

Bundeforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg

Leuschnerstraße 91, 21031 Hamburg

Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes

Erarbeitung betriebswirtschaftlich-technischer Modelle von Anlagen zur Herstellung mitteldichter Faserplatten (MDF)

von

K. Kruse, A. Janßen, A. Frühwald

**Arbeitsbericht
des Instituts für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes**

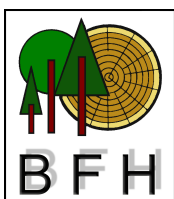
**Nr. 2001/01
Januar 2001**

Bundeforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft

und die

Ordinariate für Holzbiologie,
Holztechnologie und Weltforstwirtschaft der

UNIVERSITÄT HAMBURG



E-Mail: KKruse@holz.uni-hamburg.de

Tel: 040 / 739 62-601
Fax: 040/ 739 62-480



Hinweis

Der vorliegende Arbeitsbericht basiert auf dem Abschlußbericht eines Projektes des Ordinariats für Holztechnologie der Universität Hamburg in Zusammenarbeit mit dem Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH). Das Projekt (Nr. 12103N) wurde mit Mitteln der AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) über die DGfH (Deutsche Gesellschaft für Holzforschung) gefördert.

Zusammenfassung

Holzwerkstoffhersteller sind heute aus einer Vielzahl von Gründen (z.B. Überkapazitäten, Substitutionsdruck innerhalb der Holzwerkstoffe, starker in- und ausländischer Konkurrenz, steigenden Anforderungen ihrer Kunden hinsichtlich Produktqualität, Lieferterminen und Losgrößen) gezwungen, einen nach Kostengesichtspunkten optimierten Produktionsprozeß zu betreiben.

Holzwerkstoffe werden in einem komplexen, nahezu kontinuierlichen Prozeß gefertigt, weshalb die einzelnen Produktionsschritte zumeist isoliert kontrolliert und gesteuert werden. Eine Verknüpfung mit den Produktionskosten erfolgt, wenn überhaupt, nur selten und manuell.

Projektziel war es daher, die Zusammenhänge zwischen Produktionsfaktoren und Kostenträgern einer typischen MDF-Produktion in einem betriebswirtschaftlichen Modell (*Kostenmodell*) zu beschreiben. Hierdurch sollten verschiedene Betriebszustände ausreichend präzise und schnell berechnet werden können, um so eine fundierte Entscheidungsgrundlage für Produktionsplanungen und Investitionsvorhaben zu erhalten.

Auf Basis realer Daten verschiedener MDF-Anlagen wurde ein Kosten-Modell entwickelt, welches alle wesentlichen Kostenträger einer typischen, europäischen MDF-Produktion in Abhängigkeit der Produktionskapazität berücksichtigt (z.B. Rohstoffeinsatz und -verluste, Maschinen und Anlagen, Personal, Energie, Wartung). Durch Erstellung sogenannter *Engineered Production Functions* EPF wurden die Teilprozesse vom Holzplatz bis zur Endfertigung hinsichtlich der intensitätsabhängigen Durchschnittskosten beschrieben. Der Entwicklung der EPF und des Kostenmodells wurde durch detaillierte Darstellung besonderes Gewicht beigemessen, so daß betriebsspezifische Anpassungen und individuelle Fragestellungen problemlos durchgeführt bzw. berechnet werden können.

Im Zuge des Projekts wurden mit dem Kosten-Modell verschiedene Berechnungen z.B. hinsichtlich der Zusammensetzung der Produktionskosten, der Ermittlung der optimalen Intensität, von Erweiterungsinvestitionen (Pre-Heater, Verlängerung Heißpresse) und einer Kapazitätserhöhung durchgeführt. Des weiteren wurde die Sensitivität veränderter Rohstoffkosten betrachtet. Es konnte festgestellt werden, daß die fixen Kosten einen Anteil von ca. 30% an den Gesamtkosten besitzen, die Rohstoffkosten ca. 40% betragen und die Personalkosten mit ca. 3% auf einem geringen Niveau liegen. Auch war eindeutig zu erkennen, daß die Produktion grundsätzlich um so kostengünstiger wird, je höher die Produktionsmenge ist, da dann der Anteil der fixen Kosten abnimmt. Begrenzt wird dies durch den Punkt, an dem die Reparaturmehrkosten (z.B. durch Materialverschleiß) überproportional steigen.

Bei den Berechnungen konnte gezeigt werden, daß mit dem Kostenmodell sehr unterschiedliche Fragestellungen schnell und zuverlässig berechnet werden können. Die erstellten Kostenmodelle können von Herstellern von Holzwerkstoffen und deren Zulieferindustrie z.B. zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit neuer Produkte und Techniken verwendet werden. Des weiteren können betriebsindividuelle Kostenmodelle zur kostenorientierten Schwachstellenanalyse sowie bei Ein- und Verkaufsverhandlungen eingesetzt werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	MDF	3
2.1	MDF als Produkt	3
2.2	Herstellung von MDF	3
2.3	Betriebsdatenerfassungs- und Prozeßleitsysteme	4
2.4	Prozeßmodelle	5
2.5	Betriebswirtschaftliche Modelle	7
3	Produktions- und Kostentheorie	7
3.1	Produktionstheorie	7
3.2	Verbrauchsfunktionen	8
3.2.1	Produktionsfunktion vom Typ A (Ertragsgesetz)	9
3.2.2	Produktionsfunktion vom Typ B (Gutenberg)	15
3.2.3	Engineering Production Functions (EPF)	18
4	Datenerhebung	22
5	Ermittlung der Kostenfunktionen	26
5.1	Berechnung der Materialzugänge und -verluste	26
5.2	Betrachtete MDF-Anlage	30
5.3	Materialdurchsatz	30
5.4	Ermittlung der monetären Verbrauchsfunktionen	32
5.4.1	Endfertigung	33
5.4.2	Pressung	35
5.4.3	Formung	37
5.4.4	Trocknung	38
5.4.5	Beleimung	39
5.4.6	Sichtung	40
5.4.7	Fasererzeugung	41
5.4.8	Holzplatz	42
6	Modellbildung	43

7	Anwendungsmöglichkeiten des Kostenmodells in der Praxis.....	46
7.1	Zusammensetzung der Produktionskosten	46
7.2	Optimale Intensität	48
7.2.1	Zeitliche Anpassung.....	50
7.2.2	Intensitätsmäßige Anpassung.....	50
7.3	Berechnung von Szenarien	51
7.3.1	Sensitivitätsanalyse	51
7.3.2	Unterstützung von Investitionsentscheidungen	53
7.3.3	Einfluß von Änderungen im Bereich Rohstoffe und Platteneigenschaften	57
7.3.4	Weitere Anwendungen.....	59
8	Diskussion.....	60
9	Potentiale für weiterführende Untersuchungen	64
10	Literatur	65
11	Veröffentlichungen.....	67
12	Abkürzungsverzeichnis.....	68
13	Abbildungsverzeichnis	69
14	Tabellenverzeichnis.....	70

Erarbeitung betriebswirtschaftlich-technischer Modelle von Anlagen zur Herstellung mitteldichter Faserplatten (MDF)

1 Einleitung

Deutsche Holzwerkstoffhersteller sind heute aufgrund von Überkapazitäten, Substitutionsdruck unter den Holzwerkstoffen, Rationalisierungs- bzw. Modernisierungsdruck, intensiver in- und ausländischer Konkurrenz, sowie steigenden Anforderungen ihrer Kunden hinsichtlich Produktqualität, Lieferterminen und Losgrößen in starkem Maße gezwungen, einen nach Kostengesichtspunkten optimierten Produktionsprozeß zu betreiben. So konnten beispielsweise die Erzeugerpreise für rohe und geschliffene Spanplatten bei steigenden Produktionskosten für Löhne, Klebstoffe und Holz zwischen 1991 und 1997 um über 20 % gesenkt werden.

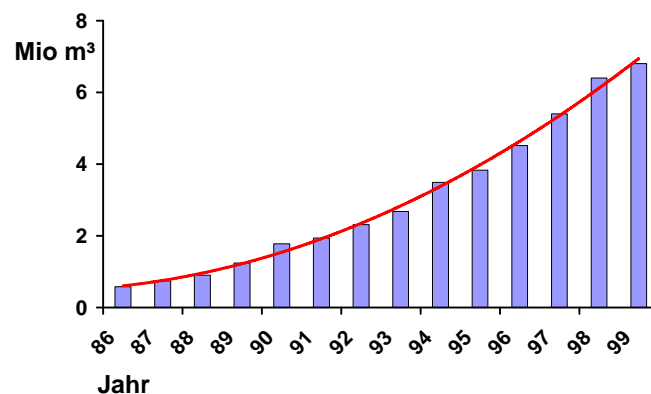


Abbildung 1: Entwicklung des MDF-Verbrauchs in Europa (EPF 2000)

Bei den verschiedenen Holzwerkstoffen sind insbesondere bei der Produktion von MDF-Platten enorme Kapazitätswüchse auszumachen (*Abbildung 1*). Ein Ende dieses Trends ist nicht absehbar. Die MDF-Produktionskapazität erreicht im Jahr 2000 ein Volumen von rund 10,6 Mio. m³ welches einem Verbrauch von ca. 7,8 Mio. m³ entgegensteht (EPF 2000). Auf Grund der Sättigung des europäischen Marktes sind die Produzenten somit gehalten grundsätzlich günstiger zu produzieren sowie einen größeren Teil der Produktion, z.B. nach Süd-Ost Asien, zu exportieren.

Alle Holzwerkstoffe werden in einem nahezu kontinuierlichen Prozeß gefertigt. Durch die Komplexität des Prozesses sind die Anlagenbetreiber zumeist dazu gezwungen die Produktionsschritte von der Rohstoffaufbereitung bis zum fertigen Produkt in Teilabschnitten isoliert zu kontrollieren und zu steuern. Eine Optimierung des Gesamtprozesses kann durch Vernetzung der Teilabschnitte erreicht werden. Voraussetzung für eine weitgehende Prozeßoptimierung ist die umfangreiche Erfassung von Betriebsdaten (z.B. Materialverbräuche, Prozeßeinstellungen, Produkteigenschaften, Kosten), und deren technische Analyse z.B. mit einem Prozeßleitsystem. Durch Kopplung dieser Informationen mit betriebswirtschaftlichen Aspekten, kann der Produktionsprozeß unter Kostengesichtspunkten optimiert werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten

Um auf einem zunehmend globalen Markt für MDF-Platten langfristig konkurrenzfähig zu bleiben, muß die Produktion unter Kostengesichtspunkten optimiert sein.

Projektziel ist es daher, die Zusammenhänge zwischen Produktionsfaktoren und Kostenträgern einer typischen MDF-Produktion in einem betriebswirtschaftlichen Modell („Kostenmodell“) zu beschreiben. Hierdurch sollen verschiedene Betriebszustände ausreichend präzise und schnell berechnet werden können, um so eine fundierte Entscheidungsgrundlage für Produktionsplanungen und Investitionsvorhaben zu erhalten.

2 MDF

2.1 MDF als Produkt

MDF ist ein relativ junger Holzwerkstoff. Die Entwicklung von Faserplatten geht auf frühe Arbeiten u.a. von Asplund und Masonite zurück. Das erste MDF-Werk Europas entstand 1973 in Ribnitz-Damgarten, in der ehemaligen DDR. 1987 wurde in Meppen die erste westdeutsche MDF-Anlage in Betrieb genommen. Zwischenzeitlich wird MDF auf ca. 30 Standorten in Europa produziert.

Der große Vorteil von MDF-Platten liegt in ihrer Homogenität sowohl in der Fläche als auch über die Dicke. Hierdurch resultiert eine hervorragende Kanten- und Oberflächenqualität, weshalb die Platten vorrangig im Möbelbau eingesetzt werden. In letzter Zeit sind verstärkt Anstrengungen unternommen worden, um die Anwendungsbereiche für MDF zu erweitern. Zu nennen ist hierbei vor allem der Einsatz im Bauwesen (z.B. Laminatboden, diffusionsoffene MDF). Eine weitere Diversifizierung der Produkttypen wird auf Grund der bereits angesprochenen Überkapazitäten intensiv betrieben. Gerade die Herstellung höher veredelter Produkte durch hiesige Produzenten ist ein wichtiger Aspekt um angesichts zunehmender Billig-Importe von Standardqualitäten langfristig bestehen zu können.

Tabelle 1: Abschnitte eines Produktlebenszyklus (WOEHE)

Produktlebenszyklus	Unternehmerische Maßnahme
Einführung	Werbung
Wachstum	Erhöhung der Produktivität und der betrieblichen Kapazität
Reife	Werbung; leichte Verbesserung an den angebotenen Leistungen (Face-lifting)
Sättigung	Sonderangebote, Preisreduzierungen, Paketpreise, Diversifizierung
Auslauf	Deinvestition

2.2 Herstellung von MDF

Für die Herstellung von MDF wird der Faserverbund verschiedener Holzsortimente (z.B. Hackschnitzel, Schwachholz, Industrierestholz) durch Applikation von Temperatur, Dampf und mechanischer Energie aufgelöst. Die stark vereinzelt Fasern werden mit Klebharzen und weiteren Additiven (z.B. Wachs, Härter) beaufschlagt und anschließend getrocknet.

Nachfolgend werden die trockenen, beleimten Fasern zu einer sogenannten Matte gestreut. Die Matte wird durch eine Vor- und Heißpresse verdichtet. In der Heißpresse wird die Aushärtung des Klebstoffs durch Temperatureinwirkung stark beschleunigt. Durch Anwendung eines ausreichenden Preßdrucks wird die Matte zu einer Platte definierter Dicke verdichtet. Nach dem Pressen werden die Platten konditioniert, auf Fertigmaß geschnitten und in der Regel geschliffen. Diese sogenannten Rohplatten werden dann der Weiterverarbeitung (z.B. Beschichtung, fräsen, lackieren) zur Herstellung von Laminatböden, Möbelteilen, etc. zugeführt.

In modernen MDF-Produktionsanlagen wird durch weitgehende Automatisierung eine Optimierung des Produktionsprozesses und der Produktionsergebnisse angestrebt. Dieses Ziel kann nur durch eine Koordinierung der Teilprozesse anhand einer Gesamtstrategie erreicht werden. Voraussetzung für eine Prozeßoptimierung ist die umfangreiche Erfassung von Betriebsdaten (Eingangs- und Ausgangsdaten, Systemzustände, Produkteigenschaften), deren Aufarbeitung nach technischen und betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten sowie die Kopplung der Informationsflüsse in einem Prozeßleitsystem (ARNOLD 1984).

2.3 Betriebsdatenerfassungs- und Prozeßleitsysteme

Im Rahmen der Betriebsdatenerfassung werden Produktionsereignisse und -abläufe einander sinnvoll zugeordnet. Hierdurch wird der Gesamtprozeß hinsichtlich Materialfluß, Verbrauch, Auslastung und Produktion transparent. In die Betriebsdatenerfassung können z.B. folgende Daten eingehen:

- Verbrauchsmengen aller Art
- Produktmengen
- Produktionsverluste
- Stillstandzeiten
- Kosten
- Anlagennutzung
- Lagerverwaltung
- Materialverfolgung

Die Ergebnisse der Betriebsdatenerfassung können vielschichtig verwendet werden (z.B. Prozeßsteuerung, Produktionsplanung, Controlling).

Werden die Informationen des Betriebsdatenerfassungssystems zeitlich synchronisiert, zentral erfaßt und mit Systemen zur Maschinensteuerung verknüpft, spricht man von Prozeßleitsystemen. Bei modernen Prozeßleitsystemen werden die einzelnen Produktionsabschnitte wie Faseraufbereitung, Trocknung, Beileimung und Preßvorgang, bei denen jeweils eine eigene Steuer- und Regelungstechnik vorhanden ist, miteinander vernetzt. Hierdurch wird die Kontrolle und Steuerung des Gesamtprozesses von einem zentralen Leitstand aus möglich.

Prozeßleitsysteme können für folgende Aufgaben eingesetzt werden:

- Dokumentation aller relevanten Leistungs- und Verbrauchsdaten mit Auswertung
- Automatische Produktionsumstellung
- Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit (kostenwirksam)
- Einsparung von Rohstoffen und Energie (kostenwirksam)

2.4 Prozeßmodelle

Werden die Daten des Produktionsprozesses derart ausgewertet, daß ein Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der Rohstoffe und den Einstellungen des Prozesses einerseits und der Qualität der Produkte andererseits beschreiben wird, spricht man von einem Prozeßmodell. Voraussetzung für die Prozeßmodellierung sind zeit-synchronisierte Datensätze, die sich aus einem Vektor der Prozeßvariablen und einem Vektor der Qualitätsmerkmale zusammensetzen. Dabei beziehen sich sämtliche Daten auf eine Platte, d.h. alle erfaßten Prozeßvariable entsprechen den Durchlaufzeiten des Materials von der Meßstelle bis zur Entnahme von Probestreifen der betrachteten Platte. Erleichtert wird die Datensatzbildung durch den Einsatz von Betriebsdatenerfassungssystemen, die sowohl der Aufnahme und Speicherung von „on-line“ meßbaren Variablen als auch der entsprechenden zeitlichen Zuordnung zum Plattenstreifen dienen. Nicht „on-line“ meßbare Prozeßvariable wie z. B. Rohstoffcharakteristika können nur manuell erfaßt und hinzugefügt werden (LOBENHOFFER 1990).

Von den unterschiedlichen Methoden zur Prozeßmodellierung wird die experimentell-statistische Variante gegenüber analytischen Methoden oder Ansätzen mit Fuzzy-Logic in der Industrie wie auch in bisherigen Forschungsarbeiten bevorzugt, da diese relativ einfach umsetzbar ist und zu präziseren Ergebnissen führt als die der Fuzzy-Logic. Innerhalb der experimentell-statistischen Modellierung wird die Regressionsanalyse bevorzugt angewendet. Hierbei werden Zusammenhänge zwischen Variablen erforscht mit dem Ziel eine Gleichung

zu etablieren, die bei Kenntnis der Werte der unabhängigen Variablen (Prozeßvariablen) den zu erwartenden Wert der abhängigen Variablen (Qualitätsmerkmal, Produktionskosten) bestimmen kann. LOBENHOFFER (1990) beschäftigt sich mit den statistischen Grundlagen und Voraussetzungen der Prozeßmodellierung. Auf Grundlage technischer Prozeßmodelle lassen sich nach LOBENHOFFER kostenmäßige Optimierungen der Produktion vornehmen. In den von ihm betrachteten Werken liegt das Verhältnis der errechneten optimalen Kosten zu den Ist-Kosten zwischen 0,93 und 0,98. Bei vorsichtiger Einschätzung der Versuchsergebnisse ergibt sich somit eine Kosteneinsparung von wenigstens 1,5 bis 2% der Herstellkosten.

Das von LOBENHOFFER (1990) beschriebene Verfahren wurde von STAHL (1993) und JANSSEN (1997) auf einen MDF-Produktionsprozeß übertragen. THOEMEN und LÉON-MÉNDEZ (1996) wendeten das Verfahren in einer Spanplattenproduktionsanlage an.

Nachfolgend werden die wichtigsten Ziele der Prozeßmodellierung näher erläutert.

Formulierung des Zusammenhangs zwischen Prozeß und Plattenqualität/Simulation

Funktionale Zusammenhänge zwischen den Prozeßvariablen untereinander und zwischen Prozeßvariablen und Qualitätsmerkmalen der Platte werden erkennbar. Mit diesem Instrument können beabsichtigte Prozeßänderungen hinsichtlich der Plattenqualität ohne Versuchskosten und technische Risiken simuliert und beurteilt werden.

Echtzeitqualitätskontrolle

Durch die Echtzeitqualitätskontrolle liegen zuverlässige Schätzwerte der Qualitätsmerkmale lückenlos und ohne Zeitverzug vor. Die auf Monitoren dargestellten Schätzwerte geben dem Anlagenpersonal die Möglichkeit unverzüglich auf Schwankungen der Plattenqualität zu reagieren.

Kostenmäßige Optimierung

Prozeßmodelle dienen als Grundlage für eine zielgerichtete und dokumentierbare Kostenoptimierung der Produktion. Hierfür werden die einstellbaren Kontrollvariablen (z.B. Spanfeuchte, Preßtemperatur, Klebstoffeinsatz) mit Kostendaten verknüpft. Über eine Optimierungsrechnung läßt sich die kostenminimale Kombination der einstellbaren Kontrollvariablen unter Berücksichtigung anlagenspezifischer Restriktionen und vorgegebener Gütekriterien ermitteln. Dafür wird eine Zielfunktion mit Nebenbedingungen aufgestellt. Die Zielfunktion enthält die Produktionskosten als Linearkombination der einstellbaren Kontrollvariablen und ist zu minimieren. Die Nebenbedingungen bestehen aus den Gütebedingungen und den

technologischen Restriktionen. Als Ergebnis der Optimierungsrechnung erhält man die optimalen Werte der einstellbaren Kontrollvariablen (LOBENHOFFER 1988).

2.5 Betriebswirtschaftliche Modelle

Da eine detaillierte Kostenerfassung unter industriellen Bedingungen üblicherweise äußerst aufwendig ist, können, mit vereinfachten Annahmen arbeitende, betriebswirtschaftliche Modelle zunächst einen Überblick über die Kostenstruktur und Sensitivität der Kostenträger verschaffen. Ausgehend von eher globalen Modellen kann dann eine detaillierte Betrachtung einzelner Prozeßabschnitte durchgeführt werden.

Einen ersten Ansatz zur Entwicklung betriebswirtschaftlich-technischer Modelle können Systeme zur Betriebsdatenerfassung darstellen. Werden die Daten in einem Prozeßleitsystem zeitlich synchronisiert und zusammengefasst, sind detaillierte Einblicke in Stoffströme, Verbrauchsdaten etc. möglich. In einem weiteren Schritt können die einzelnen Prozeßvariablen mit Kostenfunktionen belegt werden. Deren Zusammenfassung stellt dann das eigentliche betriebswirtschaftliche Modell dar.

Die Entwicklung betriebswirtschaftlicher Modelle für Holzwerkstoffproduktionsanlagen wird von BECK (1994) beschrieben. Er beschäftigte sich im Rahmen seiner Arbeit mit der modellanalytischen Produktionskostenoptimierung und beschrieb mit Hilfe von Engineering Production Functions (EPF) Ansätze für verschiedene betriebswirtschaftliche Optimierungsszenarien (z. B. Gewinnschwellenberechnung oder kostenminimale Produktionsplanung). Dieser Ansatz wird in den nachfolgenden Abschnitten für die Entwicklung betriebswirtschaftlich-technischer Modelle für MDF-Anlagen verfolgt.

3 Produktions- und Kostentheorie

Die Produktionstheorie beschäftigt sich hauptsächlich mit den mengenmäßigen Beziehungen in einem Produktionsprozeß, während sich die Kostentheorie hauptsächlich mit der monetären Bewertung des Produktionsprozesses beschäftigt.

3.1 Produktionstheorie

Die Produktionstheorie untersucht die Beziehung zwischen Input (Realgütern) und Output (Endprodukten) und stellt sie in einen funktionalen Zusammenhang. In seiner einfachsten Form können Mengeninput und –output wie folgt dargestellt werden.

$$\text{Input} = \frac{\text{Mengeneinheit}}{\text{Zeiteinheit}}$$

$$\text{(Güter-)output} = \frac{\text{Mengeinheit}}{\text{Zeiteinheit}}$$

Die Produktionstheorie dient der effizienten Gestaltung einer Produktion, mit dem Ziel einen bestimmten Ertrag mit einem möglichst geringen Faktoreinsatz zu erreichen oder aber mit einem geringen Faktoreinsatz einen möglichst hohen Ertrag zu erzielen.

Durch Multiplikation der Verbrauchsmengen mit den Faktorkosten ergeben sich die Kosten der Produktion. Die Produktionstheorie ist somit die Grundlage der Kostentheorie.

3.2 Verbrauchsfunktionen

Zur Darstellung der Auswirkung von Veränderungen der Prozeßbedingungen bedient man sich der Verbrauchsfunktionen, eine Bezeichnung aus der von Gutenberg (1971) entwickelten Produktions- und Kostentheorie.

Eine Verbrauchsfunktion zeigt den Einsatz von Produktionsfaktoren in Abhängigkeit von der Maschinenleistung. Für jedes Aggregat entspricht die Anzahl der Verbrauchsfunktionen der Anzahl der eingesetzten Produktionsfaktoren.

Die Verbrauchsfunktionen können verschiedene Formen aufweisen (*Abbildung 2*).

- a) Konstanter Verlauf: z. B. für den Einsatz von Werkstoffen
- b) Exponentieller Verlauf: z. B. Energieverbrauch eines Aggregates
- c) Asymptotischer Verlauf: z. B. bei Zeitlohnarbeit

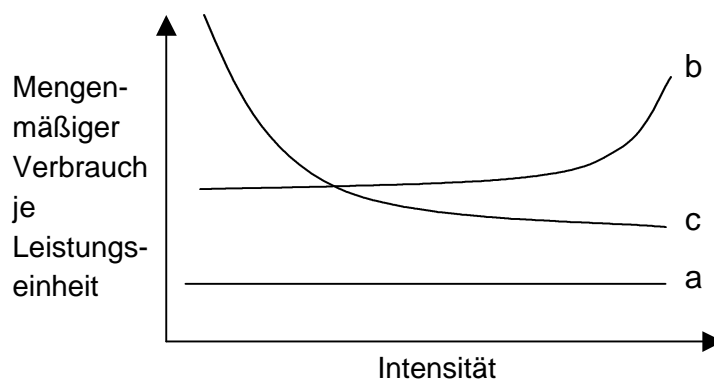


Abbildung 2 : Mögliche Verläufe von Verbrauchsfunktionen

Die Beziehungen zwischen dem mengenmäßigen Einsatz an Realgütern (Input) und der Menge an hergestellten bzw. verwerteten Endprodukten (Output) der Unternehmung werden durch Verbrauchsfunktionen abgebildet (SCHWEITZER 1997).

Die Produktionsfunktion (auch Ertragsfunktion oder Input-Output-Funktion) wird in der allgemeinen Form als

$$x = f(r_1, r_2, \dots, r_n)$$

geschrieben, wobei x die Ausbringung (in Stück, kg o. ä.) und r_1 bis r_n die einzelnen Mengen an eingesetzten Produktionsfaktoren wiedergeben.

Die Kostenfunktion (auch monetäre Produktionsfunktion) stellt die funktionale Beziehung zwischen Ausbringungsmenge und Gesamtkosten dar. Sie wird formal aus der Produktionsfunktion abgeleitet, indem die eingesetzten Produktionsfaktoren mit ihren Preisen (q_1 bis q_n) bewertet werden.

$$x = f(r_1 \cdot q_1, r_2 \cdot q_2, \dots, r_n \cdot q_n)$$

Grundsätzlich werden Verbrauchsfunktionen vom Typ A (Ertragsgesetz) und Typ B (Gutenberg) unterschieden. Ferner gibt es noch aus diesen Grundtypen weiterentwickelte Produktionsfunktionstypen, wie z. B. den Engineering Production Functions *EPF*.

3.2.1 Produktionsfunktion vom Typ A (Ertragsgesetz)

Wird die Menge eines eingesetzten Produktionsfaktors (r) mit ihren Preisen (q) bewertet, so erhält man die Kosten (k).

$$k = r \cdot q$$

Somit entspricht die funktionale Beziehung zwischen Ausbringungsmenge und Kosten der folgenden allgemeinen Form.

$$x = f(r \cdot q)$$

Die Menge des Outputs ist eine Funktion der Menge des Inputs.

Der Ursprung der Produktionsfunktion vom Typ A ist die Beschreibung des Boden-Ertragsgesetzes für die Landwirtschaft von A.R.J. Turgot (1768). Alfred Marshall erweiterte das ursprünglich nur für die Landwirtschaft geltende Gesetz auf die industrielle Fertigung. Es besagt, daß durch zunehmenden Einsatz eines Produktionsfaktors bei Konstanz aller anderen Faktoren Erträge erzielt, die zunächst progressiv und dann degressiv ansteigen um schließlich regressiv zu verlaufen (*Abbildung 3*).

3.2.1.1 Modellprämissen

- Einproduktbetrieb
- Homogene Produkte, beliebig teilbar
- Homogene Inputs, beliebig teilbar
- Momentanproduktion, keine Beachtung der Produktionszeit
- Konstante Produktionstechnik und Kapazität
- Die Inputfaktoren sind gegeneinander peripher substituierbar (Randsubstitutionalität, keine totale Substitution eines Faktors durch einen anderen möglich)

Besonders die letzte Prämisse ist bei einer Ausweitung des Boden-Ertragsgesetzes auf die industrielle Fertigung fraglich.

Analyse-Vorgehensweise

Lediglich einer der Produktionsfaktoren ist variabel, um eine zu komplexe Betrachtung zu vermeiden. Es wird untersucht, wie sich der Ertrag bei einer Erhöhung dieses eines variablen Faktors verändert. Diese Form der Analyse wird mit allen Faktoren einzeln durchgeführt, so daß die Modellanalyse zur Partialanalyse und Partialanpassung wird.

Jeder Faktor wird somit einzeln in seiner Bedeutung für den Ertrag analysiert. Eine Partialanalyse ist nur möglich, bei Substitutität der Produktionsfaktoren, d. h. eine Erhöhung des Ertrages kann durch Veränderung unterschiedlicher Faktoren erreicht werden

3.2.1.2 Beispiel einer ertragsgesetzlichen Produktionsfunktion bei einem variierbaren Einsatzgut

Wird ein Produkt x aus einer veränderlichen Menge des Produktionsfaktors r_1 , sowie einem oder mehreren Produktionsfaktoren $r_2 \dots r_n$, die als konstant angenommen werden, hergestellt, so lautet die Produktionsfunktion:

$$x = f\left(r_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_n\right)$$

Die Produktionsfaktoren $\bar{r}_2 \dots \bar{r}_n$ sind konstant und werden in der weiteren Analyse nicht mehr explizit aufgeführt. Graphisch sieht die Funktion wie folgt aus:

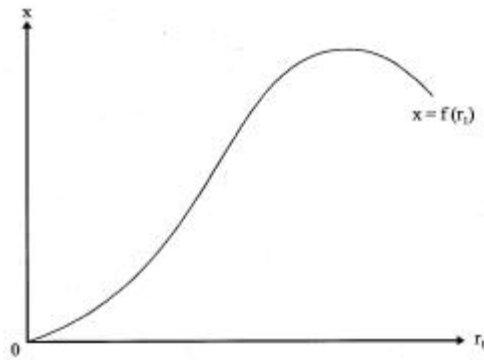


Abbildung 3: Verlauf der ertragsgesetzlichen Produktionsfunktion

Die in *Abbildung 3* dargestellte Kurve wird als Gesamtertragskurve bezeichnet. Aus dieser Kurve lassen sich die Durchschnittsertragskurve und die Grenzproduktivitätskurve (Grenzertragskurve) herleiten.

Die Durchschnittsertragskurve e wird ermittelt, indem der Gesamtertrag in jedem Punkt durch die zugehörige Produktfaktoreinsatzmenge r_1 dividiert wird.

Es gilt:

$$\text{Durchschnittsertrag} = e = \frac{x}{r_1} = \text{tg } \mathbf{a}$$

Die Funktion der Durchschnittsertragskurve lautet entsprechend:

$$e = g(r_1) = \frac{f(r_1)}{r_1}$$

Abbildung 4 veranschaulicht die grafische Herleitung der Durchschnittsertragskurve aus der Gesamtkurve.

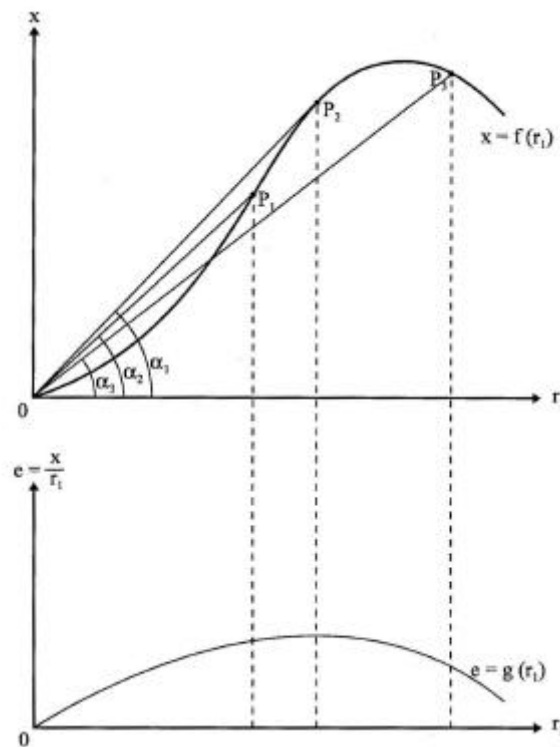


Abbildung 4: Herleitung der Durchschnittsertragskurve aus der Gesamtkurve.

Die Veränderung der Erträge der Variation der eingesetzten Menge r_1 wird durch die Grenzproduktivität ¹ (den Grenzertrag) wiedergegeben. Die Grenzproduktivität ist der Differentialquotient der Gesamtertragsfunktion nach dem variierten Einsatzgut und entspricht damit der Steigung der Gesamtertragskurve.

Es gilt:

$$\text{Grenzproduktivität} = x' = \frac{dx}{dr_1} = h(r_1) = \frac{d[f(r_1)]}{dr_1} = \text{tg } \mathbf{b}$$

Zeichnet man in jedem Punkt Q der Gesamtertragskurve die Tangente (s. *Abbildung 5*), so ist die Grenzproduktivität gleich dem Tangens des Winkels β , den die Tangente an die Gesamtertragskurve mit der Abzisse bildet.

¹ „Die Grenzproduktivität stellt an sich nur ein Verhältnis, und zwar das zwischen den beiden Größen Ertragszuwachs und Zuwachs zur Einsatzmenge des variablen Faktors, also lediglich den Tangens eines Winkels dar.“ (Gutenberg „Die Produktion“, S. 306)

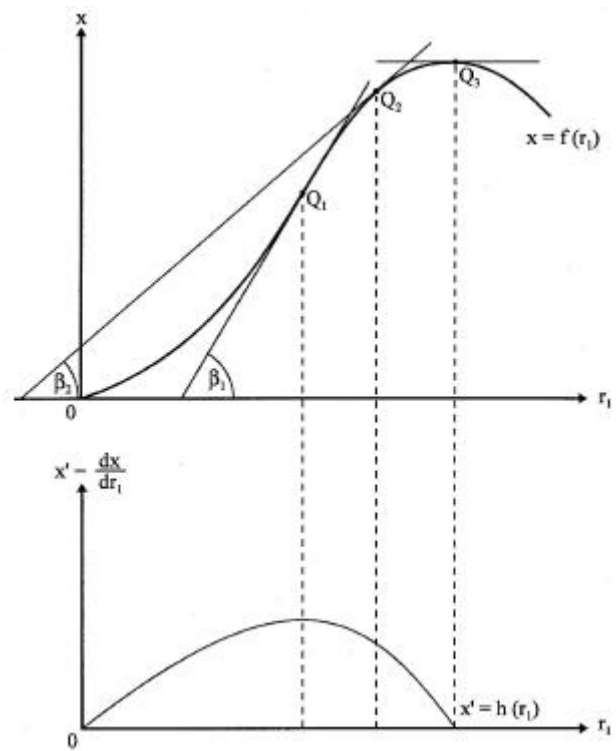


Abbildung 5: Ableitung der Grenzproduktivitätskurve aus der Gesamtertragskurve

In Abbildung 6 wird der Zusammenhang zwischen Gesamtertrag, Durchschnittsertrag und Grenzproduktivität deutlich.

Es lassen sich drei charakteristische Punkte auf der Gesamtertragskurve identifizieren:

1. Der Wendepunkt der Gesamtertragskurve bei $r_1^{(1)}$, wo die Grenzproduktivität ihr Maximum erreicht
2. Der Punkt $r_1^{(2)}$, wo das Maximum des Durchschnittsertrages liegt
3. Das Maximum der Ertragskurve bei $r_1^{(3)}$

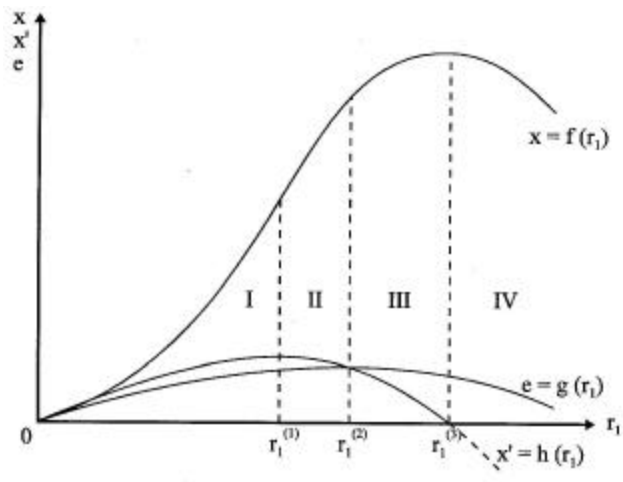


Abbildung 6: Beziehungen zwischen Gesamtertrag, Durchschnittsertrag und Grenzproduktivität

3.2.1.3 Beispiel einer ertragsgesetzlichen Produktionsfunktion bei zwei variierbaren Einsatzgütern

3.2.1.3.1 Totalanpassung

Hierbei werden alle Faktoren gleichzeitig und im gleichen Verhältnis (proportional) variiert. Das Faktorenverhältnis wird beibehalten, eine Erhöhung bzw. Absenkung der Faktoren findet jeweils im gleichen Verhältnis statt.

Eine Totalanpassung führt zu einem linearen Ertragsverlauf. Eine S-Form hingegen erhält man bei der Variation nur eines Faktors (=Partialanpassung).

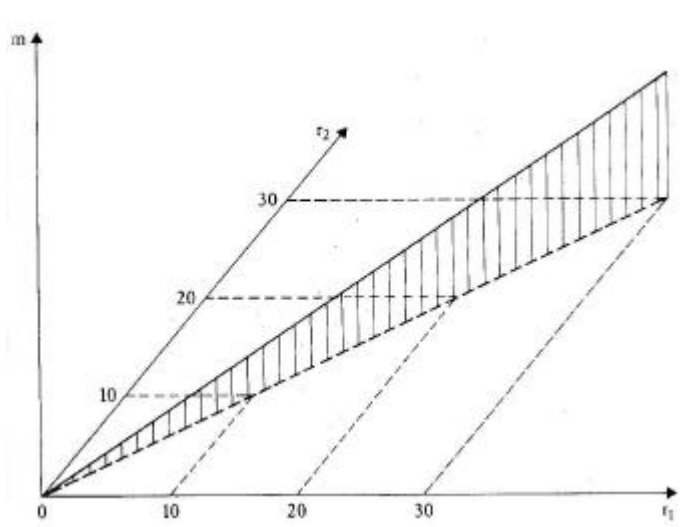


Abbildung 7: Funktionsverlauf bei Totalanpassung

3.2.1.3.2 Ertragsgebirge

In dreidimensionaler Form läßt sich das Ertragsgesetz bei nur zwei Faktoren r_1 und r_2 darstellen. Auf den Abszissen werden die Faktoreinsatzverhältnisse, auf der Höhenachse wird der Ertrag dargestellt. Ausgehend vom Abszissenschnittpunkt bleiben die Faktoreinsatzverhältnisse erhalten (Totalanpassung = linearer Funktionsverlauf). Ausgehend vom Rand bleibt ein Faktor konstant, während der andere verändert wird (Partialanpassung = S-förmiger Funktionsverlauf).

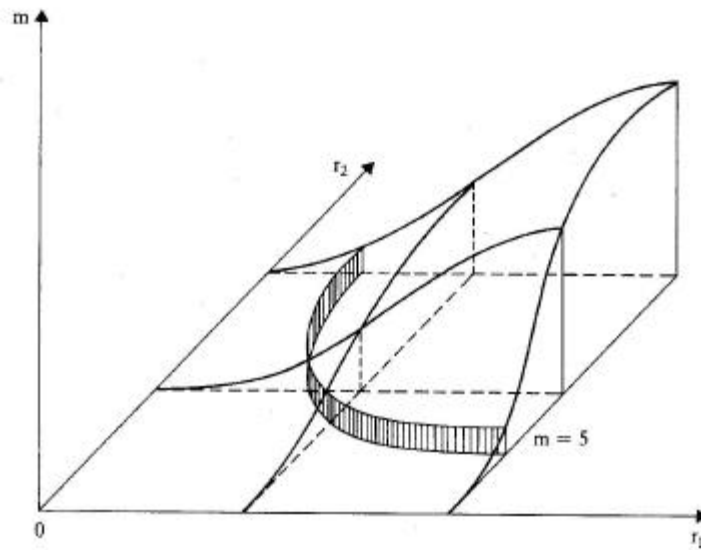


Abbildung 8: Ertragsgebirge

3.2.2 Produktionsfunktion vom Typ B (Gutenberg)

Ausgehend von der Frage inwieweit das Ertragsgesetz und die daraus abgeleiteten Kostenfunktionen für die industrielle Produktion Gültigkeit haben kann, wurde 1951 von GUTENBERG, die Produktionsfunktion vom Typ B entwickelt.

Diese Funktion lautet in allgemeiner Form:

$$r_{i,j} = f(x_j)$$

Mit r für die Produktfaktoreinsatzmenge und x für die Ausbringungsmenge.

Ein wesentlicher Unterschied zum Ertragsgesetz besteht darin, daß keine direkte Abhängigkeit der Faktoreinsatzmengen von der Ausbringungsmenge besteht, sondern daß zwischen Faktorverbrauch und Maschinenleistung nur noch eine indirekte Beziehung zwischen Kosten und Ausbringung dargestellt werden. (HABERSTOCK, 1986)

Eine Verbrauchsfunktion in diesem Sinne gibt also die funktionale Abhängigkeit der Verbrauchsmenge einer bestimmten Faktorart für eine Ausbringungseinheit von der technischen Leistung (Intensität) eines Betriebsmittels wieder.

Der Begriff Intensität entspricht dem physikalischen Begriff der Leistung, als Arbeit pro Zeiteinheit. Die Formel für die Intensität I kann wie folgt dargestellt werden:

$$I = \frac{x}{t}$$

mit x für die Anzahl der Arbeitseinheiten (Ausbringungsmenge) und t für die Zeit.

Für die meisten Betriebsmittel besteht aufgrund technischer Gründe ein Spielraum, innerhalb derer die Intensität variiert werden kann. Die Obergrenze ist hierbei die Maximalintensität I_{\max} und die Untergrenze die Minimalintensität I_{\min} .

In Abhängigkeit vom Intensitätsgrad ändert sich allgemein der Verbrauch an Produktionsfaktoren. Über diesen Zusammenhang geben Verbrauchsfunktionen Auskunft, die in allgemeiner Form für den Produktionsfaktor i wie folgt aussehen:

$$\frac{r_i}{x} = f_i(I)$$

Der Verbrauch des Rohstoffes i auf dem Aggregat j hängt von der Intensität ab, mit der das Aggregat j genutzt wird.

$$r_{i,j} \cdot q_i = f(x_j) \cdot q_i$$

$$k_{i,j} = f(x_j) \cdot q_i$$

Bei einem gegebenen Faktorpreis q können die Produktionskosten bestimmt werden.

Modellprämissen

- Die Funktion darf sich nicht nur auf die reine Input-Output Beziehung beschränken, sondern muß auch berücksichtigen wie der Output erzeugt wurde (Aggregat) (*Abbildung 9*).
- Statt peripherer Substitutionalität gilt Limitionalität. D. h. jeder Leistungsintensität (Leistungsmenge je Zeiteinheit) kann eine ganz bestimmte und nur diese Faktorkombination zugeordnet werden.
- Das Faktor-Input-Output-Verhältnis kann:
 - Immer gleich (linear) oder

- Sich ändernd (über- bzw. unterproportional) sein.
- Die Technik ist mit verbrauchsbestimmend und gekennzeichnet durch limitionale und keine substitutären Prozesse. Jede Ausbringungsmenge hat nur eine Faktorkombination $\frac{r_1}{r_2}$, die konstant ist.

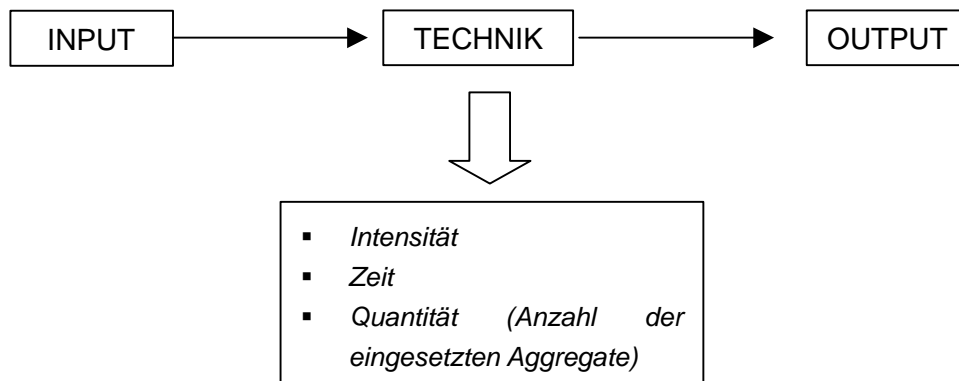


Abbildung 9: Zusammenhang von Input, Technik und Output (SCHWEITZER 1997)

Die Intensität ist für jedes einzelne Aggregat determiniert. Der Gesamtbetrieb ist die Summe aller Produktionsaggregate. Die Anzahl der nötigen Funktionen ergibt sich durch Multiplikation von Aggregate * Produktionsfaktoren.

3.2.2.1 Ermittlung der Verbrauchsfunktionen

Die Verbrauchsfunktion sagt aus, welche Mengeneinheiten pro Zeiteinheit (Input) einzusetzen sind, um einen bestimmten Output zu erreichen. (Verbrauchsfunktionen vom Typ A untersuchen die Umkehrfunktion: Wie hoch ist der Output bei einem bestimmten Input?)

Die Verbrauchsfunktion $r_{i,j}$ gibt den Verbrauch des Faktors i auf dem Aggregat j wieder.

$$r_{i,j} = f(z_{j1}, z_{j2}, \dots; d_j(x_j))$$

d_j = Technische Leistung von j , z.B. Umdrehungszahl pro Minute

x_j = Ökonomische Leistung von j , bei einer bestimmten technischen Leistung d_j (Anzahl von Umdrehungen pro Minuten) wird ein bestimmter Output in Höhe von x erreicht

z_{jk} = technische Eigenschaften des Aggregates j bezüglich des technischen Merkmals k für $k = 1, 2, \dots$ (Bohrung, Verdichtungsverhalten, ...)

Diese Funktion gibt somit eine Input-Output-Beziehung wieder.

Der Input pro Zeiteinheit wird determiniert von:

- (a) der technischen Eigenschaft des Aggregates j (z_{jk})
- (b) der technischen Leistung des Aggregates j (d_j)
- (c) der ökonomischen Leistung des Aggregates j (x_j)

3.2.3 Engineering Production Functions (EPF)

Die Engineering Production Functions – in der deutschen Literatur auch „technische Produktionsmodelle“ genannt - dienen der expliziten Berücksichtigung technischer Eigenschaften bzw. Einflußgrößen von

- Einsatzgütern
- Aggregaten
- Produkten.

Ausgangspunkt für die Formulierung von Engineering Production Functions ist die Erkenntnis, daß zwischen dem *Verbrauch* von Einsatzgütern und *technischen Produktionsbedingungen*² ein Zusammenhang besteht. (SCHWEITZER 1997)

Engineering Production Functions beschreiben somit den funktionalen Zusammenhang zwischen Produktionsfaktorverbrauch (economic variables) und den technischen Einflußgrößen (engineering variables), die diesen Verbrauch bestimmen.

Ziel ist es im weitaus stärkeren Maß technische Gesetzmäßigkeiten und ingenieurmäßiges Denken in die betriebswirtschaftliche Analyse einfließen zu lassen. Hierbei bedient man sich sowohl des Laborexperiments als auch der Beobachtung und Auswertung praktischer Produktionsprozesse .

Die Gutenbergsche Verbrauchsfunktion stellt einen Spezialfall der allgemeineren Engineering Production Functions dar, die sich auf die Intensität als technische Einflußgröße beschränkt.

² Technische Produktionsbedingungen = Erfassung entscheidungsrelevanter technischer Eigenschaften von Einsatzgütern, Aggregaten und Produkten.

3.2.3.1 Aufbau von EPF (nach SCHWEITZER 1997)

(1) Am Produktionsvorgang an einer Stelle sind beteiligt

Potentialgüter (Gebrauchsgüter)

Repetiergüter (Verbrauchsgüter)

Ausbringungsgüter (Produkte)

(2) Alle beteiligten Güter lassen sich kennzeichnen durch ihre

Mengen (Quantität)

Technische Eigenschaften (Attribute)

(3) Für die drei Güterarten aus (1) lassen sich folgende Mengen- und Eigenschaftsvariable einführen:

	Mengenvariable	Eigenschaftsvariable
Potentialgüter	$r_j^G ; j = 1 \dots n$	$(z_{js}^G) = z^G ; j = 1 \dots n$ $s = 1 \dots S$
Repetiergüter	$r_i^V ; i = 1 \dots n$	$(z_{il}^V) = z^V ; i = 1 \dots m$ $l = 1 \dots L$
Produkt	X	$(z_{iq}) = z^x ; q = 1 \dots Q$

(4) Energieverbrauch

E^r sei die Menge an Energie, die benötigt wird, um die Produktmenge x zu erstellen. E^s sei die Energie, die den Gebrauchsgütern für die Produktion zugeführt werden muß.

(5) Die Beziehungen zwischen der Produktmenge x , den technischen Produkteigenschaften z^x , den technischen Verbrauchseigenschaften z^V und der benötigten Energiemenge E^r drücken eine oder mehrere *Transformationsfunktionen* (Material Transformation Function) aus:

$$f_1(x, z^x, z^V, E^r) = 0 \quad (i)$$

(6) Die Menge der zugeführten Energie E^S hängt von der für die Produktion erforderlichen Energie E^r und von den technischen Eigenschaften der Gebrauchsgüter z^G ab. Hierfür gilt die *Energiezufuhrfunktion* (Energy Supply Function):

$$E^S = f_2(E^r, z^G) \text{ bzw. } E^r = f_3(E^S, z^G) \quad (\text{ii})$$

(7) Wird (ii) in (i) eingesetzt, so erhält man die Engineering Production Function:

$$f_1(x, z^X, z^V, f_3(E^r, z^G)) = 0 \text{ bzw. } f_1(x, z^X, z^V, z^G, E^S) = 0 \quad (\text{iii})$$

(iii) ist eine Transformationsfunktion, die den funktionalen Zusammenhang zwischen

- Energiezufuhr E^S
- Produktionsmenge x
- Technischen Produkteigenschaften z^X
- Technischen Eigenschaften der Verbrauchsgüter z^V
- Technischen Eigenschaften der Gebrauchsgüter z^G

in der betrachteten Stelle ausdrückt.

(8) Für die Einsatzmengen der übrigen Repetiergüter r^V und Potentialgüter r^G gelten die folgenden Transformationsfunktionen:

$$r^V = f_h(z^V, z^G, z^X) \quad (\text{iv})$$

$$r^G = f_i(z^V, z^G, z^X) \quad (\text{v})$$

(9) Mit der Engineering Production Function (iii) und den Transformationsfunktionen (iv) und (v) wird der Input-Output-Zusammenhang der betrachteten Stelle sowohl unter Mengen- als auch unter technischen Eigenschaftsaspekten umfassend abgebildet.

3.2.3.2 Empirische Geltung von Engineering Production Functions

Nach SCHWEITZER (1997) ist der empirische Gehalt der Engineering Production Functions abhängig davon, ob sie in der Lage sind die Tatbestände der Realität wiederzugeben, die beobachtbar und meßbar sind. Werden die verwendeten Grundbegriffe, wie „Potentialgüter“, „Repetiergüter“ und „Ausbringungsgüter“ betrachtet, kann festgestellt werden, daß sich diese auf meßbare und beobachtbare Gegenstände der Empirie beziehen. Üblicherweise lassen

sich „Einsatzgüterverbrauch“, „Produktionsmenge“, „technische Produkteigenschaften“, „technische Eigenschaften der Verbrauchsgüter“ und „technische Eigenschaften der Gebrauchsgüter“ hinreichend genau messen. SCHWEITZER (1997) zieht daher den Schluß, daß alle wichtigen Begriffe beobachtbare und weitestgehend auch meßbare Größen der Realität ausdrücken. Somit besitzen mit Engineering Production Functions gebildete Aussagensysteme empirischen Gehalt.

3.2.3.3 Anwendung von Engineering Production Functions

Nach HABERSTOCK (1986) sind Engineering Production Functions, die genauesten und aussagefähigsten Funktionen dieser Art die es geben kann. Jedoch weist er ebenso darauf hin, daß solche technischen Spezialfunktionen nur für sehr wenige Produktionsfaktoren ermittelt werden können, und somit einen zu kleinen Ausschnitt aus dem gesamten Produktionsprozeß wiedergeben. BECK (1994) stellt hierzu fest, daß in modernen Holzwerkstoffproduktionsanlagen durch die weite Verbreitung elektronisch unterstützter Datenaufnahme und Auswertung, sowie des hohen Automatisierungsgrades die Voraussetzungen für den Einsatz von Engineering Production Functions in hohem Maße gegeben sind.

Schlußfolgernd wird im Rahmen dieses Projektes auf den Einsatz von Engineering Production Functions zurückgegriffen, um eine möglichst umfassende und genaue Beschreibung des MDF-Produktionsprozesses zu erreichen.

4 Datenerhebung

Damit Modelle die Realität möglichst präzise widerspiegeln, ist eine sorgfältige und umfassende Datenerhebung elementare Grundvoraussetzung.

Im vorliegenden Fall wurden Daten verschiedener europäischer MDF-Hersteller zur Modellbildung herangezogen. Die technischen Prozeßdaten stammen dabei überwiegend aus den Betriebsdatenerfassungs- bzw. Prozeßleitsystemen sowie ergänzenden handschriftlichen Aufzeichnungen nicht on-line erfaßter Bereiche (z.B. Holzplatz). Zusätzlich wurden betriebswirtschaftliche Daten des betriebsinternen Controlling verwendet. In den Fällen, in denen keine ausreichenden Aufzeichnungen vorhanden waren, wurden Expertenschätzungen eingeholt und den Berechnungen zugrundegelegt.

Die nachstehende Aufzählung zeigt, welche Informationen im Einzelnen berücksichtigt wurden:

<i>Ausrüstungsgegenstände</i>	Spezifizierung der Maschinen Anzahl der Maschinen Investitionskosten pro Maschine Installierte Leistung pro Maschine Leistung in Abhängigkeit vom Materialdurchsatz (soweit differenzierbar)
<i>Energieverbrauch</i>	Strom Heißdampf Prozeßwasser Kühlwasser
<i>Wartung/Personal</i>	Wartungskosten, Wartungszeit pro Maschine Bedienungspersonal pro Maschine Lohnkosten
<i>Rohstoffe (Holz, Chemikalien)</i>	Einkaufspreise Verbräuche Verluste

Für eine adäquate Datenerhebung wurde der komplexe Gesamtproduktionsprozeß in kleine in sich abgeschlossene, analysierbare Teilabschnitte zerlegt (*Abbildung 10*).

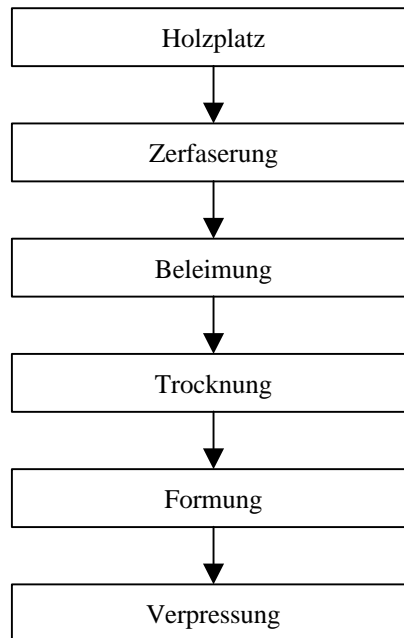


Abbildung 10: Betrachtete Teilprozesse

Bei der Aufteilung des Gesamtprozesses wurde darauf Wert gelegt, daß der jeweilige entstehende Teilprozeß für sich alleine betrachtet werden kann. D. h. Input- und Output-Ströme können explizit für diesen Teilabschnitt definiert und quantifiziert werden.

In *Abbildung 11* ist beispielhaft das Modul *Holzplatz* dargestellt. Als Input-Ströme fallen zum einen Rohstoffe (Rundholz, Hackschnitzel) an, des weiteren fließen Energie, Betriebsstoffe, Personalkosten und Abschreibungen als Input in das Modul ein.

Innerhalb des Moduls sind die Aggregate aufgeführt mit deren Hilfe aus den Input-Strömen das Output erzeugt wird.

Als Output werden zum einen Hackschnitzel erzeugt, die als Input in das nächste Modul (Input) fließen, zum anderen fallen Holzabfälle an, die thermisch zur Energieerzeugung verwendet bzw. recycelt werden.

Die Input- und Output-Ströme unterscheiden sich abhängig von der jeweiligen Aufgabe der Teilprozesse. Im Bereich Beleimung fallen als zusätzlicher Input noch Chemikalien (Klebstoff, Härter, etc.) an. In anderen Modulen ist die Berücksichtigung von z. B. Abwasser notwendig.

Grundsätzlich kann mit der Anzahl der im Modell berücksichtigten Input- und Output-Ströme die Genauigkeit des Modells beeinflußt werden. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass mit zunehmender Berücksichtigung von Faktoren die Komplexität des Modells erhöht und damit dessen Bildung erschwert wird.

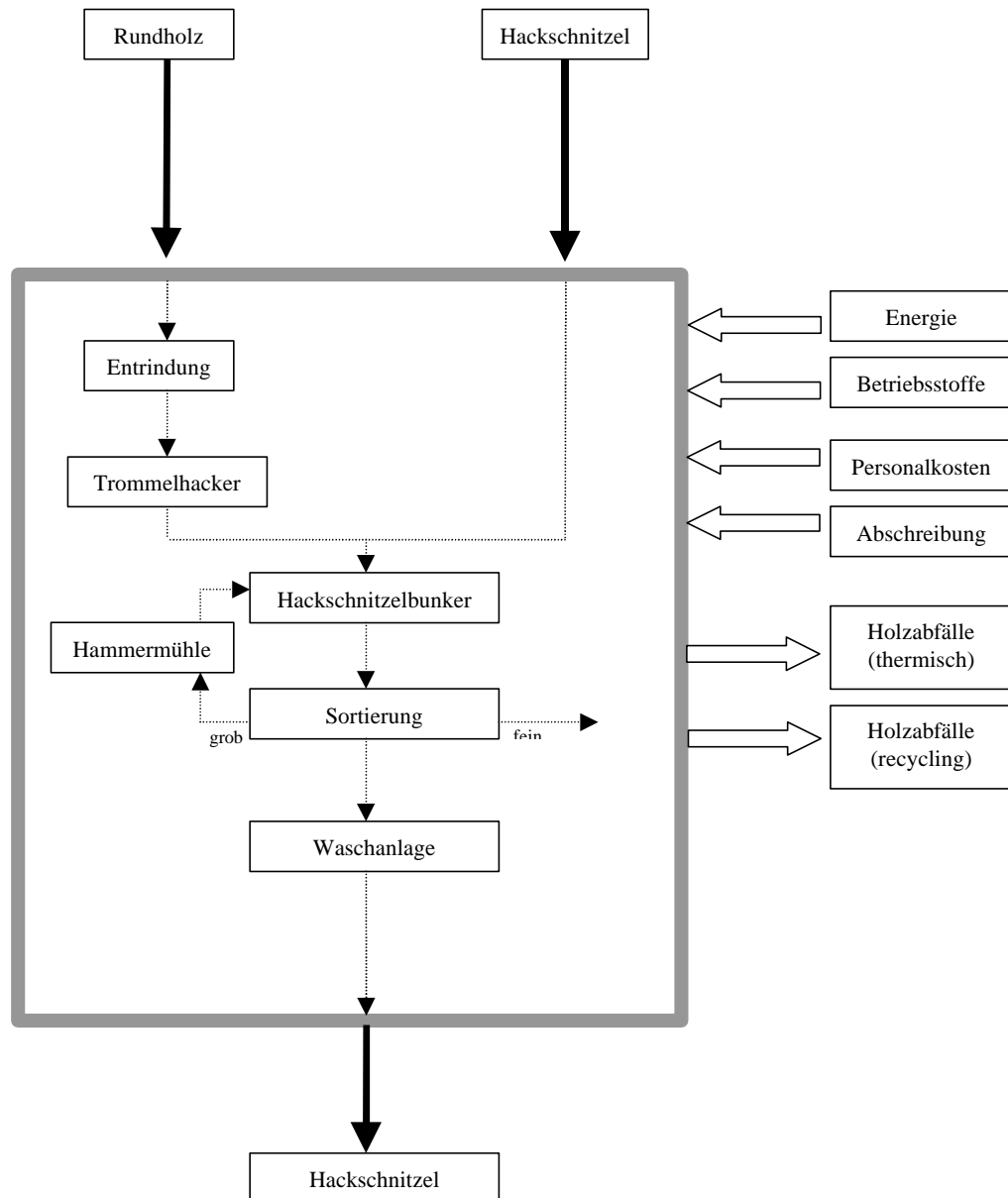


Abbildung 11: Überblick über Input- und Outputströme des Teilabschnittes Holzplatz

Jeder Teilabschnitt wird bezüglich der Maschinenausstattung, installierter Leistung, Materialdurchflüsse etc. charakterisiert. In der folgenden Tabelle sind für die einzelnen Teilprozesse die Maschinen und Aggregate aufgeführt, die im Laufe des Projektes untersucht wurden. Wichtig bei der Bildung von Engineering Production Functions ist die Berücksichtigung von Aggregaten, die in ihrer Leistung in Abhängigkeit von der Produktionsintensität schwanken,

da diese variable Kosten erzeugen, die in einem direkten Zusammenhang mit der Produktionsintensität stehen.

Tabelle 2: Maschinenausstattung einzelner Teilabschnitte

Holzplatz	Fahrzeuge Entrinder Hacker Sichter Hackschnitzelwaschanlage Hackschnitzelbunker Fördereinrichtungen
Zerfaserung	Vordämpfer Kocher Refiner Fördereinrichtungen
Beleimung	Klebstoffbehälter Klebstoffdosierung Blow-line
Trocknung	Trockner Faserbunker Fördereinrichtungen
Formung	Formstationbunker Formstation Fördereinrichtungen
Verpressung	Vorwärmer Vorpresse Heißpresse
Endfertigung	Kühlstern Schleifmaschine Formatsäge
Werkstatt	Elektrische Werkstatt Mechanische Werkstatt
Labor	Laboreinrichtung
Energieanlage/Entsorgungseinrichtungen	Gebäude Kessel Rohrleitungen Abwasserentsorgung

5 Ermittlung der Kostenfunktionen

Die Abhängigkeit von Kosten zur Ausbringungsmenge können mit Kostenfunktionen dargestellt werden. Die Gesamtkosten setzen sich aus einer Vielzahl verschiedener Kostenarten zusammen, die grundsätzlich in fixe und variable Kosten unterteilt werden können. Während des Vorhabens wurde ein besonderes Gewicht auf die Ermittlung der variablen Kosten gelegt. Die Kosten wurden in eine formale Beziehung zur Ausbringungsmenge gesetzt, woraus ein mathematisches Modell entwickelt wurde.

Die Herleitung von Kostenfunktionen wird nach HABERSTOCK in fünf Schritte unterteilt:

1. Ermittlung der Verbrauchsfunktionen
2. Bewertung der Produktionsfaktoren in den Verbrauchsfunktionen mit ihren Preisen
3. Zusammenfassung der Verbrauchsfunktionen durch Vertikaladdition und Ermittlung der Optimalintensität
4. Bestimmung der kurzfristigen Anpassungsform
5. Ableitung des Kostenverlaufs

5.1 Berechnung der Materialzugänge und -verluste

Bei der Herstellung von MDF treten in den verschiedenen Produktionsschritten Materialverluste, wie zum Beispiel beim Formatschneiden durch die Schnittfuge, sowie auch Materialzugänge, wie zum Beispiel durch die Zugabe von Klebstoff während der Beleimung, auf.

Für eine exakte Beschreibung des Produktionsprozesses ist es notwendig die Materialzugänge und -verluste möglichst genau zu erfassen und den jeweiligen Produktionsschritten zuzuordnen.

Zuerst wurde der Produktionsprozeß in einzelne Abschnitte aufgeteilt, die für sich alleine betrachtet werden können (s.o.). Anschließend wurden die jeweiligen Materialverluste bzw. -zugänge ermittelt. Die Werte für die Materialverluste begründeten sich dabei auf Erfahrungswerte von Anlagenbetreibern. Dem gegenüber waren die Materialzugänge, wie z. B. die Klebstoffzugabe, exakt bekannt. In

Tabelle 3 sind die im weiteren berücksichtigten Materialzugänge bzw. -verluste aufgeführt.

Tabelle 3: Materialzugänge und –verluste der Produktionsabschnitte

Produktionsabschnitt	Materialverluste [%]	Materialzugänge [%]
Schleifen	2	
Besäumen	1,5	
Pressung	0	
Trocknung	5	
Beleimung		
<i>Klebstoff</i>		12
<i>Härter</i>		1,5
<i>Wachs</i>		3
<i>Additiv</i>		1
Sichtung	2	
Fasererzeugung	3	
Holzplatz	8	

Die Berechnung der absoluten Verluste und Zugänge erfolgt im Folgenden ausgehend vom Fertigprodukt mit bekannter Rohdichte den Produktionsprozeß rückwärts folgend bis zum Holzplatz.

Schleifen

Die Verluste beim Schleifen betragen 2 %. Die Rohdichte des Fertigprodukts beträgt 800 kg/m³. Somit muß vor dem Schleifen eine Masse von 816 kg vorhanden sein, damit das Fertigprodukt eine Dichte von 800 kg/m³ besitzt.

$$M_{\text{Sch}} = \frac{M_{\text{Fp}} \cdot 100}{100 - V_{\text{Sch}}}$$

Besäumen

Die Materialmasse vor dem Besäumen ergibt sich aus dem Material vor dem Schleifvorgang sowie der Materialverluste beim Besäumen (1,5%).

$$M_{Fs} = \frac{M_{Sch} \cdot 100}{100 - V_{Fs}}$$

Trocknung

Die Verluste beim Trocknen der Fasern betragen 5 %, weshalb eine Masse von 886 kg vor der Trocknung erforderlich ist.

$$M_{Tr} = \frac{M_{Fs} \cdot 100}{100 - V_{Tr}}$$

Beleimung

Im Produktionsabschnitt Beleimung treten keine Materialverluste auf. Allerdings wird hier Material in Form von Klebstoff, Härter, Wachs und Additiven zugeführt. Für eine Differenzierung in Holz und andere Komponenten wird zunächst der Anteil des reinen Holzmaterials im Fertigprodukt berechnet. Hierfür wird ausgehend von der Rohdichte des Fertigproduktes, die Menge an Klebstoff, Härter, Wachs und Additiv berechnet, um anschließend per Subtraktion auf den Holzanteil zu schließen.

$$M_B = \frac{M_{Fs}}{\left(1 + \left(\frac{K_{\%}}{100}\right) + \left(\frac{K_{\%} \cdot H_{\%}}{10000}\right) + \left(\frac{W_{\%}}{100}\right) + \left(\frac{K_{\%} \cdot A_{\%}}{10000}\right)\right)}$$

Ausgehend von der berechneten Holzmenge können die Absolutmengen an Klebstoff, Härter, Wachs und Additiv ermittelt werden. Die Mengen an Klebstoff M_K und Wachs M_W werden hierbei direkt auf die Menge Holz bezogen.

$$M_K = \frac{M_B}{100} \cdot K_{\%}$$

$$M_W = \frac{M_B}{100} \cdot W_{\%}$$

Die Härter-Menge M_H und die der Additive M_A wird dagegen auf den zuvor berechneten Klebstoffgehalt bezogen.

$$M_H = \frac{M_K}{100} \cdot H_{\%}$$

$$M_A = \frac{M_K}{100} \cdot A_{\%}$$

Sichtung

Die Verluste beim Sichten betragen 2%.

$$M_S = \frac{M_B \cdot 100}{100 - V_S}$$

Fasererzeugung

Die Verluste beim Erzeugen der Fasern betragen 3%.

$$M_F = \frac{M_S \cdot 100}{100 - V_F}$$

Holzplatz

Der Materialverlust auf dem Holzplatz beträgt 8%.

$$M_H = \frac{M_F \cdot 100}{100 - V_H}$$

5.2 Betrachtete MDF-Anlage

Für weitere war die zu berücksichtigende MDF-Anlage näher zu spezifizieren. Zu diesem Zwecke wurden Informationen von Maschinen- und Anlagenherstellern, Plattenproduzenten sowie weiteren Literaturangaben zusammengetragen. Hierauf basierend wurde eine aktuelle, europäische Standard-MDF-Anlage definiert (Tabelle 5).

Alle weiteren Berechnungen basieren auf einer MDF-Platte mit einer Dicke von 19 mm und einer Breite von 2,6 m.

Tabelle 5: Spezifikation der MDF-Anlage

Pressenlänge	40.000,00	[mm]
Plattenbreite (Produktionsbreite)	2.600,00	[mm]
Plattendicke	19,00	[mm]
Produktionsstunden	23,00	[Stunden/Tag]
Produktionstage	330,00	[Tage/Jahr]
Kapazität	861,12	[m ³ /Tag]

5.3 Materialdurchsatz

Auf Grundlage oben aufgeführter Spezifikationen können die Materialverbräuche pro Produktionsabschnitt und der Materialdurchsatz pro Stunde berechnet werden (Tabelle 5). Beginnend beim Endprodukt, der fertig geschliffenen Platte, werden nach Abzug des Wassergehalts (hier 5%), entgegen der Produktionsrichtung die Materialverbräuche berechnet. Ziel dieser Berechnung ist es festzustellen, wie hoch in den einzelnen Produktionsabschnitten die Materialverbräuche sind entsprechend angenommener Materialverluste, die sich aus technischen Gründen ergeben und Materialergänzungen, durch die Zugabe von Chemikalien, wie Klebstoff, Härter, etc..

Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse der Materialberechnung

		Masse [kg]	Materialdurchsatz [kg/h] ³
Produkt	Masse Platte im Fertigprodukt	730	
	5 % Wasser (u)	35	
	Masse Platte atro	695	
Schleifen			
<i>Verlust</i>	2 % Masse Platte vor Schleifen	709	26561
Besäumen			
<i>Verlust</i>	1,5 % Masse Platte vor Besäumen	720	26965
Trocknung			
<i>Verlust</i>	5 % Masse beleimte Faser vor Trocknung	758	28385
Beleimung			
	Masse Faser vor Beleimung	658	24618
<i>Klebstoff</i>	12 % Masse Klebstoff	79	2954
<i>Härter</i>	1,5 % Masse Härter	1	44
<i>Wachs</i>	3 % Masse Wachs	20	739
<i>Additiv</i>	1 % Masse Additiv	1	30
Sichtung			
<i>Verlust</i>	2 % Masse Faser vor Sichtung	671	25120
Fasererzeugung			
<i>Verlust</i>	3 % Masse Holz vor Fasererzeugung	692	25897
Holzplatz			
<i>Verlust</i>	8 % Masse Holz	752	28149

³ Materialdurchsatz pro Stunde im jeweiligen Produktionsabschnitt

5.4 Ermittlung der monetären Verbrauchsfunktionen

Kostenfunktionen stellen den monetären Verbrauch an Produktionsfaktoren in Abhängigkeit von der Maschinenleistung dar. Die Maschinenleistung im Rahmen der Modellbildung wird anhand der Durchsatzmenge des Fasermaterials angegeben.

Tabelle 7 zeigt die einzelnen Produktionsabschnitte mit ihrer installierten Leistung, der maximalen Kapazität und dem notwendigen Bedienpersonal.

Tabelle 7: Installierte Leistung, maximale Kapazität und erforderliches Bedienpersonal je Produktionsabschnitt

Produktionsabschnitt	Installierte Leistung [kWh]	max. Kapazität [m³/h]	Bedienpersonal
Endfertigung	75	27000	1,50
Verpressung	455	30000	0,75
Formung	315	30000	0,75
Trocknung	95	30000	0,50
Beleimung	20	22000	0,50
Sichtung	1580	28000	0,50
Fasererzeugung	4040	28000	0,50
Holzplatz	414	30000	3,00

In diesem Kapitel wird dargestellt, wie die Produktionsfaktoren monetär bewertet und anschließend in einen funktionellen Zusammenhang zur Fasermenge gesetzt werden.

Folgende Produktionsfaktoren werden dabei berücksichtigt:

Bedien- und Wartungskosten

Diese Kosten werden durch Multiplikation des Stundensatzes mit der Anzahl der Mann-Stunden berechnet. Als Stundensatz wird der Planpreis für eine Stunde in einer Höhe von 50,- DM (ohne Berücksichtigung von freiwilligen und gesetzlichen Sozialleistungen) angenommen.

Die folgende Formel dient zur Berechnung der Personalkosten pro Produktionsabschnitt.

$$K_{BW} = K_{St} \cdot n_{MSt}$$

Reparatur- und Inspektionskosten

Diese Daten wurden im Rahmen des Projektes anhand von Angaben des innerbetrieblichen Controlling ermittelt.

Reparaturmaterialkosten

Diese Daten wurden ebenfalls im Rahmen des Projektes anhand von Angaben des innerbetrieblichen Controlling ermittelt.

Energiekosten

Die Kosten für elektrische Energie wurden durch Multiplikation der benötigten Maschinenleistung mit dem Preis für eine kWh (0,05 DM) berechnet.

Es wurde davon ausgegangen, daß thermische Energie durch 100%ige thermische Verwertung von Produktionsabfällen (Materialverluste) sowie ergänzend fossilen Brennstoffen in einer werkseigenen Kesselanlage produziert wird. Dementsprechend entstehen Kosten lediglich durch Zukauf von fossilen Brennstoffen.

5.4.1 Endfertigung

Unter dem Produktionsabschnitt Endfertigung werden die Arbeitsschritte Schleifen und Formatschneiden zusammengefaßt betrachtet.

Die verschiedenen Berechnungen, die für jeden Produktionsabschnitt durchgeführt werden müssen, soll ausführlich am Beispiel des Abschnitts Endfertigung dargestellt werden.

Tabelle 8: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Endfertigung

		A	B	C	D
Auslastung	kg/h	27000	25000	23000	21000
Bedien- und Wartungskosten	DM/h	75	75	75	75
Reparatur- und Inspektionskosten	DM/h	14	12	10	9
Reparaturmaterialkosten	DM/h	12	11	7	52
Energiekosten	DM/h	23,75	23,75	23,75	23,75
Gesamtkosten	DM/h	124,75	121,75	115,75	112,75
Durchschnittskosten	DM/kg	0,0046	0,0049	0,0050	0,0054

Die anfallenden Kosten sind in Tabelle 8 für verschiedene Auslastungsgarde aufgeführt.

Die Bedienungs- und Wartungskosten ergeben sich aus der Multiplikation der erforderlichen Mannstunden für diesen Abschnitt (1,5 Mannstunden) und den Kosten pro Stunde (50,00 DM). Die Bedienungs- und Wartungskosten fallen hier unabhängig von der Maschinenintensität in gleicher Höhe an.

Die Reparatur- und Inspektionskosten sowie die Reparaturmaterialkosten basieren auf Erfahrungswerten von Anlagenbetreibern. Bedingt durch einen zunehmenden Verschleiß bei höheren Durchsatzmengen wird mit einem Anstieg der Kosten bei höher Maschinenauslastung gerechnet.

Die Energiekosten, die sich in diesem Fall lediglich auf Kosten für Elektrizität beziehen, wurden anhand der installierten Leistung der einzelnen Maschinen in diesem Abschnitt berechnet. Bei den Berechnungen werden die in Tabelle 9 genannten Maschinen berücksichtigt.

Tabelle 9: Berücksichtigte Maschinen mit installierter Leistung im Bereich Endfertigung

Besäumung u. Absaugung	40	kWh
Schleifmaschine	310	kWh
Transport	110	kWh
Diagonal-Säge	15	kWh
Summe	475	kWh

Durch Multiplikation des Gesamtverbrauchs an elektrischer Energie mit einem angenommenen Preis von 0,07 DM pro kWh ergibt sich ein Betrag von 33,25 DM/h.

Im Rahmen dieses Berechnungsbeispiels wird davon ausgegangen, daß der Energieverbrauch unabhängig von der Maschinenintensität konstant ist. Es ist hinlänglich bekannt, daß die Schleifmaschine in ihrem Energieverbrauch schwankt. Es lagen jedoch keine konkreten Angaben vor und es ist davon auszugehen, daß diese Energieschwankungen auch wahrscheinlich nicht signifikant sind.

Die Gesamtkosten werden durch Addition der Kosten für die einzelnen Produktionsfaktoren ermittelt. Nach Division der Gesamtkosten durch die Intensität werden anschließend die Durchschnittskosten ermittelt.

Die monetäre Verbrauchsfunktion wird basierend auf den errechneten Kosten aus Tabelle 8 mit Hilfe der Polynom-Regression ermittelt. Mit einem Tabellenkalkulationsprogramm (MS-Excel) wird sowohl der Funktionsverlauf dargestellt, als auch die Funktionsgleichung ermittelt (Abbildung 12). In diesem Fall lautet die Funktionsgleichung:

$$y = 6,25E^{-11}x^2 - 4,25E^{-06}x + 0,01154375.$$

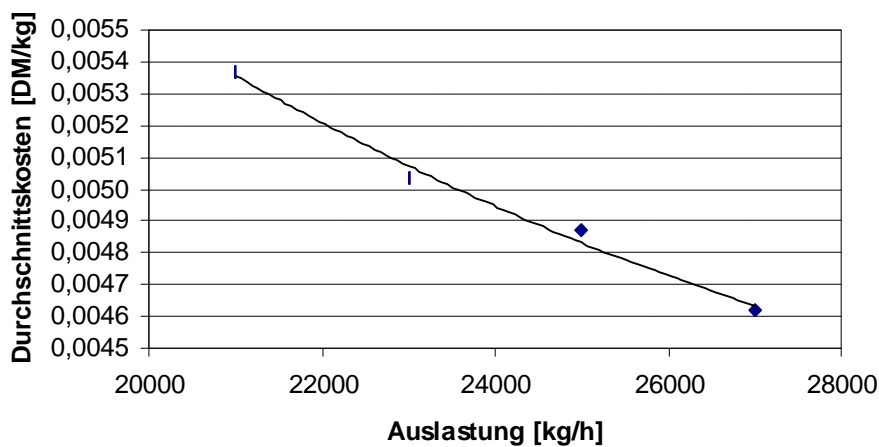


Abbildung 12: Funktionsverlauf der Durchschnittskosten im Produktionsbereich Endfertigung

5.4.2 Pressung

Die Berechnungen für diesen Abschnitt beziehen sich auf die Heißpresse und die Vorpresse.

Die Methodik der Berechnung dieses Produktionsabschnitts ist identisch mit der zuvor ausführlich dargestellten. Aus diesem Grunde wird nur auf einige Besonderheiten dieses Produktionsabschnitts eingegangen.

Tabelle 10: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Verpressung

		A	B	C	D
Auslastung	kg/h	30000	28000	26000	24000
Bedien und Wartungskosten	DM/h	37,5	37,5	37,5	37,5
Reparatur- und Inspektionskosten	DM/h	15	13	11,5	10
Reparaturmaterialkosten	DM/h	13	11,5	9,5	9
Energiekosten	DM/h	22,5	22,5	22,5	22,5
Gesamtkosten	DM/h	88,0	84,5	81,5	79,0
Durchschnittskosten	DM/kg	0,002933	0,003018	0,003115	0,003292

Für die Berechnung der Bedien- und Wartungskosten wurde eine Mannstunde angesetzt. Die Energiekosten setzen sich aus den Kosten für elektrische Energie und thermische Energie zusammen. Bei der Berechnung des thermischen Energieverbrauchs wird davon ausgegangen, daß die benötigte Energie sowohl aus Produktionsabfällen als auch mit Hilfe von fossilen Energieträgern erzeugt wird. In der Berechnung wurde ein elektrischer Energieverbrauch von 255 kWh und ein thermischer Energieverbrauch von 350 MJ je m³ produzierter Platte zugrundegelegt. Der Effizienzgrad der Heißpresse wurde mit 85% angenommen.

Nach Berechnung der Kosten kann durch Polynom-Regression die monetäre Verbrauchsfunktion ermittelt werden:

$$y = 5,75E^{-12}x^2 - 3,692E^{-07}x + 0,0088374.$$

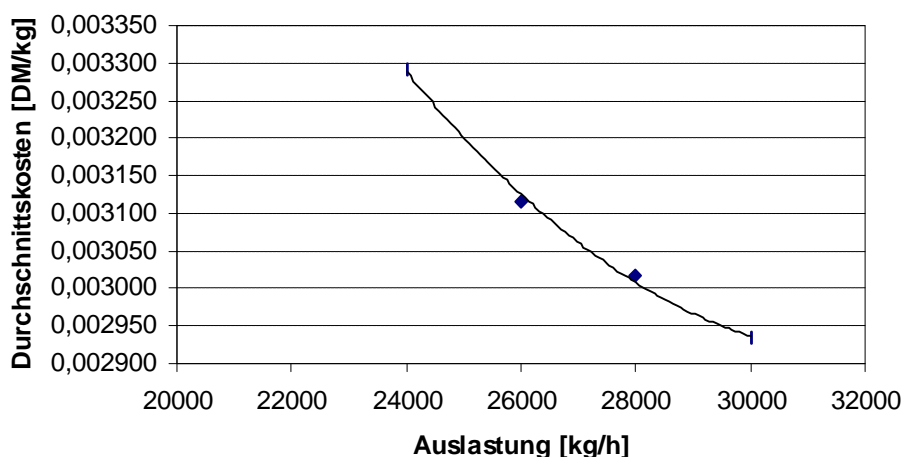


Abbildung 13: Funktionsverlauf der Durchschnittskosten im Produktionsbereich Verpressung

5.4.3 Formung

Für den Produktionsabschnitt Formung wird ebenfalls mit einer Mannstunde gerechnet. Die Energiekosten beschränken sich auf den Verbrauch von elektrischer Energie.

Tabelle 11: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Formung

		A	B	C	D
Auslastung	kg/h	30000	28000	26000	24000
Bedien- und Wartungskosten	DM/h	37,5	37,5	37,5	37,5
Reparatur- und Inspektionskosten	DM/h	8	6	5	4
Reparaturmaterialkosten	DM/h	9	7	5	4
Energiekosten	DM/h	15,75	15,75	15,75	15,75
Gesamtkosten	DM/h	70,25	66,25	63,25	61,25
Durchschnittskosten	DM/kg	0,00234	0,00237	0,00243	0,00255

Nach Addition der Kosten kann mit Hilfe der Polynom-Regression wiederum die monetäre Verbrauchsfunktion ermittelt werden:

$$y = 5,625E^{-12}x^2 - 3,3825E^{-07}x + 0,0074265.$$

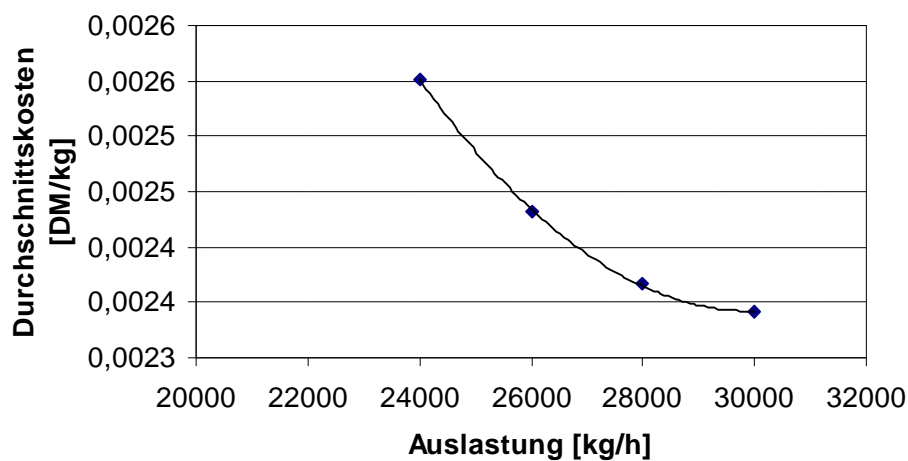


Abbildung 14: Funktionsverlauf der Durchschnittskosten im Produktionsbereich Formung

5.4.4 Trocknung

Im Produktionsabschnitt Trocknung wurde mit einer halben Mannstunde gerechnet. Der Energieverbrauch setzt sich in diesem Abschnitt aus elektrischer Energie und thermischer Energie zusammen. Der Verbrauch an elektrischer Energie beträgt 75 kWh. Der Verbrauch an thermischer Energie wurde anhand des Energieverbrauchs berechnet, der für die Verdunstung von 1 kg Wasser aus Holz benötigt wird (3560 kJ/kg). Zur Erzeugung der thermischen Energie werden sowohl Produktionsabfälle, als auch fossile Energieträger benutzt.

Tabelle 12: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Trocknung

		A	B	C	D
Auslastung	kg/h	30000	28000	26000	24000
Bedien- und Wartungskosten	DM/h	25	25	25	25
Reparatur und Inspektionskosten	DM/h	15	13	10	8
Reparaturmaterialkosten	DM/h	11	9,5	8	7
Energiekosten	DM/h	434,80	434,80	434,80	434,80
Gesamtkosten	DM/h	485,80	482,30	477,80	474,80
Durchschnittskosten	DM/kg	0,0162	0,0172	0,0194	0,0198

Nach Ermittlung der Durchschnittskosten kann, wie auch bei den vorherigen Abschnitten, durch Polynom-Regression, die monetäre Verbrauchsfunktion ermittelt werden:

$$y = 2,5E^{-11}x^2 - 1,95E^{-06}x + 0,0522.$$

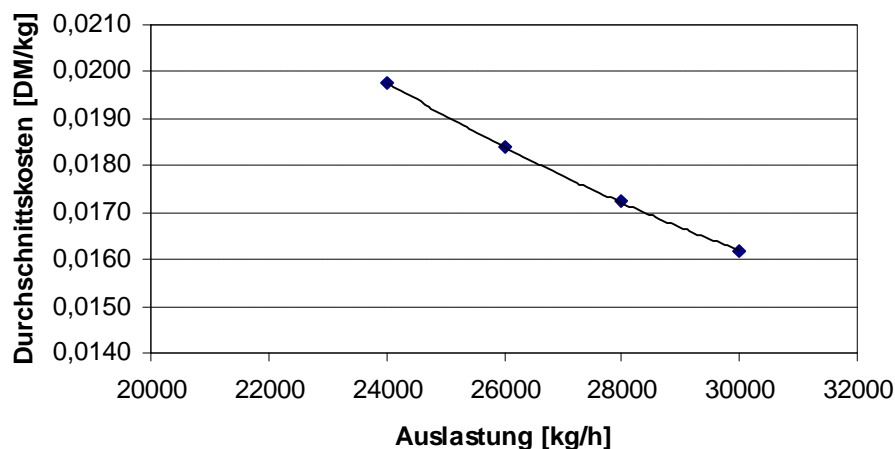


Abbildung 15: Funktionsverlauf der Durchschnittskosten im Produktionsbereich Trocknung

5.4.5 Beleimung

Für diesen Produktionsabschnitt wurde ebenfalls mit einer halben Mannstunde gerechnet.

Tabelle 13: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Beleimung

		A	B	C	D
Auslastung	kg/h	26000	25000	24000	23000
Bedien- und Wartungskosten	DM/h	25	25	25	25
Reparatur- und Inspektionskosten	DM/h	13	11	9	8
Reparaturmaterialkosten	DM/h	10	8	6	5
Energiekosten	DM/h	1	1	1	1
Gesamtkosten	DM/h	49	45	41	39
Durchschnittskosten	DM/kg	<i>0,0019</i>	<i>0,0018</i>	<i>0,0017</i>	<i>0,0017</i>

Da in diesem Produktionsbereich lediglich in geringem Umfang Energie verbraucht wird und keine Daten zur Verfügung standen, wurde diese konstant auf 1 DM/h gesetzt. Die monetäre Verbrauchsfunktion für diesen Bereich lautet:

$$y = 1,825E^{-11}x^2 - 8,2835E^{-07}x + 0,01108945.$$

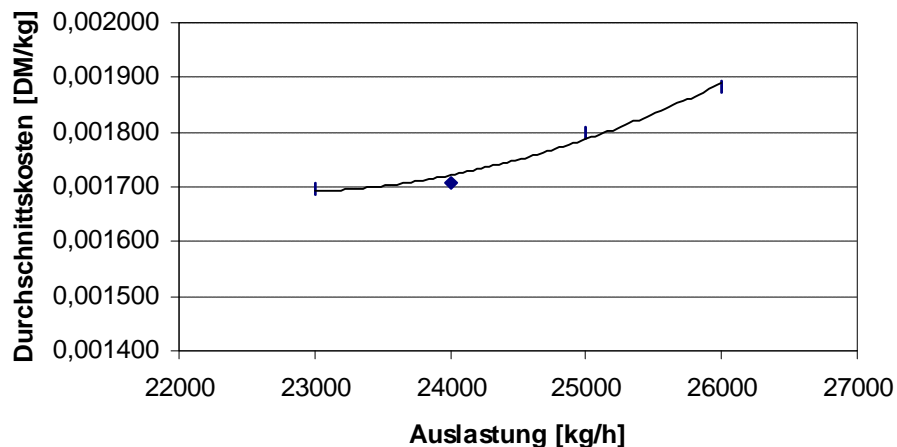


Abbildung 16: Funktionsverlauf der Durchschnittskosten im Produktionsbereich Beleimung

5.4.6 Sichtung

Für diesen Produktionsabschnitt wurde ebenfalls mit einer Mannstunde gerechnet.

Tabelle 14: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Sichtung

		A	B	C	D
Auslastung	kg/h	27000	26000	25000	24000
Bedien- und Wartungskosten	DM/h	25	25	25	25
Reparatur- und Inspektionskosten	DM/h	14	12	11	9
Reparaturmaterialkosten	DM/h	12	10	9	8
Energiekosten	DM/h	79	79	79	79
Gesamtkosten	DM/h	130	126	124	121
Durchschnittskosten	DM/kg	0,0048	0,0048	0,0050	0,0050

Die monetäre Verbrauchsfunktion für diesen Bereich lautet:

$$y = 1,275E^{-11}x^2 - 7,2975E^{-07}x + 0,01521775.$$

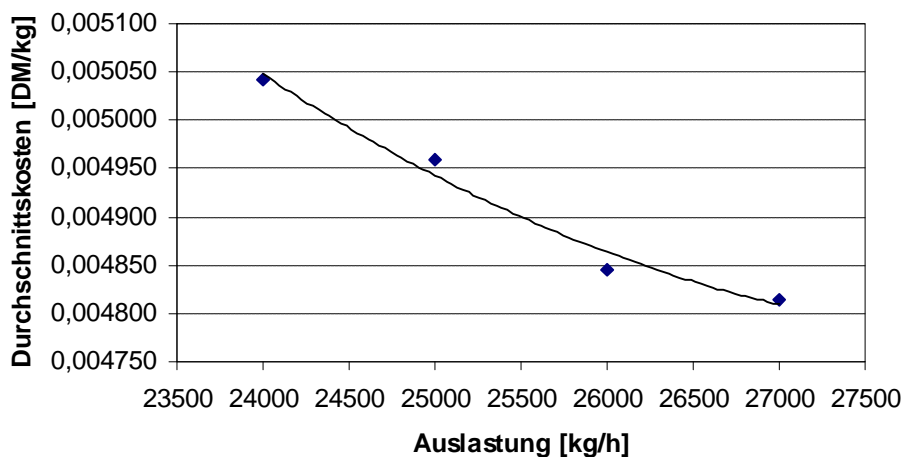


Abbildung 17: Funktionsverlauf der Durchschnittskosten im Produktionsbereich Sichtung

5.4.7 Fasererzeugung

Für diesen Produktionsbereich wurde eine Mannstunde zugrundegelegt.

Tabelle 15: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Fasererzeugung

		A	B	C	D
Auslastung	kg/h	27000	26000	25000	24000
Bedien u. Wartungskosten	DM/h	25	25	25	25
Rep. u. Inspektionskosten	DM/h	11	9,5	7,5	6,5
Reparaturmaterialkosten	DM/h	10	8	6	5
Energiekosten	DM/h	202	202	202	202
Energiekosten variabel	DM/h	175,5	169,0	162,5	156
Gesamtkosten	DM/h	423,5	413,5	403,0	394,5
Durchschnittskosten	DM/kg	0,0157	0,0159	0,0161	0,0164

Bei der Berechnung der Energiekosten wird in diesem Fall einen fester, auslastungsunabhängigen Betrag und ein variabler, auslastungsabhängiger Betrag berücksichtigt.

Die monetäre Verbrauchsfunktion für diesen Bereich lautet:

$$y = 2,5E^{-11}x^2 - 1,505E^{-06}x + 0,038115.$$

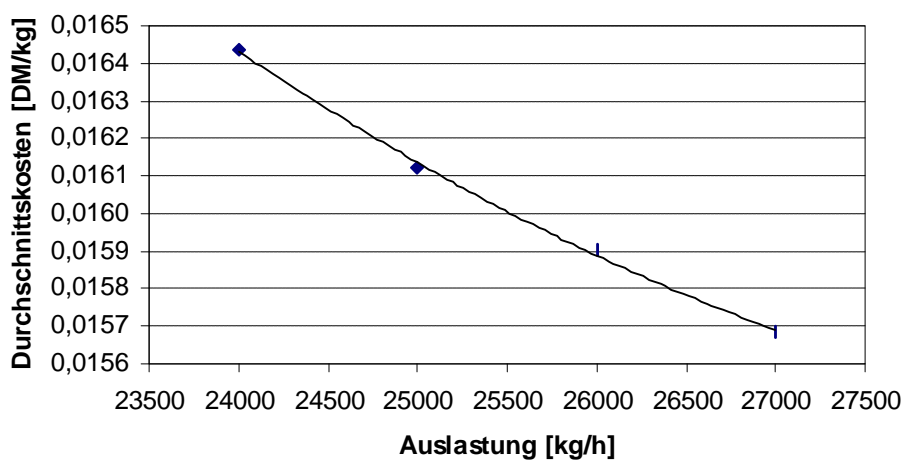


Abbildung 18: Funktionsverlauf der Durchschnittskosten im Produktionsbereich Fasererzeugung

5.4.8 Holzplatz

Für diesen Produktionsbereich wurde mit drei Mannstunden gerechnet.

Tabelle 16: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Holzplatz

		A	B	C	D
Auslastung	kg/h	30000	28000	26000	24000
Bedien- und Wartungskosten	DM/h	150	150	150	150
Reparatur- und Inspektionskosten	DM/h	10	9	7	6
Reparaturmaterialkosten	DM/h	10	8	7	5
Energiekosten	DM/h	21	19	17	15
Gesamtkosten	DM/h	191	186	181	176
Durchschnittskosten	DM/kg	0,0064	0,0066	0,0070	0,0073

Die monetäre Verbrauchsfunktion für diesen Bereich lautet:

$$y = 6,25E^{-12}x^2 - 4,925E^{-07}x + 0,015535.$$

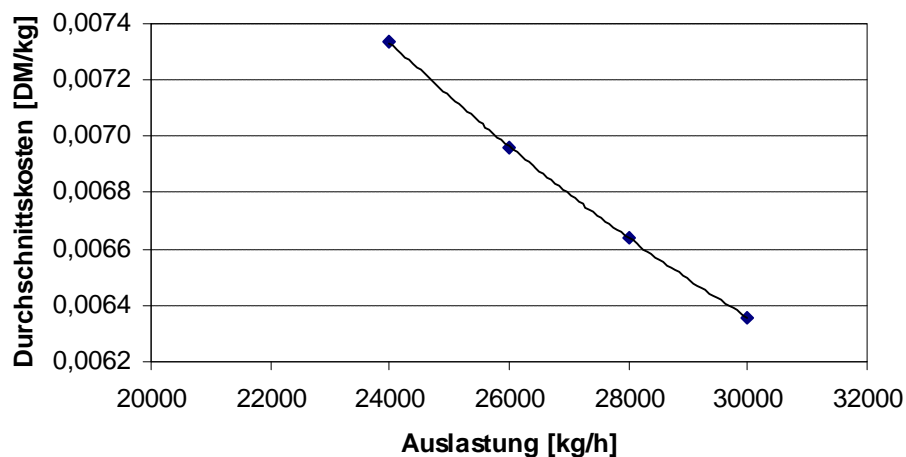


Abbildung 19: Funktionsverlauf der Durchschnittskosten im Produktionsbereich Holzplatz

6 Modellbildung

Die für einzelne Produktionsabschnitte ermittelten Verbrauchsfunktionen werden im folgenden zu einer Gleichung dem Kostenmodell zusammengefaßt.

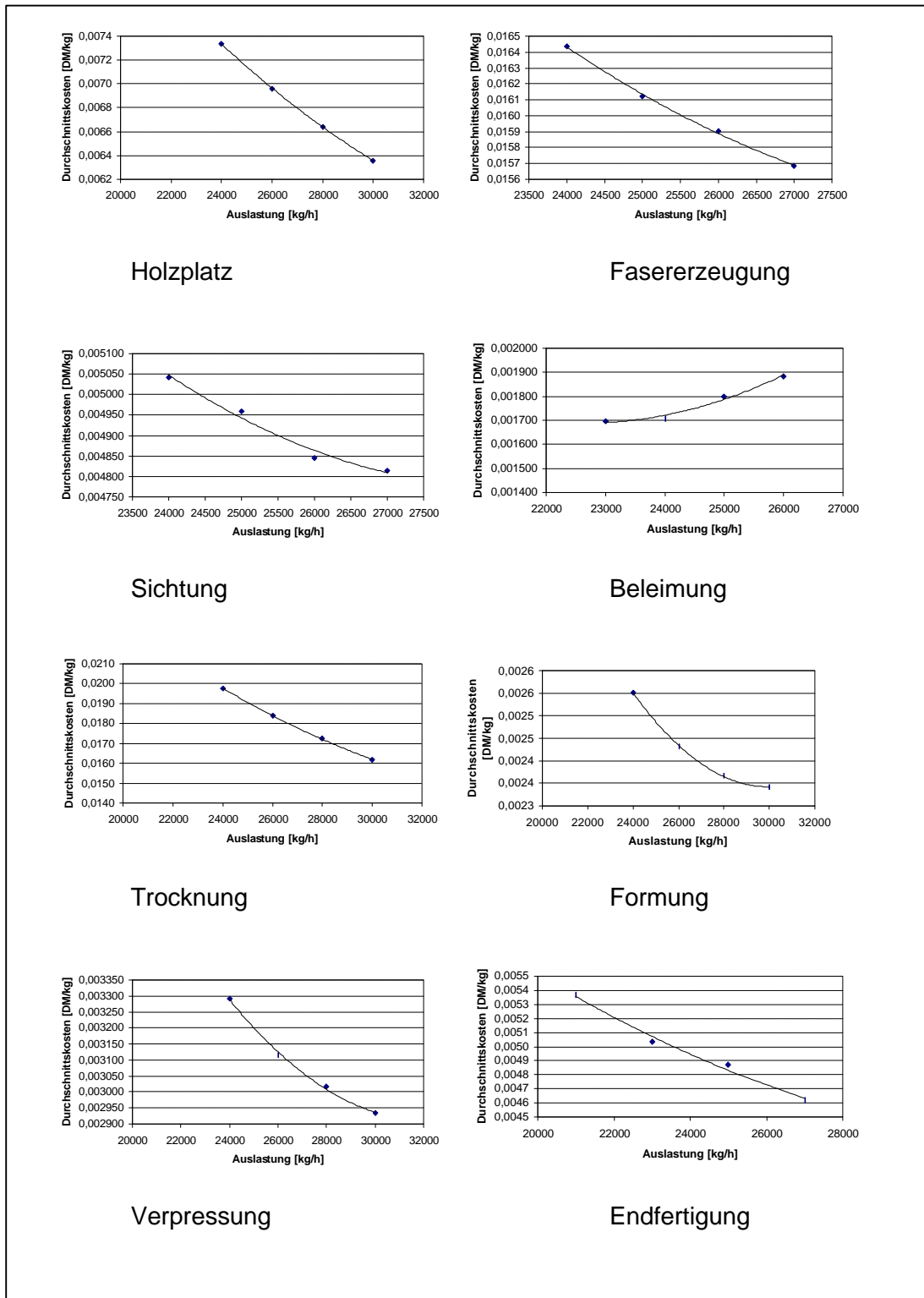


Abbildung 20: Überblick über alle ermittelten monetären Verbrauchsfunktionen

Die Ermittlung der Gesamtkostenfunktion erfolgt durch vertikale Addition der einzelnen Kostenfunktionen.

Tabelle 17: Ermittlung der Gesamtkostenfunktion

Holzplatz	$y = 6,25E^{-12} x^2 - 4,93E^{-07} x + 0,01553$
Fasererzeugung	$y = 2,50E^{-11} x^2 - 1,51E^{-06} x + 0,03811$
Sichtung	$y = 1,28E^{-11} x^2 - 7,30E^{-06} x + 0,01521$
Beleimung	$y = 1,83E^{-11} x^2 - 8,28E^{-07} x + 0,00266$
Trocknung	$y = 2,50E^{-11} x^2 - 1,95E^{-06} x + 0,05220$
Formung	$y = 5,63E^{-12} x^2 - 3,38E^{-07} x + 0,00742$
Pressung	$y = 5,75E^{-12} x^2 - 3,69E^{-07} x + 0,00883$
Endfertigung	$y = 6,25E^{-12} x^2 - 4,25E^{-06} x + 0,01154$
	$y = 1,05E^{-10} x^2 - 6,64E^{-06} x + 0,15996$

Die ermittelte Gesamtkostenfunktion für das vorgegebene Produkt lautet:

$$Y = 1,05E^{-10}x^2 - 6,64E^{-06}x + 0,15996.$$

In ist der Verlauf der Gesamtkostenfunktion abgebildet. Die auf der y abgebildeten Kosten beziehen sich auf Aufwendungen, die für Personal, Energie und Wartung entstehen. Zur Ermittlung der Gesamtkosten müssen z.B. noch Abschreibungen und Kosten für den Rohstoffverbrauch addiert werden.

Es ist eindeutig zu erkennen, daß sich die Kosten pro m³ mit zunehmender Ausbringungsmenge verringern. Wobei jedoch die Kostenreduzierung im Bereich der niedrigen Kapazitäten wesentlich deutlicher auftritt, als im Bereich hoher Kapazitäten.

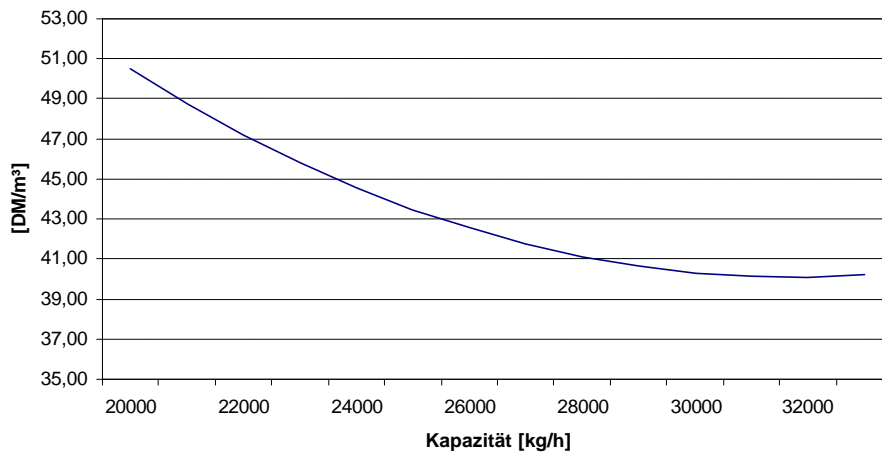


Abbildung 21: Verlauf der Gesamtkostenfunktion

7 Anwendungsmöglichkeiten des Kostenmodells in der Praxis

Aus der Vielzahl möglicher Anwendungen des Modells sollen im folgenden einige angesprochen und teilweise vorgerechnet werden.

7.1 Zusammensetzung der Produktionskosten

Ausgehend von den ermittelten Kosten für Personal, Energie und Reparatur/Wartung, können durch Addition der Kosten für Rohstoffe (Holz und Chemikalien) und Abschreibung die Gesamtkosten je produziertem m³ MDF berechnet werden.

Tabelle 18 zeigt die Zusammensetzung der Kosten für eine 19 mm Standard-MDF-Platte. Hierbei sind alle Kosten erfaßt, die direkt im Zusammenhang mit der Produktion entstehen. Kosten für Vertrieb, Administration und Gebäude, sowie für Steuern und Versicherung, sind hierbei nicht berücksichtigt.

Tabelle 18: Kostenstruktur für einen m³ MDF

	[DM/m ³]
Personal	10,58
Energie	21,30
Wartung	8,66
Holzkosten	88,65
Klebstoff	63,31
Härter	0,68
Wachs	29,07
Additiv	1,18
Abschreibung	112,61
Summe	336,04

Für die Berechnung der Kosten für Abschreibung wurde von einer Investitionssumme von 160 Mio. DM ausgegangen, die auf 5 Jahre linear abgeschrieben wird. Die Rohstoffkosten berechnen sich aus den in

Tabelle 19 angegebenen Verbrauchswerten und Einkaufspreisen.

Tabelle 19: Rohstoffe (Verbrauch, Marktpreise)

	Verbrauch	Preis pro Einheit
Holz	752 kg	120 DM/ t atro
Klebstoff	79 kg	0,7 DM/kg
Wachs	20 kg	1,50 DM/kg
Härter	1 kg	0,50 DM/kg
Additiv	1 kg	1,30 DM/kg

In *Abbildung 22* sind die Kosten relativ dargestellt. Den größten Teil an den Gesamtkosten haben die Kosten für Abschreibung. Sie stehen in einem direkten Zusammenhang mit der produzierten Menge (siehe hierzu auch die Szenarien).

Deutlich zu erkennen ist, daß auf der Rohstoffseite die Kosten für Holz weitaus bedeutender sind als die reinen Klebstoffkosten, die ca. 8 Prozentpunkte niedriger liegen. Als Ursache für die hohen Holzkosten können zum einen die Verwendung von hochwertigen und damit im Einkauf teuren Sortimenten identifiziert werden, sowie die hohen Materialverluste, die gerade im Bereich Holzplatz, Fasererzeugung und Holz Trocknung entstehen.

Im Gegensatz hierzu sind die Aufwendungen für Personal und Energie - bezogen auf die Gesamtkosten – gering. Die niedrigen Personalkosten lassen sich eindeutig mit dem hohen Automatisierungsgrad und dem damit verbundenem geringen Personalbedarf in der modernen Holzwerkstoffindustrie erklären. Die niedrigen Kosten für Energie lassen sich in diesem speziellen Fall damit erklären, daß zum einen die Kosten für Elektrizität inzwischen deutlich geringer geworden sind (in diesem Beispiel 0,05 DM pro kWh). Zum anderen wird zur Erzeugung der nötigen Thermischen Energie Recyclingholz mit einem Anteil von 70% verwendet, das zu einem günstigen Einkaufspreis von 30 DM/t zugekauft wird. Die verbleibende Differenz von 30% wird mit fossilen Energieträgern abgedeckt.

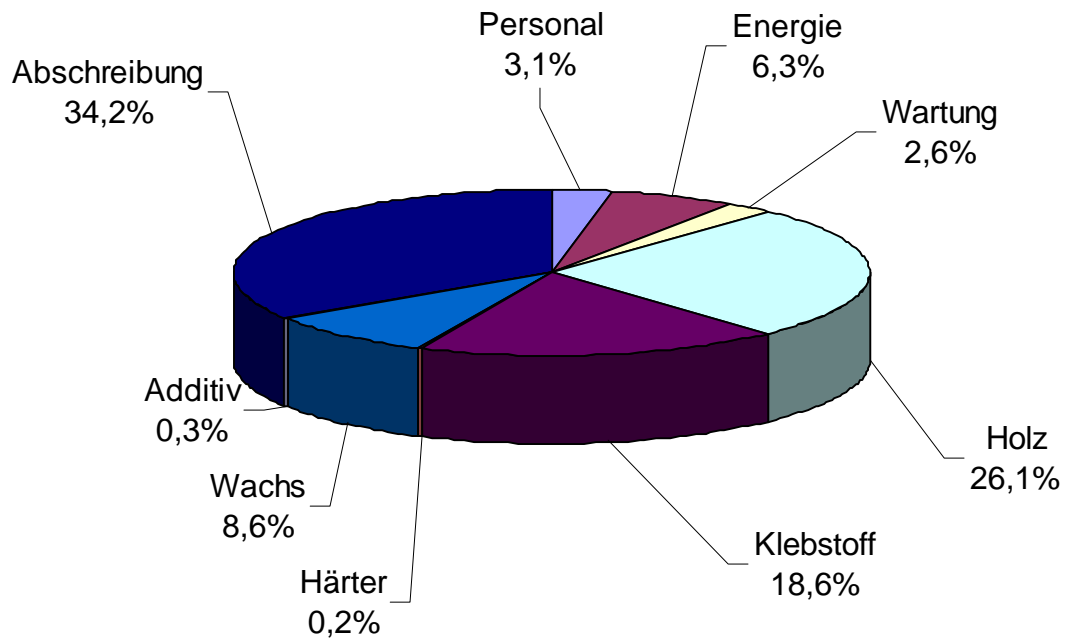


Abbildung 22: Prozentuale Aufschlüsselung der Kosten

7.2 Optimale Intensität

Die optimale Intensität einer Produktionsanlage ist erreicht, wenn die (Gesamt-) Kostenfunktion in Abhängigkeit von der Intensität ihr Minimum aufweist (WÖHE). Zur Berechnung der optimalen Intensität muß die Gesamtkostenfunktion bekannt sein. Zuerst wird die Kostenfunktion abgeleitet. Anschließend wird die Nullstelle der Ableitung berechnet, da die Kostenfunktion an der Nullstelle ihrer Ableitung ein Minimum hat.

Die im vorherigen Kapitel ermittelte Gesamtkostenfunktion lautet:

$$Y = 1,05E^{-10}x^2 - 6,64E^{-06}x + 0,15996$$

Die Ableitung führt zur Funktion:

$$Y = 2,10E^{-10}x - 6,64E-06$$

Die anschließende Berechnung der Nullstelle führt zu folgendem Resultat:

$$0 = 2,10E^{-10}x - 6,64E^{-05}$$

$$x = \frac{2,10E^{-10}}{6,64E^{-05}}$$

$$x = 31609 \text{ kg/h}$$

Demnach liegt die optimale Intensität bei einem Materialdurchgang von 31609 kg/h.

Die Durchschnittskosten bei optimaler Intensität können durch Einsetzen in die Gesamtkostenfunktion ermittelt werden:

$$y = 1,05E^{-10} \cdot 31609^2 - 6,64E^{-05} \cdot 31609 + 0,15996$$

$$y = 0,054 \text{ DM/kg}$$

Zur Ermittlung der Kosten pro m³ MDF werden die Durchschnittskosten pro kg mit der Rohdichte des Fertigprodukts (730 kg/m³) multipliziert. Das Resultat von 60,82 DM/m³ berücksichtigt die Kosten für Wartung, Personal und Energie. Zur Berechnung der Gesamtkosten die pro m³ MDF anfallen, müssen noch die Kosten für die Rohstoffe (Holz, Klebstoff) und die Abschreibung dazu addiert werden.

Die Berechnung der Rohstoffkosten bezieht sich dabei auf die Materialverbräuche, die in Kapitel 4 berechnet wurden. Ausgegangen wurde dabei von folgenden Werten:

Tabelle 20: Berechnung der Gesamtkosten für 1 m³ MDF

Energie, Personal, Wartung	40,09	[DM/m ³]
Holz	88,65	[DM/m ³]
Klebstoff	63,31	[DM/m ³]
Wachs	29,07	[DM/m ³]
Härter	0,68	[DM/m ³]
Additiv	1,18	[DM/m ³]
Abschreibung	112,61	[DM/m ³]
Gesamtkosten	335,59	[DM/m³]

Die Abbildung 23 zeigt den Funktionsverlauf der Gesamtkosten pro m³ in Abhängigkeit von der Produktionsintensität. Deutlich zu erkennen ist der Punkt, der die kostenminimalste Produktion erlaubt.

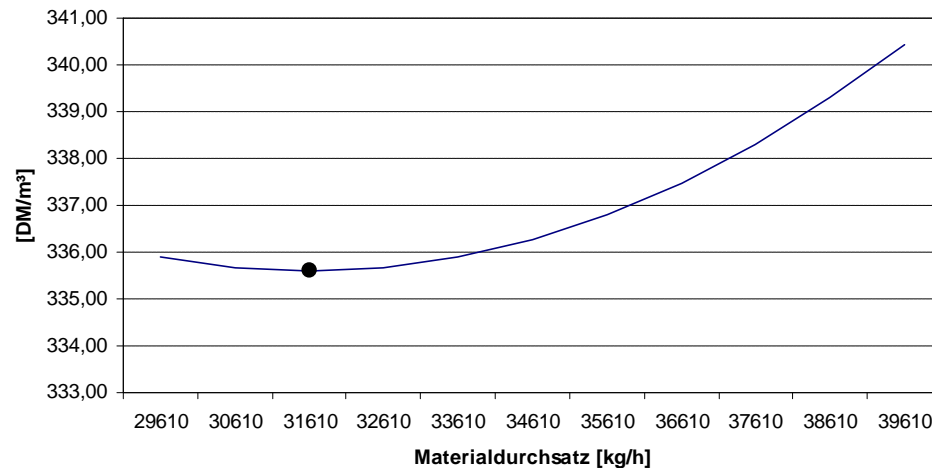


Abbildung 23: Verlauf der Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Produktionsintensität

7.2.1 Zeitliche Anpassung

Unter zeitlicher Anpassung versteht man eine Änderung der Ausbringungsmenge bei konstanter Leistung allein durch Änderung der Arbeitszeit. Da jedoch in einem modernen MDF-Produktionswerk üblicherweise 24 Stunden am Tag durchgehend gearbeitet wird, fehlt diesem Ansatz die Anwendungsgrundlage.

7.2.2 Intensitätsmäßige Anpassung

Intensitätsmäßige Anpassung meint eine Änderung der Ausbringungsmenge bei konstanter Arbeitszeit und unverändertem Einsatz von Produktionsfaktoren (HABERSTOCK). Die intensitätsmäßige Anpassung ist insbesondere für kontinuierliche Produktionsprozesse von Interesse, da hier im Prinzip ohne Unterbrechung 24 Stunden am Tag und 7 Tage in der Woche produziert wird. Die intensitätsmäßige Anpassung hat einen direkten Effekt auf die Durchschnittskosten, die sich durch ein Entfernen vom Kostenoptimum erhöhen.

Beim folgenden Rechenbeispiel wurde die Produktionsintensität verändert, indem der Preßzeitfaktor variiert wurde.

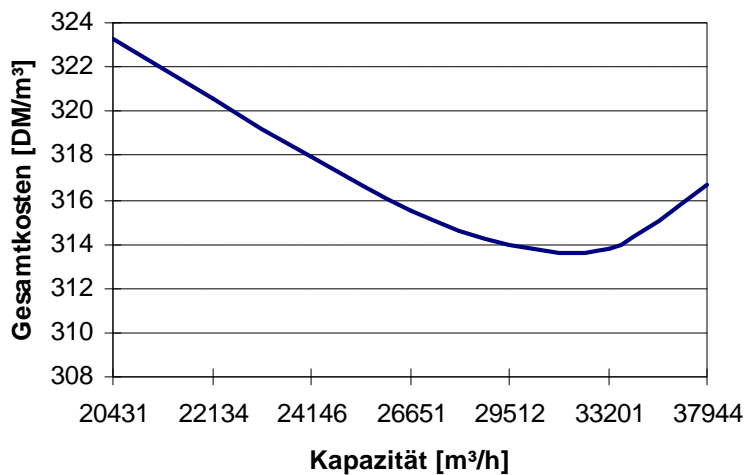


Abbildung 24: Verlauf der Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Intensität

7.3 Berechnung von Szenarien

Das hier entwickelte Modell bietet die Möglichkeit Szenarien unter verschiedenen Aspekten zu berechnen.

Als erstes Beispiel wird mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse die kostenwirksamkeit der Klebstoff- und Holzkosten berechnet.

In einem zweiten Beispiel soll der Einfluß einer Erweiterungsinvestition auf die Kosten berechnet werden. Wiederum ausgehend von einem Standardszenario wird ein Pre-heater angeschafft bzw. die Heißpresse verlängert.

Als letztes Beispiel wird der Kosteneinfluß der Rohdichte und des Klebstoffgehalts berechnet.

7.3.1 Sensitivitätsanalyse

Bei der Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen von Variationen wichtiger Eingabeparameter auf das Modellierungsergebnis untersucht. Die komplexe Struktur des Produktionsprozesses, welche vielfältige Wechselwirkungen und Rückkopplungen beinhalten, machen es generell unmöglich eine Vielzahl von Eingabeparametern gleichzeitig zu verändern. Daher wird hier zur Vereinfachung nur ein Eingabeparameter verändert, während alle anderen Parameter als konstant angenommen werden.

Jeder Eingabeparameter wurde innerhalb eines plausiblen Wertebereichs um die Faktoren – 10 %, -5%, +5% und +10% variiert. Als Maß für die Modellsensitivität wird das Verhältnis der Änderung des Ausgabewertes zur Änderung des Eingabewertes angegeben. Je größer der Betrag ist, desto wichtiger ist der betreffende Eingabeparameter für das Modellierungsergebnis. Das Vorzeichen des Index gibt an, ob die Änderung des Modellierungsergebnisses gleich- oder gegensinnig zu der des Eingabeparameters verläuft.

Die ermittelten Werte sind lediglich als Orientierungswerte aufzufassen, da sich in der Regel tatsächlich zeitgleich mehrere Parameter ändern. Dennoch können die Ergebnisse eine wertvolle Hilfe bei der praktischen Arbeit leisten.

Abbildung 25 zeigt als Beispiel die Auswirkung variiertes Holz- und Klebstoffstoffkosten. Die unterschiedliche Steigung der Geraden zeigt sehr deutlich, daß die Holzkosten in diesem Fall einen größeren Einfluß auf die Gesamtkosten, haben als eine Änderung der Klebstoffkosten. Die Ursache für den deutlichen Einfluß der Holzkosten läßt sich darauf zurückführen, daß die Holzkosten einen größeren Anteil an den Gesamtkosten haben (26%), als die Klebstoffkosten (18%).

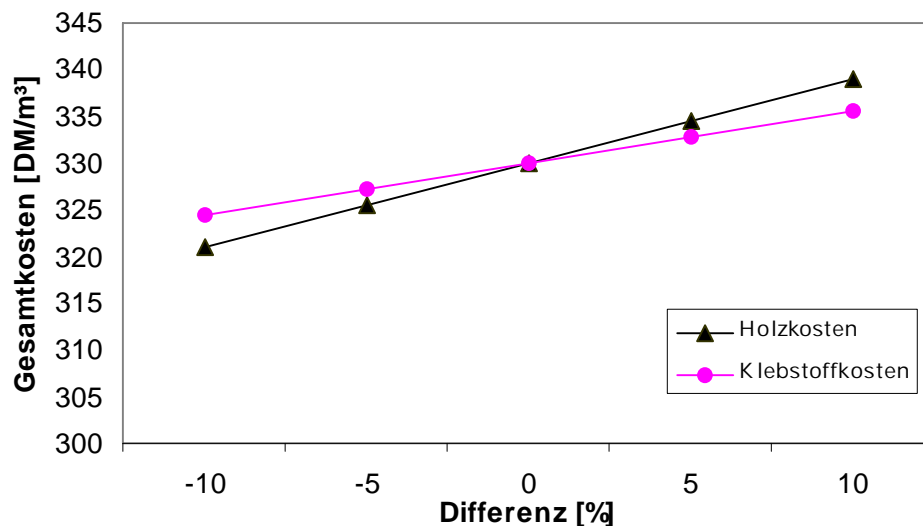


Abbildung 25: Auswirkung variiertes Eingabeparameter auf die Gesamtkosten

7.3.2 Unterstützung von Investitionsentscheidungen

Die Berücksichtigung von technischen Größen wie z. B. Pressenlänge und –breite oder Produktionsparametern erlauben es Szenarien für unterschiedliche Maschinenkonfigurationen zu berechnen.

Im folgenden sollen als Beispiele der nachträgliche Einsatz eines Pre-heaters und die nachträgliche Verlängerung einer Heißpresse hinsichtlich ihrer Kostenwirksamkeit berechnet werden. Es ist dabei ausdrücklich festzustellen, daß in diesen Beispielen lediglich die erhöhten Investitionssummen und die veränderten Preßzeitfaktoren berücksichtigt werden. In der Realität hätten Maschinenerweiterungen dieser Art erhebliche Konsequenzen für den gesamten Produktionsstrang, wie z.B. das Entstehen von Engpässen an einzelnen Maschinen, die der Kapazität nicht genügen können oder notwendige Änderungen an weiteren Produktionsparametern wie Rohdichte des Fertigproduktes oder Klebstoffgehalt. Dennoch erlaubt diese simplifizierte Betrachtung einen Einblick in Größenordnungen und Tendenzen.

Im ersten Beispiel wird ein Pre-heater zusätzlich in eine bestehende Produktionslinie integriert. Aufgrund der Mattenvorwärmung wird hierdurch eine Preßzeitreduzierung erreicht. Berücksichtigt wird eine Investitionssumme von 5 Mio. DM für Anschaffung und Installation des Gerätes. Bezüglich des Energiebedarfs wird angenommen, daß sich der Energieverbrauch des Pre-heaters mit Energieeinsparungen in der Heißpresse substituiert.

In Abbildung 26 wird der Effekt kürzerer Preßzeiten dargestellt. Ausgehend von einer Basis, in diesem Fall 10 Sekunden, wird die Preßzeit schrittweise verringert. Eine verkürzte Preßzeit wirkt direkt steigernd auf die Produktionsmenge, was zur Folge hat, daß sich die Fixkosten - in diesem Fall die Abschreibung - auf eine größere Produktionsmenge verteilt. Dies führt zu einer Abnahme der Gesamtkosten. Die Abnahme der Gesamtkosten erfolgt hierbei nicht linear, d.h. bei einer Reduzierung des Preßzeitfaktors von 10 auf 9 Sekunden Werden die Gesamtkosten um 13,32 DM gesenkt, während bei einer Reduzierung des Preßzeitfaktors von 9 auf 8 Sekunden nur noch 11,39 eingespart werden können.

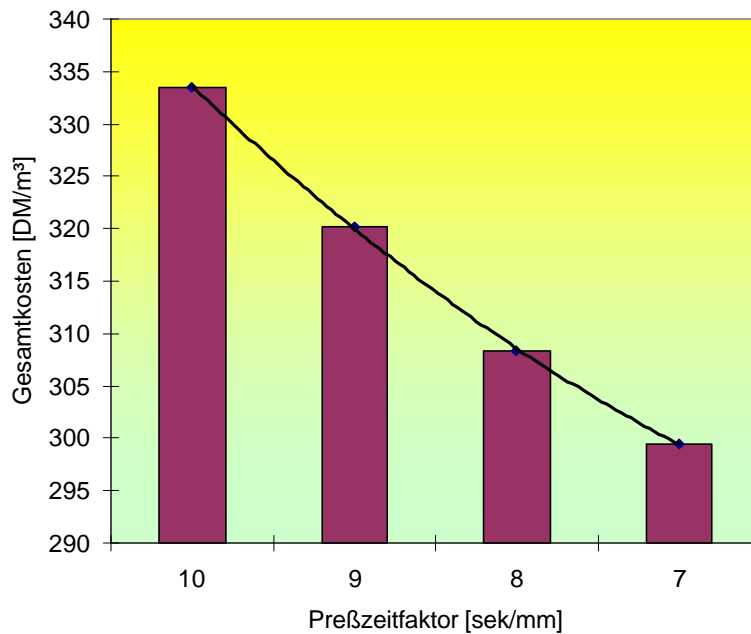


Abbildung 26: Effekt verkürzter Preßzeiten durch Pre-heater auf die Gesamtkosten pro m³

Die Erklärung hierfür wird aus Abbildung 27 ersichtlich. Demnach hat ein reduzierter Preßzeitfaktor nicht nur einen geringeren Abschreibungssatz pro m³ zur Folge, sondern gleichzeitig auch steigende Kosten für Wartungen und Reparatur. Die steigenden Materialkosten werden durch die erhöhte Produktionsmenge verursacht, da in gleicher Zeit mehr Material bearbeitet wird fallen entsprechend höhere Kosten für Energie, Reparaturmaterial und Personal an. Der Verlauf der Funktion für die Kosten für Reparaturmaterial/Energie/Personal entspricht hierbei dem Verlauf der im vorigen Kapitel ermittelten Gesamtkostenfunktion. Bei einer weiteren (hypothetischen) Senkung des Preßzeitfaktors, würde ab einem bestimmten Punkt die Kosteneinsparung, verursacht durch die verringerten Abschreibungssätze, durch die steigenden Materialkosten aufgehoben werden.

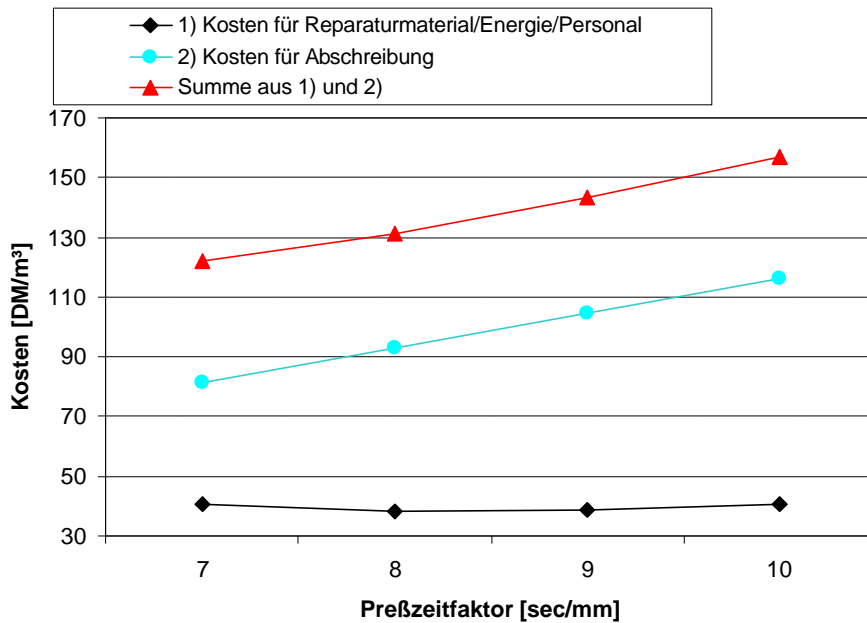


Abbildung 27: Zusammenhang von Abschreibungskosten und Material/Energie/Personal-Kosten bei reduziertem Preßzeitfaktor

Bei Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung ist zu beachten, daß bei höherem Materialdurchsatz (=höhere Kapazität) die Reparaturkosten überproportional ansteigen. Hierdurch kann die Reduzierung der Fixkosten in bestimmten Fällen überkompensiert werden.

Dieser Effekt ist im folgenden Rechenbeispiel noch deutlicher zu erkennen. In diesem Fall wird angenommen, daß sich die Kosten im erheblichen Umfang ändern, wenn die Maschinenintensität steigt oder sinkt. Eine Steigerung des Materialdurchsatzes hätte in diesem Beispiel somit wesentlich höhere Kosten zur Folge. In der Abbildung 28 kann deutlich erkannt werden, daß eine Reduzierung des Preßzeitfaktors nur bis zu einem bestimmten Punkt den erwünschten kostensenkenden Einfluß hat.

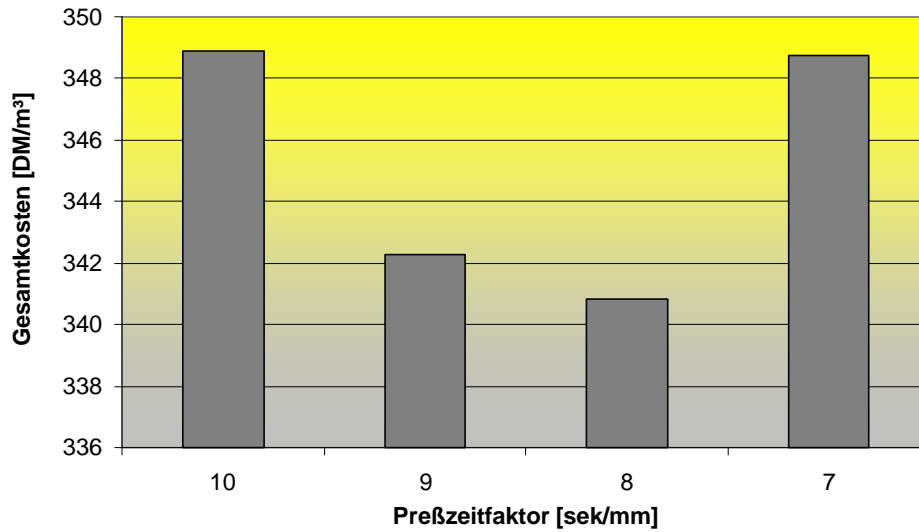


Abbildung 28: Einfluß des Preßzeitfaktors auf die Gesamtkosten für Beispiel 2

Der Punkt an dem die Kostenersparnisse durch erhöhte Materialkosten substituiert wird ist deutlich zu erkennen. In der Abbildung 29 wird nochmals verdeutlicht in welchem Zusammenhang Abschreibung und Kosten für Reparaturmaterial/Energie/Personal stehen.

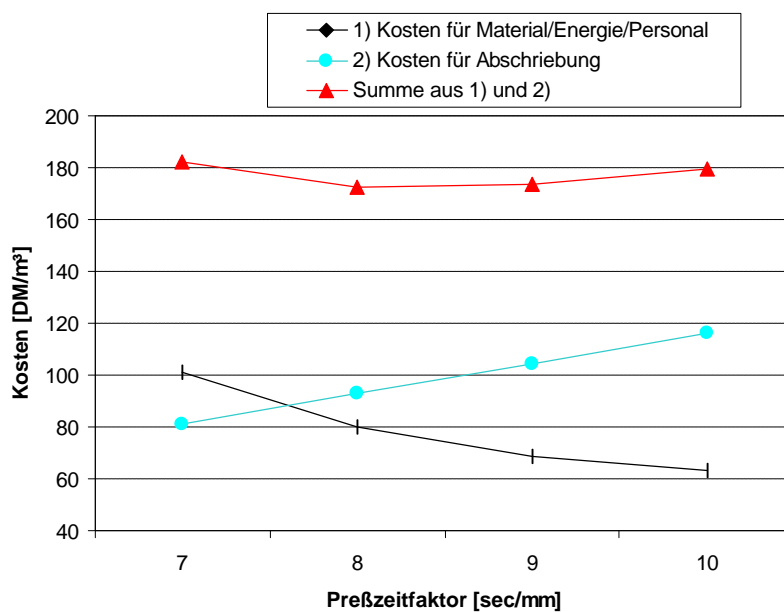


Abbildung 29: Zusammenhang von Abschreibung und Kosten für Reparaturmaterial/Energie/Personal

Auch im Fall einer Kapazitätserhöhung durch eine Verlängerung der Heißpresse kann ein ähnlicher Effekt festgestellt werden. Die Abbildung 30 zeigt die Effekte für eine Heißpressenverlängerung von 5 m und 10 m. Auch in diesem Fall kann aufgrund der steigenden Produktionsmenge ein Abfall des Fixkostenanteils festgestellt werden. Dieser fällt jedoch aufgrund steigender Reparaturkosten unterproportional.

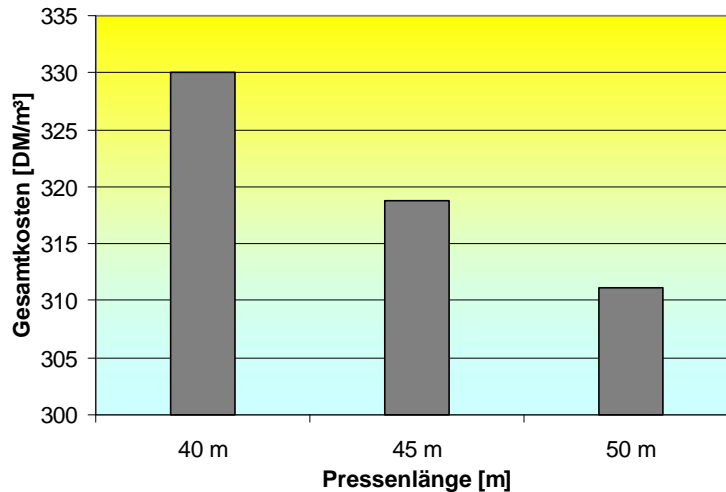


Abbildung 30: Effekt einer verlängerten Heißpresse auf die Gesamtkosten pro m³

7.3.3 Einfluß von Änderungen im Bereich Rohstoffe und Platteneigenschaften

Für diesen Bereich sollen beispielhaft zwei Szenarien berechnet werden.

Im ersten Beispiel soll der Einfluß einer Rohdichtereduzierung berechnet werden. Dazu wird ausgehend von einer vergleichsweise niedrigen Rohdichte von 690 kg/m³ in 20 kg/m³ Schritten die Rohdichte bis auf 770 kg/m³ angehoben.

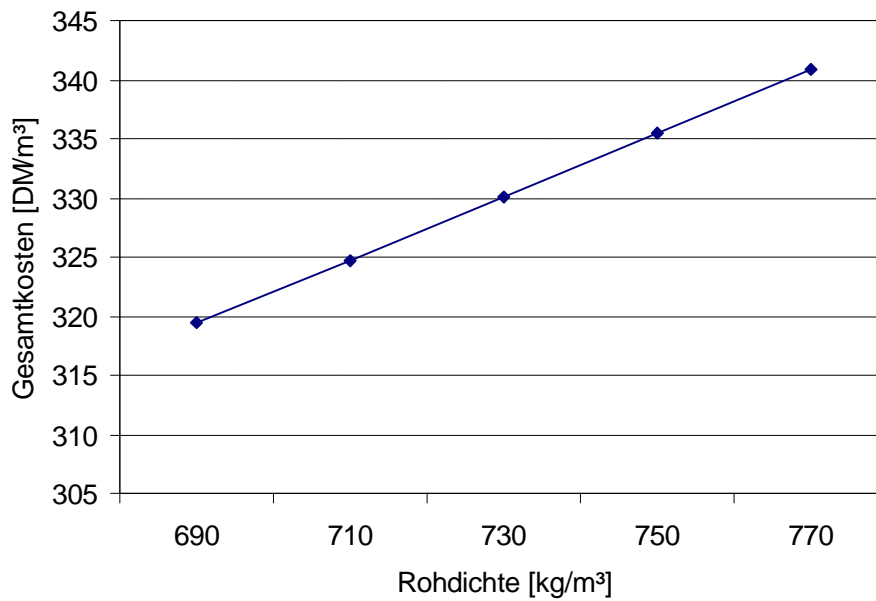


Abbildung 31: Einfluß der Rohdichte auf die Gesamtkosten pro m³

In der Abbildung 31 ist deutlich zu erkennen, daß die Kosten mit zunehmender Dichte linear steigen, da pro m³ mehr Material verwendet werden muß. Die Zunahme der Gesamtkosten beträgt in diesem Fall ca. 2,1 % pro 20 kg/m³ Rohdichtezunahme.

Auch für den Fall eines steigenden Klebstoffgehalts läßt sich ein linearer Anstieg der Gesamtkosten feststellen (ca. 1% pro 1%Klebstoffzunahme).

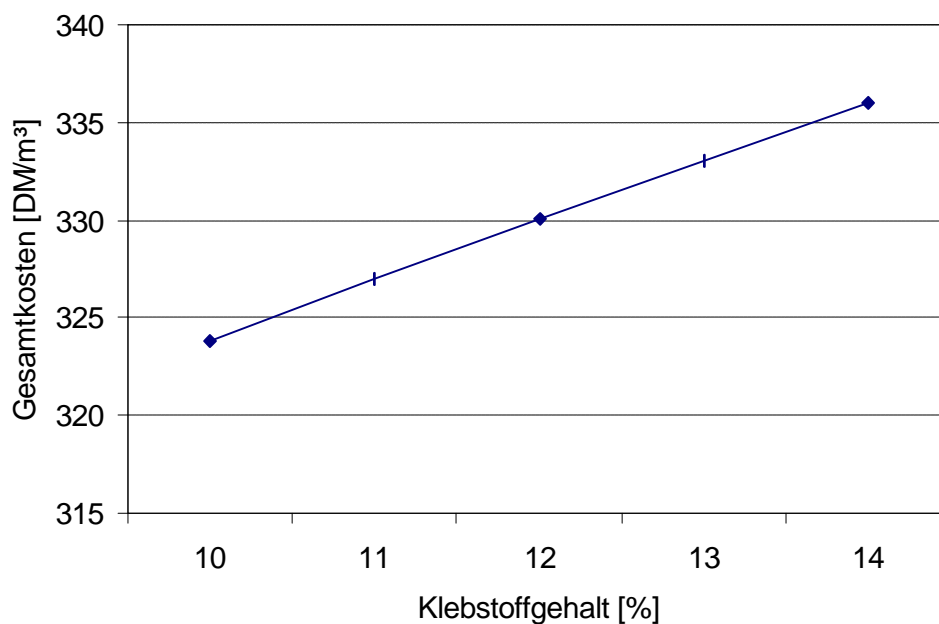


Abbildung 32: Einfluß des Klebstoffgehalts auf die Gesamtkosten

7.3.4 Weitere Anwendungen

Neben den hier ausführlicher vorgestellten Berechnungen lassen sich noch eine Vielzahl anderer Betrachtungen durchführen:

- die Berechnung der Gewinnschwelle (Break_Even_Analyse), mit deren Hilfe die minimale Produktionsmenge ermittelt werden kann, die bei vorgegebenem Preis abgesetzt werden muß, um keinen Verlust zu erzielen.
- Kostenminimale Produktionsplanung mit Hilfe der Maschinenintensitäten und benötigten Arbeitszeit

8 Diskussion

Die intensive Beschäftigung mit der Kostenrechnung ist für Unternehmen heute generell eine zwingende Angelegenheit. Hoher Preisdruck auf Märkten die von einer Vielzahl von Anbietern bedient werden, kurze Produktlebenszyklen (die eine Optimierung von Produkten erfordern) sowie eine starke nationale und internationale Konkurrenz markieren die Anforderungen, die an ein Unternehmen in der Holzwerkstoffbranche gestellt werden.

Eine der vorrangigen Aufgaben der Kostenrechnung ist es, die innerbetriebliche Kostenstruktur transparent zu machen. Ein weiterer wichtiger Punkt für ein produzierendes Unternehmen ist die Kenntnis vom Zusammenhang zwischen Prozeßeinstellungen und den verursachten Kosten. Ziel dabei ist es, durch Optimierung zu Kosteneinsparungen zu gelangen. Daneben kann mit Hilfe der Kostenrechnung bzw. -analyse die Entscheidungsfindung unterstützt werden, indem z. B. bei Investitionsentscheidungen finanzielle Spielräume abgegrenzt werden.

Die Kostenanalyse mit Hilfe eines mathematischen Modells durchzuführen, führt zu verschiedenen Vorteilen. Im Allgemeinen erlauben mathematische Modelle die vereinfachte Darstellung eines real vorhandenen Systems. Hiermit können dann sehr schnell Berechnungen von veränderten Produktionsbedingungen (z.B. der Produktionsparameter, maschinelle Ausstattung) durchgeführt werden.

Die Entwicklung eines Kosten-Modells ist besonders sorgfältig durchzuführen. Zunächst sind die Modellgrenzen klar zu definieren, was einen Einfluß auf die Komplexität des Modells hat. Im vorliegenden Fall wurde z.B. darauf verzichtet die werkseigene Energieanlage mit einzu beziehen. Im weiteren sind alle relevanten Daten zu erfassen. Da in der Regel nicht alle benötigten Daten laufend dokumentiert und mit Kosten belegt werden, sind ergänzende Erhebungen sowie teilweise auch Abschätzungen notwendig. Schlußfolgernd ist festzuhalten, daß Modelle kein hundertprozentiges Abbild der Realität darstellen können. Allerdings können sie mit einem hohen Genauigkeitsgrad ein annähernd realistisches Bild wiedergeben, was bei Überprüfung der berechneten Modellergebnisse durch Industrievertreter bestätigt wurde.

Die Qualität des Modells hängt in sehr hohem Maße von dem Umfang und der Genauigkeit der Datenerfassung ab. Naturgemäß ist die Erhebung von kostensensitiven Daten in der Industrie schwierig, da diese häufig der Geheimhaltung unterliegen. Auch im vorliegenden Projekt waren die Daten teilweise nicht so detailliert verfügbar wie gewünscht. Dieser Aspekt betraf insbesondere die Reparaturkosten (Material und Lohn), da diese nur pauschal für den gesamten Betrieb, nicht jedoch getrennt nach Produktionsschritten ausgewiesen wurden. In diesem Fall wurden dann mit Expertenschätzungen gearbeitet.

Alle im folgenden vorgestellten und diskutierten Ergebnisse basieren auf den Daten für eine europäische Standard-MDF-Produktionsanlage. Aus diesem Grunde muß an dieser Stelle noch einmal deutlich darauf hingewiesen, daß die Ergebnisse zwar korrekte Größenordnungen und Trends liefern (wie durch Experten mehrfach bestätigt wurde), konkrete Berechnungen einzelner Produktionsanlagen und Fragestellungen aber immer die Berücksichtigung der individuellen Bedingungen erfordert.

An den Gesamtkosten bei der Herstellung einer Standard-MDF besitzen die fixen Kosten mit ca. 30% und die für Rohstoffe (ca. 40% für Holz und Chemikalien) die weitaus größten Anteile. Die Kosten für Personal sind dagegen auf sehr niedrigem Niveau (ca. 3%).

Anhand der Ergebnisse ist eindeutig festzustellen, daß die Produktion grundsätzlich um so kostengünstiger wird, je höher die Produktionsmenge ist. Dies läßt sich im wesentlichen auf den Anteil der fixen Kosten zurückführen, deren Anteil pro produziertem m³ abnimmt je mehr produziert wird. Dieser Aspekt besitzt solange Gültigkeit, wie die Reparaturmehrkosten (z.B. Materialverschleiß) nur unterproportional steigen, so daß es nicht zur Kompensation der Kostenersparnisse kommt.

Berechnungen zur Sensitivität der Rohstoffkosten ergaben, daß eine Änderung der Einkaufskosten um 1% zu einer Differenz der Herstellkosten von 0,90 DM/m³ (Holz) bzw. 0,64 DM/m³ (Klebstoff) führen. Hochgerechnet auf eine Jahresproduktion von 280.000 m³ würde dies eine jährliche Kosteneinsparung von 252.000 DM im Bereich Holz bzw. 179.200 DM im Bereich Klebstoff bedeuten.

Aus vorgenanntem lassen sich für die MDF-Produktion folgende Kernaussagen ableiten:

- Besondere Bedeutung in der Zusammensetzung der Kosten haben fixe Kosten (Abschreibung) und Rohstoffkosten (Holz, Chemikalien).
- Ansätze zur Reduzierung des Fixkostenansatzes sind Maßnahmen, die zu einer Erhöhung der Produktionskapazität führen:
 - Reduzierung des Preßzeitfaktors
 - Vorwärmung (Pre-heater)
 - bessere Durchwärmung
 - schnelleres Klebstoffsystem
 - bessere Entdampfung (längere Presse)

- Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit
 - Geringere Stillstandzeiten
- Weniger Ausschuß
- Ansätze zur Reduzierung der Materialkosten sind:
 - geringere Rohstoffeinkaufspreise (z.B. Einsatz kostengünstiger Holzsortimente (Recyclingholz))
 - geringere Materialverluste
 - Verringerung des Klebstoffgehalts
 - geringere Rohdichte

Abschließend ist diesem Zusammenhang festzuhalten, daß geringfügige Kosteneinsparungen pro m³ aufgrund der hohen Anlagenkapazität (280.000 m³/a) einen deutlichen Effekt im Jahresvergleich aufweisen.

Mit dem Kostenmodell wurden verschiedene Szenarien berechnet. Hierbei konnte gezeigt werden, daß mit dem Kostenmodell sehr unterschiedliche Fragestellungen schnell und zuverlässig berechnet werden können. Die hier berücksichtigten Fragestellungen umfassen z.B. die Bereiche:

- Ersatzinvestitionen
- Erweiterungsinvestitionen
- Identifikation besonders kostenwirksamer Prozeßeinstellungen
- Berechnung der optimalen Intensität

Dabei konnte festgestellt werden, daß mit Kostenmodell die betriebswirtschaftlich günstigere Variante in jedem Fall eindeutig identifiziert werden konnte.

Die Kombination eines Kostenmodells mit einem Prozeßleitsystem bietet grundsätzlich die Möglichkeiten:

1. Daten aus dem Prozeßleitsystem für das Kostenmodell zur Verfügung zu stellen
2. Relevante Prozeßparameter mit Kosten zu belegen und diese Informationen bei der Prozeßführung zu berücksichtigen.

Die in diesem Projekt verwendeten Daten stammen teilweise aus Prozeßleitsystemen und liegen dort üblicherweise auch online vor (z.B. Beleimungsgrad, Stromverbrauch). Auf der anderen Seite waren für die Entwicklung des Kostenmodells zwingend weitere Informationen notwendig, die nicht in einem Prozeßleitsystem erfaßt werden (z.B. Reparaturkosten). Für die Ermittlung der intensitätsabhängigen Kosten kann ein Prozeßleitsystem eine wichtige Hilfe darstellen, wenn die Leistungsaufnahme entsprechend dokumentiert wird.

Vorrangiges Ziel eines Prozeßleitsystems ist es dem Bedienungspersonal der Produktionsanlage ein Kontroll- und Aufzeichnungsinstrument zur Verfügung zu stellen, mit dem es in der Lage ist, die geforderten Quantitäten und Qualitäten zu produzieren. Dabei fällt es nicht in die Aufgabe des Bedienungspersonals die Produktion hinsichtlich der Kosten zu optimieren. Dies ist vielmehr die Aufgabe der Produktions- und Betriebsleitung. Grundsätzlich ist jedoch das Prozeßleitsystem als Informationsquelle eine wichtige Hilfe, um den Produktionsprozeß unter betriebswirtschaftlichen Aspekten, i.d.R. off-line, zu bewerten. Auch ist es vorstellbar, daß einzelne, als besonders kostenwirksam eingestufte Prozeßparameter (z.B. Leimgehalt) mit Kosten belegt werden. Dem Anlagenfahrer könnten so durch ihn veränderte Prozeßeinstellungen hinsichtlich ihres Effektes auf die Produktionskosten in einfacher Weise dargestellt werden.

Die Verwendung der hier erstellten Kostenmodelle ist für die Hersteller von Holzwerkstoffen als auch für deren Zulieferindustrie (Maschinen- und Anlagenbau, Forst, chemische Industrie (Klebstoffe, Additive), Meßtechnik) von großem Interesse. Anhand der aufgezeigten Zusammenhänge können z.B. Neu-Entwicklungen (z.B. Vorwärmung, reaktivere Klebstoffe, neue MDF-Typen) hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit abgeschätzt werden. Hierdurch können in einem frühen Stadium der F&E-Tätigkeiten die Marktchancen neuer Produkte und Techniken betrachtet und Fehlentwicklungen vermieden werden. Des weiteren können betriebsindividuelle Kostenmodelle zur kostenorientierten Schwachstellenanalyse sowie bei Ein- und Verkaufsverhandlungen eingesetzt werden.

9 Potentiale für weiterführende Untersuchungen

In diesem Projekt konnte gezeigt werden, daß es grundsätzlich möglich ist, auch komplexe Herstellungsprozesse, wie die der MHF-Herstellung, mit befriedigenden Resultaten zu simulieren.

Anhand der in vorstehenden Kapiteln aufgezeigten Vorgehensweise, kann jegliche Produktionsanlage mit ihren spezifischen Bedingungen beschrieben werden.

Gerade im Hinblick auf aktuelle Entwicklungen können folgende weiterführende Untersuchungen von Bedeutung sein:

- Die Ausweitung der Modellgrenzen, z. B. durch Berücksichtigung einer werkseigenen Energieanlage oder Klebstoffproduktion.
- Die Kombination des Kostenmodells mit Daten aus einer Ökobilanz, so daß eine simultane ökologisch-ökonomische Betrachtung erreicht wird.

10 Literatur

- ARNOLD, D. (1984): Einsparmöglichkeiten in der Spanplattenindustrie durch Prozeßautomatisierung. Holz als Roh- und Werkstoff (42), S. 105-108
- BECK, P. (1994): Modellanalytische Produktionskostenoptimierung bei Sortenfertigung am Beispiel der Holzwerkstoffplatten-Industrie. Diplomarbeit Fachhochschule Niederrhein, 1994
- BERNARDY, G. (1995): SPOC: Echtzeit-Qualitätskontrolle, Kostenoptimierung, Simulation - Erschließung wesentlicher Einsparpotentiale. Vortrag, ATR-Symposium Prozeßleittechnik, Prozeßoptimierung am 26.5.1995 in Hannover
- BERNARDY, G.; SCHERFF, B. (1997): Prozeßmodellierung führt zur Online Qualitätskontrolle und Prozessoptimierung bei der Span- und Faserplattenindustrie. Holz als Roh- und Werkstoff (55), S.133-140
- BECKER, R.; MAURER, H. (1994): Aufbau und Funktionen des zentralen Prozeß und Produktionssystems Schenck PRODACON®. Vortrag, Schenck Automatisierungs Symposium am 13./14.10.1994 in Darmstadt
- EPF 2000: Annual Report 1999 – 2000. Brussels, 224 Seiten
- GUTENBERG, E. (1971): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Band I Die Produktion. Springer Verlag (1983)
- HABERSTOCK, L. (1986): Kostenrechnung II, (Grenz-) Plankostenrechnung. S+W Steuer und Wirtschaftsverlag, Hamburg (1986)
- JANSSEN, A.: Erfassung und detaillierte Auswertung von Prozeßdaten aus der MDF Produktion mit dem Ziel einer Prozeßoptimierung. Diplomarbeit Universität Hamburg, 1997
- KISTNER, K.-P. (1993): Produktions- und Kostentheorie. Physica-Verlag 1993
- KRUSE, K. (1997): Entwicklung eines Verfahrens der berührungslosen Ermittlung von Schallgeschwindigkeiten zur zerstörungsfreien Bestimmung mechanischer Eigenschaften an Holzwerkstoffplatten und dessen Integration in die Prozeßkontrolle. Dissertation an der Universität Hamburg, 1997
- KRUSE, K.; THÖMEN, H.; MAURER, H.; STEFFEN, A.; LÉON-MÉNDEZ, R. 1997: Optimierung des Spanplattenproduktionsprozesses mit Hilfe der Prozeßmodellierung. Holz als Roh- und Werkstoff (55), S. 17-24

- LOBENHOFFER, H. (1988): Qualitätskontrolle in Echtzeit und Prozeßoptimierung bei der Spanplattenfertigung. Holz-Zentralblatt Nr.8 (114), S.101-108
- LOBENHOFFER, H. (1990): Qualitätsbedingte Regelung eines Spanplattenformstrangs. Dissertation Georg August Universität Göttingen, 1990
- SANDWEG, T. (1995): PROMACS – Produktionsmangement und Kontrollsystem in MDF und Spanplattenanlagen. Vortrag, ATR Symposium Prozeßleittechnik, Prozeßoptimierung am 26.5.1995 in Hannover
- SCHWEITZER, M.; KÜPPER; H.-U. (1997): Produktions- und Kostentheorie, Grundlagen Anwendungen. Gabler Verlag 1997
- STAHL, W: (1993): Machbarkeitsstudie über die Einführung von QCOPC in einem MDF Werk. Diplomarbeit, FH Rosenheim, 1993
- THÖMEN, H.; LEÓN-MÉNDEZ, R.: Untersuchung zur Optimierung eines Prozeßleitsystems in einem Spanplattenwerk. Diplomarbeit Universität Hamburg, 1996
- WÖHE, G.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. München 18. Auflage (1993), 1442 S.

11 Veröffentlichungen

Annonymus 2000: Modelle zur Wirtschaftlichkeit von MDF-Anlagen. Holz-Zentralblatt Nr. 6, S. 61

Janßen, A.: Kruse, K.: Economic analyses of MDF production. In: Proceedings of the 4th European Panel Products Symposium, Llandudno, Wales. S. 220-226

Janßen, A.: Kruse, K.: Betriebswirtschaftliche Analyse der MDF-Produktion. Posterpräsentation 10. Hamburger Forst- und Holztagung

Kruse, K.; Janßen, A.; Frühwald, A.: Erarbeitung betriebswirtschaftlich-technischer Modelle von Anlagen zur Herstellung mitteldichter Faserplatten (MDF). BFH homepage <http://www.dainet.de/bfh/bfh.htm>

12 Abkürzungsverzeichnis

$A_{\%}$	Anteil Additiv in Prozent
$H_{\%}$	Anteil Härter in Prozent
$K_{\%}$	Anteil Klebstoff in Prozent
K_{BW}	Kosten für Bedienung und Wartung
K_{St}	Stundensatz in DM/h
MA	Absolutmenge Additiv
M_B	Masse vor Beleimung
M_{FP}	Masse Fertigprodukt
MH	Absolutmenge Härter
MK	Absolutmenge Klebstoff
M_{Sch}	Masse vor dem Schleifen
MW	Absolutmenge Wachs
N_{MSt}	Anzahl der erforderlichen Mann-Stunden in einem Produktionsabschnitt
V_{Sch}	Verlust beim Schleifen
$W_{\%}$	Anteil Wachs in Prozent

13 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung des MDF-Verbrauchs in Europa (EPF 2000)	1
Abbildung 2 : Mögliche Verläufe von Verbrauchsfunktionen	8
Abbildung 3: Verlauf der ertragsgesetzlichen Produktionsfunktion.....	11
Abbildung 4: Herleitung der Durchschnittsertragskurve aus der Gesamtkurve.....	12
Abbildung 5: Ableitung der Grenzproduktivitätskurve aus der Gesamtertragskurve	13
Abbildung 6: Gesamtertrag, Durchschnittsertrag und Grenzproduktivität	14
Abbildung 7: Funktionsverlauf bei Totalanpassung.....	14
Abbildung 8: Ertragsgebirge	15
Abbildung 9: Zusammenhang von Input, Technik und Output (SCHWEITZER 1997)	17
Abbildung 10: Betrachtete Teilprozesse	23
Abbildung 11: Überblick über Input- und Outputströme des Teilabschnittes Holzplatz	24
Abbildung 12: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Endfertigung	35
Abbildung 13: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Verpressung	36
Abbildung 14: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Formung.....	37
Abbildung 15: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Trocknung	38
Abbildung 16: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Beileimung	39
Abbildung 17: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Sichtung	40
Abbildung 18: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Fasererzeugung	41
Abbildung 19: Funktionsverlauf der Durchschnittskosten im Produktionsbereich Holzplatz .	42
Abbildung 20: Überblick über alle ermittelten monetären Verbrauchsfunktionen.....	43
Abbildung 21: Verlauf der Gesamtkostenfunktion	45
Abbildung 22: Prozentuale Aufschlüsselung der Kosten.....	48
Abbildung 23: Verlauf der Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Produktionsintensität	50
Abbildung 24: Verlauf der Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Intensität	51
Abbildung 25: Auswirkung variierteter Eingabeparameter auf die Gesamtkosten	52
Abbildung 26: Effekt verkürzter Preßzeiten durch Pre-heater auf die Gesamtkosten pro m ³	54
Abbildung 27: Einfluß des reduzierten Preßzeitfaktor	55
Abbildung 28: Einfluß des Preßzeitfaktors auf die Gesamtkosten für Beispiel 2	56
Abbildung 29: Zusammenhang von Abschreibung und Kosten für Reparaturmaterial.....	56
Abbildung 30: Effekt einer verlängerten Heißpresse auf die Gesamtkosten pro m ³	57
Abbildung 31: Einfluß der Rohdichte auf die Gesamtkosten pro m ³	58
Abbildung 32: Einfluß des Klebstoffgehalts auf die Gesamtkosten	58

14 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abschnitte eines Produktlebenszyklus (WOEHE).....	3
Tabelle 2: Maschinenausstattung einzelner Teilabschnitte	25
Tabelle 3: Materialzugänge und –verluste der Produktionsabschnitte.....	27
Tabelle 4: Spezifikation der MDF-Anlage.....	30
Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Materialberechnung.....	31
Tabelle 6: Installierte Leistung je Produktionsabschnitt.....	32
Tabelle 7: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Endfertigung	34
Tabelle 8: Berücksichtigte Maschinen mit installierter Leistung im Bereich Endfertigung	34
Tabelle 9: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Verpressung	36
Tabelle 10: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Formung	37
Tabelle 11: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Trocknung	38
Tabelle 12: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Beleimung	39
Tabelle 13: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Sichtung	40
Tabelle 14: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Fasererzeugung	41
Tabelle 15: Durchschnittskosten im Produktionsbereich Holzplatz.....	42
Tabelle 16: Ermittlung der Gesamtkostenfunktion.....	44
Tabelle 17: Kostenstruktur für einen m ³ MDF	46
Tabelle 18: Rohstoffe (Verbrauch, Marktpreise)	47
Tabelle 19: Berechnung der Gesamtkosten für 1 m ³ MDF	49