die auf der Stoffstromanalyse basierende Implementierung von vorsorgendem integrierten Umweltschutz. *Chemie Ingenieur Technik (70)* , S. 64-73.

Schrack, D. (29.u 30.. März 2012). Material und Kosteneffizienz in der Abfallwirtschaft durch Weiterentwicklung der Materialflusskostenrechnung. 2. *Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft* , S. 43-48.

Steland, A. (2007). *Basiswissen Staitik*. Aachen: Springerverlag Berlin Heidelberg.

Wilkens, K. (2004). *Kosten- und Leistungsrechnung*. München: R. Oldenbourg Verlag München Wien.

Wöhe, G., & Döring, U. (2008). *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Lüneburg: Franz Vahlen GmbH.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Methodisches Vorgehen zur Erstellung einer Stoffflussanalyse	10
Abbildung 2 Edukte im Produktionssystem	15
Abbildung 3 Materialflusskostenrechnung Beispiel	19
Abbildung 4 Stoffhaushaltssystem Wohnen mit ökonomischen Daten	20
Abbildung 5 Variante 1 Darstellung der Güter- und Geldflüsse	27
Abbildung 6: Variante 2 Darstellung der Güterflüsse	27
Abbildung 7 Variante 2 Darstellung der Geldflüsse	27
Abbildung 8 Darstellung Zeitaufwand	28
Abbildung 9 Güterfluss Referenzprodukt	41
Abbildung 10 Güterfluss Herstellprozess Halbfabrikat 1	42
Abbildung 11 Güterfluss Herstellprozess Halbfabrikat 2	43
Abbildung 12 Güterfluss Herstellprozess Halbfabrikat 5	44
Abbildung 13 Güterfluss Herstellprozess Halbfabrikat 11	45
Abbildung 14 Referenzprodukt Kosten	47
Abbildung 15 Herstellprozess Halbfabrikat 1 Referenzprodukt Kostenebene	48
Abbildung 16 Herstellprozess Halbfabrikat 2 Referenzprodukt Kostenebene	49
Abbildung 17 Herstellprozess Halbfabrikat 5 Referenzprodukt Kostenebene	50
Abbildung 18 Herstellprozess Halbfabrikat 11 Referenzprodukt Kostenebene	51
Abbildung 19 Zeitlicher Verlauf STAN Güterebene	56
Abbildung 20 Zeitlicher Verlauf STAN Kostenebene	57
Abbildung 21 Halbfabrikat 1 Güterbewegung	58
Abbildung 22 Halbfabrikat 2 Güterbewegung	59
Abbildung 23 Halbfabrikat 3 Güterbewegung	60
Abbildung 24 Halbfabrikat 4 Güterbewegung	61
Abbildung 25 Halbfabrikat 5 Güterbewegung	62
Abbildung 26 Zeitaufwand Halbfabrikate Gesamt	64
Abbildung 27 Zeitaufwand Halbfabrikat 1	65
Abbildung 28 Zeitaufwand Halbfabrikat 2	66
Abbildung 29 Zeitaufwand Halbfabrikat 3	67
Abbildung 30 Güterflüsse Referenzprodukt	74
Abbildung 31 Kostenflüsse Referenzprodukt	75
Abbildung 32 Güterflüsse Halbfabrikate	76
Abbildung 33 Halbfabrikat 5 Güterbewegung	77
Abbildung 34 Zeitaufwände Halbfabrikate	78
Abbildung 35 Aufteilung in der Güterebene	81
Abbildung 36 Aufteilung in Kostenebene	81

9 Formelverzeichnis

Formel 1 Dichtefunktion der Normalverteilung	17
Formel 2 Materialeinsatz ökologisch	33
Formel 3 Hilfsstoffanteil	33
Formel 4 Lösemittelanteil	34
Formel 5 Rohstoffabfallanteil.....	34
Formel 6 Materialeinsatz ökonomisch	35
Formel 7 Prozesskostenanteil	35
Formel 8 Lösemittelkostenanteil.....	36
Formel 9 Fester Hilfsstoffkostenanteil	36
Formel 10 Hilfsstoffkostenanteil	36
Formel 11 Entsorgungskostenanteil	37

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Ökologische Kennzahlen	52
Tabelle 2 Ökonomische Kennzahlen.....	52
Tabelle 3 Auswirkung der Unsicherheiten	54
Tabelle 4 Ökologische Kennzahlen der Halbfabrikate	68
Tabelle 5 Ökonomische Kennzahlen der Halbfabrikate.....	68
Tabelle 6 Auswirkung der Unsicherheiten	76
Tabelle 7 Nutzen für ein Unternehmen.....	80

11 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d.h.	das heißt
ERP	Enterprise-Resource-Planning
etc.	et cetera
exkl.	exklusive
i.d.R	in der Regel
inkl.	Inklusive
lt.	laut
MFA	Materialflussanalyse
Min.	Minuten
o.g.	oben genannt
Sek.	Sekunden
SFA	Stoffflussanalyse
Std.	Stunden
Stk.	Stück
tlw.	teilweise
TNV	Thermische Nachverbrennung
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel