

Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik der
Universität Erlangen-Nürnberg

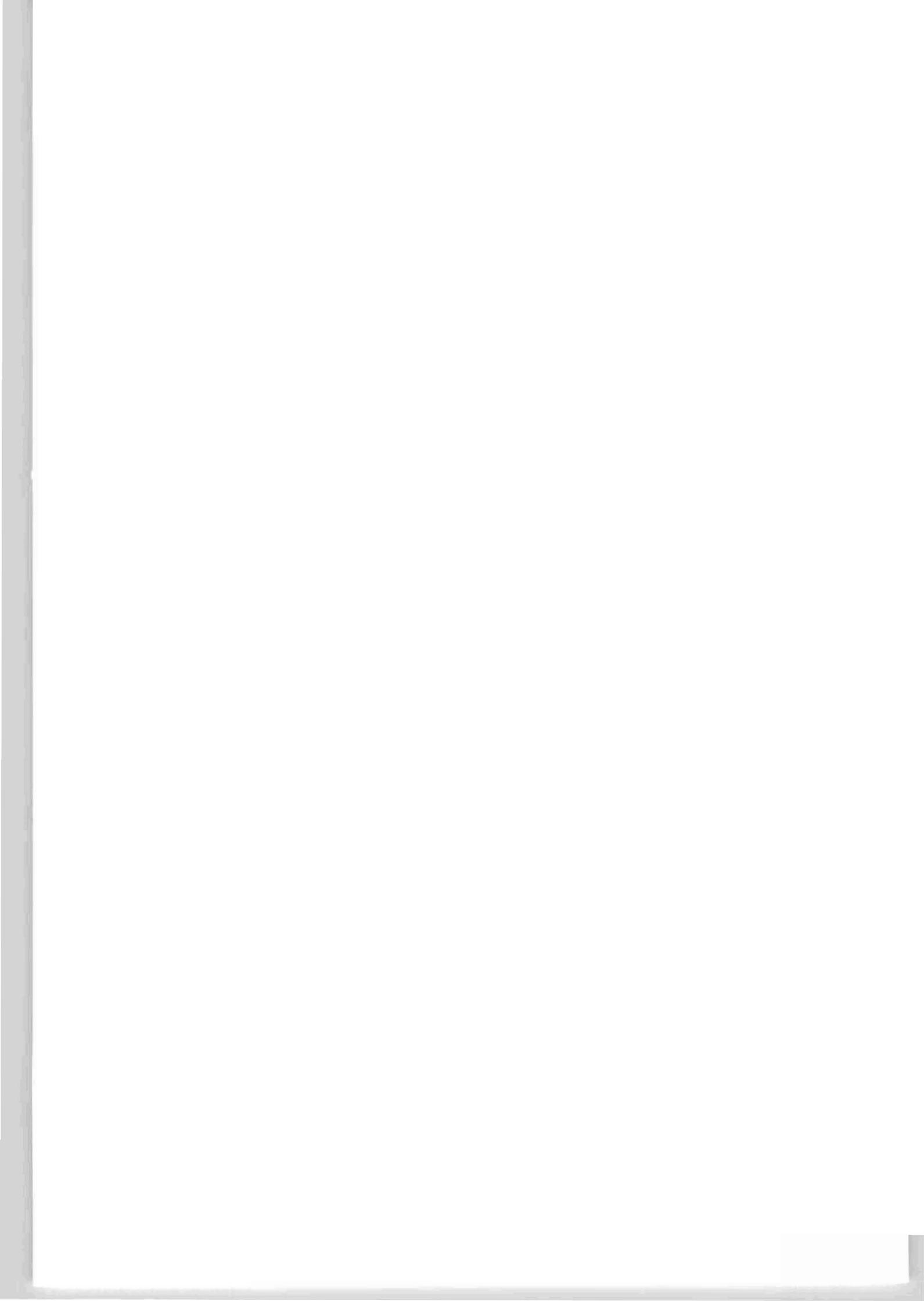
**Präventive ökologische Bewertung von Produkten und
Prozessen mit Fuzzy-Set-Modellierungen von unsicheren
Eingangsinformationen am Beispiel des Wellenlötens
elektronischer Baugruppen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az. 12904 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. A. Weckenmann, Dr.-Ing. A. Schwan, Dipl.-Ing. L. Bushi,
Dipl.-Ing. K. Nalbantic

Erlangen, November 2000



Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	12904	Referat	21/0	Fördersumme	50.000,00 DM
Antragstitel	Präventive ökologische Bewertung von Produkten und Prozessen mit Fuzzy-Set-Modellierungen von unsicheren Eingangsinformationen am Beispiel des Wellenlötens elektronischer Baugruppen				
Stichworte	Produkt; Bauteil; Ökologie				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
24	01/1999	01/2001	keine		
Zwischenberichte:	alle 6 Monate Kurzbericht				
Bewilligungsempfänger	Universität Erlangen-Nürnberg Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmeßtechnik Nägelsbachstr. 25 91052 Erlangen			Tel	09131/856521
				Fax	09131/856524
				Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. A. Weckenmann
				Bearbeiter	
Kooperationspartner	Deutsche Thomson Brandt GmbH, Villingen-Schwenningen WfB Lippstadt gGmbH, Lippstadt				

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Die mit einer Produkt-Ökobilanz verbundene Analyse der im Produktleben fließenden Energie- und Massenströme ist meist zeitaufwendig und teuer. Zur Aufwandsreduzierung werden deshalb häufig Abschätzungen beim Ermitteln der Energie- und Massenströmen herangezogen. Bedingt durch die mit Schätzungen einhergehende Erhöhung der Datenunsicherheit z.B. gegenüber Wiederholmessungen wird jedoch die Aussagesicherheit des Bilanzergebnisses geschmälert. Ziel des Projektes ist ein fuzzygestütztes Modell zur präventiven ökologischen Bewertung von Produkten und Prozessen bei unsicheren Eingangsinformationen. Eine Reduzierung des zeitlichen und finanziellen Aufwandes bei gleichzeitiger Sicherstellung der Aussagesicherheit der Bewertung gegenüber bisherigen Produkt-Ökobilanz-Verfahren ist zu erwarten. Das Modell wird beispielhaft für die vorsorgende ökologische Bewertung des Wellenlötens elektronischer Baugruppen bei den Kooperationspartnern eingesetzt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Für die mit Unsicherheit behafteten Schätzdaten wird ein Modell zur Verarbeitung und ökologischen Bewertung erarbeitet, mit dessen Hilfe Auswirkungen von Produkten und Prozessen auf die Umwelt transparent werden und ökologische Verbesserungsmaßnahmen aus dem Bewertungsergebnis unter Berücksichtigung der Datenunsicherheit abgeleitet werden können. Zur Modellierung der Datenunsicherheiten werden Fuzzy-Sets herangezogen. Daten der abgeschätzten Energie- und Massenströme mitsamt der als Fuzzy-Sets modellierten Unsicherheiten werden nach Wirkungskategorien wie z.B. Treibhauseffekt oder Ozonabbau klassifiziert, innerhalb der Kategorien gewichtet und mit Hilfe von Fuzzy-Operatoren zu einem Kennwert verdichtet. Darüber hinaus werden die Wirkungskategorien untereinander gewichtet und dann ebenfalls mittels Fuzzy-Operatoren verknüpft, so dass ein komplexes Produkt mit einem umweltbezogenen Fuzzy-Set bzw. nach der Defuzzifizierung mit einem einzigen Kennwert bewertet werden kann. Anhand jeweils einer ausgewählten elektronischen Baugruppe eines TV-Gerätes sowie eines Kartondruckers bei den Kooperationspartnern wird das ökologische Bewertungsmodell mit Fuzzy-Set-Modellierungen von unsicheren Eingangsinformationen erprobt. Hierbei werden Energie- und Massenströme beim Wellenlöten der elektronischen Baugruppen prognostiziert, bewertet, ökologische Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet und die Öko-Effizienz der Maßnahmen ermittelt.

Ergebnisse und Diskussion

Ein präventives ökologisches Bewertungsmodell wurde entwickelt, mit dem alternative Produkt- oder Prozesslösungen planungsbegleitend hinsichtlich der zu erwartenden ökologischen Eigenschaften im gesamten Lebenszyklus bewertet und daraus Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden können. Bei der Bewertung wurde insbesondere die Aussagesicherheit des als Fuzzy-Set vorliegenden Ergebnisses einbezogen. Für das Modell wurde die prototypenhafte Softwareumsetzung Green FIT (Fuzzy-Set supported Life Cycle Interpretation Tool for *greening* products und processes) erstellt, mit deren Hilfe die Effektivität des präventiven Vorgehens erhöht wird. Auf den Grundlagen der Fuzzy-Set-Theorie aufbauend wurden anwendungsorientierte Werkzeuge zur Modellierung von Datenunsicherheiten zugeschnitten. Diese wurden am Beispiel des Wellenlötens durch den Vergleich von geschätzten und gemessenen Werten erprobt. Hierzu wurden eigens dazu hergestellte elektronische Baugruppen verwendet.

Für die als Fuzzy-Sets dargestellten Schätzdaten wurde ein Modell zur Datenverdichtung und Auswertung erarbeitet. Sachbilanzdaten werden hierbei nach Wirkungskategorien wie z. B. Treibhauseffekt oder Ozonabbau klassifiziert, innerhalb der Kategorien gewichtet und mit Hilfe von Fuzzy-Operatoren zu einem Kennwert verdichtet. Darüber hinaus wurden die Wirkungskategorien untereinander gewichtet und dann ebenfalls mittels Fuzzy-Operatoren verknüpft. Ein komplexes Produkt kann somit mit einem umweltbezogenen Fuzzy-Set bzw. nach der Defuzzifizierung mit einem einzigen Kennwert „Green Fitness“ bewertet werden. Im Rahmen der Auswertung wurde das Ergebnis auf seine Sensitivität resultierend aus unsicheren Eingangsinformationen untersucht. Durch die Modellierung von Unsicherheiten als Fuzzy-Sets wurde die Unschärfe des Bewertungsergebnisses visuell veranschaulicht und eine Aussage über die Sicherheit des Gesamtergebnisses ermöglicht. Mit einer modifizierten Dominanzanalyse wurden sowohl die den ökologischen Kennwert „Green Fitness“ als auch die die Gesamtunsicherheit des Bewertungsergebnisses am meisten beeinflussenden Energie- und Massenströme erkannt. Die erstgenannte Auswertemöglichkeit hilft dabei, Verschwendungen gezielt zu vermeiden. Es können diejenigen Ströme ermittelt werden, die eine hohe Wirkung auf das Gesamtergebnis haben. Die zweitgenannte Dominanzanalyse für Unschärfe unterstützt das iterative Schätzen. Hintergrund ist ein Vorgehen in mehreren Iterationsschleifen zu verstehen: Eine erste grobe Sachbilanzschätzung der hinsichtlich der Umweltverträglichkeit zu vergleichenden Produkte wird bewertet. Ist keine eindeutige Entscheidung für oder gegen ein Produkt möglich, dann werden mit Hilfe der Dominanzanalyse für Unschärfe diejenigen Energie- und Massenströme herausgefiltert, die die Unschärfe des Gesamtergebnisses dominieren. Die herausgefilterten Ströme sind in einem zweiten Iterationszyklus genauer zu bestimmen. Diese Schleife wird solange durchlaufen, bis eine eindeutige Entscheidung getroffen werden kann. Dieses Vorgehen führt zu einer Zeit- und Kostenersparnis, da nicht alle Sachbilanzdaten mit der gleichen Genauigkeit vorliegen müssen. Für viele Eingangsdaten genügt eine grobe Schätzung. Ökologisch kritische Prozesse sind diejenigen, die bei einer kleinen mengenmäßigen Erhöhung eine deutliche Verschlechterung des Gesamtergebnisses nach sich ziehen. Zum Ermitteln potentiell kritischer Prozesse wurde Ideelle Analyse so abgewandelt, dass Informationen aus Fuzzy-Set direkt verarbeitet werden können. Hierdurch wird das Auffinden von Umwelt- und Haftungsrisiken unterstützt. Mit Hilfe von Green FIT werden Auswirkungen von Produkten und Prozessen auf die Umwelt planungsbegleitend transparent. Hieraus können präventiv ökologische Verbesserungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Aussagesicherheit des Bewertungsergebnisses abgeleitet werden. Die potentiellen Auswirkungen dieser Maßnahmen können mit Hilfe der Software simuliert und somit die Effizienz einer Maßnahme bewertet werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Eine Reihe von Veröffentlichungen hierzu sind in den Zeitschriften „Umwelt-Wirtschafts-Forum“, „Qualität und Zuverlässigkeit“ erschienen. Darüber hinaus wurde die Projektvorstellung auf GQW-Tagung am 23. Februar 1999 vorgetragen.

Fazit

Ein fuzzygestütztes Bewertungsmodell, mit dessen Hilfe der Aufwand für Produkt-Ökobilanzen verringert und zugleich die Streuung von Bilanzergebnissen transparenter werden sollen, wurde erstellt. Bei Anwendung des Modells sollen die Auswirkungen von Produkten und Prozessen auf die Umwelt transparent werden und ökologische Verbesserungsmaßnahmen aus dem Bewertungsergebnis unter Berücksichtigung der Datenunsicherheit abgeleitet werden können. Zur Modellierung unsicherer Eingangsdaten werden hierbei Fuzzy-Sets herangezogen. Für dieses Bewertungsmodell wurde ein Softwareprototyp „Green FIT“ erstellt. Mit Hilfe des erarbeiteten rechnergestützten Modells können Produkte und Prozesse bereits in der Planungs- und Entwicklungsphase auf ihre Umweltverträglichkeit hin bewertet und unter Berücksichtigung der Ergebnisstreuung des Bewertungsergebnisses optimiert werden. Das Modell wurde am Beispiel Wellenlöten elektronischer Baugruppen (SMD-, THD- und SMD/THD- Platine) und für drei Druckverfahren (Kartondruck, Etiketten-Rollendruck und Siebdruck) erprobt.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Verzeichnis von Bildern und Tabellen	3
Verzeichnis von Abkürzungen, Begriffen und Definitionen	6
Zusammenfassung	12
Einleitung	13
1 Ausgangssituation	13
1.1 Produkt-Ökobilanz	13
1.2 Elektronikproduktion	14
1.3 Defizite	14
2 Zielsetzung	15
3 Aufgabenstellung	16
Hauptteil	17
4 Darstellung und Verarbeitung von Unsicherheiten bei der Sachbilanz	17
4.1 Unsicherheiten als Fuzzy-Sets	17
4.1.1 Gemessene oder geschätzte Standardabweichung	17
4.1.2 Wenige Meßwerte	18
4.1.3 Weitere Schätzverfahren	20
4.2 Der Wellenlötprozeß als Beispielanwendung	21
4.3 Hilfsmittel zur Prognose der Sachbilanz beim Wellenlöten	23
4.3.1 Abschätzung flächenabhängiger Energie- und Massenströme	23
4.3.2 Abschätzung weiterer Energie- und Massenströme	23
4.4 Vergleich von gemessenen und berechneten Lotmassenströmen	27
4.4.1 Versuche zur Verifizierung der Volumenmodelle für Lötstellen	27
4.4.2 Gemessene Lotmassenströme	28
4.4.3 Berechnete Lotmassenströme	29
4.4.4 Spezifische Ausgleichsrechnung	30
4.5 Sachbilanzprognose für das Wellenlöten bei unsicheren Informationen	33
5 Modell zur Datenverdichtung und Auswertung	34
5.1 Festlegung des Formats für die Klassifizierung von Sachbilanzdaten	36

5.2	Klassifizierung der Sachbilanz-Prognosedaten nach Wirkungskategorien.....	37
5.3	Charakterisierung innerhalb der Wirkungskategorien mit Fuzzy-Operatoren ...	39
5.4	Aggregation der Wirkungskategorie-Ergebnisse	41
5.4.1	Gewichtungsfaktoren.....	41
5.4.2	Unterstützung der Aggregation durch Fuzzy-Operationen	42
5.5	Systematische Auswertung der Ergebnisse	45
5.5.1	Defuzzifizierung der aggregierten Fuzzy-Sets	45
5.5.2	Sensitivitätsanalyse.....	46
5.5.3	Werkzeuge zur Ergebnisanalyse im Überblick	51
6	Anwendungsbeispiel	52
	Fazit	57
	Literaturverzeichnis	60
	Anhänge	63
	Anhang A	63
	Anhang B	64
	Anhang C	65
	Anhang D	72
	Anhang E	78
	Anhang F.....	84

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

		Seite
Bild 1.1	Phasen einer Produkt-Ökobilanz	13
Bild 1.2	Auswirkungen von unsicheren Sachbilanzdaten auf das Ökobilanzergebnis an einem einfachen Beispiel	15
Bild 2.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	16
Bild 4.1	Ermitteln einer Zugehörigkeitsfunktion basierend auf Fehlerintervallen nach [POHL 1997]	18
Bild 4.2	Beispiel für eine Häufigkeitsverteilung von Meßwerten	19
Bild 4.3	Beispiel für eine Fuzzy-Set-Modellierung bei wenigen Meßwerten	19
Bild 4.4	Beispiele für Fuzzy-Set-Darstellungen von Energie- und Massenströmen auf Basis von Schätzungen und Messungen	21
Bild 4.5	Energie- und Massenströme beim Wellenlöten	22
Bild 4.6	Geometrische Idealisierung einer Lötstelle für DKL	24
Bild 4.7	Lotverbrauch an unbestückten durchkontaktierten Bohrungen	26
Bild 4.8	Geometrische Lotvolumen-Idealisierung an unbestückten SMD-Lötpads	26
Bild 4.9	Lotschichtdicke auf Leiterbahnen	27
Bild 4.10	Beispiele für bestückte Versuchsplatinen	28
Bild 4.11	Ausgleichsrechnung für das Lotvolumen am Beispiel der Platine P_2	32
Bild 4.12	Exemplarische Gegenüberstellung gemessener und mit Ausgleichsrechnung ermittelter Lotvolumina	33
Bild 4.13	Prognose des Lotverbrauchs am Beispiel Wellenlöten elektronischer Baugruppen	34
Bild 5.1	Beispielprodukte für den Vergleich hinsichtlich der Umweltverträglichkeit	35
Bild 5.2	Gliederung der Sachbilanzdaten und Bezeichnung der Dateien bei Umsetzung mit MS Excel	36
Bild 5.3	Klassifizierung mittels Filtertabellen	38
Bild 5.4	Zuweisung eines Stoffes aus dem Sachbilanzgliederungspunkt „Stoffe“ in eine bestimmte Wirkungskategorie	39
Bild 5.5	Umsetzung der Aggregationsvorschrift für den Treibhauseffekt mit Beispieldaten der THD-Platine	40
Bild 5.6	Normierung eines Teilergebnisses am Beispiel THD-Platine	43
Bild 5.7	Vorgehensweise zur Datenverdichtung unsicherer Eingangsinformationen	44

Bild 5.8	Graphische Darstellung der unscharfen Gesamtergebnisse der THD- und der THD/SMD-Platine relativ zum Referenzprodukt SMD-Platine	46
Bild 5.9	Qualitative Abhängigkeit des Gesamtergebnisses von F, w und N	51
Bild 5.10	Werkzeuge zur systematischen Auswertung im Überblick	52
Bild 6.1	Grafische Darstellung der unscharfen Gesamtergebnisse des Kartondrucks und des Siebdrucks relativ zum Referenzdruck Rollendruck	55
Bild 6.2	Green FIT-Ergebnisse der 'Dominanzanalyse' für Siebdruck'	55
Bild 6.2	Green FIT-Ergebnisse der 'Dominanzanalyses für Unschärfe' für Siebdruck	56
Bild 6.4	Normalisierte Wirkungskategorien für Kartondruck und Siebdruck	56
Bild 7.1	Iterationsschleife zur Auswahl umweltverträglicher Produkt- oder Prozesse	58
Tabelle 1.1	Sachbilanz für produkt A und B sowie Gewichtungsfaktoren GWP	15
Tabelle 4.1	Berechnungsvorschriften für Fehlerintervalle nach [POHL 1997]	17
Tabelle 4.2	Fuzzy-Set-Modellierungen bei fünf Meßwerten	20
Tabelle 4.3	Beispielhafte Energie- und Massenströme beim Wellenlöten elektronischer Baugruppe	22
Tabelle 4.4	Zusammenstellung von Volumenmodellen für Lötstellen	25
Tabelle 4.5	Bauelemente (BE) auf den Versuchsplatinen und wichtige Abmessungen	28
Tabelle 4.6	Meßergebnisse „Lötstellenvolumina in mm ³ “ der bestückten Versuchsplatinen als Fuzzy-Set-Modellierung	29
Tabelle 4.7	Berechnete unscharfe Lötstellenvolumina in mm ³	30
Tabelle 4.8	Fuzzy-Set-Äquivalenzfaktoren für flächenabhängige Energie- und Massenströme beim Wellenlöten	33
Tabelle 5.1	Sachbilanz für die SMD-, THD- und THD/SMD-Platine	36
Tabelle 5.2	Beispieldaten für den Sachbilanzgliederungspunkt „Ressourcen“ für die THD-Platine (Auszug aus Anhang C, Tabelle C.2)	37
Tabelle 5.3	Auszug aus der Filtertabelle Ressourcen (Anhang D, Tabelle D.1)	37
Tabelle 5.4	Zusammenstellung unscharfer Aggregationsvorschriften	40
Tabelle 5.5	Gewichtung der Wirkungskategorien	41
Tabelle 5.6	Aggregierte normierte Bewertung am Beispiel THD-Platine	44

	im Vergleich zur SMD-Platine (Auszug aus Anhang E, Tabelle E.5)	
Tabelle 5.7	Gesamtergebnisse der THD- und der THD/SMD-Platine relativ zum Referenzprodukt SMD-Platine	45
Tabelle 5.8	Dominanzanalyse der normierten, gewichteten und defuzzifizierten Wirkungskategorie-Ergebnisse für die THD-Platine im Vergleich zur SMD-Platine (Auszug aus Anhang E, E.6)	47
Tabelle 5.9	Dominanzanalyse der Prozeßemissionen in der Wirkungskategorie Ressourcen (Auszug für THD-Platine aus Anhang E, Tabelle E.1)	48
Tabelle 5.10	Dominanzanalyse der THD-Platine (Auszug aus Anhang E, Tabelle E7)	48
Tabelle 5.11	Unschärfe Dominanzanalyse für die THD-Platine (Auszug aus Anhang E, Tabelle E8)	49
Tabelle 5.12	Zusammenfassung der Ergebnisse der Dominanzanalyse	50
Tabelle 5.13	Ergebnisse der ideellen Analyse für die THD-Platine (Auszug aus Anhang E, Tabelle E9)	51
Tabelle 6.1	Datenerfassung für Kartondruck, Rollendruck und Siebdruck	53
Tabelle 6.2	Gesamtergebnisse des Kartondruckers und des Siebdrucks relativ zum Referenzdruckers Rollendruck	54
Tabelle 7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse der Dominanzanalyse	59

Verzeichnis von Abkürzungen, Begriffen und Definitionen

Abkürzungen		SI-Einheiten
\tilde{A}	Unschärfe spezifische Ausgleichsfunktion	-
AF	Normierungsfaktor Abfall	-
AP	Normierungsfaktor Versauerung (Acidification Potential)	kg
$\ddot{A}q.$	Äquivalent	-
A_{PE}	Anteil der Prozeßemission an einem Wirkungskategorie-Ergebnis	%
A_{SPE}	Anteil der Unschärfe der Prozeßemission an der Unschärfe eines Wirkungskategorie-Ergebnis i	%
A_{SWK}	Anteil der Unschärfe eines Wirkungskategorie-Ergebnisses an der Unschärfe des Gesamtergebnis	%
A_{WK}	Anteil eines Wirkungskategorie-Ergebnisses am Gesamtergebnis	%
BE	Bauelement	-
b	Höhe des Lotdurchstiegs	m
\tilde{b}	Unschärfe Höhe des Lotdurchstiegs	m
b_A	Breite der Querschnittsfläche eines rechteckigen THD-Beinchens	m
b_C	Breite des Lotprismas bei SMD-Anschlüssen	m
b_{PC}	Breite eines SMD-Chip-Löt pads	m
b_{PGW}	Breite eines SMD-Gullwing-Löt pads	m
b_Z	Breite der Querschnittsfläche eines rechteckigen THD-Beinchen einschl. Lotüberzug	m
\tilde{C}	Unschärfe Verschiebungskonstante	-
CF_3Cl	Chlortrifluormethan (R13)	kg
$CFCl_3$	Trichlorfluormethan (R11)	kg
CH_4	Methan	kg
CO	Kohlenmonoxid	kg
CO_2	Kohlendioxid	kg
C_2H_4	Ethen	kg
\tilde{D}	Unschärfe Menge „Dauer der Emission“	-
$DIL\ 40$	Bauform Dual Inline Package mit 40 Anschlüssen	-
DKL	Durchkontaktierte Leiterplatte	-
d_A	Beinchendurchmesser von THD-Bauelementen	m
\tilde{d}_A	Unschärfer Beinchendurchmesser von THD-Bauelementen	m
d_B	Bohrungsdurchmesser für THD-Anschlußbeinchen	m
\tilde{d}_B	Unschärfer Bohrungsdurchmesser für THD-Anschlußbeinchen	m

d_{diag}	Diagonale eines rechteckigen THD-Beinchens	m
d_L	Lötaugendurchmesser von THD-Anschlüssen	m
\tilde{d}_L	Unscharfer Lötaugendurchmesser von THD-Anschlüssen	m
d_z	Durchmesser eines THD-Beinchens einschl. Lotüberzug	m
\tilde{d}_z	Unscharfer Durchmesser eines THD-Beinchens einschl. Lotüberzug	m
E	Ergebnis eines Vergleichsproduktes	-
ECA	Normierungsfaktor Ökotoxizität-Aquatisch (Ecotoxicological Classification Factor for Aquatic Ecosystems)	m ³
ECT	Normierungsfaktor Ökotoxizität-Terrestisch (Ecotoxicological Classification Factor for Terrestrial Ecosystems)	kg
E/M	Energie- oder Massenstrom	W; kg
E/M_{LP}	Energie- oder Massenstrom pro m ² Leiterplatte	W/m ² ; kg/m ²
E_{Wasser}	Wärmeemission in Wasser	W
F	Normierungsfaktor (Reduktionsfaktor) einer Wirkungskategorie	-
Fl	Flächenangabe	m ²
\tilde{Fl}	Unscharfe Menge „Flächenangabe“	m ²
Fl_{Cu}	Freiliegende Kupferfläche einer Leiterplatte	m ²
fu	Funktionelle Einheit (functional unit)	-
f_{Lot}	Funktion zur Bestimmung des Lotverbrauchs	-
GE	Gesamtergebnis	-
GL	Normierungsfaktor Lärm	-
GWP	Normierungsfaktor Treibhauseffekt (Global Warming Potential)	kg
HCA	Normierungsfaktor Humantoxizität-Luft (Human Toxicological Classification Factor for Atmosphere)	kg
HCS	Normierungsfaktor Humantoxizität-Boden (Human Toxicological Classification Factor for Soil)	kg
HCW	Normierungsfaktor Humantoxizität-Wasser Human (Toxicological Classification Factor for Water)	kg
HS	Normierungsfaktor Hemerobiestufe	-
h	Lötaugenkegelhöhe	m
h'	Höhe des Beinchenüberstands über dem Lötauge	m
h_{CGW}	Höhe eines SMD-Anschlusses	m
h_{FGW}	Höhe der Grundfläche des umschließenden Lotdreieckprismas bei SMD-Gullwing-Anschlüssen	m
h_{NFGW}	Höhe der Grundfläche des nicht umschließenden Lotdreieckprismas	m

	bei SMD-Gullwing-Anschlüssen	
h_{PC}	Höhe des Lots bei einem freiliegenden SMD-Chip-Lotpad	m
h_{PGW}	Höhe des Lots bei einem freiliegenden SMD-Gullwing-Lotpad	m
IT	Informationstechnik	-
k	Skalierungswert	-
LR	Referenzfunktion für die linke und rechte Seite einer unscharfen Menge	-
l_A	Länge der Querschnittsfläche eines rechteckigen THD-Beinchens	m
l_{FGW}	Länge der Grundfläche des idealisierten umschließenden Lotdreieckprismas bei SMD-Gullwing-Anschlüssen	m
l_{LGW}	Lotumschlossene Länge eines Gullwing-Anschlusses	m
l_{NFGW}	Länge der Grundfläche des idealisierten nicht umschließenden Lotdreieckprismas bei SMD-Gullwing-Anschlüssen	m
l_{PC}	Länge eines SMD-Chip-Löt pads	m
l_{PGW}	Länge eines SMD-Gullwing-Löt pads	m
l_Z	Länge der Querschnittsfläche eines rechteckigen THD-Beinchen einschl. Lotüberzug	m
\tilde{M}	Unscharfes Intervall	-
Max	Maximum	-
Min	Minimum	-
MU	Meßunsicherheit	-
m	Massenangabe	kg
\tilde{m}	Unscharfe Massenangabe	kg
m_L	Linke Toleranz- oder Kerngrenze eines unscharfen Intervalls	-
m_R	Rechte Toleranz- oder Kerngrenze eines unscharfen Intervalls	-
N	Ergebnis einer Wirkungskategorie eines Vergleichproduktes	-
$NDKL$	Nicht durchkontaktierte Leiterplatte	-
NP	Normierungsfaktor Eutrophierungspotential (Nitrification Potential)	kg
n	Anzahl	-
ODP	Normierungsfaktor Ozonabbau (Ozon Depletion Potential)	kg
OTV	Normierungsfaktor Belästigungen-Gestank (Odour Threshold Value)	m ³
$POCP$	Normierungsfaktor Photooxidantien (Photochemical ozone creation potential)	kg
PO_4^{3-}	Phosphat	kg
P_-	Bestückte durchkontaktierte Versuchsplatine	-
P_-N	Bestückte nicht durchkontaktierte Versuchsplatine	-

p	Anteil eines mit einem Prozeß verbundenen Energie- und Massenstroms am Gesamtergebnis	%
p_s	Anteil der Unschärfe eines mit einem Prozeß verbundenen Energie- und Massenstromes an der Gesamtunschärfe	%
Q_A	Querschnittsfläche eines rechteckigen THD-Beinchen	m ²
Q_Z	Querschnittsfläche eines rechteckigen THD-Beinchen einschl. Lotüberzug	m ²
\tilde{q}	Unschärfe Menge „Jährliches Produktionsvolumen“	-
R	Rechte Fuzzy-Referenzfunktion	-
RV	Ressourcenverbrauchsfaktor	-
S	Schwerpunktsfaktor zugleich Sicherheitsfaktor	-
$SBGP$	Sachbilanzgliederungspunkt	-
SMD	Oberflächenmontierte Bauelemente (Surface Mounted Device)	-
$SO14$	Bauform „Solid Outline Package“ mit 14 Anschlüssen	-
SO_2	Schwefeldioxid	kg
SP	Unschärfe Menge „Schallpegel“	-
TE	Teil-Ergebnis der Wirkungsabschätzung	-
THD	Bauelemente mit Drahtanschluß (Through Hole Device)	-
THE	Treibhauseffekt	-
TX	Bezeichnung für eine elektronische Baugruppe	-
\tilde{U}	Unschärfe einer Fuzzy-Menge	-
V	Lotvolumen	m ³
\tilde{V}	Unschärfe Lotvolumen	m ³
w	Normierungsfaktor eines Energie- oder Massenstroms innerhalb einer Wirkungskategorie	-
w_{CGW}	Breite von SMD-Anschlußbeinchen	m
\bar{x}_{TE}	Mittelwert	-
x_s	x-Koordinate des Flächenschwerpunkts in globalen Koordinaten	-
Δ	Intervall bei der Fuzzy-Set-Modellierung bei fünf Meßwerten	-
α	Linke Schwankungsbreite eines unscharfen Intervalls	-
β	Rechte Schwankungsbreite eines unscharfen Intervalls	-
λ	Skalierungsfaktor	-
μ	Zugehörigkeitsgrad	-
ρ	physikalische Dichte	kg/m ³
σ	Standardabweichung	-

Begriffen & Definitionen

Aggregationsvorschrift	Funktion zur Datenverdichtung
Ausgleichsrechnung	Abgleichen von berechneten und gemessenen Fuzzy-Sets
Auswertung	Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung werden mit dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen einer Produkt-Ökobilanz zusammengeführt (interpretation)
Charakterisierung	Datenverdichtung innerhalb einer Wirkungskategorie
Defuzzifizierung	Ableiten eines korrespondierenden scharfen (skalaren) Werts aus einer unscharfen Menge
Dominanzanalyse	Herausfiltern der dominierenden Energie- und Massenströme eines Bewertungsergebnisses (dominance analysis)
Fuzzy-Set-Theorie	Theorie der unscharfen Mengen
Green FIT	Softwareprototyp für das fuzzygestützte ökologische Bewertungsmodell zur Datenverdichtung und Auswertung (F uzzy- S et supported L ife Cycle I nterpretation T ool for g reening products and processes)"
Green Fitness	Defuzzifizierter Wert auf Basis des ökologischen Bewertungsmodells zur Datenverdichtung und Auswertung
Gültigkeitsanalyse	Ermitteln der Auswirkungen der Variation von Eingangsdaten auf ein Bewertungsergebnis (validity analysis)
Ideelle Analyse	Ermitteln der aus ökologischer Sicht potentiell kritischen Prozesse (marginal analysis)
Klassifizierung	Zuordnen der in der Sachbilanz erhobenen Energie- und Massenströme zu betroffenen Wirkungskategorien
Normierung	Division durch das Ergebnis eines Vergleichsprodukts
Produkt-Ökobilanz	Zusammenstellung der Energie- und Massenströme und Beurteilung der Umweltwirkungen eines Produkt-Systems im Verlauf seines Lebenswegs (life cycle assessment)
Produkt-System	Zusammenfassung der durch Energie- und Massenströme verbundenen Prozesse
Sachbilanz	Zusammenstellung und Quantifizierung von Energie- und Massenströmen eines Produkt-Systems einer Produkt-Ökobilanz im Verlauf des Lebenswegs (inventory analysis)
Sensitivitätsanalyse	Ermitteln des Einflusses von unsicheren Eingangsinformationen auf das Bewertungsergebnis
Umweltverträglichkeit	Umweltwirkungen eines Produkt-Systems auf Lebewesen, Flora, Fauna, Luft, Boden, Wasser und Klima
Unschärfe, Unsicherheit	Informationen mit Schwankungsbreite
Volumenmodell	Idealisierte Lötstellenform
Wirkungsabschätzung	Abschätzung der Bedeutung von potentiellen Umwelt-

	wirkungen eines Produkt-Systems (impact assessment)
Wirkungskategorie	Gliederungsmerkmal von globalen, regionalen und lokalen Umweltwirkungen wie z. B. Treibhauseffekt (impact category)
Zuverlässigkeitsanalyse	Analyse zur Ermittlung des Unsicherheitsbereichs eines aggregierten Bewertungsergebnisses (reliability analysis)

Zusammenfassung

Produktbezogene Ökobilanzen sind ein häufig eingesetztes Mittel zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Produkten und der zur Herstellung notwendigen Prozesse. Der Aufwand für das Erstellen einer produktbezogenen Ökobilanz ist meist sehr groß. Deshalb werden in der Praxis Energie- und Massenströme häufig abgeschätzt. Dies ist eine wesentliche Quelle für Datenunsicherheiten auf der Sachbilanzebene. Dadurch entstehen Interpretationsspielräume bei der Auswertung der verdichteten Daten.

Ein fuzzygestütztes Bewertungsmodell, mit dessen Hilfe der Aufwand für Produkt-Ökobilanzen verringert und zugleich die Auswertung von Bilanzergebnissen unterstützt werden soll, wurde erläutert. Zur Modellierung unsicherer Eingangsdaten werden hierbei Fuzzy-Sets herangezogen.

Für das Modell zur Entwicklung umweltverträglicher Produkte und Prozesse bei unsicheren Eingangsinformationen wurde der Softwareprototyp Green FIT erarbeitet. Mit Hilfe von Green FIT werden Auswirkungen von Produkten und Prozessen auf die Umwelt planungsbegleitend transparent. Hieraus können präventiv ökologische Verbesserungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Aussagesicherheit des Bewertungsergebnisses abgeleitet werden. Die potentiellen Auswirkungen dieser Maßnahmen können mit Hilfe der Software simuliert und somit die Effizienz einer Maßnahme bewertet werden. Die Funktionsweise von Green FIT wurde anhand der Beispielplatine TX und deren hinsichtlich der Fertigungsprozesse modifizierten Varianten demonstriert.

Weiterentwicklungspotentiale sind insbesondere bei der Fuzzy-Set-Modellierung von Informationen über die Datenqualität zu sehen. Informationen über die Datenqualität sind z. B. der zeitliche Bezug der Datenerhebung oder die Datenherkunft. Weiterhin ist eine Kopplung mit einer Wirtschaftlichkeitsbewertung erstrebenswert. Mit Hilfe dieser Kopplung könnten parallel zur Ermittlung der Öko-Effizienz die Kosten und Nutzen einer ökologischen Verbesserungsmaßnahme entwicklungsbegleitend erarbeitet werden.

Einleitung

1 Ausgangssituation

Die Anforderungen an die Planung und Entwicklung neuer Produkte steigen. Neben den herkömmlichen Kriterien Kosten, Zeit und Qualität gewinnt der Faktor Umwelt an Bedeutung. Zur Bewertung der Umweltverträglichkeit von Produkten und Prozessen werden häufig produktbezogene Ökobilanzen herangezogen. Die hierfür erforderliche Erfassung, Verdichtung und Analyse der im Produktleben fließenden Energie- und Massenströme ist zeitaufwendig und teuer. Desweiteren liegen Bewertungsergebnisse häufig nicht in Planung und Entwicklung vor, obwohl sich hier die höchsten ökologischen und damit verbunden auch ökonomischen Potentiale erschließen lassen [PERRONE 1998]. Die Potentiale sind in Planung und Entwicklung besonders hoch, da nahezu alle Eigenschaften eines Produkts festgelegt werden. Um den Zeit- und Kostenaufwand möglichst gering zu halten und zugleich planungsbegleitend vorzugehen, werden häufig Abschätzungen beim Ermitteln der Energie- und Massenströme herangezogen. In der Praxis basieren diese Schätzungen oftmals auf Datenbankangaben oder Erfahrungswissen. Bedingt durch die mit Schätzungen einhergehende Erhöhung der Datenunsicherheit z. B. gegenüber Wiederholmessungen wird jedoch die Auswertesicherheit des Bilanzergebnisses geschmälert. Um diesen Nachteil zu vermeiden, ist es notwendig, Vertrauensbereiche von produktbezogenen Ökobilanzergebnissen anzugeben und transparent darzustellen [WEIDEMA 1996], [SINGHOFEN 1996]. Dies ist möglich durch Fuzzy-Set-Modellierung von Unsicherheiten.

1.1 Produkt-Ökobilanz

In der Norm ISO 14040 [ISO 14040] sind für das Erstellen einer Produkt-Ökobilanz vier Bearbeitungsphasen (Bild 1.1) vorgesehen:

- 1 Festlegen des Ziels und des Untersuchungsrahmens (goal and scope definition)
- 2 Ermitteln der Sachbilanz (inventory analysis)
- 3 Erstellen der Wirkungsabschätzung (impact assessment)
- 4 Auswertung der Ergebnisse (interpretation)

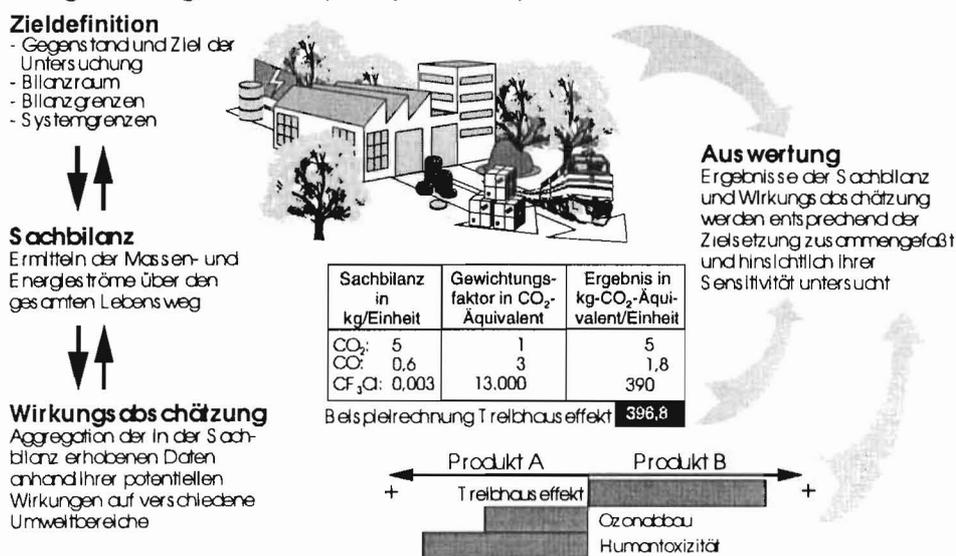


Bild 1.1: Phasen einer Produkt-Ökobilanz

1.2 Elektronikproduktion

Geräte der Elektronikproduktion spielen eine immer größere Rolle bei vielen gewerblichen und privaten Aktivitäten. Sie unterliegen bei sich beschleunigenden technologischen Innovationen einer immer kürzeren Lebensdauer. Nach der Nutzungsphase stellen sie als sogenannter Elektronikschrott ein heterogenes Abfallgemisch dar, das vielfältige Gefahr- und Rohstoffpotentiale in sich birgt.

Eine Wiederverwendung von einzelnen Baugruppen der entsorgten Geräte ist wegen der raschen technischen Veralterung nur begrenzt möglich. Beim Elektronikschrott beschränkt sich deshalb das Kreislaufwirtschaftsprinzip derzeit in aller Regel auf die stoffliche Verwertung der Fraktionen Metalle und Kunststoffe. Metalle lassen sich mit klassischen Technologien wiedergewinnen. Bei der Verwertung der Kunststoffanteile ist das Downcycling vorherrschend. Künftig sollen große Bauteile wie z.B. Kunststoffgehäuse sortenrein getrennt werden, um eine höherwertige Wieder- und Weiterverwertung zu ermöglichen.

Elektronische Baugruppen (häufig auch als Flachbaugruppen oder Platinen bezeichnet) stellen diejenige Fraktion im Elektronikschrott dar, die am wenigsten dem Recycling und damit auch der Kreislaufwirtschaft zugänglich ist. Der Grund dafür ist die große Vielfalt der Materialien, die sich in ihnen verbergen. In elektronischen Baugruppen können bis zu zwei Drittel der Elemente des Periodensystems und eine weitaus höhere Zahl an chemischen Verbindungen enthalten sein. Erschwerend für ein Wirtschaften in Kreisläufen kommt hinzu, daß vor allem bei importierten Bauelementen die Zusammensetzung unbekannt ist.

Wegen dieses starken Anstiegs und der im Schrott enthaltenen Schadstoffe wie z.B. additive Bromverbindungen zur Flammhemmung in Substratmaterialien, Blei in den Loten oder Cadmium und Quecksilber zur Pigmentierung in den Bauelementen besteht dringender Handlungsbedarf, Umweltbelastungen bei Herstellung, Gebrauch und Entsorgung zu reduzieren.

1.3 Defizite

Das Erstellen einer produktbezogenen Ökobilanz ist meist mit hohem Aufwand verbunden. Je komplexer das zu bewertende Produkt ist, um so mehr steigt der Aufwand für das Erstellen der Bilanz. Je früher im Produktleben eine ökologische Bewertung erfolgen soll, desto häufiger muß auf mehr oder minder grobe Abschätzungen zurückgegriffen werden, die mit mehr oder minder großen Unsicherheitsbereichen behaftet sind. Produktbezogene Ökobilanz-Ergebnisse können demzufolge zu Fehlinterpretationen und nicht zielgerichteten Verbesserungsmaßnahmen führen.

Eine mögliche Auswirkung der Unsicherheit auf das Ökobilanz-Ergebnis sei an einem stark vereinfachten Beispiel gezeigt: Die Sachbilanz für zwei Produkte enthalte die in Tabelle 1.1 zusammengestellten Daten.

Für den Analytiker sei beispielhaft lediglich die Wirkungskategorie „Treibhauseffekt (THE)“ von Interesse. Hierfür gilt Gleichung (1.1) zur Datenverdichtung.

$$\text{THE} = m(\text{CO}_2) \cdot \text{GWP}(\text{CO}_2) + m(\text{CF}_3\text{Cl}) \cdot \text{GWP}(\text{CF}_3\text{Cl}) \quad (1.1)$$

m = Masse

GWP = Global Warming Potential (Gewichtungsfaktor)

Stoff	Beschreibung	Masse Produkt A in kg	Masse Produkt B in kg	Global Warming Potential (GWP)
CO ₂	Kohlendioxid	10,00	9,00	1
CF ₃ Cl	R13	0,24	0,25	13.000

Tabelle 1.1: Sachbilanz für Produkt A und B sowie Gewichtungsfaktoren GWP

Werden die Sachbilanzdaten nach Gleichung (1.1) verdichtet, so ist Produkt A wegen des geringeren Beitrags zum Treibhauseffekt zu bevorzugen. Schwankt der Sachbilanzwert von Produkt A für CF₃Cl um fünf Prozentpunkte und der von B für CO₂ um 20 Prozentpunkte nach oben, so ist B das umweltverträglichere (Bild 1.2).

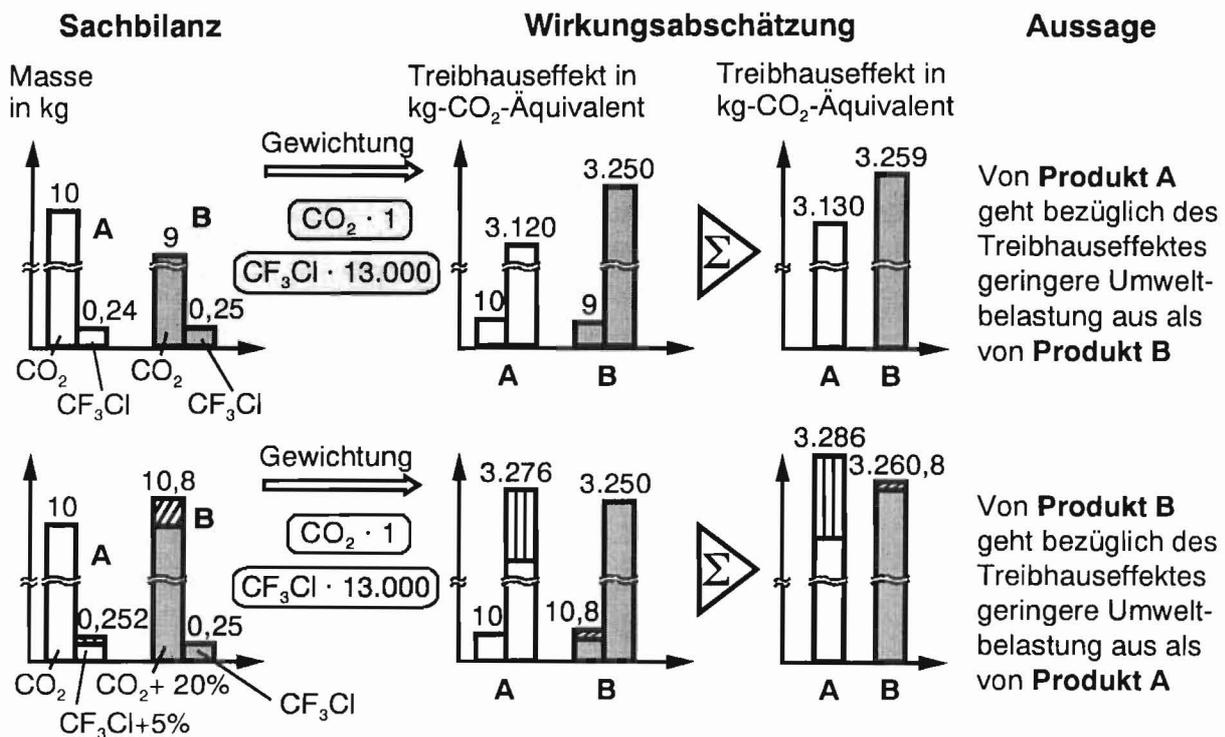


Bild 1.2: Auswirkungen von unsicheren Sachbilanzdaten auf das Ökobilanzergebnis an einem einfachen Beispiel

Bereits eine kleine Schwankung von Massenangaben von hoch zu gewichtenden Energie- und Massenströmen wie z.B. CF₃Cl kann zu erheblichen Ergebnisänderungen führen. Die Verlässlichkeit der Bewertung wird somit in Frage gestellt. Sowohl bei der Sachbilanz, der Wirkungsabschätzung als auch der Auswertung können unsichere Informationen das Ergebnis einer produktbezogenen Ökobilanz stark beeinflussen [POHL 1996] und dazu führen, daß durch Ergebnisse verschiedener Bilanzen die Umweltverträglichkeit eines Produkt ganz unterschiedlich eingestuft wird. Durch die Verwendung skalarer Werte für Energie- und Massedaten wird bereits bei der Sachbilanz eine grobe Vereinfachung vorgenommen.

2 Zielsetzung

Für die umweltverträgliche Auslegung eines Produktes sind insbesondere aus finanziellen Gründen präventiv greifende und in angemessenem Rahmen handhabbare

Bewertungswerkzeuge notwendig. Wird Wissen über die nachhaltige Entwicklung von vornherein eingebaut, können Fehlentscheidungen und damit Fehlinvestitionen vermieden und somit das Risiko bei Investitionsentscheidungen verringert werden. Ziel des Projektes ist ein Modell zur präventiven ökologischen Bewertung von Produkten und Prozessen bei unsicheren Eingangsinformationen. Das Modell wird beispielhaft für die vorsorgende ökologische Bewertung des Wellenlötens elektronischer Baugruppen bei den Pilotanwendern Deutsche Thomson Brandt GmbH und WfB Lippstadt gGmbH eingesetzt. Mit Hilfe des zu erarbeitenden Modells werden Produkte und Prozesse bereits in der Planungs- und Entwicklungsphase auf ihre Umweltverträglichkeit hin bewertet und unter ökologischen Gesichtspunkten optimiert. Dies wird ermöglicht durch Fuzzy-Set-Modellierungen von unsicheren Informationen.

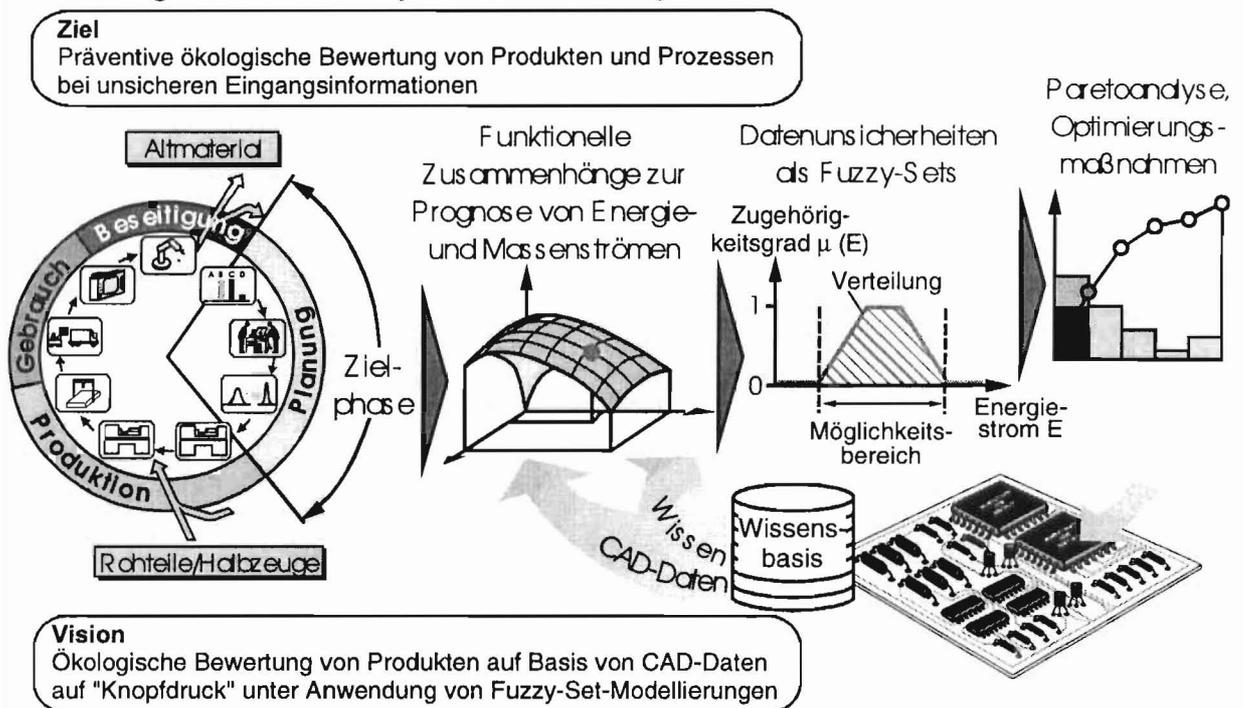


Bild 2.1: Zielsetzung und Vorgehensweise

3 Aufgabenstellung

Im folgenden wird ein fuzzygestütztes präventiv greifendes Bewertungsmodell erläutert, mit dem unsichere Eingangsinformationen bei der Produkt-Ökobilanz anwendergerecht dargestellt, verarbeitet und verdichtet werden können. Des Weiteren wird ausgeführt, wie die als unscharfe Intervalle angegebene Bewertungsergebnisse mit angemessener Aussagesicherheit ausgewertet werden können. Für dieses Bewertungsmodell ist ein Softwareprototyp „Green FIT“ (Fuzzy-Set supported Life Cycle Interpretation Tool for **greening** products and processes) erstellt worden. Mit Hilfe des erarbeiteten rechnergestützten Modells können Produkte und Prozesse bereits in der Planungs- und Entwicklungsphase auf ihre Umweltverträglichkeit hin bewertet und unter Berücksichtigung der Aussagesicherheit der Bewertungsergebnisse optimiert werden. Die Funktionsweise von Green FIT wird am Beispiel „Wellenlöten einer elektronischen Baugruppe“ erläutert.

Hauptteil

4 Darstellung und Verarbeitung von Unsicherheiten bei der Sachbilanz

Ziel dieses Kapitels ist es, anwendergerechte Werkzeuge zur Darstellung und Verarbeitung von unsicheren Informationen bei der Sachbilanz-Prognose bereitzustellen. Die vorgeschlagenen Werkzeuge werden am Beispiel des Wellenlötprozesses und dessen spezifischen Randbedingungen erläutert sowie auf ihre praktische Anwendbarkeit untersucht.

4.1 Unsicherheiten als Fuzzy-Sets

Abschätzungen z.B. auf Basis von funktionellen Zusammenhängen oder verbal formulierte Informationen wie beispielsweise Expertenaussagen sind mit einem Unsicherheitsbereich behaftet. Nahezu alle Unsicherheitsangaben lassen sich als Fuzzy-Sets darstellen. Die Modellierung eines Großteils von Unsicherheitsangaben als Fuzzy-Sets hat den Vorteil, daß sie gleiches Datenformat aufweisen. Für eine rechnerunterstützte Verarbeitung der Daten ist dies eine unabdingbare Voraussetzung.

4.1.1 Gemessene oder geschätzte Standardabweichung

Es wird ein „pessimistisches“ und ein „optimistisches“ Unsicherheitsintervall angenommen. Hierbei wird vorausgesetzt, daß eine Anzahl von Meßwerten normalverteilt mit dem Mittelwert \bar{x} und der Standardabweichung σ ist. Die empirische Standardabweichung s ist dabei als Schätzwert für die Standardabweichung σ zu verstehen.

Für die „pessimistische“ Schätzung $I_{2,5}$ (Tabelle 4.1) wird ein breites Intervall gewählt, damit ein großer Möglichkeitsbereich in den Berechnungen berücksichtigt wird. $I_{2,5}$ bedeutet, daß die Intervallbreite das Zweieinhalbfache der geschätzten relativen Standardabweichung s_{rel} beträgt. Hierbei heißt „relativ“, daß die Standardabweichung relativ zum Mittelwert \bar{x} in Prozent angegeben wird.

Die „optimistische“ Schätzung basiert auf der Vorstellung, daß Plausibilitätsüberlegungen und eine hohe Anzahl von Meßwerten den Möglichkeitsbereich relativ genau eingrenzen können, weshalb hier das Intervall $[I_{0,5}]$ gewählt wird (Tabelle 4.1).

Fehlerintervall $[I_n]$	Minimum $I_{n, Min}$ normiert	Nr.	Maximum $I_{n, Max}$ normiert	Nr.
$[I_{0,5}]$	$\frac{1}{1+0,5s_{rel}}$	(4.1a)	$1+0,5s_{rel}$	(4.1b)
$[I_{2,5}]$	$\frac{1}{1+2,5s_{rel}}$	(4.2a)	$1+2,5s_{rel}$	(4.2b)

Tabelle 4.1: Berechnungsvorschriften für Fehlerintervalle nach [POHL 1997]

Die Minima und Maxima sind dabei so gewählt, daß der nach Gleichung (4.20) scharfe defuzzifizierte Wert das geometrische Mittel bildet. Das hat den Vorteil, daß auch bei großen Standardabweichungen das Fuzzy-Set nie in den negativen Bereich, d.h. in den zweiten Quadranten eines kartesischen Koordinatensystems, ragen

kann. Daher sind die Intervalle und somit auch die trapezförmigen Fuzzy-Sets asymmetrisch. Die Zugehörigkeitsfunktion wird gemäß Bild 4.1 modelliert.

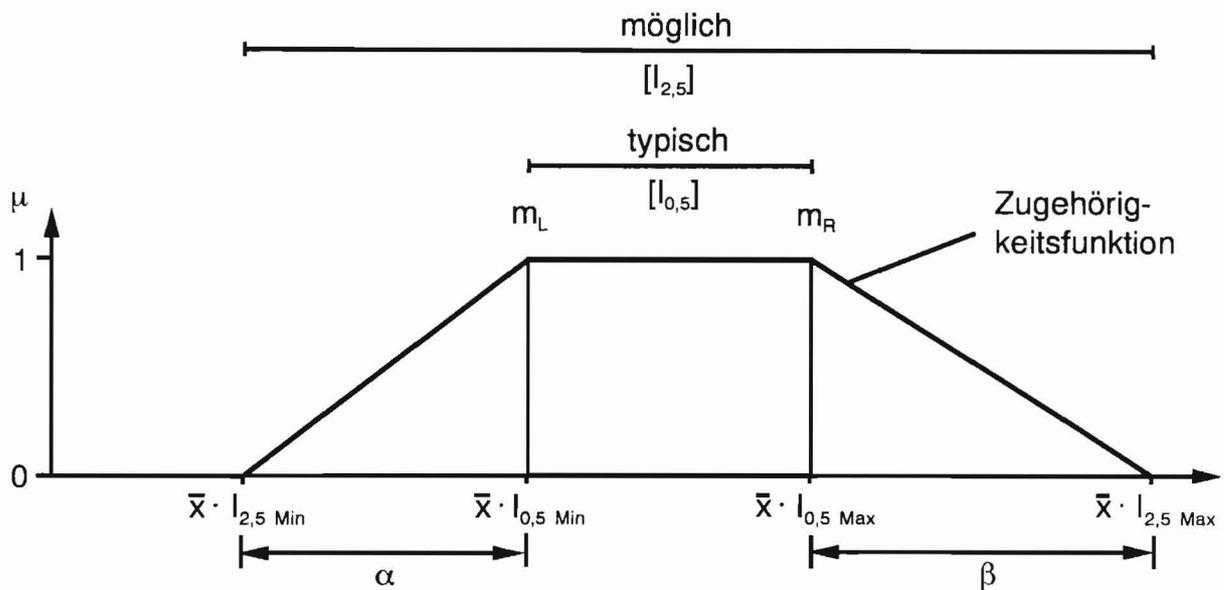


Bild 4.1: Ermitteln einer Zugehörigkeitsfunktion basierend auf Fehlerintervallen nach [POHL 1997]

Stellt man das in Bild 4.1 abgebildete unscharfe Intervall \tilde{M} in der LR-Form dar, so erhält man:

$$\tilde{M} = (m_L, m_R, \alpha, \beta) \quad (4.3)$$

$$\text{mit } m_L = \bar{x} \cdot l_{0,5 \text{ Min}} \quad (4.4)$$

$$m_R = \bar{x} \cdot l_{0,5 \text{ Max}} \quad (4.5)$$

$$\alpha = \bar{x} \cdot (l_{0,5 \text{ Min}} - l_{2,5 \text{ Min}}) \quad (4.6)$$

$$\beta = \bar{x} \cdot (l_{2,5 \text{ Max}} - l_{0,5 \text{ Max}}) \quad (4.7)$$

Mit einer Tabellenkalkulation wie z.B. MS Excel läßt sich die LR-Darstellung einer unscharfen Zahl automatisiert aus Meßwerten bestimmen.

4.1.2 Wenige Meßwerte

Konventionelle statistische Verfahren stoßen an ihre Grenzen oder komplizieren sich stark, wenn z.B. zu wenig Daten für eine statistische Analyse vorliegen [SALSKI 1993]. Beispielsweise würde die Angabe des arithmetischen Mittelwerts Exaktheit vortäuschen, die statistisch nicht nachgewiesen werden kann. Die Angabe eines Intervalles der Form [minimaler Meßwert; maximaler Meßwert] schließt zwar alle gemessenen Werte ein, hat jedoch bei entsprechend großer Intervallbreite, beispielsweise hervorgerufen durch „Ausreißer“, nur noch wenig Aussagekraft. Häufig läßt sich die ungefähre Lage des Erwartungswertes erahnen. Hierzu wird die Spannweite der Meßwerte berechnet und in gleich breite Intervalle eingeteilt. Für jede der Klassen wird die Anzahl der Meßwerte pro Klasse bestimmt (Bild 4.2). Menschliche Intuition läßt sich gut mit Hilfe unscharfer Mengen respektive ihrer Zugehörigkeitsfunktionen modellieren. In der Fuzzy-Set-Theorie wird für jeden Term

einer linguistischen Variablen das Intervall festgelegt, das am **typischsten** ist [ALT-ROCK 1995].

Anzahl der
Meßwerte
pro Intervall

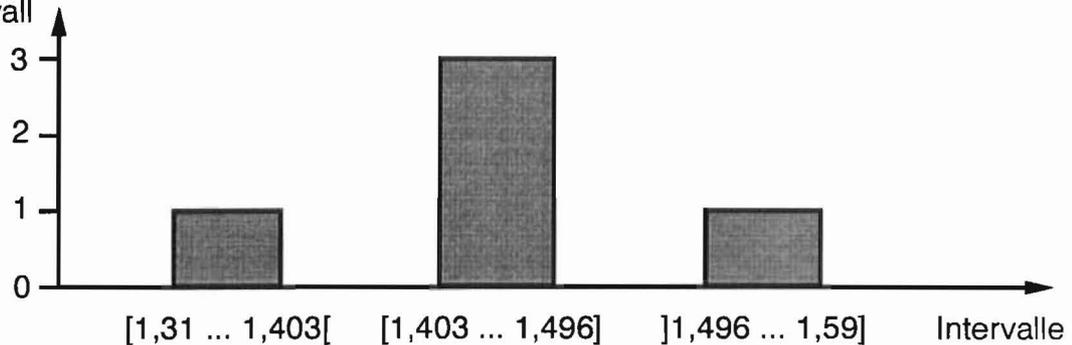


Bild 4.2: Beispiel für eine Häufigkeitsverteilung von Meßwerten

Da dieses Intervall den „Prototyp“ eines Terms darstellt, erhält es den Zugehörigkeitsgrad $\mu = 1$. Das Übertragen dieses Prinzipes auf die Beispielhäufigkeitsverteilung in Bild 4.2 ergibt eine in Bild 4.3 dargestellte Fuzzy-Set-Modellierung.

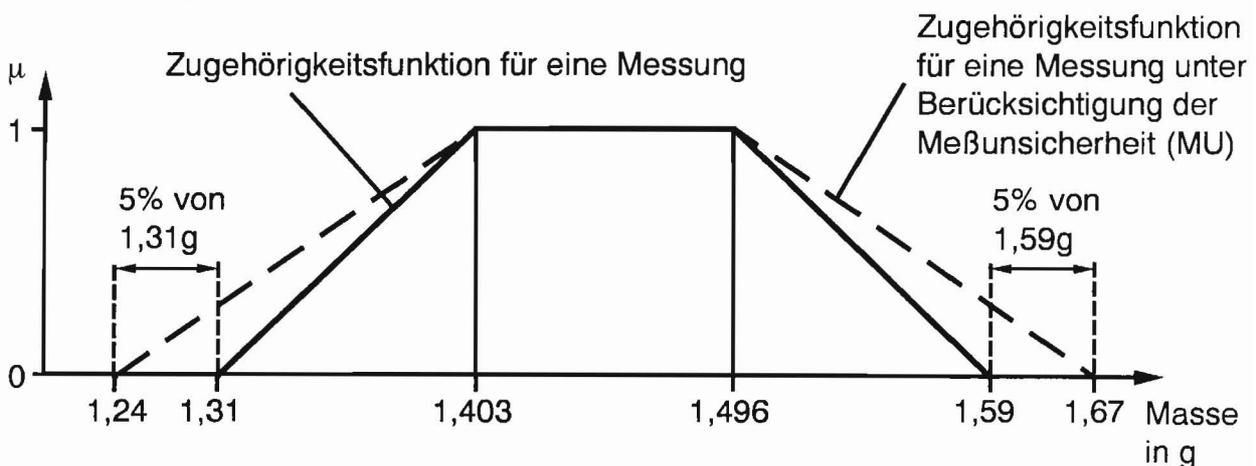


Bild 4.3: Beispiel für eine Fuzzy-Set-Modellierung bei wenigen Meßwerten

Die Zugehörigkeitsfunktion in Bild 4.3 beinhaltet folgende verbale Information: Der Erwartungswert wird eher im Intervall [1,403; 1,496] liegen als in den Intervallen [1,31; 1,403[und]1,496; 1,59]. Ist neben den wenigen Meßwerten auch die Meßunsicherheit des Meßgerätes bekannt, so kann diese in Form einer Verbreiterung der Intervallgrenzen einfließen [TRAEGER 1993]. Beträgt die Meßunsicherheit beispielsweise plus/minus fünf Prozent, so wird dies durch ein breiteres Fuzzy-Set modelliert (Bild 4.3).

Algorithmus zur Darstellung und Verarbeitung von Unsicherheitsangaben als Fuzzy-Sets aufgrund weniger Meßwerte

- 1 Ermittlung des niedrigsten (= Min) und höchsten Meßwertes (= Max)
- 2 „Range“ = Max - Min
- 3 Teilen von „Range“ in drei gleichbreite Intervalle Δ : $\Delta = \text{Range}/3$
- 4 Bilden von 3 Klassen: [Min; Min+ Δ] = Klasse 1

$[\text{Min}+\Delta; \text{Min}+2\Delta[$ = Klasse 2

$[\text{Min}+2\Delta; \text{Max}]$ = Klasse 3I

5 Ermitteln, wie viele Meßwerte in einer Klasse liegen

6 Fuzzy-Set-Modellierung aus der Häufigkeit der Klassen und Berücksichtigung der Meßunsicherheit (MU)

In Tabelle 4.2 sind Fuzzy-Set-Modellierungen bei fünf Meßwerten zusammengestellt. Unter dem Typ ist dabei die Anzahl an Meßwerten je Klasse (Anzahl Klasse 1 - Anzahl Klasse 2 - Anzahl Klasse 3) zu verstehen. Die verwendeten Bezeichnungen sind dem obigen Algorithmus entnommen.

Typ	Skizze	
II-0-III III-0-II II-I-II		
I-II-II II-II-I		
I-III-I		
I-I-III III-I-I		
I-0-III III-0-I		

Tabelle 4.2: Fuzzy-Set-Modellierungen bei fünf Meßwerten

4.1.3 Weitere Schätzverfahren

Vielfach liegen Informationen über Energie- und Massenströme verbal formuliert vor. In diesen Fällen wird folgender Algorithmus angewendet:

- 1 Angabe des Intervalls $[o_L/o_R]$ für eine optimistische Schätzung. LR-Darstellung: $o_L = m_L$ als linke und $o_R = m_R$ als rechte Grenze der Fuzzy-Set Toleranzbreite.

2 Angabe des Intervalls $[p_L/p_R]$ für eine pessimistische Schätzung. LR-Darstellung: $\alpha = m_L - p_L$ als linke und $\beta = p_R - m_R$ als rechte Schwankungsbreite.

Bei der Modellierung von Unsicherheitsangaben im Feldeinsatz treten auch Mischformen aus gemessenen und verbalen Eingangsinformationen auf. Beispielsweise kann eine grobe Schätzung von m_L und m_R aus der Messung an einem Prototyp ermittelt werden. Die Aufspreizungen α und β geben z.B. die Unsicherheit bezüglich der Energie- und Massenströme beim Übergang von der Prototypenfertigung zur Serienfertigung an. In Datenbanken bezüglich Energie- und Massenströme werden häufig Intervalle angegeben. Solche Angaben lassen sich ebenfalls mit Fuzzy-Sets darstellen (Bild 4.4)

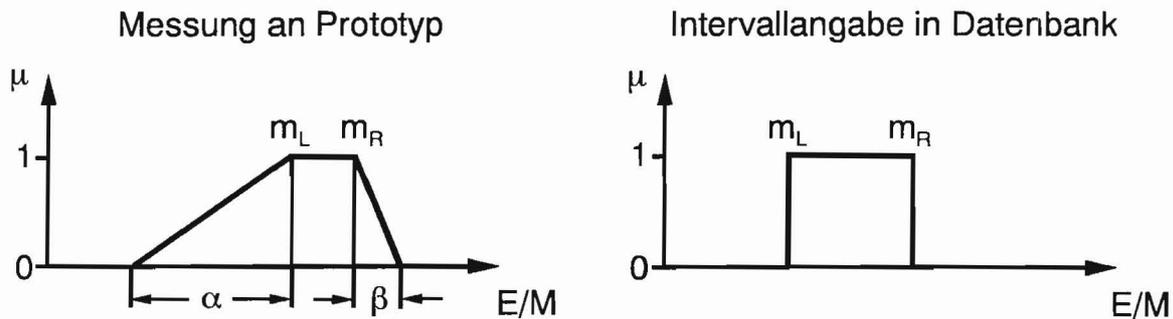


Bild 4.4: Beispiele für Fuzzy-Set-Darstellungen von Energie- und Massenströmen auf Basis von Schätzungen und Messungen

4.2 Der Wellenlötprozeß als Beispielanwendung

Das Wellenlöten umfaßt nach [HERRMANN 1990] folgende Ablaufschritte: Die zu lötenden Leiterplatten werden in Lötrahmen gespannt und mittels eines Transportbandes durch die Wellenlötanlage gefahren. Beim Sprühfluxen werden Flußmitteltröpfchen gegen die Leiterplattenunterseite geschleudert. Der Flußmittelauftrag hat in erster Linie zum Ziel, Absorptionsschichten zu lösen und Oxide, Sulfide und andere Reaktionsprodukte zu beseitigen, um eine hochwertige intermetallische Verbindung beim nachfolgenden Löten zu gewährleisten. Flußmittel bestehen in aller Regel aus Lösungsmittel- und Festkörperanteil. Der Festkörperanteil setzt sich zusammen aus dem Träger wie z.B. Kolophonium, Aktivatoren wie z.B. Aminhydrochloride und Additiven wie z.B. Antiabsetzmittel. Beim anschließenden Wellenlöten werden die zu lötenden Teile vollständig in flüssiges Lot mit einer Temperatur von ca. 250°C getaucht. Bei einer Doppelwellen-Lötanlage hat die erste, turbulente Welle eine höhere Strömungsenergie als die nachfolgende Hauptwelle. Hierdurch kann eine Benetzung mit Lot auch in den Bereichen erzielt werden, die beim Löten mit einer Einfachwelle nicht erreicht werden.

Energie wird bei einer Wellenlötlinie vor allem für Heizelemente z.B. beim Aufheizen des Lotbades, aber auch für Motoren z.B. für den Antrieb des Transportbandes und für elektronische Komponenten wie z.B. Sensoren benötigt. An Massenströmen fließen beim Wellenlöten in erster Linie Lot, Lotkrätze, Flußmittel und Lotdämpfe. Entstehende Dämpfe werden meist über eine Abluftabsaugung abgeführt (Bild 4.5).

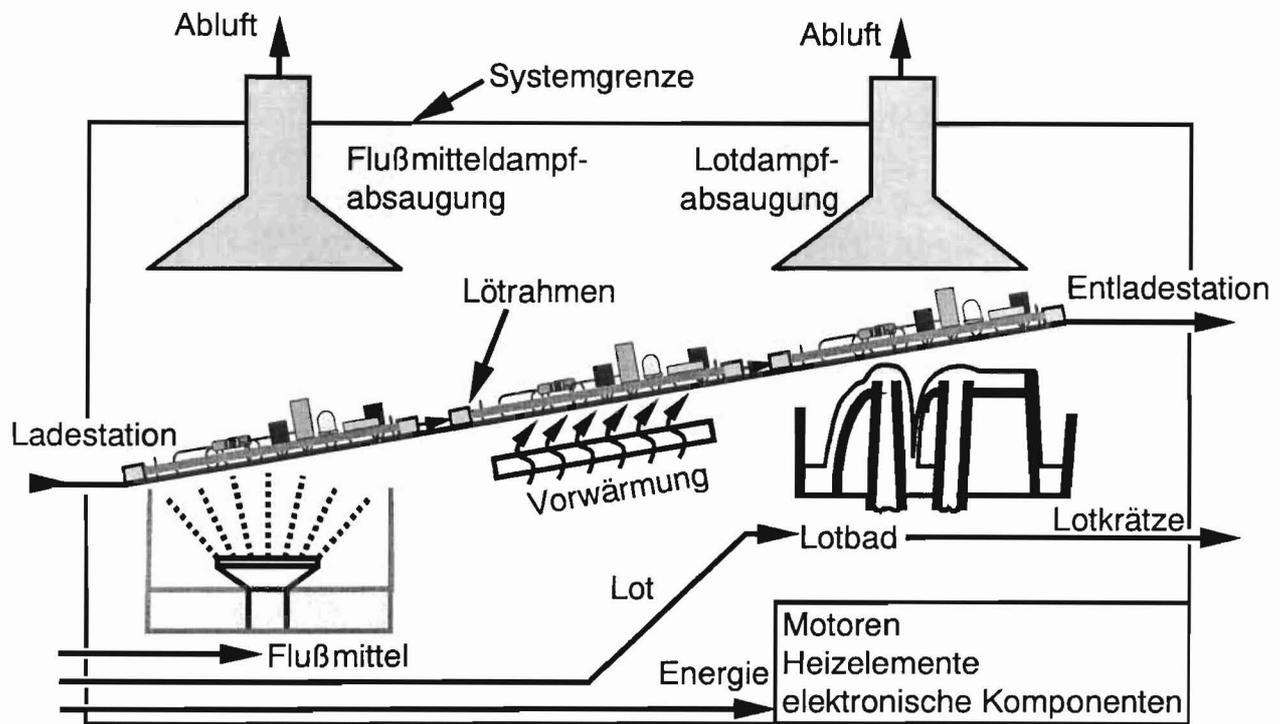


Bild 4.5: Energie- und Massenströme beim Wellenlöten

Die in Tabelle 4.3 zusammengefaßten Energie- und Massenströme einer Wellenlötanlage entstammen den betriebswirtschaftlichen Daten eines Herstellers elektronischer Produkte. Sie werden in der letzten Spalte in Tabelle 4.3 auf die Leiterplattenfläche bezogen.

Energie- und Massenströme	Gesamtverbrauch pro Halbjahr	Verbrauch je m ² Leiterplatte
Leiterplattenfläche	17.700 m ²	1
Verbräuche		
Lötzinn	10.500 kg	0,59 kg/m ²
Flußmittel	3.600 l	0,20 l/m ²
Abfälle		
Lotkrätze	3.400 kg	0,19 kg/m ²
Energieverbrauch		
Gesamtenergie	200.000 kWh	11,30 kWh/m ²

Tabelle 4.3: Beispielhafte Energie- und Massenströme beim Wellenlöten elektronischer Baugruppe

Für Flußmittel und Lotkrätze ist die Bezugsgröße „Fläche der elektronischen Baugruppe“ wegen der anzunehmenden Proportionalität in erster Näherung geeignet. Der Energieverbrauch für eine elektronische Baugruppe ist in einem ersten Ansatz abhängig von der Laufzeit der Anlage. Die Laufzeit steht in einem funktionellen Zusammenhang mit der Verweildauer einer Baugruppe in der Lötanlage. Diese ist wie-

derum abhängig von der Fläche der Baugruppe. Somit ist für den Energieverbrauch die Bezugsgröße „Fläche der elektronischen Baugruppe“ gerechtfertigt.

Zum Abschätzen des Lotverbrauchs ist die Bezugsgröße „Fläche der elektronischen Baugruppe“ nur bedingt geeignet. Wählte man diese Bezugsgröße, dann würde z.B. eine gänzlich ohne Bohrungen versehene Platine mit 100 cm² Fläche die gleiche Menge an Lot verbrauchen wie eine gleichflächige Platine mit mehreren hundert bestückten Bohrungen. Bezüglich der Verbindungstechnik ist die Bezugsgröße „Fläche der elektronischen Baugruppe“ demnach nicht geeignet. Hingegen ist sie geeignet als Bezugsgröße für Lotabscheidungen auf freiliegenden Leiterbahnzügen. Für die Vorhersage des Lotverbrauchs einer elektronischen Baugruppen ist deshalb ein Zusammenhang mit den bestimmenden Größen „Geometrische Form der Anschlüsse“ sowie „Verkupferte freiliegende Fläche“ herzustellen.

4.3 Hilfsmittel zur Prognose der Sachbilanz beim Wellenlöten

Zum Abschätzen von Energie- und Massenströmen beim Wellenlöten wird unterschieden in flächenabhängige Ströme wie z.B. Flußmittel und Energieverbrauch sowie dem teilweise flächenabhängigen und teilweise flächenunabhängigen Lotverbrauch. Für flächenabhängige Ströme wird jeweils ein Flächenäquivalenzfaktor erarbeitet, der auf betriebswirtschaftlich ermittelten Daten basiert. Für den Lotverbrauch werden funktionelle Zusammenhänge mit den bestimmenden Größen hergeleitet. Sowohl mit Hilfe der Flächenäquivalenzfaktoren als auch der funktionellen Zusammenhänge sollen Energie- und Massenströme beliebig bestückter elektronischer Baugruppen prognostiziert werden.

4.3.1 Abschätzung flächenabhängiger Energie- und Massenströme

Aus betriebswirtschaftlichen Vergleichsdaten wird ein Faktor ermittelt, mit dem die jeweilige Fläche einer elektronischen Baugruppe zur Bestimmung der Energie- und Massenströme zu multiplizieren ist.

Der Flächenäquivalenzfaktor **Energie- oder Massenstrom pro Quadratmeter Leiterplatte** E/M_{LP} wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$E/M_{LP} = \frac{E/M}{A_{LP}} \quad (4.8)$$

Legt man die betriebswirtschaftlichen Daten aus Tabelle 4.3 für die Halbjahresproduktion zugrunde, so ergibt sich für den Energieverbrauch ein Flächenäquivalenzfaktor von 11,3 kWh/m² und für die Lotkrätzenmenge einer von 0,192 kg/m². Der Äquivalenzfaktor für den Flußmittelverbrauch wird auf Basis des in Tabelle 4.3 angegebenen Wertes sowie der Flußmitteldichte mit 0,0345 kg/m² bestimmt.

4.3.2 Abschätzung weiterer Energie- und Massenströme

Die Menge des benötigten Lots kann über Volumenmodelle der Lötstellen (bestückte und nicht bestückte Bohrungen und Pads) und der Strukturierung (Leiterbahnen) bestimmt werden. Zwischen lötstellenbezogenem und flächenbezogenem Lotverbrauch wird unterschieden.

Bestimmen des lötstellenbezogenen Lotverbrauchs

Zur Prognose des Lotverbrauchs an den Lötstellen werden für ausgewählte Gruppen von Bauelementanschlüssen (runde THD-Beinchen, rechteckige THD-Beinchen, 2-polige SMD und SMD mit Gullwing-Anschlüssen) geeignete Volumenmodelle der Lötstellen entwickelt. Hierbei gehen sowohl theoretische Überlegungen über die Geometrie der Lötstellen als auch praktische Untersuchungen von Musterlötstellen in die Modellerstellung ein. Beispielhaft wird die Formel für das Lotvolumen von runden durchgesteckten Anschlussbeinchen an durchkontaktierten Leiterplatten (DKL) hergeleitet. Die Ausprägung der Lötstelle wird zur Berechnung des Volumens idealisiert (Bild 4.6).

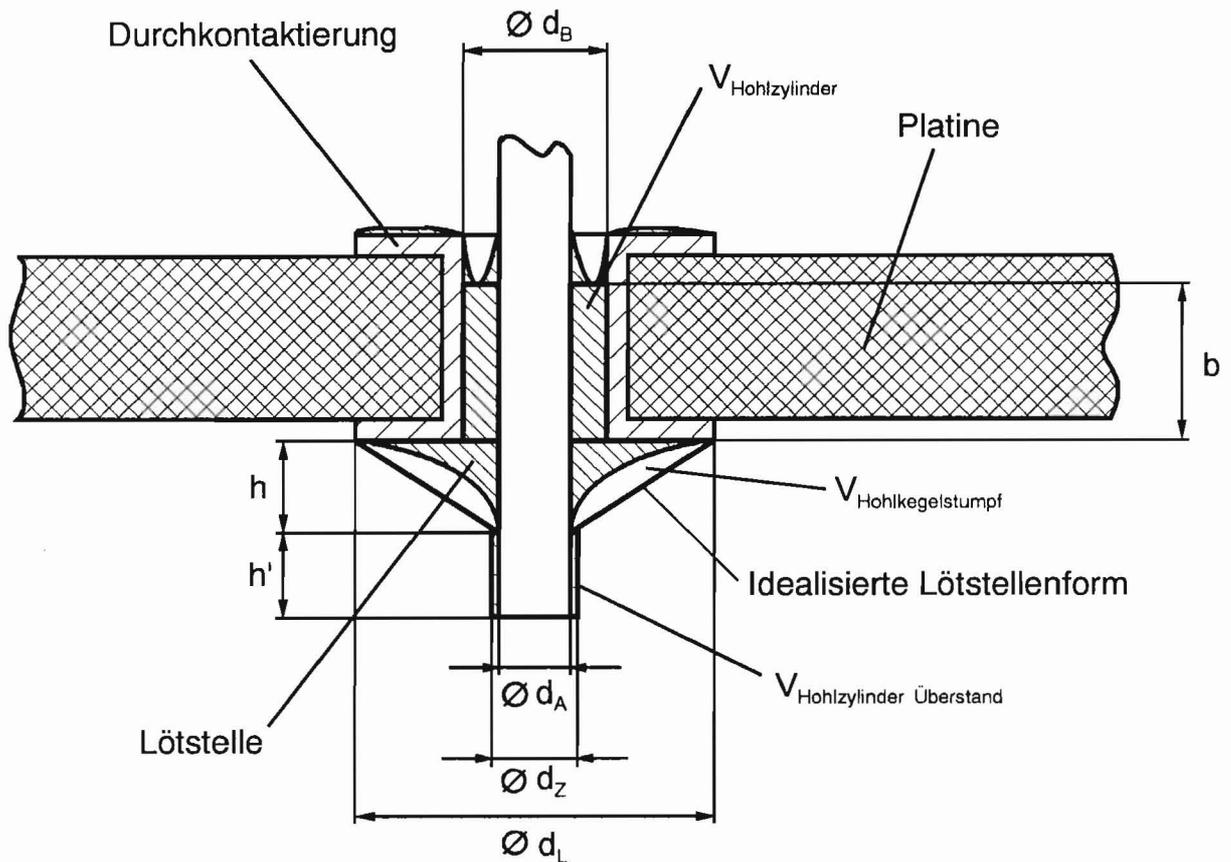


Bild 4.6: Geometrische Idealisierung einer Lötstelle für DKL

Das **Lotvolumen für DKL** errechnet sich nach folgender Beziehung:

$$V_{\text{Lot DKL}} = V_{\text{Hohlzylinder}} + V_{\text{Hohlkegelstumpf}} + V_{\text{Hohlzylinder Überstand}} \quad (4.9)$$

Nach Einsetzen der für diese geometrischen Körper geltenden Formeln zur Volumenberechnung [HEINZLER 1992] ergibt sich:

$$V_{\text{Lot-DKL}} = \frac{\pi \cdot b}{4} \cdot (d_B^2 - d_A^2) + \frac{\pi \cdot h}{12} \cdot (d_L^2 + d_L \cdot d_A - 2d_A^2) + \frac{\pi \cdot h'}{4} \cdot (d_Z^2 - d_A^2) \quad (4.10)$$

Analog werden für weitere durchkontaktierte (DKL) und nicht durchkontaktierte (NDKL) Lötstellengeometrien die in Tabelle 4.4 zusammengestellten Modelle für Lotvolumina erarbeitet.

Typ	Formel	Skizze	Nr.
Rund DKL z.B. Standard- wider- stand	$V_{\text{Lot DKL}} = \underbrace{\frac{\pi \cdot b}{4} \cdot (d_B^2 - d_A^2)}_{V_{\text{Hohlzylinder}}} +$ $+ \underbrace{\frac{\pi \cdot h}{12} \cdot (d_L^2 + d_L \cdot d_A - 2d_A^2)}_{V_{\text{Hohlkegelstumpf}}} +$ $+ \underbrace{\frac{\pi \cdot h'}{4} \cdot (d_Z^2 - d_A^2)}_{V_{\text{Hohlzylinder Überstand}}}$		(4.11)
Rund NDKL	$V_{\text{Lot NDKL}} = \frac{\pi \cdot h}{12} \cdot (d_L^2 + d_L \cdot d_A - d_A^2) +$ $+ \frac{\pi \cdot h'}{4} \cdot (d_Z^2 - d_A^2)$	Bezeichnungen wie DKL rund	(4.12)
Recht- eckig DKL z.B. Hoch- leistungs- transistor	$V_{\text{Lot DKL R}} = \underbrace{\frac{\pi \cdot h}{12} \cdot (d_L^2 + d_{\text{diag}}^2 + d_L \cdot d_{\text{diag}})}_{V_{\text{Kegelstumpf}}} +$ $+ \underbrace{\frac{\pi \cdot d_B^2 \cdot b + h' \cdot l_Z \cdot b_Z}{4}}_{V_{\text{Zylinder}}} -$ $- \underbrace{l_A \cdot b_A \cdot (h + h' + b)}_{V_{\text{Aussparung}}}$		(4.13)
Recht- eckig NDKL	$V_{\text{Lot NDKL R}} = \frac{\pi \cdot h}{12} \cdot (d_L^2 + d_{\text{diag}}^2 + d_L \cdot d_{\text{diag}}) -$ $- l_A \cdot b_A \cdot h + h' (l_Z \cdot b_Z - l_A \cdot b_A)$	Bezeichnungen wie DKL rechteckig	(4.14)
SMD zweipolig z.B. 1206	$V_{\text{Chip}} = \frac{1}{2} \cdot b_C \cdot h_{\text{CGW}} \cdot w_{\text{CGW}}$		(4.15)
SMD Gullwing z.B. SO14	$V_{\text{Lot DKL R}} = w_{\text{CGW}} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot l_{\text{FGW}} \cdot h_{\text{FGW}} - \right.$ $\left. - l_{\text{LGW}} \cdot h_{\text{CGW}} + \frac{1}{2} \cdot l_{\text{NFGW}} \cdot h_{\text{NFGW}} \right)$		(4.16)

Tabelle 4.4: Zusammenstellung von Volumenmodellen für Lötstellen

Der Lotverbrauch an unbestückten Bohrungen kann aufgrund von Geometrieuntersuchungen an Musterplatinen wie z.B. in Bild 4.7 dargestellt modelliert werden.

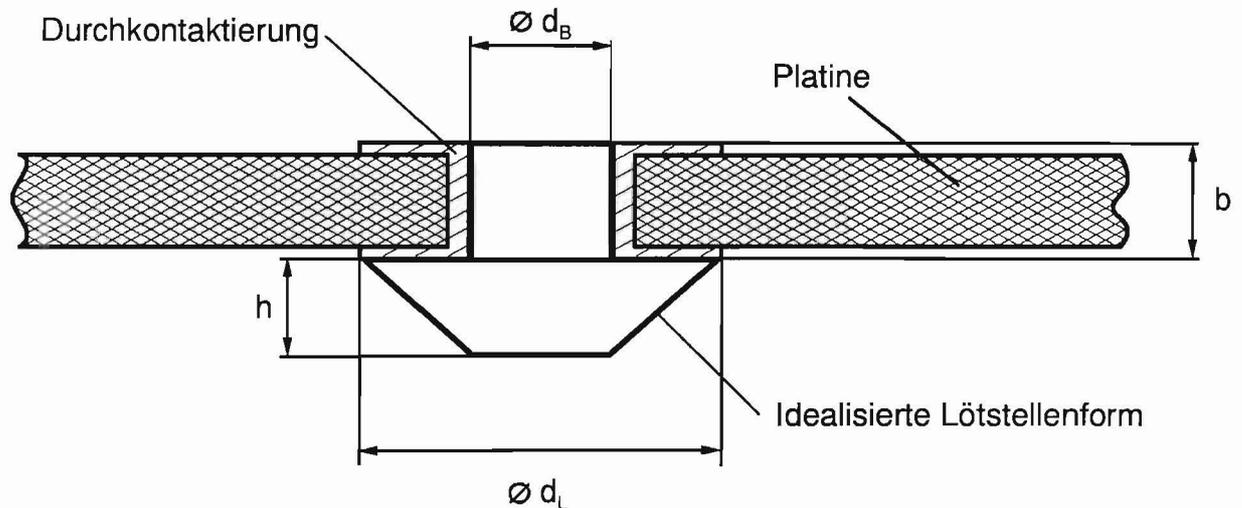


Bild 4.7: Lotverbrauch an unbestückten durchkontaktierten Bohrungen

Lotverbrauch $V_{\text{Bohrung DKL}}$ bei einer unbestückten durchkontaktierten Bohrung:

$$V_{\text{Bohrung DKL}} = \frac{\pi}{12} \cdot h \cdot (d_L^2 + d_B^2 + d_L \cdot d_B) + \frac{d_B^2 \cdot \pi}{4} \cdot b \quad (4.17)$$

Lotverbrauch $V_{\text{Bohrung NDKL}}$ bei einer unbestückten nicht durchkontaktierten Bohrung:

$$V_{\text{Bohrung NDKL}} = \frac{\pi}{12} \cdot h \cdot (d_L^2 + d_B^2 + d_L \cdot d_B) \quad (4.18)$$

Bestimmen des flächenbezogenen Lotverbrauchs

Der flächenbezogene Lotverbrauch setzt sich aus dem Verbrauch für nicht besetzte Löt pads von SMD-Bauteilen und dem Verbrauch für Kupferflächen von freiliegenden Leiterbahnen zusammen. Für den Lotverbrauch an Löt pads von SMD-Chips und an Löt pads von SMD-Gullwing-Anschlüssen werden in erster Näherung die in Bild 4.8 dargestellten geometrischen Modelle angenommen.

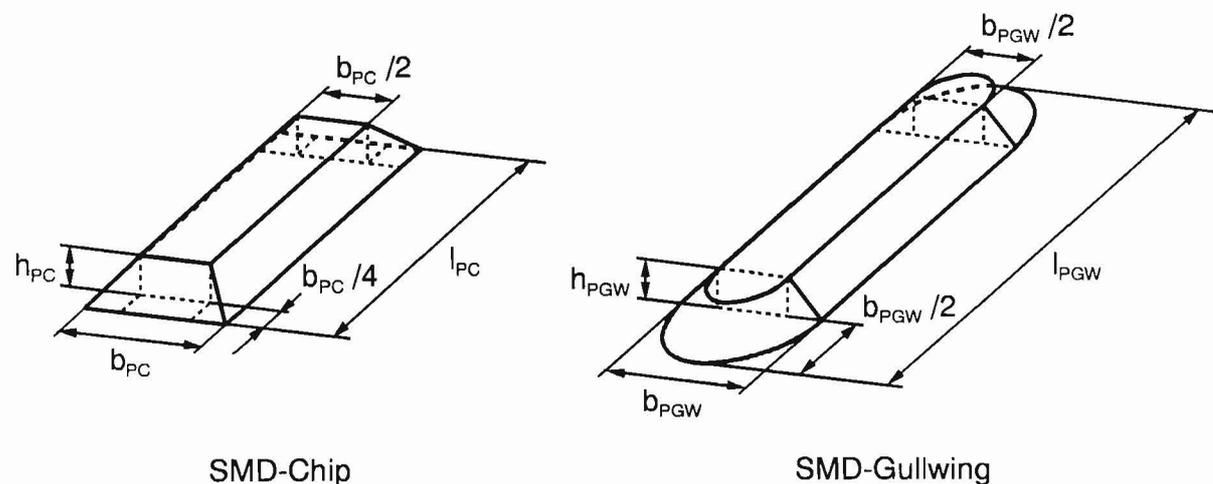


Bild 4.8: Geometrische Lotvolumen-Idealisierung an unbestückten SMD-Löt pads

Die Modelle basieren auf Untersuchungen an Musterplatinen.

Lotverbrauch für Löt pad SMD-Chip:

$$V_{Pad\ Chip} = \frac{3}{4} \cdot b_{PC} \cdot l_{PC} \cdot h_{PC} - \frac{1}{6} b_{PC}^2 \cdot h_{PC} \quad (4.19)$$

Lotverbrauch für Lötpad SMD-Gullwing:

$$V_{Pad\ Gullwing} = \frac{3}{4} \cdot b_{PGW} \cdot h_{PGW} \cdot (l_{PGW} - b_{PGW}) + \frac{7}{12} b_{PGW}^2 \cdot h_{PGW} \cdot \pi \quad (4.20)$$

Zur Bestimmung des Lotverbrauchs auf Leiterbahnzügen wird davon ausgegangen, daß freiliegende Leiterbahnen gleichmäßig mit einer 10 µm dicken Lotschicht überzogen werden (Gleichung (4.21), Bild 4.9).

$$V_{Kupferfläche} = 10 \mu m \cdot F_{ICU} \quad (4.21)$$

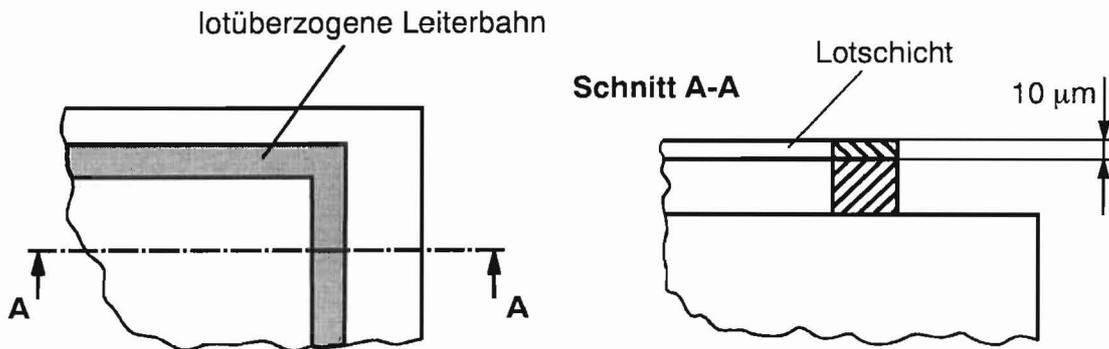


Bild 4.9: Lötchichtdicke auf Leiterbahnen

4.4 Vergleich von gemessenen und berechneten Lotmassenströmen

Für die Bestätigung oder Verwerfung der vermuteten funktionellen Zusammenhänge werden Versuchsplatinen gelötet und der Lotverbrauch gemessen. Unsicherheiten von berechneten Werten auf Basis der funktionellen Zusammenhänge werden ebenso wie Meßunsicherheiten als Fuzzy-Sets modelliert und anschließend gemessene und berechnete Werte verglichen.

4.4.1 Versuche zur Verifizierung der Volumenmodelle für Lötstellen

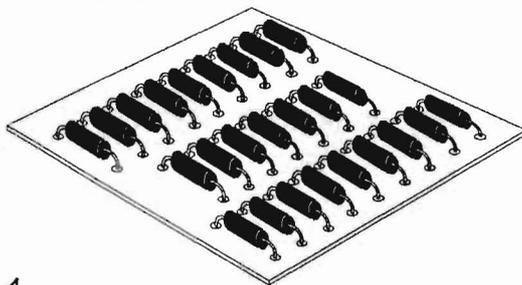
Für die Versuche an einer Wellenlötanlage werden die in Tabelle 4.5 zusammengestellten Bauelement- bzw. Lötpad-Abmessungen verwendet. Die Bauelemente (BE) werden auf jeweils fünf gewogenen Platinen mit identischen Abmessungen bestückt und nochmals gewogen, wobei die THDs sowohl auf durchkontaktierten Leiterplatten (DKL) als auch auf nicht durchkontaktierten Leiterplatten (NDKL) bestückt werden. Beispiele für jeweils eine mit THD-Leistungsdioden und eine mit SMD-SO14-Bauelementen bestückte Platine sind in Bild 4.10 dargestellt.

THD rund	Platinen- bezeichnung für DKL	Platinen- bezeichnung für NDKL	Beinchen- durch- messer d_A in mm	Bohrungs- durch- messer d_B in mm	Lötaugen- durch- messer d_L in mm	Anzahl BE je Platine
Standard ¼Watt Widerstand	P_1	P_N1	0,6	0,7	1,52	84
Elko Radial 	P_2	P_N2	0,6	0,8	1,6	26

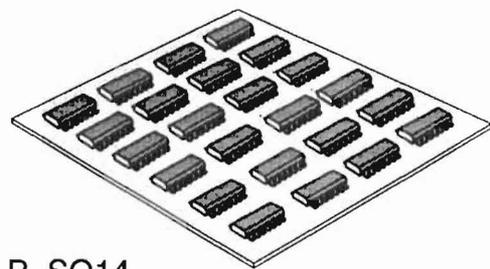
Leistungswiderstand wirewound 	P_3	P_N3	0,8	1,0	2,54	16	
Leistungsdiode 	P_4	P_N4	1,2	1,4	2,54	25	
THD rechteckig	Platinenbezeichnung für DKL	Platinenbezeichnung für NDKL	Länge l_A in mm	Breite b_A in mm	Bohrungsdurchmesser d_B in mm	Lötaugendurchmesser d_L in mm	Anzahl BE je Platine
DIL 40 Sockel 	P_5	P_N5	0,60	0,15	1,0	2,04	2
SMD zweipolig	Platinenbezeichnung für DKL	Platinenbezeichnung für NDKL	Höhe H der BE in mm	Breite W in mm	Länge des Lötpads l_C in mm	Breite des Lötpads b_C in mm	Anzahl BE je Platine
805 	-	P_805	2,0	1,25	1,15	1,5	351
1206 	-	P_1206	3,2	1,6	1,65	1,7	210
SMD Gullwing	Platinenbezeichnung für DKL	Platinenbezeichnung für NDKL	Höhe H der BE in mm	Breite W in mm	Länge des Lötpads l_{GW} in mm	Breite des Lötpads b_{GW} in mm	Anzahl BE je Platine
SO14 	-	P_SO14	0,25	0,35	2,5	0,7	24

Tabelle 4.5: Bauelemente (BE) auf den Versuchsplatinen und wichtige Abmessungen

Jeweils drei Platinen werden zusammen auf einen Lötrahmen gespannt und auf einer produktionsüblichen Wellenlötanlage gelötet. Durch Wiegen und Subtrahieren der Masse der bestückten nicht gelöteten Leiterplatte von der gewogenen Masse erhält man die Masse des Lotverbrauchs auf der Leiterplatte. Zur Verifizierung des Lotverbrauchs für nicht besetzte THD-Bohrungen und SMD-Pads werden pro Bauelementtyp jeweils fünf nicht bestückte Platinen durch die Wellenlötanlage gefahren.



P_4



P_SO14

Bild 4.10: Beispiele für bestückte Versuchsplatinen

4.4.2 Gemessene Lotmassenströme

Mit den Meßergebnissen werden nach den Vorgaben für Fuzzy-Set-Modellierungen bei fünf Meßwerten unscharfe Massen ermittelt. Die Meßunsicherheit (MU) der verwendeten Waage beträgt fünf Prozent. Das Volumen für den Lotverbrauch wird

durch Division mit der Dichte des Lotes $\rho = 8,98 \text{ mg/mm}^3$ errechnet. In Tabelle 4.6 sind die Meßergebnisse für die bestückten Versuchsplatinen in LR-Darstellung zusammengestellt.

Platine	Typ	m_L	m_R	α	β
P_1	I-I-III	66,82	71,27	11,80	3,56
P_2	I-III-I	32,89	35,15	3,80	4,14
P_3	II-II-I	46,77	53,45	2,34	6,18
P_4	III-0-II	79,06	89,09	3,95	4,45
P_5	III-I-I	143,65	145,51	7,18	11,17
P_N1	I-III-I	38,23	40,83	4,38	4,77
P_N2	I-0-III	15,59	15,59	1,84	0,78
P_N3	II-0-III	36,75	37,86	1,84	1,89
P_N4	I-II-II	43,43	47,88	4,29	2,39
P_N5	I-0-III	67,93	67,93	8,69	3,40
P_805	III-0-I	168,15	168,15	8,41	43,49
P_1206	II-0-III	150,89	164,25	7,54	8,21
P_SO14	I-I-III	85,75	89,09	10,63	4,45

Tabelle 4.6: Meßergebnisse „Lötstellenvolumina in mm^3 “ der bestückten Versuchsplatinen als Fuzzy-Set-Modellierung

4.4.3 Berechnete Lotmassenströme

Mit den in Tabelle 4.4 zusammengestellten Volumenmodellen für Lötstellen kann der Lotverbrauch beim Wellenlöten elektronischer Baugruppen in Abhängigkeit von den bestückten Bauelementen prognostiziert werden. Die Unsicherheit der Prognosewerte ist abhängig von der Unsicherheit der in Tabelle 4.4 verwendeten Formelparameter. Beispielsweise ist die Unsicherheit des Lotverbrauchs bei THD-Bauelementen abhängig von Schwankungen der Lotaugen-, Bohrungs- und Beinchendurchmesser. Die Schwankungsbreiten für die Formelparameter in Tabelle 4.4 werden anhand der Standardabweichung resultierend aus Wiederholungsmessungen ermittelt und als Fuzzy-Sets modelliert. In Anhang A sind die so erarbeiteten Fuzzy-Sets beispielhaft für die Versuchsplatinen P_2 (Tabelle A.1) und P_805 (Tabelle A.2) angegeben.

Die Formeln zur Ermittlung des Lotverbrauchs (Gleichungen 4.9 bis 4.20) werden mit Hilfe der Vorgaben zu Operationen mit unscharfen Zahlen zu unscharfen Volumenformeln erweitert. Die unscharfe Erweiterung des Lotvolumenmodells von SMD-Chips (Gleichung (4.15)) wird beispielhaft für die linke Kerngrenze m_L und die linke Schwankungsbreite α in den Gleichungen (4.22a) und (4.22b) wiedergegeben. Die im Vergleich zu Gleichung (4.15) erweiterten Indizes weisen jeweils auf die entsprechende Indizierung von Fuzzy-Intervallen hin. Beispielsweise bedeutet b_{cL} „Linke Kerngrenze“ und $b_{c\alpha}$ „Linke Schwankungsbreite“ des Formelparameters b_C „Breite des Lotprismas bei SMD-Anschlüssen“. Die unscharfe Erweiterung bei runden durchkontaktierten Lötstellen ist in Anhang B, Tabelle B.1 zusammengestellt.

$$m_L = \frac{1}{2} \cdot b_{CL} \cdot h_{CGWL} \cdot w_{CGWL} \quad (4.22a)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot (b_{CL} \cdot h_{CGWL} \cdot w_{CGW\alpha} + w_{CGWL} (b_{CL} \cdot h_{CGW\alpha} + h_{CGWL} \cdot b_{C\alpha})) \quad (4.22b)$$

Platinen	m_L	m_R	α	β
P_1	60,93	113,65	90,65	104,06
P_2	34,32	46,34	20,571	23,98
P_3	49,56	70,99	36,24	42,45
P_4	67,97	119,41	87,29	105,25
P_5	127,52	157,84	54,00	54,48
P_N1	37,70	75,43	64,14	75,72
P_N2	18,55	25,10	11,34	13,01
P_N3	38,58	53,48	36,37	28,45
P_N4	44,12	79,73	63,84	69,21
P_N5	48,24	62,32	23,12	26,56
P_805	176,02	195,58	33,76	40,77
P_1206	166,32	183,69	30,47	36,15
P_SO14	109,80	152,60	62,24	68,84

Tabelle 4.7: Berechnete unscharfe Lötstellenvolumina in mm^3

Setzt man die als Fuzzy-Sets dargestellten Parameter in die unscharfen Formeln zur Volumenberechnung ein und multipliziert diese mit der Anzahl der Bauelemente und der Anzahl der Anschlüsse je Bauelement, dann erhält man die in Tabelle 4.7 aufgeführten berechneten unscharfen Lötstellenvolumen für die bestückten Versuchsplatinen. Die Lotvolumina von nicht bestückten Platinen errechnen sich analog.

4.4.4 Spezifische Ausgleichsrechnung

Bei einem Vergleich der Werte in Tabelle 4.6 und 4.7 ist festzustellen, daß die Einflußbreite der berechneten Fuzzy-Sets sehr viel größer ist als die der gewogenen. Der Grund hierfür liegt darin, daß die Unschärfen aller Formelparameter der Lötstellen-Volumenmodelle mit voller Einflußbreite in die unscharfe Erweiterung eingehen. Beispielsweise gehen die Einflußbreiten der Formelparameter b_C , h_{CGW} und w_{CGW} (Gleichung (4.15)) zur Bestimmung des Lotverbrauchs eines zweipoligen SMD-Anschlusses multiplikativ in die unscharfe Erweiterung (Gleichungen (4.22a) und (4.22b)) ein. Im Gegensatz zur Wahrscheinlichkeitsrechnung können sich Unschärfen in der Fuzzy-Set-Theorie nicht relativieren. Deshalb wird vorgeschlagen, eine Ausgleichsfunktion zu ermitteln, mit der die Schwerpunkte der Fuzzy-Sets von gemessenen und berechneten Lotvolumina sowie Toleranz- und Einflußbreite der Fuzzy-Sets in eine weitgehende Übereinstimmung gebracht werden. Mit Hilfe der Ausgleichsfunktion kann auf Basis weniger Messungen das Lotvolumen einer Vielzahl von elektronischen Baugruppen bei relativ hoher Übereinstimmung mit praktischen Messungen prognostiziert werden. Die zu erarbeitende Funktion für das Anwen-

dungsbeispiel wird **Spezifische Ausgleichsfunktion** genannt, da sie von den spezifischen Randbedingungen der Wellenlötanlage abhängt.

Die Teilschritte für das Bestimmen des Lotvolumens mit der Ausgleichsrechnung sind in den Gleichungen (4.23) bis (4.29) wiedergegeben. Die hiermit ermittelten Werte sind in Anhang B, Tabelle B.3 zusammengestellt.

$$k_i = \frac{m_{2i, gemessen} - m_{1i, gemessen}}{m_{2i, berechnet} - m_{1i, berechnet}} \quad (4.23)$$

$$k = \text{Max}\{k_1, \dots, k_n\} \quad (4.24)$$

$$S_i = \frac{x_{si, berechnet} - x_{si, gemessen}}{x_{si, berechnet}} \quad (4.25)$$

$$\lambda = (1+S) \cdot k \quad (4.26)$$

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (4.27)$$

$$\tilde{V}_{\text{Ausgleichsrechnung}} = \lambda \otimes \tilde{V}_{\text{berechnet}} \oplus \tilde{C} \quad (4.28)$$

$$\tilde{C} = (x_s(1-S-\lambda), x_s(1-S-\lambda), 0, 0)_{LR} \quad (4.29)$$

Die im folgenden beschriebene Vorgehensweise für die Ausgleichsrechnung ist in Bild 4.11 anhand eines Beispiels visualisiert. Zum Angleichen der Toleranz- und Einflussbreite bei gemessenen und berechneten Werten wird der Skalierungswert k (Gleichungen (4.23) und (4.24)) berechnet. Durch Multiplikation des berechneten Lotvolumens mit dem Skalierungsfaktor λ (Gleichung (4.26)) wird die Toleranz- und Einflußbreite dem des gemessenen angepasst. In Gleichung (4.26) wird mit S ein Sicherheitsfaktor verwendet. Mit Hilfe des Sicherheitsfaktors wird gewährleistet, dass der Bereich „sicher möglich“ des mit der Ausgleichsrechnung berechneten Lotvolumens immer größer oder gleich dem des gewogenen ist.

Um den Schwerpunkt von gemessenen und berechneten Fuzzy-Sets weitestgehend zur Deckung zu bringen, wird ein Schwerpunktsfaktor ermittelt. Er errechnet sich aus der Differenz der Schwerpunkte von gemessenen und berechneten Fuzzy-Sets bezogen auf den berechneten Schwerpunkt (Gleichung (4.25)). Für den Sicherheitsfaktor bietet sich eine Kopplung an den Schwerpunktsfaktor an, da mit größer werdender Schwerpunktsdifferenz auch die Genauigkeit der berechneten Fuzzy-Set-Modellierung abnimmt und deshalb die Breite der Fuzzy-Sets erhöht werden muß.

Für die Schwerpunktverschiebung des berechneten Fuzzy-Sets wird eine unscharfe Konstante \tilde{C} ermittelt (Gleichung (4.29)). Wegen der Skalierung des Fuzzy-Sets und der daraus resultierenden Verschiebung des Schwerpunkts muß der Skalierungsfaktor λ bei der Bestimmung der Verschiebungskonstante berücksichtigt werden.

Um eine aussagekräftige Ausgleichsfunktion zu erhalten, sollten von jeder Lötstellenart wie z.B. THD mit runden Anschlüssen mehrere Varianten in Form unterschiedlicher Beinchendurchmesser untersucht werden. Ein mit Hilfe der Ausgleichsfunktion modifiziertes Lotvolumenmodell ist unter dieser Voraussetzung mit größerer Sicherheit zu verallgemeinern.

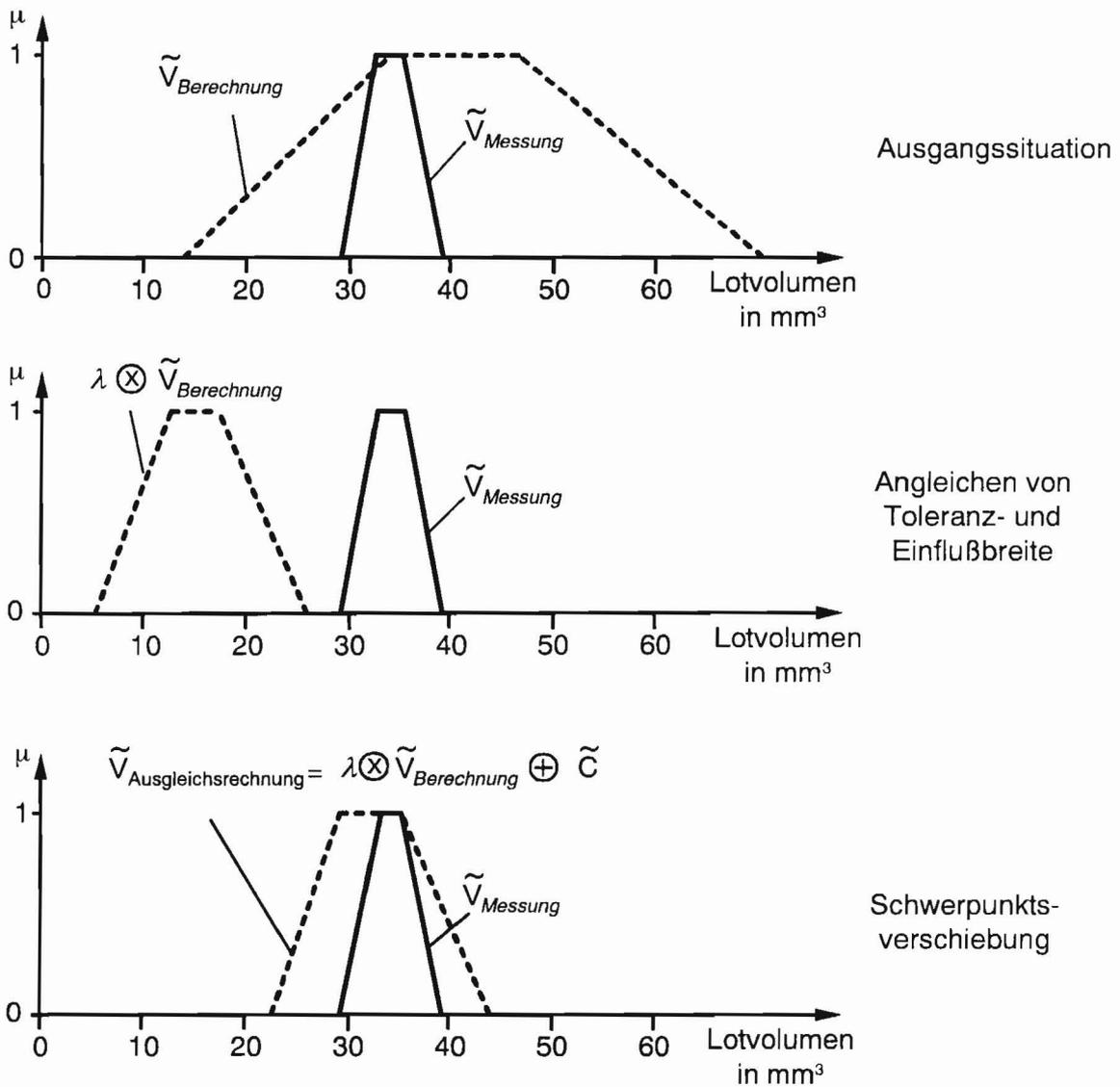


Bild 4.11: Ausgleichsrechnung für das Lotvolumen am Beispiel der Platine P_2
 Der Schwerpunktsfaktor S wird bei Messungen an mehreren Varianten durch Mittelwertbildung aus den Einzelfaktoren ermittelt. Für den Skalierungswert wird der größte bei den Varianten vorkommende Wert eingesetzt.

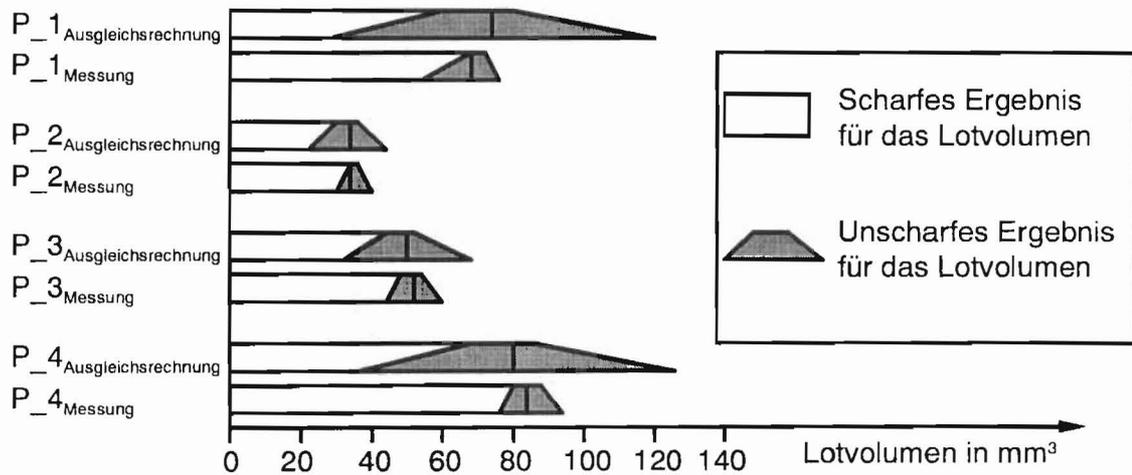


Bild 4.12: Exemplarische Gegenüberstellung gemessener und mit Ausgleichsrechnung ermittelter Lotvolumina

In Bild 4.12 ist ein beispielhafter Vergleich von gemessenen und mit Ausgleichsrechnung ermittelten Lotvolumina für die Versuchsplatinen dargestellt. In Anhang B, Tabelle B.3 findet sich die Zusammenstellung sämtlicher mit Ausgleichsrechnung ermittelten Lotvolumina. Ob die mit Hilfe der spezifischen Ausgleichsrechnung ermittelten Lotmassen hinreichend genau abgeschätzt werden, wird in Kapitel 5 im Rahmen der Auswertung eingehend erläutert.

4.5 Sachbilanzprognose für das Wellenlöten bei unsicheren Informationen

Zum Abschätzen rein flächenabhängiger Energie- und Massenströme beim Wellenlöten wird zur Modellierung der Unsicherheiten der Schätzwert für die relative Standardabweichung s_{rel} herangezogen. In einer ersten groben Näherung wird s_{rel} mit den in Tabelle 4.8 genannten Werten abgeschätzt. In Tabelle 4.8 sind weiterhin Fuzzy-Set-Modellierungen des Energie-, Flußmittel- und Lotkrätzeverbrauchs für die Wellenlötanlage im Feldversuch angegeben. Wird die Fläche der elektronischen Baugruppe mit den angegebenen Fuzzy-Sets multipliziert, so erhält man den absoluten Energie-, Flußmittel- und Lotkrätzeverbrauch mit Angabe des Unsicherheitsbereichs.

	Flächen- äquiva- lenz-faktor	s_{rel} geschätzt in %	m_L	m_R	α	β
Energie in kWh/m ²	11,3	20	10,3	12,4	2,7	4,5
Energie in kJ/m ²	40.680,0	20	36.972,0	44.748,0	9.864,0	16.272,0
Flußmittel in g/m ²	34,5	30	30,6	39,7	10,3	20,7
Lotkrätze in g/m ²	192,0	50	153,6	240,0	68,3	192,0

Tabelle 4.8: Fuzzy-Set-Äquivalenzfaktoren für flächenabhängige Energie- und Massenströme beim Wellenlöten

Zur Modellierung von Unsicherheiten des Lotverbrauchs eignet sich folgende Vorgehensweise sowohl für bestückte Platinen als auch für nicht bestückte Platinen (Bild 4.13):

- 1 Idealisieren der Lötstellengeometrie und Ermitteln von funktionellen Zusammenhängen zwischen Massenströmen und Geometriegrößen.
- 2 Ermitteln von mathematischen Gleichungen für die funktionellen Zusammenhänge, wobei Parameter als unscharfe Zahlen dargestellt werden.
- 3 Massenberechnung anhand von Beispieldaten und deren Darstellung als unscharfe Zahlen.
- 4 Massenermittlung der vorher berechneten Massen aus praktischen Versuchen, wobei Unsicherheiten der Versuchsergebnisse mit Fuzzy-Sets modelliert werden.
- 5 Vergleich der Ergebnisse aus Schritt 3 und Schritt 4.
- 6 Ermitteln einer spezifischen Ausgleichsfunktion \bar{A} , um gemessene und berechnete Ergebnisse in weitgehende Übereinstimmung zu bringen.

- 7 Verallgemeinern der mathematischen Gleichungen aus Schritt 2 durch Einführen der spezifischen Ausgleichsfunktion \tilde{A} zur Bestimmung des Lotverbrauchs elektronischer Baugruppen beliebiger Art.

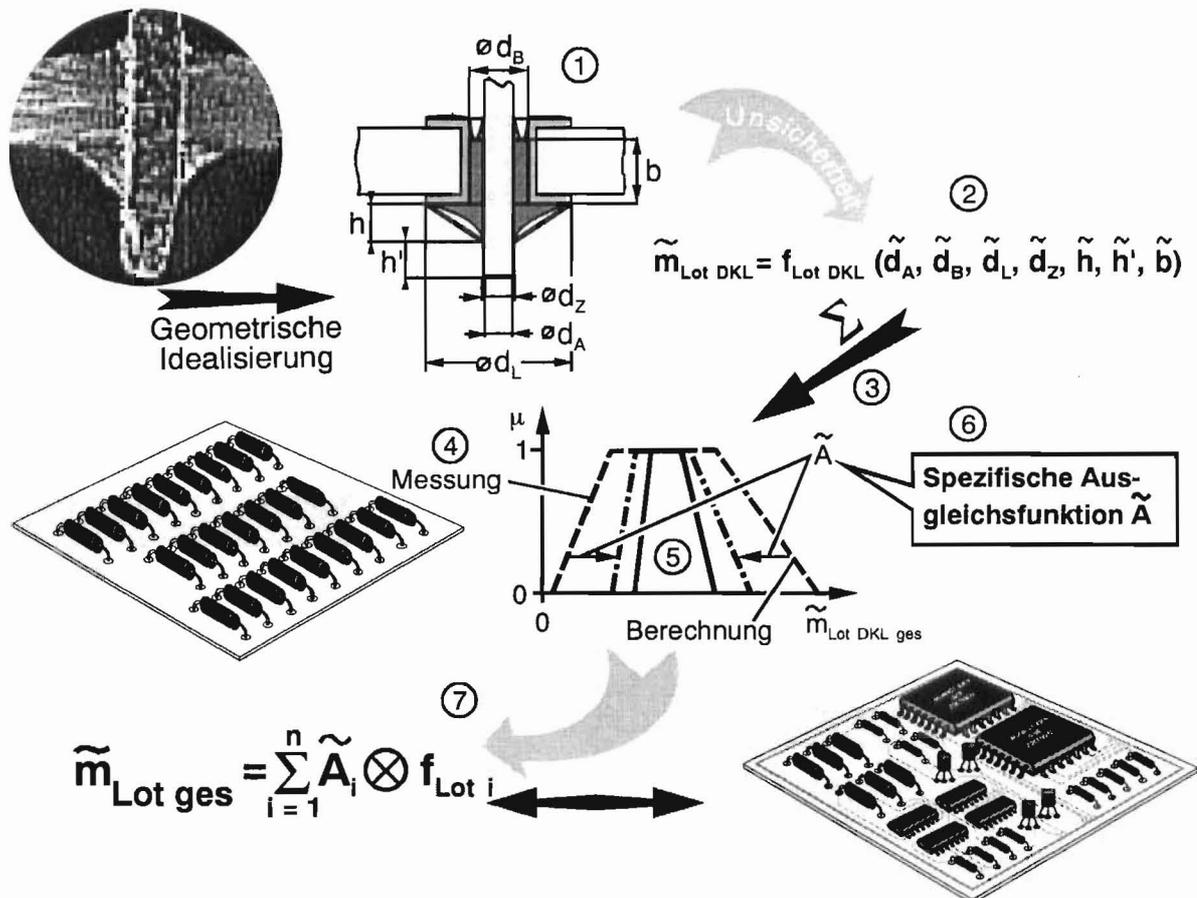


Bild 4.13: Prognose des Lotverbrauchs am Beispiel Wellenlötens elektronischer Baugruppen

Mit Hilfe der Vorgehensweise wird eine in vielen Fällen wegen der großen Zahl von Einflußparametern mathematisch aufwendige Verarbeitung von Meßdaten wie z.B. über eine Regressionsrechnung umgangen. Anhand der an wenigen Beispielen ermittelten Ausgleichsfunktion kann auf den Lotverbrauch beliebiger geometrischer Formen gleichen Typs geschlossen werden (Bild 4.13). Beispielsweise wird für durchkontaktierte THD-Bauelemente bei den praktischen Versuchen aus vier unterschiedlichen Kombinationen von Beinchendurchmesser zu Bohrungsdurchmesser und Lotaugendurchmesser eine Ausgleichsfunktion erarbeitet, mit der der Lotverbrauch für durchkontaktierte THD-Bauelemente beliebiger Durchmesserkombinationen abgeschätzt werden kann.

5 Modell zur Datenverdichtung und Auswertung

In diesem Kapitel werden Ergebnisse der Sachbilanz-Prognose aus Kapitel 4 herangezogen, um ein fuzzygestütztes Datenverdichtungs- und Auswertemodell zu erläutern. Die drei fiktiven Produkte „Elektronische Baugruppe SMD-Widerstand (kurz: SMD-Platine)“, „Elektronische Baugruppe THD-Widerstand (kurz: THD-Platine)“ und „Elektronische Baugruppe SMD- und THD-Widerstände (kurz: THD/SMD-Platine)“

(Bild 5.1) sollen hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit beim Wellenlöten verglichen werden.

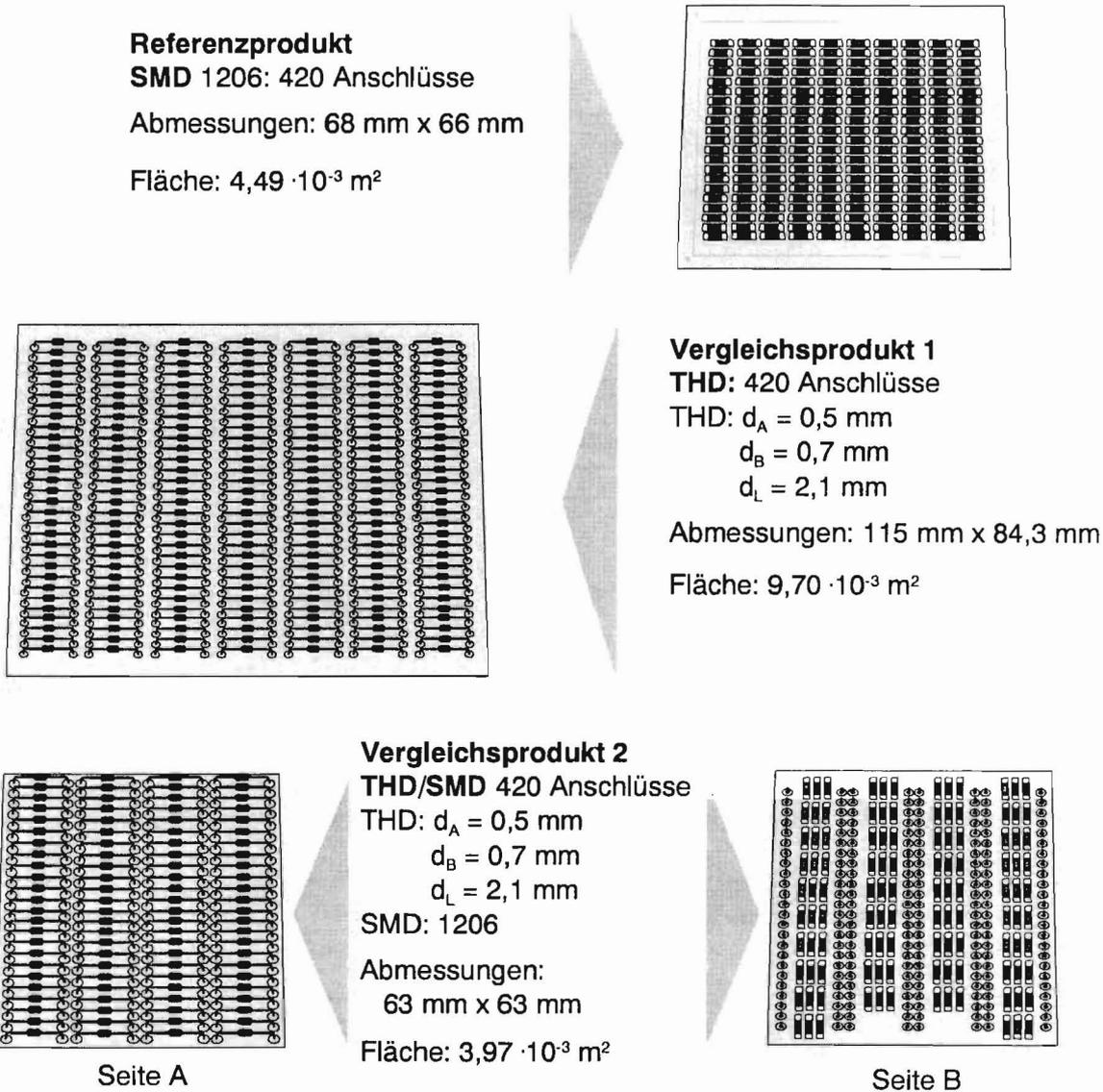


Bild 5.1: Beispielprodukte für den Vergleich hinsichtlich der Umweltverträglichkeit

Sie erfüllen die gleiche Funktion. Für die SMD-Platine liegen hinsichtlich des Lotverbrauchs Meßwerte vor. Weitere Energie- und Massenströme werden nach den in Kapitel 4.5 zusammengestellten Methoden abgeschätzt.

In Tabelle 5.1 sind die grob geschätzten Sachbilanzen der drei Produkte angegeben.

		Energie in kJ bei Fehler- schätzung +/- 20 %	Flußmittel in kg bei Fehler- schätzung +/- 30 %	Lotkrätze in kg bei Fehler- schätzung +/- 50 %	Lotmasse in kg nach Be- rechnung aus Kap. 4.4
SMD-Platine ($4,49 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$)	m_L	$1,66 \cdot 10^2$	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$6,89 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$
	m_R	$2,01 \cdot 10^2$	$1,78 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-3}$
	α	$4,43 \cdot 10^1$	$4,62 \cdot 10^{-5}$	$3,06 \cdot 10^{-4}$	$6,77 \cdot 10^{-5}$
	β	$7,30 \cdot 10^1$	$9,29 \cdot 10^{-5}$	$8,62 \cdot 10^{-4}$	$7,37 \cdot 10^{-5}$

THD-Platine ($9,70 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$)	m_L	$3,59 \cdot 10^2$	$2,91 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-3}$	$3,55 \cdot 10^{-3}$
	m_R	$4,34 \cdot 10^2$	$3,85 \cdot 10^{-4}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$	$4,45 \cdot 10^{-3}$
	α	$9,57 \cdot 10^1$	$9,98 \cdot 10^{-5}$	$6,62 \cdot 10^{-4}$	$3,55 \cdot 10^{-3}$
	β	$1,58 \cdot 10^2$	$2,01 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$3,88 \cdot 10^{-3}$
THD/SMD- Platine ($3,97 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$)	m_L	$1,44 \cdot 10^2$	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$6,10 \cdot 10^{-4}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$
	m_R	$1,80 \cdot 10^2$	$1,60 \cdot 10^{-4}$	$9,50 \cdot 10^{-4}$	$2,84 \cdot 10^{-3}$
	α	$3,60 \cdot 10^1$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$2,70 \cdot 10^{-4}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$
	β	$7,20 \cdot 10^1$	$8,00 \cdot 10^{-5}$	$7,60 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 5.1: Sachbilanz für die SMD-, THD- und THD/SMD-Platine

Die Energie- und Massenströme der Sachbilanz müssen im Rahmen der Ökobilanzschritte „Klassifizierung“ und „Charakterisierung“ z.B. hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung differenziert werden. Beispielsweise ist der Kupfer- und Bleiverbrauch beim Lötten aus der chemischen Zusammensetzung des Lotbads ermittelbar. Für den Energieverbrauch ist festzusetzen, welcher Energiemix zugrunde liegt. Daraus wird auf die aus der Energieerzeugung resultierenden Umweltbelastungen geschlossen. Unter Zuhilfenahme geeigneter Datenbankangaben der Ökobilanzierungssoftware UMBERTO werden für die Vergleichsprodukte aus Bild 5.1 die in Anhang C, Tabelle C.1, angegebenen Sachbilanzen ermittelt.

5.1 Festlegung des Formats für die Klassifizierung von Sachbilanzdaten

Eine rechnergestützte Zuordnung der Sachbilanzdaten zu den einzelnen Wirkungskategorien erfordert Eingangsdaten in einem definierten Format. Für das Modell zur Datenverdichtung und Auswertung wird von der in Bild 5.2 dargestellten Gliederung der Sachbilanzdaten ausgegangen. Anhand des Sachbilanzgliederungspunkts (SBGP) Ressourcen (Anhang C, Tabelle C.2) wird das für die spätere Rechnerumsetzung verwendete Datenformat erläutert. Formatvorlagen für die weiteren SBGP gemäß Bild 5.2 sind in Anhang C, Tabelle C.3 bis C.7 mit den exemplarischen Angaben für die THD-Platine abgedruckt.

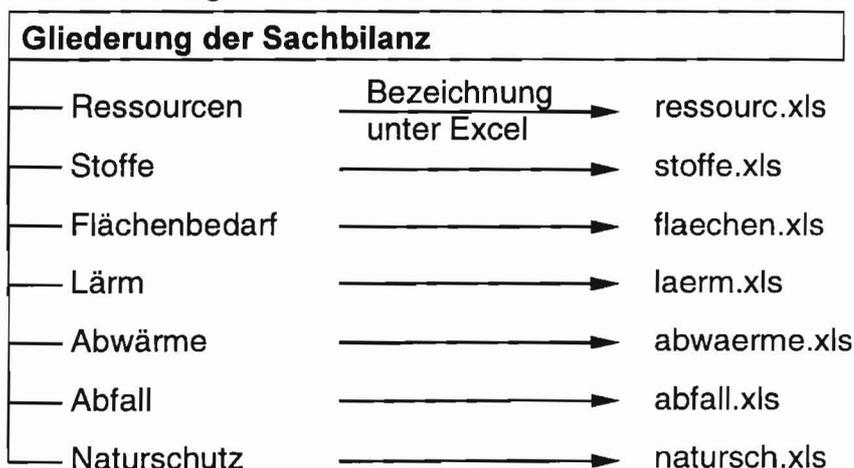


Bild 5.2: Gliederung der Sachbilanzdaten und Bezeichnung der Dateien bei Umsetzung mit MS Excel

Der Sachbilanzgliederungspunkt Ressourcen (Tabelle 5.2) umfaßt alle relevanten Arten von Ressourcen bzw. Rohstoffen. Benötigte Informationen sind:

- Bezeichnung der Ressource bzw. des Rohstoffes.
- Angabe des Prozeßschrittes, bei dem eine Ressource verbraucht wird.
- Masse der Ressource in kg pro funktionelle Einheit (fu), als unscharfe Zahl in LR-Darstellung, d. h. in der Form $(m_L, m_R, \alpha, \beta)_{LR}$.

Ressource	Prozeß	Masse in kg/ fu			
		m_L	m_R	α	β
Braunkohle	El. Energieerzeugung	$2,79 \cdot 10^{-2}$	$3,37 \cdot 10^{-2}$	$7,44 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$
Erdöl	El. Energieerzeugung	$4,75 \cdot 10^{-4}$	$5,75 \cdot 10^{-4}$	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$2,09 \cdot 10^{-4}$
Blei	Löten	$1,49 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-3}$	$1,63 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 5.2: Beispieldaten für den Sachbilanzgliederungspunkt „Ressourcen“ für die THD-Platine (Auszug aus Anhang C, Tabelle C.2)

5.2 Klassifizierung der Sachbilanz-Prognosedaten nach Wirkungskategorien

Die Zuordnung der Sachbilanzdaten zu den jeweiligen Wirkungskategorien wird erreicht durch den Vergleich der in Kapitel 5.1 formatierten Tabellen für Sachbilanzdaten mit Filtertabelle (Tabelle 5.3 und Anhang D, Tabelle D.1 bis D.14). Die Klassifizierung mittels Filtertabelle ist in Bild 5.3 dargestellt.

Ressource	Verbrauch in kg/a	Reserven in kg	RV in 1/a	Quelle
Blei	$5.800 \cdot 10^6$	$85.000 \cdot 10^6$	0,0682	[RIEDEL 1994]
Zinn	$230 \cdot 10^6$	$4.500 \cdot 10^6$	0,0511	[RIEDEL 1994]
Zink	$7 \cdot 10^6$	$147 \cdot 10^6$	0,0476	[EYERER 1996]

Tabelle 5.3: Auszug aus der Filtertabelle Ressourcen (Anhang D, Tabelle D.1)

Äquivalente für den Ressourcenverbrauchsfaktor RV sind in Tabelle 5.3 angegeben als Quotient der Reserven und des jährlichen Verbrauchs. Enthält beispielsweise die Sachbilanztabelle „Ressourcen“ die Angabe „Blei“, so wird wegen der Übereinstimmung der Ressourcenbezeichnung mit der Filtertabelle der Bleiverbrauch als unscharfe Zahl in LR-Darstellung der Wirkungskategorie „Inanspruchnahme von Ressourcen“ zugeordnet. Die Filtertabelle enthalten neben den Bezeichnungen für Energie- und Massenströme zusätzliche Angaben wie z.B. Gewichtungsfaktoren, die für die anschließende Charakterisierung innerhalb der Wirkungskategorie benötigt werden.

Die Sachbilanz-Tabelle „Stoffe“ (Anhang C, Tabelle C.3) muß wegen des umfassenden Wirkungspotentials der darin enthaltenen Stoffe mit einem Großteil der Filtertabelle verglichen werden. Neben den Stoffbezeichnungen (primäre Zuordnung: n=1) müssen alle bekannten zutreffenden Übergruppen (sekundäre bis quartäre Zuordnung: n=2 bis 4) aufgeführt werden.

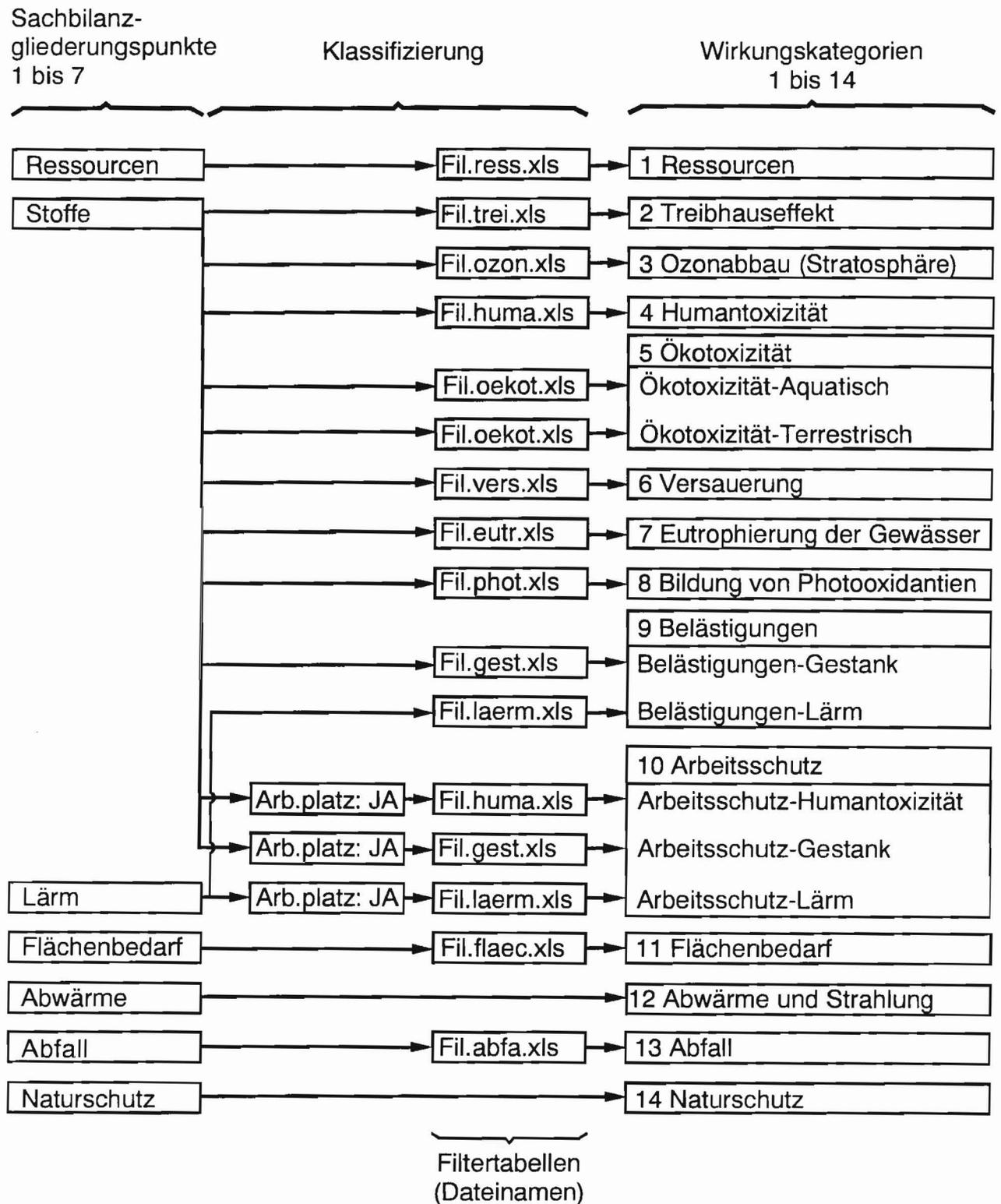


Bild 5.3: Klassifizierung mittels Filtertabellen

Die Zuweisung zu Wirkungskategorien geschieht in einem iterativen Prozeß (Bild 5.4). Bei Übereinstimmung der Bezeichnungen wird der Stoff der entsprechenden Wirkungskategorie zugewiesen. Zusätzlich müssen bei der Abfrage neben den Bezeichnungen auch die Angaben über das Medium (Luft, Wasser) sowie über den Emissionsort (Arbeitsplatz = 'JA', Bild 5.4) übereinstimmen, damit die korrekte Klassifizierung erfolgt.

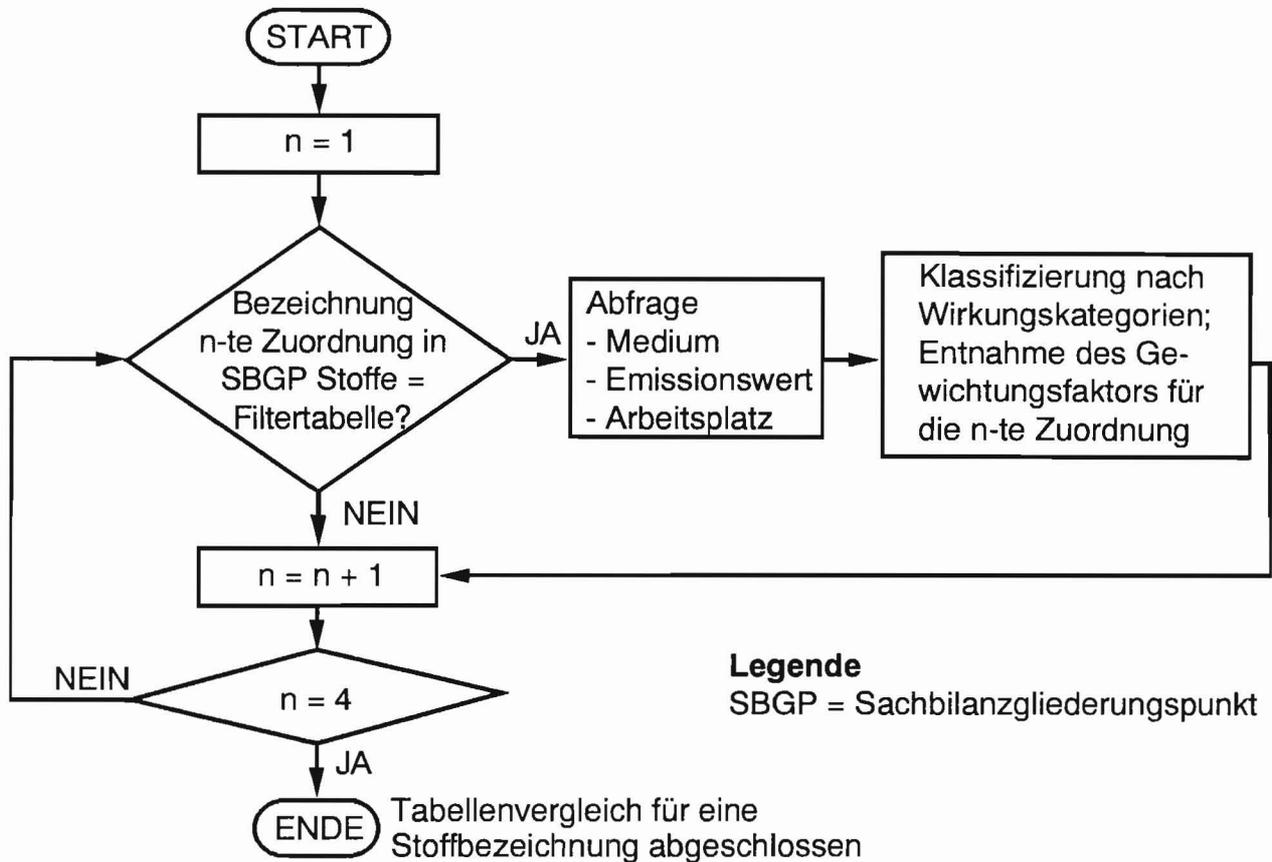


Bild 5.4: Zuweisung eines Stoffes aus dem Sachbilanzgliederungspunkt „Stoffe“ in eine bestimmte Wirkungskategorie

5.3 Charakterisierung innerhalb der Wirkungskategorien mit Fuzzy-Operatoren

Die in Tabelle 2.2 zusammengestellten Aggregationsvorschriften zur Charakterisierung innerhalb der Wirkungskategorien werden in Tabelle 5.4 auf unscharfe Vorschriften übertragen. Für die Wirkungskategorie Abfall wird eine vorläufige Vorschrift vorgeschlagen.

Wirkungskategorie	Unscharfe Aggregationsvorschrift	Einheit	Nr.
Ressourcen	$\sum_i RV_i \otimes \tilde{m}_i$	kg/(a·fu)	(5.1)
Treibhauseffekt	$\sum_i GWP_i \otimes \tilde{m}_i$	kg-CO ₂ -Äq./fu	(5.2)
Ozonabbau	$\sum_i ODP_i \otimes \tilde{m}_i$	kg-CFCl ₃ -Äq./fu	(5.3)
Human-toxizität	$\sum_i HCA_i \otimes \tilde{m}_i \oplus HCW_i \otimes \tilde{m}_i \oplus HCS_i \otimes \tilde{m}_i$	kg-Körpergew./fu	(5.4)
Ökotoxizität-Aquatisch	$\sum_i ECA_i \otimes \tilde{m}_i$	m ³ -Wasser/fu	(5.5)
Ökotoxizität	$\sum_i ECT_i \otimes \tilde{m}_i$	kg-Boden/fu	(5.6)

Terrestrisch			
Versauerung	$\sum_i AP_i \otimes \tilde{m}_i$	kg-SO ₂ -Äq./fu	(5.7)
Eutro- phierung	$\sum_i NP_i \otimes \tilde{m}_i$	kg-PO ₄ ³⁻ -Äq./fu	(5.8)
Photo- oxidantien	$\sum_i POCP_i \otimes \tilde{m}_i$	kg-C ₂ H ₄ -Äq./fu	(5.9)
Flächen- bedarf	$\sum_i HS_i \otimes \tilde{F}_i \oplus \tilde{q}_i$	(m ² ·a)/fu	(5.10)
Belästigung- Gestank	$\sum_i \frac{1}{OTV_i} \otimes \tilde{m}_i$	m ³ /fu	(5.11)
Belästigung- Lärm	$\sum_i GL_i \otimes \tilde{S}P_i \otimes \tilde{D}_i$	1/fu	(5.12)
Arbeitsschutz	Vorschrift wie bei Humantoxizität		
	Vorschrift wie bei Belästigungen-Gestank		
	Vorschrift wie bei Belästigungen-Lärm		
Abwärme	$\sum_i \tilde{E}_{Wasser}$	MJ/fu	(5.13)
Abfall	$\sum_i AF_i \otimes \tilde{m}_i$	1/fu	(5.14)
Naturschutz	keine Vorschrift		

Tabelle 5.4: Zusammenstellung unscharfer Aggregationsvorschriften

Bild 5.5 zeigt exemplarisch für zwei Schadstoffe Kohlendioxid und Methan der Wirkungskategorie Treibhauseffekt die Umsetzung der Aggregationsvorschrift.

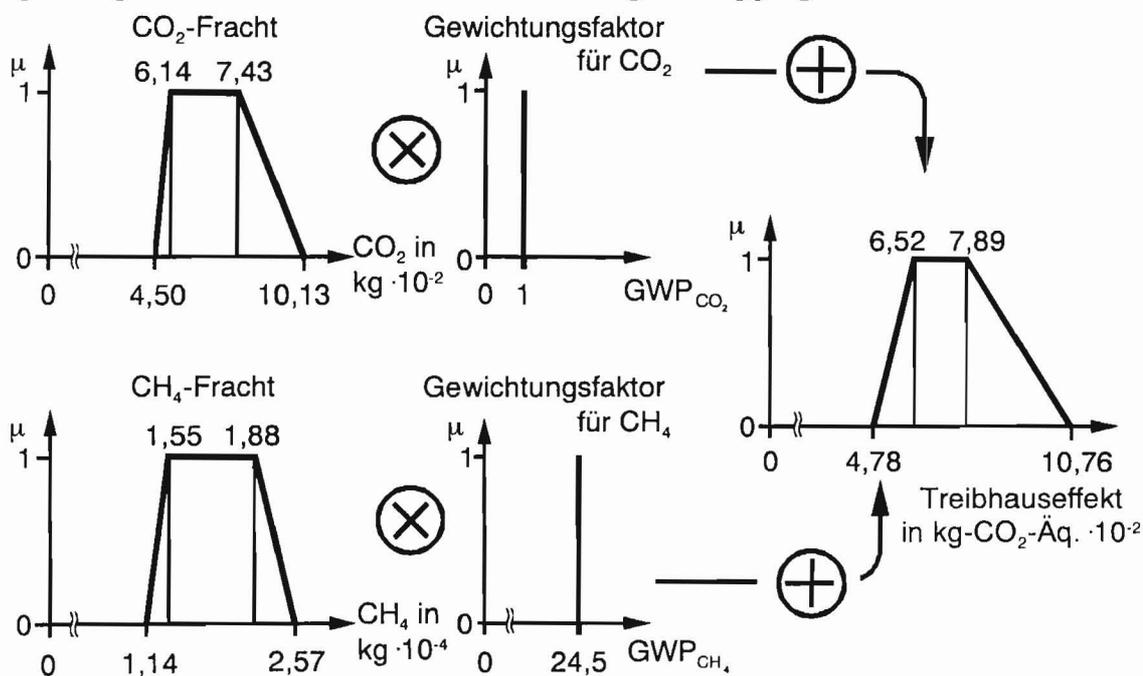


Bild 5.5: Umsetzung der Aggregationsvorschrift für den Treibhauseffekt mit Beispieldaten der THD-Platine

5.4 Aggregation der Wirkungskategorie-Ergebnisse

5.4.1 Gewichtungsfaktoren

Um ein Produkt mit einem einzigen ökologischen Kennwert bewerten zu können, ist es notwendig, die 18 Ergebnisse der 14 Wirkungskategorien zu verdichten. Hierfür sind geeignete Gewichtungsfaktoren erforderlich. Der Vorschlag für Gewichtungsfaktoren innerhalb der produktbezogenen Ökobilanz in Tabelle 5.5 lehnt sich an Vorschläge in [BRÜGGEMANN 1997], [BUNKE 1995], [ENQUETE 1997], [EYERER 1996], [GOEDKOOPT 1995], [HÜBLER 1993] sowie [UBA 1995a] an. In diesen Quellen sind Reduktionsfaktoren und daraus nach unterschiedlichen Kriterien abgeleitete Gewichtungsfaktoren zusammengestellt. Beispielsweise wird in [BRÜGGEMANN 1997] anhand der Kriterien „regionale Betroffenheit“, „gegenwärtige Geschwindigkeit der Veränderung“, „Halbwertszeit der Reversibilität“ und „Irreversibilität“ eine Rangfolge für Wirkungskategorien ermittelt.

Die Kategorien Arbeitsschutz, Abfall und Naturschutz nehmen eine Sonderstellung ein. Sie werden nicht in die Aggregation zu einem einzigen ökologischen Kennwert einbezogen, sondern übernehmen eine Indikatorfunktion. Mit Hilfe der Indikatoren wird die systematische Ergebnisanalyse unterstützt.

Wirkungskategorie	geforderte Reduktion in %	Gewichtungsfaktor F
Inanspruchnahme von Ressourcen	58	
Treibhauseffekt	80	
Ozonabbau (Stratosphäre)	100	
Humantoxizität	89	
Ökotoxizität	89	
Versauerung der Gewässer und Böden	90	
Eutrophierung der Gewässer	80	
Bildung von Photooxidantien	80	
Flächenbedarf	40	
Belästigungen (Lärm, Gestank)	40	
Gesundheitsgefährdung am Arbeitsplatz („Arbeitsschutz“)	Indikator	
Abwärme	32	
Abfall	Indikator	
Naturschutz	Indikator	



entspricht 2 Gewichtungseinheiten



entspricht 1 Gewichtungseinheit

Tabelle 5.5: Gewichtung der Wirkungskategorien

Für die Kategorien Arbeitsschutz und Abfall ist die Vernachlässigung beim Ermitteln des ökologischen Kennwerts dadurch begründet, daß ökologische Wirkungen sonst doppelt in das Endergebnis eingerechnet würden. Die Gesundheit der Arbeitnehmer wird weitestgehend durch toxische Stoffe sowie Lärm und Gestank beeinträchtigt

[C.A.U. 1995]. Diese Umweltwirkungen werden bereits in den Kategorien Human-toxizität und Belästigungen berücksichtigt.

Die durch Abfall verursachten Umweltbelastungen, die beispielsweise beim Deponieren und Verbrennen von Hausmüll entstehen, sind in den Sachbilanzgliederungspunkten Ressourcen, Stoffe, Flächenbedarf, Lärm, Abwärme und Naturschutz zu erfassen. Somit könnte die Kategorie Abfall entfallen. Dies würde jedoch zu folgendem Effekt führen: Gefährliche Abfälle, die ordnungsgemäß auf Sondermülldeponien beispielsweise in verschlossenen Behältnissen endgelagert werden, verursachen in erster Instanz lediglich Flächenbedarf, jedoch keine weiteren Umweltbelastungen wie sie z.B. bei der Hausmüllverbrennung entstehen. Dies hätte zur Konsequenz, daß das Ergebnis der Ökobilanz um so besser wäre, je mehr Sondermüll anfiel. Es ist weder wirtschaftlich noch umweltverträglich, wenn möglichst viel Sondermüll produziert oder knapper und teurer Sondermülldeponieraum mit haushaltsähnlichen Abfällen gefüllt wird. Deshalb wird bei der Charakterisierung ein Abfallindikator berechnet, mit dessen Hilfe erkannt werden kann, ob zu viel Müll - insbesondere Sondermüll - entsteht.

Für den Sachbilanzgliederungspunkt Naturschutz gibt es keine Aggregationsvorschrift. Der Gliederungspunkt entfällt, wenn zwischen den zu vergleichenden Produkten kein wesentlicher Unterschied zu erwarten ist [C.A.U. 1995]. Für die Bewertung der Umweltverträglichkeit der drei Beispielplatinen trifft dies zu.

5.4.2 Unterstützung der Aggregation durch Fuzzy-Operationen

Eine direkte Verdichtung der Wirkungskategorie-Einzelergebnisse zu einer Aussage durch arithmetische Operationen scheidet aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Einheiten aus. Es wird daher vorgeschlagen, alle Ergebnisse durch die Ergebnisse eines Vergleichsprodukts zu dividieren (Normierung) und somit relativ anzugeben (Bild 5.6).

Die Ergebnisse der Wirkungskategorien für die THD- und die SMD/THD-Platine (Bild 5.1) werden anhand des Referenzprodukts SMD-Platine normiert. In Anhang E, Tabelle E.5 sind die normierten Ergebnisse exemplarisch für die THD-Platine zusammengestellt. Innerhalb der Wirkungskategorien Ökotoxizität, Belästigungen und Arbeitsschutz, die zwei bzw. drei Teilergebnisse TE liefern, wird nach dem Normieren der arithmetische Mittelwert nach Gleichung (5.15) gebildet.

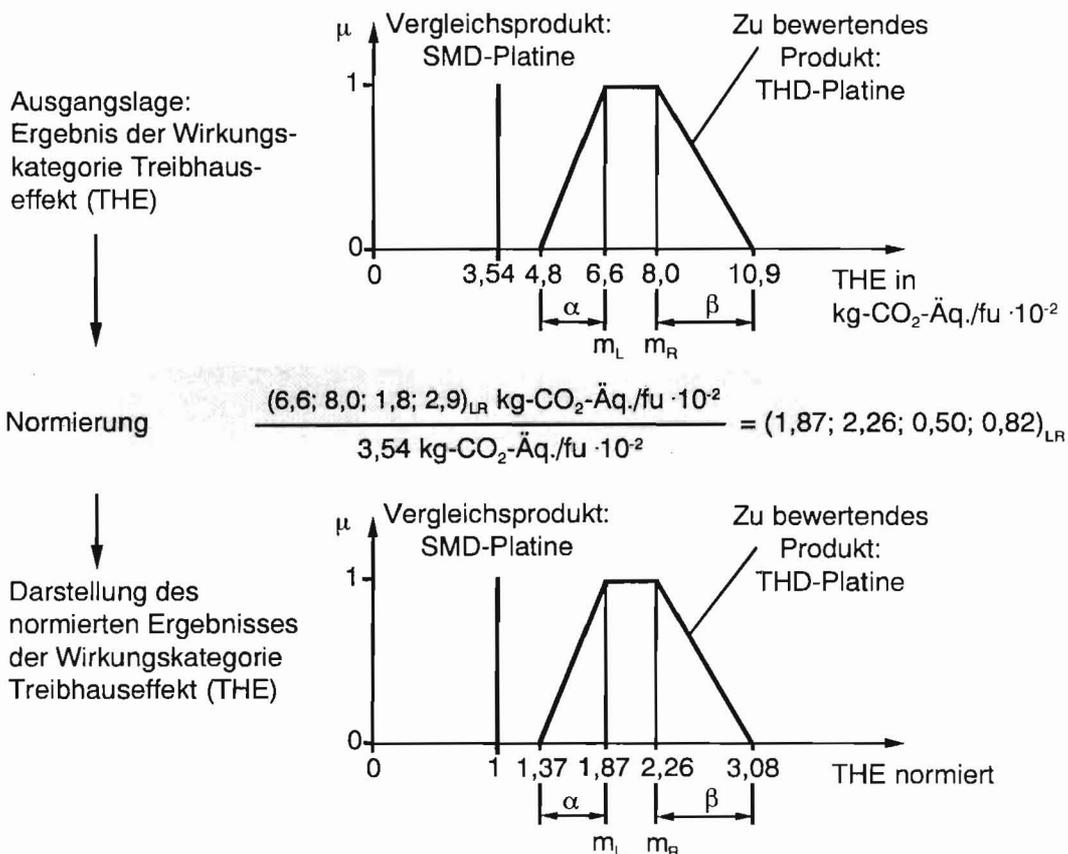
Arithmetischer Mittelwert unscharfer Zahlen:

$$\bar{x}_{TE} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_{Li}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_{Ri}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_i \right)_{LR} \quad (5.15)$$

Die normierten Teilergebnisse werden nach Gleichung (5.16) zu einem gewichteten Gesamtergebnis aufsummiert. Die Ergebnisse der Wirkungskategorien Arbeitsschutz, Abfall und Naturschutz werden hierbei nicht einbezogen. Das Gesamtergebnis kann als trapezförmiges Fuzzy-Set dargestellt werden. Das defuzzifizierte Gesamtergebnis wird als „Green Fitness“ bezeichnet.

Gesamtergebnis GE (dimensionslos):

$$GE = \frac{1}{\sum_{i=1}^{14} F_i} \cdot \sum_{i=1}^{14} (F_i \cdot TE_i) \quad (5.16)$$

**Bild 5.6:** Normierung eines Teilergebnisses am Beispiel THD-Platine

Mit den Gleichungen (5.15) und (5.16) wird beispielsweise die aggregierte normierte Bewertung für die THD-Platine im Vergleich zur SMD-Platine berechnet (Tabelle 5.6).

Wirkungskategorie	normierte Teilergebnisse TE_i (dimensionslos)	Arithmetischer Mittelwert	F_i	$F_i \cdot TE_i$
Ressourcen	(2,23; 2,76; 1,65; 1,92) _{LR}	-	6	(13,38; 16,58; 9,88; 11,53) _{LR}
Treibhauseff.	(1,87; 2,26; 0,50; 0,82) _{LR}	-	8	(14,91; 18,05; 3,98; 6,56) _{LR}
Humantox.	(1,87; 2,26; 0,50; 0,82) _{LR}	-	9	(16,82; 20,36; 4,49; 7,41) _{LR}
Ö.tox.-Aqu.	(1,60; 2,24; 0,58; 1,38) _{LR}	(1,60; 2,24; 0,58; 1,38) _{LR}	9	(14,45; 20,15; 5,19; 12,45) _{LR}
Ö.tox.-Terr.	(1,60; 2,24; 0,58; 1,38) _{LR}			
Versauerung	(1,87; 2,26; 0,50; 0,82) _{LR}	-	9	(16,81; 20,35; 4,49; 7,40) _{LR}

Eutroph.	(1,87; 2,26; 0,50; 0,82) _{LR}	-	8	(14,93; 18,08; 3,99; 6,58) _{LR}
Photooxid.	(1,73; 2,25; 0,57; 1,13) _{LR}	-	8	(13,76; 18,00; 4,59; 9,06) _{LR}
Flächenbed.	(1,59; 2,22; 0,57; 1,38) _{LR}	-	4	(6,36; 8,92; 2,30; 5,51) _{LR}
Bel.-Gestank	(1,87; 2,26; 0,50; 0,82) _{LR}	(1,66; 2,08; 0,84; 1,77) _{LR}	4	(6,62; 8,30; 3,35; 7,09) _{LR}
Bel.-Lärm	(1,44; 1,89; 1,18; 2,72) _{LR}	-	0	(0,00; 0,00; 0,00; 0,00) _{LR}
Arb.-Lärm	(1,44; 1,89; 1,18; 2,72) _{LR}	-	0	(0,00; 0,00; 0,00; 0,00) _{LR}
Abwärme	(1,87; 2,26; 0,50; 0,82) _{LR}	-	2,5	(4,65; 5,63; 1,24; 2,05) _{LR}
Abfall	(1,60; 2,24; 0,57; 1,38) _{LR}	-	0	(0,00; 0,00; 0,00; 0,00) _{LR}
ΣF_i :			67,5	
$\Sigma F_i \cdot TE_i$:				(122,70; 154,42; 43,50; 75,64) _{LR}
Gesamtergebnis $\Sigma F_i \cdot TE_i / \Sigma F_i$:				(1,82; 2,29; 0,64; 1,12)_{LR}
Green Fitness				2,20

Tabelle 5.6: Aggregierte normierte Bewertung am Beispiel THD-Platine im Vergleich zur SMD-Platine (Auszug aus Anhang E, Tabelle E.5)

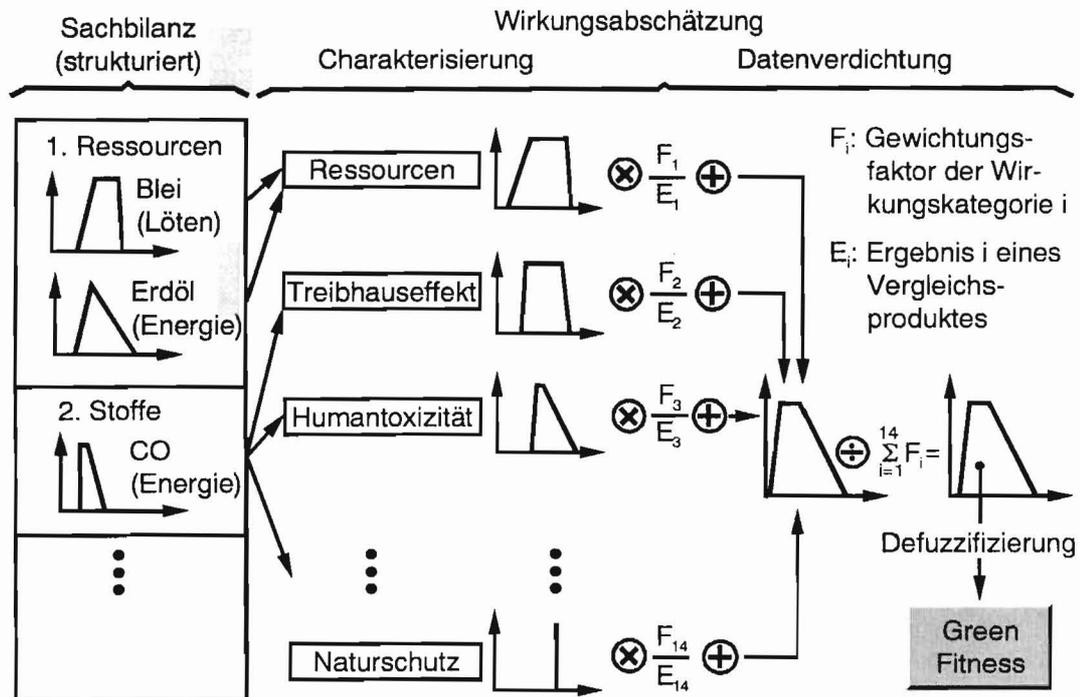


Bild 5.7: Vorgehensweise zur Datenverdichtung unsicherer Eingangsinformationen

Bild 5.7 zeigt zusammenfassend die Vorgehensweise von der Darstellung unsicherer Eingangsinformationen als Fuzzy-Sets im Rahmen der Sachbilanz bis zur Verdichtung der Wirkungskategorie-Teilergebnisse zu einem Gesamtergebnis. Die Defuzzifizierung des Gesamtergebnisses führt nach Gleichung (4.20) zum Wert „Green Fitness“.

5.5 Systematische Auswertung der Ergebnisse

5.5.1 Defuzzifizierung der aggregierten Fuzzy-Sets

Vergleich zweier Produkte miteinander

Eine Berechnung des „gewichteten Mittelwerts“ der normierten Teilergebnisse zur ökologischen Bewertung eines Produkts A impliziert, daß auch das Gesamtergebnis normiert, d. h. relativ zu einem Referenzprodukt wie z.B. einem Vergleichs- oder Vorgängerprodukt angegeben ist. Das defuzzifizierte Gesamtergebnis des Referenzproduktes beträgt konventionsgemäß 1 bzw. 100 Prozent. Beispielsweise lautet das Gesamtergebnis der THD-Platine $(1,82; 2,29; 0,64; 1,12)_{LR}$ und der nach der Schwerpunktmethod defuzzifizierte „Green Fitness“-Wert 2,20 (Tabelle 5.6). Die Umweltbelastungen, die von der THD-Platine verursacht werden, betragen somit 220 Prozent von denen der SMD-Platine.

Vergleich von zwei oder mehr Produkten mit einem Referenzprodukt

Werden zwei oder mehr Produkte anhand eines Referenzproduktes verglichen, so defuzzifiziert man die als Fuzzy-Set dargestellte Gesamtergebnisse und vergleicht die so ermittelten Werte „Green Fitness“ mit dem des Referenzproduktes. Bei großen Überlappungsbereichen der Fuzzy-Sets ist der alleinige Vergleich der Werte „Green Fitness“ nicht ausreichend. Neben den defuzzifizierten Werten sind dann auch die zugrundeliegenden Fuzzy-Mengen zu vergleichen. Möglicherweise bekommt eine Produktalternative mit geringerem „Green Fitness“-Wert trotzdem den Vorzug, weil der Unsicherheitsbereich sehr groß ist und sich durch Optimieren bestehender Fertigungsverfahren der Wert „Green Fitness“ mit geringem Aufwand hin zu einem kleineren Wert verschoben werden kann als bei anderen Produktalternativen mit besserer „Green Fitness“.

Die defuzzifizierten Gesamtergebnisse der THD-Platine und der THD/SMD-Platine sind in Tabelle 5.7 relativ zum Referenzprodukt SMD-Platine angegeben. Aufgrund der defuzzifizierten Werte "Green Fitness" ist die THD/SMD-Platine auszuwählen, da nur 94 Prozent der Umweltbelastungen des Referenzproduktes entstehen. Zu einer vergleichbaren Aussage würde unter Verwendung derselben Gewichtungsfaktoren auch eine herkömmliche Produkt-Ökobilanz nach [DIN EN ISO 14040 1997] führen.

Produkt	Gesamtergebnis	Green Fitness
THD-Platine	$(1,82; 2,29; 0,64; 1,12)_{LR}$	2,20
THD/SMD-Platine	$(0,77; 0,97; 0,27; 0,48)_{LR}$	0,94

Tabelle 5.7: Gesamtergebnisse der THD- und der THD/SMD-Platine relativ zum Referenzprodukt SMD-Platine

Die graphische Darstellung der unscharfen Gesamtergebnisse (Bild 5.8) zeigt, daß sich die beiden Fuzzy-Mengen geringfügig überlappen. Das Bewertungsergebnis der

THD-Platine kann sich durchaus im Bereich der THD/SMD-Platine bewegen. Da der Zugehörigkeitsgrad μ jedoch klein ($< 0,5$) ist, wird dies eher untypisch sein. Anhand dieses Beispiels wird deutlich, daß neben den defuzzifizierten Gesamtergebnissen auch die graphische Darstellung der unscharfen Mengen unbedingt erforderlich ist. Bei einem großen Fuzzy-Set-Überlappungsbereich läßt sich nicht eindeutig feststellen, welches Produkt das umweltverträglichere ist.

Die Kennwerte der Wirkungskategorien liegen wie das Gesamtergebnis der Wirkungsabschätzung als normierte unscharfe Zahlen in LR-Darstellung vor (Tabelle 5.6, Spalte 2). Die Defuzzifizierung der Wirkungskategorie-Kennwerte sowie die Interpretation erfolgt analog zur beschriebenen Vorgehensweise.

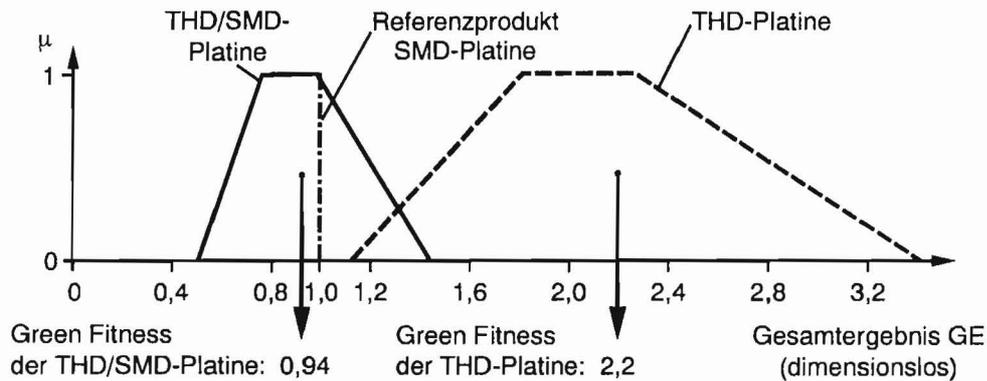


Bild 5.8: Graphische Darstellung der unscharfen Gesamtergebnisse der THD- und der THD/SMD-Platine relativ zum Referenzprodukt SMD-Platine

5.5.2 Sensitivitätsanalyse

Zuverlässigkeitsanalyse

Bei einem Bewertungsmodell, mit dem unsichere Eingangsinformationen in Form von Fuzzy-Mengen zu einem unscharfen Gesamtergebnis verknüpft werden, ist eine derartige Analyse bereits integriert. Unsicherheiten bzw. Unschärfen werden direkt wie z.B. in Bild 5.8 aus dem Gesamtergebnis abgelesen.

Gültigkeitsanalyse

Aus folgenden Gründen liefert die Gültigkeitsanalyse für Gewichtungsfaktoren der Wirkungskategorien keine wesentlichen zusätzlichen Informationen:

- Es wird nur ein Gewichtungsfaktor verändert (z.B. für Treibhauseffekt neun statt acht); die anderen werden konstant gehalten.
- Die Faktoren werden vor der Bewertung festgelegt. Eine Variation dieser Gewichtungsfaktoren führt zu einer gezielten, subjektiven Beeinflussung des Bewertungsergebnisses.
- Das direkte Ableiten von Optimierungs- und Verbesserungsmaßnahmen für Produkte und Prozesse ist nicht möglich.

Die Rahmenbedingungen zur Durchführung der Gültigkeitsanalyse sind in [HEIJUNGS 1992] beschrieben. Wegen der fehlenden Ablaufprotokolle ist eine rechnergestützte Umsetzung nicht möglich. Im weiteren wird deshalb und wegen der vorher genannten Mängel auf die Gültigkeitsanalyse nicht weiter eingegangen.

Dominanzanalyse

Anteil eines mit einem Prozeß verknüpften Energie- und Massenstroms am Gesamtergebnis

In einem ersten Schritt wird der Anteil der normierten, gewichteten und defuzzifizierten Wirkungskategorie-Ergebnisse an der Gesamtsumme bestimmt (Tabelle 5.8).

Wirkungskategorie	$(F_i \cdot TE_i)$, defuzzifiziert	Anteil an Summe in %	Anteil graphisch
Ökotoxizität Mittelwert	19,51	13,14	
Ökotoxizität-Aquatisch		6,57	
Ökotoxizität-Terrestrisch		6,57	
Humantoxizität	19,49	13,13	
Versauerung	19,48	13,12	
Eutrophierung	17,30	11,65	
Treibhauseffekt	17,28	11,64	
Photooxidantien	17,25	11,62	
Ressourcen	15,51	10,45	
Belästigungen Mittelwert	8,64	5,82	
Belästigungen-Lärm		2,91	
Belästigungen-Gestank		2,91	
Flächenbedarf	8,61	5,80	
Abwärme	5,39	3,63	
Arbeitsschutz-Lärm	0,00	0,00	
Abfall	0,00	0,00	
Summe	148,46	100,00	

Tabelle 5.8: Dominanzanalyse der normierten, gewichteten und defuzzifizierten Wirkungskategorie-Ergebnisse für die THD-Platine im Vergleich zur SMD-Platine (Auszug aus Anhang E, E.6)

Unter Teilergebnis TE wird dabei das normierte, unscharfe Ergebnis einer Wirkungskategorie verstanden. F ist der Gewichtungsfaktor einer Wirkungskategorie. Beispielsweise beträgt dieser Faktor für die Wirkungskategorie Treibhauseffekt acht. Innerhalb jeder Wirkungskategorie wird der Anteil der Energie- und Massenströme am Wirkungskategorie-Ergebnis ermittelt. Ein Beispiel anhand der Kategorie Ressourcen für die THD-Platine ist in Tabelle 5.9 gegeben. Weitere Beispiele sind in Anhang E, Tabellen E.1 bis E.4 zusammengestellt.

Prozeßemission		Ressourcen-Äquivalent in kg/fu • a, defuzzifiziert	Anteil an Summe in %	Anteil graphisch
Zinn	Löten	$1,21 \cdot 10^{-4}$	32,66	
Blei	Löten	$1,18 \cdot 10^{-4}$	31,59	
Steinkohle	el. Energieerzeugung	$7,91 \cdot 10^{-5}$	21,27	
.....	
Summe		$3,72 \cdot 10^{-4}$	100,00	

Tabelle 5.9: Dominanzanalyse der Prozeßemissionen in der Wirkungskategorie Ressourcen (Auszug für THD-Platine aus Anhang E, Tabelle E.1)

Tabelle 5.9 wird folgendermaßen interpretiert: Das durch den Prozeß Löten verbrauchte Blei beeinflusst die Wirkungskategorie „Inanspruchnahme von Ressourcen“ zu 31,59 Prozent, die Kategorie selbst ist nach Tabelle 5.8 mit 10,45 Prozent am Gesamtergebnis beteiligt. Somit beträgt der Anteil des Rohstoffes Blei $0,3159 \cdot 0,1045 = 3,30$ Prozent vom Gesamtergebnis. Dieser Aussage liegt Gleichung (5.17) zugrunde. Die Wirkung eines Energie- oder Massenstroms auf mehrere Wirkungskategorien i wird durch die Summierung berücksichtigt.

Anteil p_j eines mit einem Prozeß verknüpften Energie- und Massenstroms j am Gesamtergebnis:

$$p_j = \sum_{i=1}^n A_{PEij} \cdot A_{WKij} \quad (5.17)$$

Prozeßemission		Anteil am Gesamtergebnis in %	Anteil graphisch
Stickoxide	el. Energieerzeugung	23,61	
Schwefeldioxid	el. Energieerzeugung	14,16	
Phenole	Deponierung Schlacken	12,34	
Kohlendioxid	el. Energieerzeugung	10,82	
Isopropylalkohol	Fluxen	10,25	
Fläche Deponierung	Deponierung Schlacken	5,58	
Kühlwasser	el. Energieerzeugung	3,63	
Zinn	Löten	3,41	
Blei	Löten	3,30	
.....	

Tabelle 5.10: Dominanzanalyse der THD-Platine (Auszug aus Anhang E, Tabelle E.7)

Verbesserungsmaßnahmen müssen sich primär darauf konzentrieren, die Stickoxidemissionen bei der Energieerzeugung zu reduzieren. Da es jedoch im allgemeinen nicht möglich sein wird, Prozesse des Stromversorgers zu verändern, sollte der

Stromverbrauch beim Wellenlöten durch beispielsweise bessere Anlagenauslastung reduziert werden. Somit würden auch die Schwefel- und Kohlendioxid-Emissionen sinken, die ebenfalls erheblichen Einfluß (14,16 Prozent bzw. 10,82 Prozent) auf das Bewertungsergebnis haben.

Anteil der Unschärfe eines mit einem Prozeß verknüpften Energie- und Massenstroms an der Gesamtunschärfe

Der Einfluß der mit einem Prozeß verknüpften Unsicherheit z.B. durch Schwankungen der Emissionsmenge auf die Unschärfe des Gesamtergebnisses wird ebenfalls mit Hilfe der Dominanzanalyse ermittelt.

Ein Maß für die Unschärfe ist die Fläche eines Fuzzy-Sets. Liegt eine Fuzzy-Menge \tilde{M} in LR-Darstellung vor, so errechnet sich die **Unschärfe** \tilde{U} zu:

$$\tilde{U} = m_L + m_R + \frac{1}{2} (\alpha + \beta) \quad (5.18)$$

Das weitere Vorgehen erfolgt analog zur Vorgehensweise bei der Bestimmung des Anteils p (Gleichung 5.17) eines mit einem Prozeß verknüpften Energie- und Massenstroms am Gesamtergebnis:

Anteil p_s der Unschärfe eines mit einem Prozeß verknüpften Energie- und Massenstroms j an der Gesamtunschärfe:

$$p_{Sj} = \sum_{i=1}^n A_{SPEij} \cdot A_{SWKij} \quad (5.19)$$

In Tabelle 5.11 sind auszugsweise die Ergebnisse der Unschärfe-Dominanzanalyse bei Anwendung von Gleichung (5.19) für die THD-Platine zusammengestellt. Fettgedruckte Prozeßemissionen beeinflussen mehr als eine Wirkungskategorie.

Prozeßemission		Unschärfe zu Gesamtunschärfe in %	Anteil graphisch
Stickoxide	el. Energieerzeugung	18,69	
Phenole	Deponierung Schlacken	14,93	
Schwefeldioxid	el. Energieerzeugung	11,21	
Isopropylalkohol	Fluxen	11,04	
Kohlendioxid	el. Energieerzeugung	8,56	
Fläche Deponierung	Deponierung Schlacken	6,80	
Zinn	Löten	6,24	
Blei	Löten	6,04	
.....	

Tabelle 5.11: Unschärfe-Dominanzanalyse für die THD-Platine (Auszug aus Anhang E, Tabelle E.8)

Die Unschärfe des Gesamtergebnisses wird maßgeblich verursacht durch Stickoxide, die bei der elektrischen Energieerzeugung frei werden. Danach folgen Phenole, die bei der Schlackendeponierung entstehen. Diese Umweltbelastungen müssen genauer quantifiziert werden, um die Unschärfe des Gesamtergebnisses effizient zu

reduzieren. Bezüglich der Phenole ist dies beispielsweise durch gezielte Kooperation mit dem beauftragten Entsorgungs- bzw. Energieversorgungsunternehmen möglich. So ließe sich die Breite des unscharfen Bewertungsergebnisses deutlich verringern, falls keine eindeutige Aussage beim Vergleich mehrerer Produkte getroffen werden kann.

Für den in Kapitel 5.5.1 gezeigten Vergleich der THD- mit der THD/SMD-Platine ist eine Reduktion der Unschärfe des Bewertungsergebnisses nicht notwendig, da, wie in Bild 5.8 visualisiert, eine klare Aussage getroffen werden kann.

In Kapitel 4 wurde die Frage aufgeworfen, ob die Genauigkeit der geschätzten Lotmassen ausreichend ist. Aus der Dominanzanalyse wird ersichtlich, daß die im Lot enthaltenen Stoffe wie z.B. Blei und Zinn weder das Gesamtergebnis noch die Unschärfe des Gesamtergebnisses entscheidend beeinflussen. Somit erweist sich die Lotmassenabschätzung als hinreichend genau. Beispielsweise beeinflusst Blei nur mit 3,3 Prozent das Gesamtergebnis und mit 6,0 Prozent die Gesamtunschärfe.

Unter der Annahme, daß die Deponierung der Schlacken zu 60 Prozent von der Lotkrätze und zu 40 Prozent von der elektrischen Energieerzeugung, das entspricht dem durchschnittlichen Massenverhältnis aus Anhang C, Tabelle C.1, hervorgerufen wird, ergeben sich für die Dominanzanalyse die in Tabelle 5.12 zusammengestellten anschaulichen Ergebnisse. Das Gesamtergebnis als auch die Gesamtunschärfe des Ergebnisses sowohl der THD- als auch der THD/SMD-Platine im Vergleich zur SMD-Platine wird vom Energieeinsatz, gefolgt von der anfallenden Lotkrätze, dominiert.

Dominanzanalyse	Energie in %	Flußmittel in %	Lotkrätze in %	Lotmasse in %
Gesamtergebnis THD-Platine	65,9	10,3	13,9	9,9
Gesamtergebnis THD/SMD-Platine	63,5	9,9	13,4	13,2
Gesamtunschärfe THD-Platine	56,4	10,9	16,5	16,2
Gesamtunschärfe THD/SMD-Platine	55,3	10,6	16,2	17,9

Tabelle 5.12: Zusammenfassung der Ergebnisse der Dominanzanalyse

Ideelle Analyse

Das Bewertungsergebnis hängt neben der Höhe der mit einem Prozeß verknüpften Energie- und Massenströme von folgenden Faktoren ab:

F_i = Gewichtungsfaktor (Reduktionsfaktor) einer Wirkungskategorie i

w_{ij} = Gewichtungsfaktor für einen Energie- oder Massenstrom j innerhalb einer Wirkungskategorie i

N_i = Ergebnis einer Wirkungskategorie i eines Vergleichsproduktes

Hält man die mit einem Prozeß verknüpften Energie- und Massenströme E/M und die Ergebnisse eines Vergleichsproduktes N konstant, so steigt das Bewertungsergebnis mit wachsenden Faktoren F und w (Bild 5.9). Erhöht man hingegen die Werte

des Vergleichsproduktes, wobei alle anderen Parameter konstant bleiben, so verringert sich das Bewertungsergebnis (Bild 5.9).

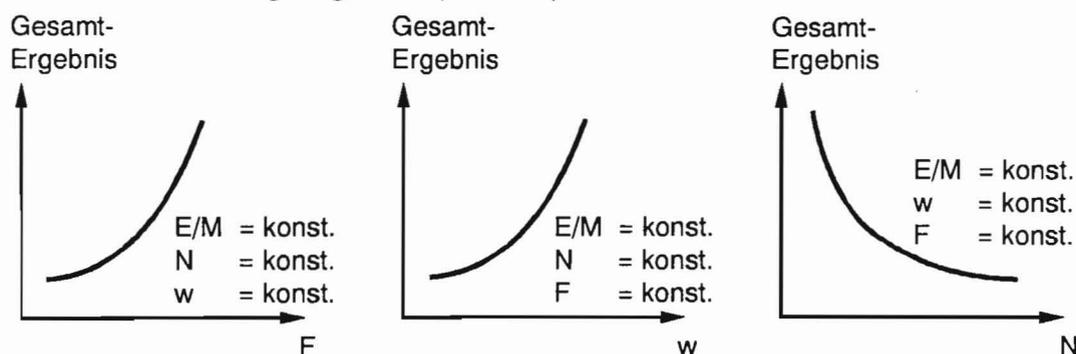


Bild 5.9: Qualitative Abhängigkeit des Gesamtergebnisses von F, w und N

Zum Ermitteln potentiell kritischer Prozesse wird das **Veränderungspotential** ΔV definiert. Die Wirkung eines Energie- oder Massenstroms auf mehrere Wirkungskategorien i wird durch die Summierung berücksichtigt.

$$\Delta V_j \sim \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i} \cdot F_i \cdot w_{ij} \quad (5.20)$$

Tabelle 5.13 zeigt die Ergebnisse der ideellen Analyse anhand der THD-Platine. Fettgedruckte Prozeßemissionen beeinflussen mehr als eine Wirkungskategorie.

Prozeßemission		Veränderungspotential	Anteil graphisch
Dioxine	Deponierung Schlacken	$8,45 \cdot 10^{11}$	
Quecksilber	Deponierung Schlacken	$1,43 \cdot 10^{11}$	
Cadmium	Deponierung Schlacken	$5,77 \cdot 10^{10}$	
Benzo(a)pyren	Deponierung Schlacken	$1,07 \cdot 10^{10}$	
Chrom	Deponierung Schlacken	$6,16 \cdot 10^9$	
Phenole	Deponierung Schlacken	$3,25 \cdot 10^9$	
.....	

Tabelle 5.13: Ergebnisse der ideellen Analyse für die THD-Platine (Auszug aus Anhang E, Tabelle E.9)

Die höchsten Veränderungspotentiale betreffen die Deponierung der Schlacken, resultierend aus der Lotkrätzenentsorgung mit einem Anteil von etwa 60 Prozent und der Energieerzeugung. Höchstes Veränderungspotential entsteht durch die bei der Schlackenentsorgung freigesetzten Dioxine. Schon geringe Veränderungen der Emissionsmenge beeinflussen das Bewertungsergebnis empfindlich. Ein geringer Anstieg der Dioxinbelastung bei der Deponierung führt zu einem deutlich schlechteren Bewertungsergebnis. Daraus ist zu schließen, daß die Menge der Lotkrätze möglichst konstant gering gehalten werden muß, damit nicht kleine Erhöhungen zu einer signifikant schlechteren Umweltverträglichkeit des Wellenlötprozesses führen.

5.5.3 Werkzeuge zur Ergebnisanalyse im Überblick

Mit Hilfe des erarbeiteten fuzzygestützten Datenverdichtungs- und Auswertemodells werden Produkte und Prozesse präventiv hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit be-

wertet. Für die systematische Ergebnisanalyse stehen die in Bild 5.10 zusammengestellten Werkzeuge zur Verfügung.

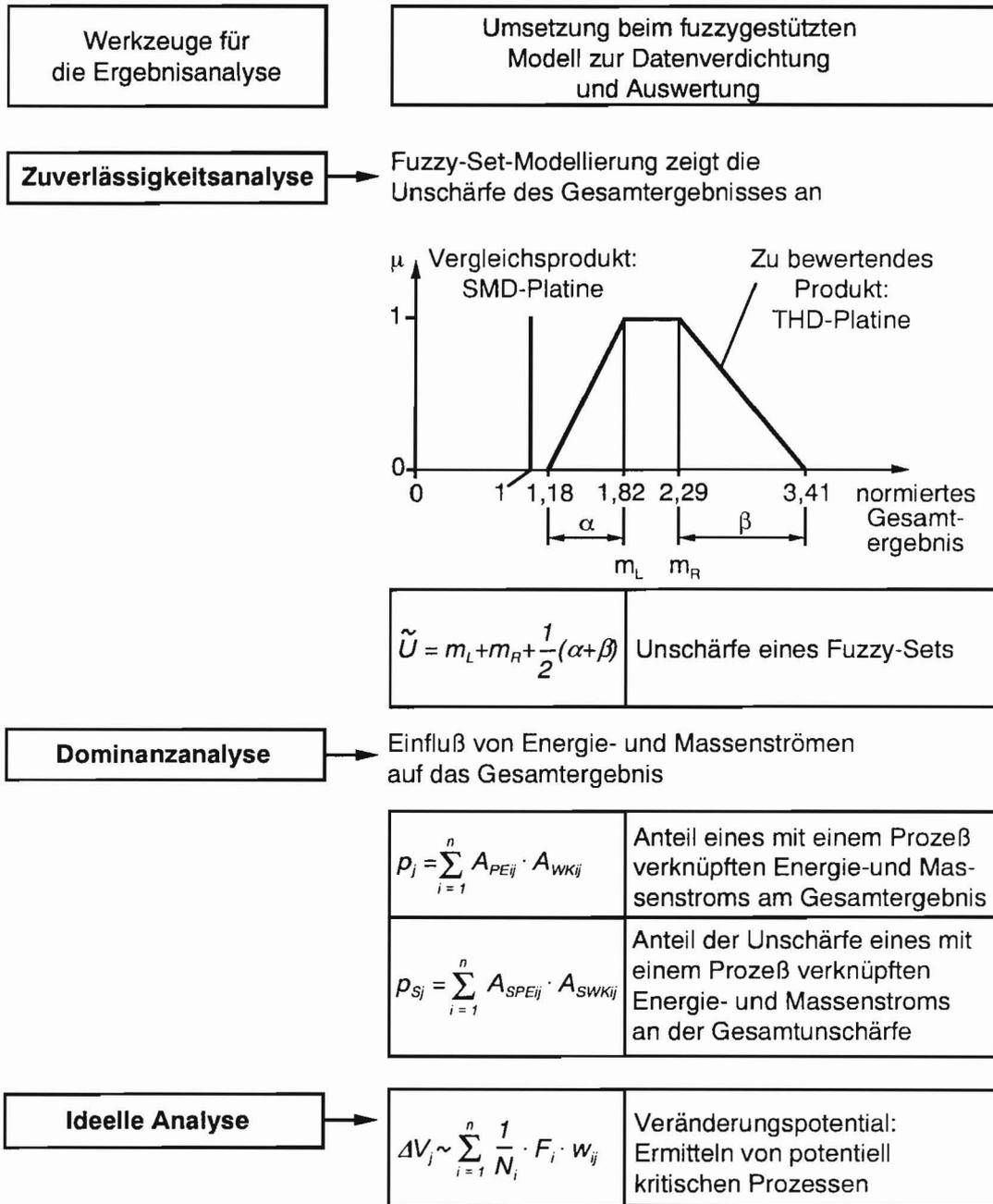


Bild 5.10: Werkzeuge zur systematischen Auswertung im Überblick

6 Anwendungsbeispiel

Präventives ökologisches Bewertungsmodell für den Vergleich der drei Druckverfahren:

- 1 Kartondruck
- 2 Etiketten-Rollendruck
- 3 Siebdruck

zur Herstellung von Etiketten.

Ziel des Anwendungsbeispiels ist der ökologische Vergleich von Druckverfahren mit einem fuzzy-gestützten Bewertungsmodell, mit dessen Hilfe sowohl umweltverträg-

liche Prozesse entwickelt, als auch vorhandene komplexe Prozesse mit einer einzigen Kennzahl bewertet werden können.

Die drei Prozesse Kartondruck, Etiketten-Rollendruck und Siebdruck sollen hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit verglichen werden. Zugleich sollen unsichere Eingangsinformationen verarbeitet und ausgewertet werden können.

Die Daten für die drei Druckverfahren sind in Tabelle 6.1 angegeben. Die Drucker erfüllen die gleichen Funktionen. Die Berechnung wird für 2 000 Etiketten ausgeführt, der relative Schätzwert der Standardabweichung s_{rel} für alle Daten ist angegeben (Tabelle 6.1). Der Etiketten-Rollendruck dient als Referenzprozeß.

Für den ökologischen Vergleich der drei Systeme muß die Gleichwertigkeit als Berechnungsgrundlage der drei Drucker gegeben sein. Das wird durch Verwendung gleicher funktioneller Einheiten und gleichwertigen methodischen Überlegungen erreicht (z.B. Datenqualität, Systemgrenze). Beim Abschätzen der Sachbilanzdaten werden Toleranzen und Unsicherheiten als Fuzzy-Set modelliert.

Daten	Kartondrucker	Rollendrucker	Siebdruck
Energie (kJ)	1,44E+02 ^a _{+50%}	1,08E+02 _{+55%}	5,76E+02 _{+50%}
Druckerfarbe (kg) ^b	1,44E-04 _{+50%}	1,44E-04 _{+50%}	5,05E-05 _{+50%}
Papier (kg)	-	5,00E-01 _{+10%}	-
Kleber (kg)	-	1,25E-01 _{+10%}	-
Reinigung (l) ^c	-	-	5,00E-01 _{+50%}
Entsorgung (kg)	1,00E-00 _{+40%}	6,60E-01 _{+40%}	6,00E-00 _{+50%}
PET (kg) ^d	1,40E-01 _{+10%}	1,60E-01 _{+10%}	8,00E-04 _{+50%}
Transport (l) ^e	-	8,00E-01 _{+60%}	8,00E-01 _{+60%}

^a Relativer Schätzwert der Standardabweichung s_{rel}

^b Farben für Kartondruck und Rollendruck bestehen aus Wachs (60%), Harz (35%), Farbpigmente (5%)

^c Isomeres Gemisch (Tuluol u. Xylol), ^d Polyester, ^e Diesel

Tabelle 6.1: Datenerfassung für Kartondruck, Rollendruck und Siebdruck

Mit Hilfe der Fuzzy-Set Theorie wird der klassische Mengenbegriff erweitert. Im Gegensatz zur klassischen Mengenlehre, bei der eindeutig bestimmt ist, ob ein Element zur Menge gehört wie z.B. 'eins' oder 'wahr' bzw. nicht zur Menge gehört wie z.B. 'null' oder 'falsch', existieren bei Fuzzy-Set auch Zugehörigkeitsgrade zwischen null und eins. Ist G eine Grundmenge, so heißt die Abbildung

$$\mu: G \rightarrow [0,1]$$

eine Fuzzy-Menge (Unschärfe Menge, Fuzzy-Set) in G .

Für μ wird meist der Begriff Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Menge verwendet, die jedem $x \in G$ den Zugehörigkeitsgrad $\mu(x)$ aus dem Intervall $[0,1]$ zuordnet. Unschärfe Informationen können durch Zugehörigkeitsfunktionen modelliert, graphisch veranschaulicht und z.B. durch logische oder arithmetische Operationen verknüpft werden.

In Anhang F, Tabelle F.1 ist das unscharfe Intervall $M=(m_L, m_R, \alpha, \beta)$ als Sachbilanz der drei Drucker angegeben.

Aus Datenbankangaben der Ökobilanzierungsprogramme Umberto und Sima Pro 3.1 werden für die Vergleichsdruckverfahren aus Tabelle 6.1 die in Anhang F, Tabelle F.2 angegebenen Sachbilanz ermittelt.

Für das Modell zur Datenverdichtung und Auswertung werden die Sachbilanzdaten (Anhang F, Tabelle F.2 und F.3) in Ressourcen, Stoffe, Flächenbedarf, Lärm, Abwärme, Abfall, Naturschutz (Sachbilanzgliederungspunkts) gegliedert. Formatvorlagen für diese Sachbilanzgliederungspunkts sind in Anhang F,(Tabelle F.4 bis F.7) mit den exemplarischen Angaben des Siebdrucks abgedruckt.

Die Daten (Anhang F, Tabelle F.2 bis F.7) werden nach Wirkungskategorien wie Treibhauseffekt, Ozonabbau, Ressourcen, Humantoxizität, Ökotoxizität, Versauerung, Eutrophierung, Photooxidantien, Flächenbedarf, Belästigung, Arbeitsschutz, Abwärme, Abfall, Naturschutz (Anhang D, Tabelle D.1 bis D.14) klassifiziert, innerhalb der Kategorien gewichtet und mit Hilfe von Fuzzy-Operatoren zu einem Kennwert verdichtet. Darüber hinaus werden die Wirkungskategorien untereinander gewichtet und dann ebenfalls mittels Fuzzy-Operatoren verknüpft, so daß ein komplexes Produkt mit einer einzigen umweltbezogenen Kennzahl bewertet werden kann.

Mit Hilfe des fuzzygestützten Bewertungsmodells kann das Gesamtergebnis einer produktbezogenen Ökobilanz mit einem weit gespannten Feld an Auswertemöglichkeiten untersucht werden. Die Angabe des Gesamtergebnisses als Fuzzy-Set beinhaltet sowohl einen skalaren defuzzifizierten Wert 'Green Fitness' als auch die Gesamtunschärfe bzw. Zuverlässigkeit. Mit dem Wert Green Fitness wird ein absoluter Vergleich von Produkt- oder Prozessalternativen hinsichtlich der Umweltverträglichkeit ermöglicht. Die defuzzifizierten Gesamtergebnisse des Kartondrucks und des Siebdrucks sind in Tabelle 6.2 relativ zum Referenzprozeß Rollendruck angegeben.

Drucker	Gesamtergebnis	Green Fitness
Kartondruck	(0,41; 0,64; 0,18; 0,51)	0,62
Siebdruck	(2,15; 3,40; 0,97; 2,78)	3,32

Tabelle 6.2: Gesamtergebnisse des Kartondruckers und des Siebdrucks relativ zum Referenzdruckers Rollendruck

Die Green Fitness-Wert des Kartondrucks und des Siebdrucks sind 0,62 beziehungsweise und 3,32. Aufgrund der defuzzifizierten Green Fitness-Werte ist der Kartondrucks auszuwählen, da nur 62 Prozent der Umweltbelastungen des Referenzprozesses entstehen. Die graphische Darstellung der unscharfen Gesamtergebnisse (Bild 6.1) zeigt, daß sich die beiden Fuzzy-Mengen nicht überlappen. Damit läßt sich feststellen, daß der Kartondruck das umweltverträglichere Verfahren ist.

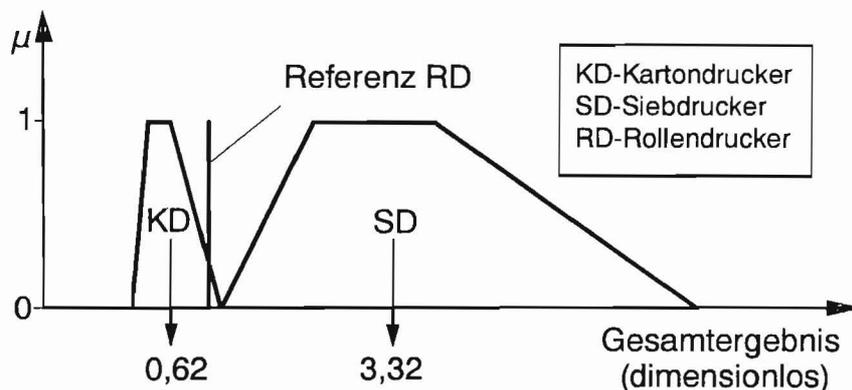


Bild 6.1: Grafische Darstellung der unscharfen Gesamtergebnisse des Kartondrucks und des Siebdrucks relativ zum Referenzdruck Rollendruck

Mit Hilfe der Dominanzanalyse werden diejenigen Prozesse und die damit verknüpften Energie- und Massendaten herausgefiltert, die die Umwelt, relativ zu den übrigen Strömen, besonders stark belasten.

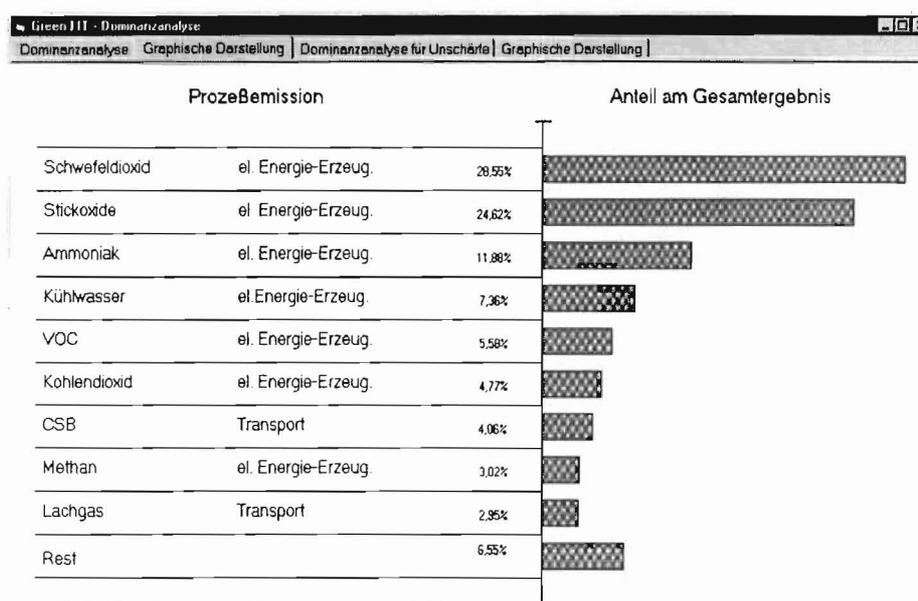


Bild 6.2: Green FIT-Ergebnisse der 'Dominanzanalyse' für Siebdruck'

Somit können gezielt und mit großer Effizienz hohe Umweltbelastungen reduziert oder gar abgestellt werden. Bild 6.2 zeigt auszugsweise die Ergebnisse der Dominanzanalyse für den Siebdruck. Das Gesamtergebnis beim Siebdrucker wird von Schwefeldioxid, Stickoxid und Ammoniak dominiert. Das Schwefeldioxid bei der elektrischen Energieerzeugung dominiert das Gesamt-Bewertungsergebnis des Siebdrucks im Vergleich zum Rollendruck mit einem Anteil von 28,55% (Bild 6.2). In Bild 6.3 sind auszugsweise die Ergebnisse der Unschärfe-Dominanzanalyse für die Siebdruck dargestellt. Schwefeldioxide, Stickoxide und Ammoniak beeinflussen mehr als eine Wirkungskategorie (siehe 5.5.2).

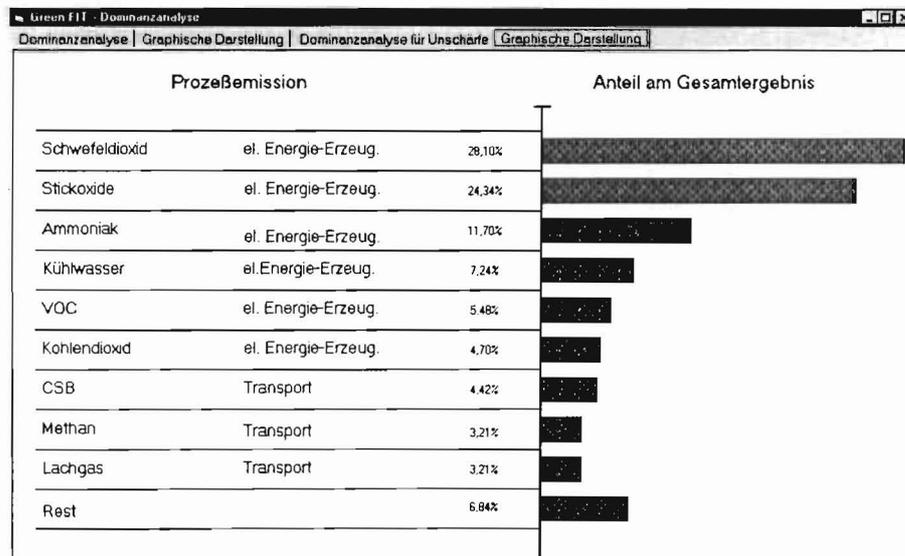


Bild 6.3: Green FIT-Ergebnisse der 'Dominanzanalyse für Unschärfe' für Siebdruck

In Bild 6.4 sind die normalisierten Wirkungskategorien für Kartondruck und Siebdruck zu dem Vergleichsdrucker Rollendruck angegeben. Beispielsweise beträgt der Treibhauseffekt des Kartondrucks und des Siebdrucks im Vergleich zum Rollendruck 27 Prozent bzw. 202 Prozent. Beim Siebdruck sind die Ergebnisse in allen Wirkungskategorien höher, in den fünf Kategorien Humantoxizität, Versauerung, Gestank, Abwärme, und Abfall sogar wesentlich höher als die des Referenzprozesses Rollendruck (alle Kategorien bei Referenzprozesses sind 100%). Beim Kartondruck übersteigen die Ergebnisse in den Kategorien Humantoxizität, Versauerung, Gestank, Abwärme, und Abfall nur leicht die des Rollendrucks, alle anderen Ergebnisse liegen unter denen des Referenzprozesses.

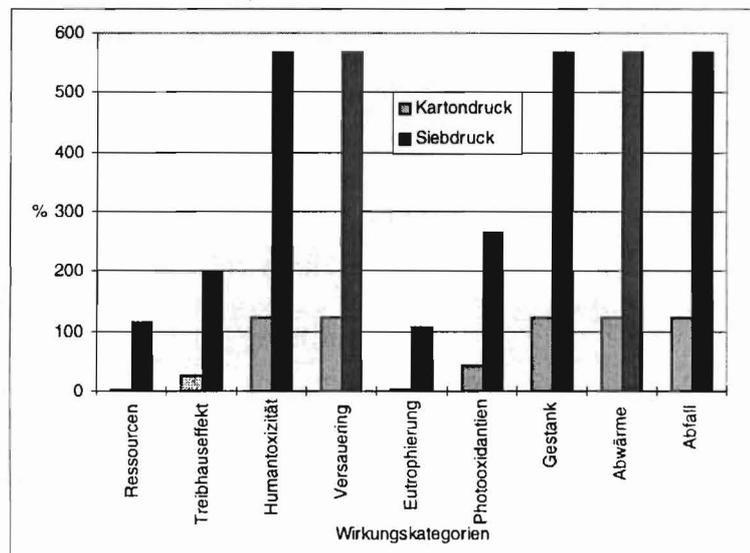


Bild 6.4: Normalisierte Wirkungskategorien für Kartondruck und Siebdruck

So, mit Hilfe des fuzzygestützten Bewertungsmodells zur Entwicklung umweltverträglicher Produkte und Prozesse bei unsicheren Eingangsinformationen und des Softwareprototypes Green Fit, wurde aufgezeigt, daß unter Berücksichtigung der angegebenen Randbedingungen, der Kartondruck im Vergleich zum Rollendruck und Siebdruck das umweltverträglichere Druckverfahren ist.

Fazit

7 Weiterentwicklung der Produkt-Ökobilanz und Ergebnisse

Die Weiterentwicklung der produktbezogenen Ökobilanz betrifft insbesondere die Verdichtung von unsicheren Eingangsinformationen, die als Fuzzy-Sets modelliert sind, und die Modifizierung der Auswertung hinsichtlich der Unsicherheitsanalyse.

Mit Hilfe des fuzzygestützten Bewertungsmodells kann das Gesamtergebnis einer produktbezogenen Ökobilanz mit einem gespannten Feld an Auswertemöglichkeiten untersucht werden. Die Angabe des Gesamtergebnisses als Fuzzy-Set beinhaltet sowohl einen skalaren defuzzifizierten Wert „Green Fitness“ als auch die Gesamtunschärfe bzw. Zuverlässigkeit. Mit dem Wert Green Fitness wird ein absoluter Vergleich von Produkt- oder Prozeßalternativen hinsichtlich der Umweltverträglichkeit ermöglicht. Hingegen zeigt der Vergleich der Gesamtunschärfe an, ob die skalaren Werte tatsächlich eine eindeutige Entscheidung hinsichtlich der Produkt- oder Prozeßauswahl zulassen. Beispielsweise überschneiden sich die als Fuzzy-Sets modellierten Unsicherheitsbereiche der hinsichtlich der Umweltverträglichkeit beim Wellenlöten untersuchten THD- und THD/SMD-Platine nur geringfügig. Der Green Fitness-Wert der THD-Platine von 2,2 gegenüber 0,94 bei der THD/SMD-Platine läßt demnach eine eindeutige Entscheidung zugunsten der letztgenannten zu. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wirkt die Dominanzanalyse unterstützend beim Herausfiltern von dominanten Energie- und Massenströmen sowie dominanten Unsicherheiten bei den Strömen. Mit Hilfe der modifizierten Ideellen Analyse werden diejenigen Energie- und Massenströme ermittelt, die extrem sensibel auf geringe Schwankungen reagieren und so ein erhebliches Risikopotential darstellen. Auf Basis dieser Auswertemöglichkeiten können gezielt erfolgversprechende ökologische Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Aus dem erarbeiteten fuzzygestützten Wirkungsabschätzungs- und Auswertemodell ergeben sich folgende Nutzen:

- Zeit- und Kostenersparnis
- Minimieren von Verschwendung
- Vermindern von Umwelt- und Haftungsrisiken

Zeit- und Kostenersparnis

Aufgrund der genannten Auswertemöglichkeiten kann die Sachbilanz grob und damit wenig zeit- und kostenintensiv abgeschätzt werden. Das als Fuzzy-Set dargestellte Gesamtergebnis des fuzzygestützten Bewertungsmodells zeigt an, ob z.B. einer der hinsichtlich der Umweltverträglichkeit zu vergleichenden Prozesse zu bevorzugen ist oder ob auf Basis der groben Schätzung keine eindeutige Aussage möglich ist.

Für den letzteren Fall werden mit der Unsicherheits-Dominanzanalyse diejenigen Energie- und Massenströme herausgefiltert, die maßgeblich für die Unschärfe des Bewertungsergebnisses verantwortlich sind. Die ermittelten Ströme sind dann in einer zweiten Schleife z.B. durch Messung oder Befragung von mehreren Experten genauer einzugrenzen.

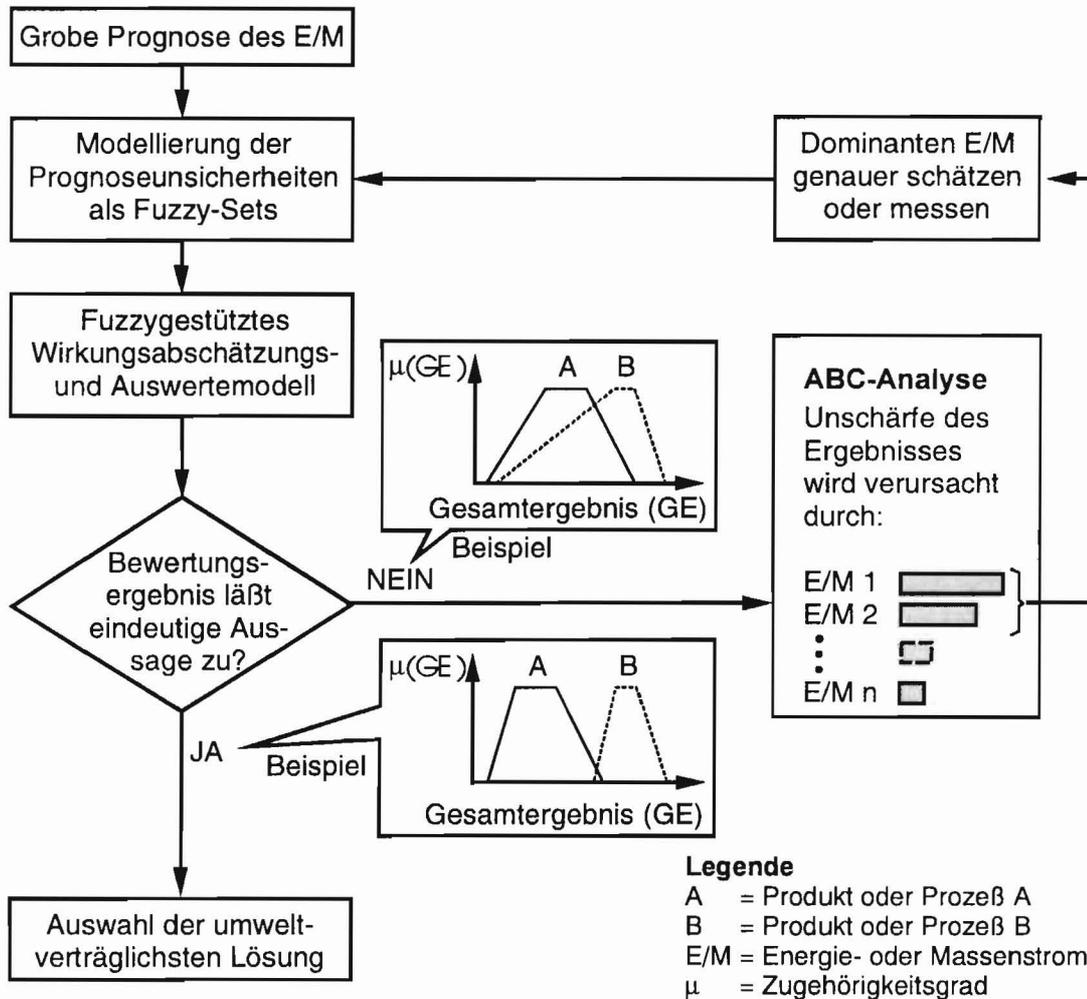


Bild 7.1: Iterationsschleife zur Auswahl umweltverträglicher Produkt- oder Prozesse

Diese Iterationsschleife wird solange durchlaufen, bis das Produkt oder der Prozeß mit der geringsten anzunehmenden Umweltbelastung eindeutig ausgewählt werden kann (Bild 7.1).

Durch dieses iterative Abschätzen müssen nicht von vornherein alle Energie- und Massenströme mit möglichst geringer Unsicherheit bestimmt werden. Es genügt in vielen Fällen, sich auf wenige, die Unschärfe des Gesamtergebnis dominierende Ströme zu beschränken.

Insgesamt ist zu erwarten, daß der Aufwand für eine Produkt-Ökobilanz mit Hilfe des erarbeiteten fuzzygestützten Bewertungsmodells gegenüber dem bisher üblichen Vorgehen geringer wird. Zwar steigt der Aufwand in erster Instanz durch die Modellierung von Unsicherheiten mit Fuzzy-Sets. Dies wird aber in aller Regel durch die Möglichkeit, grobe Abschätzungen vorzunehmen und dann gezielt diejenigen Sachbilanzdaten auszuwählen, die die Gesamtunschärfe dominieren, zumindest aufgewogen.

Vermeiden von Verschwendung

Mit Hilfe der Dominanzanalyse werden diejenigen Prozesse und die damit verknüpften Energie- und Massendaten herausgefiltert, die die Umwelt, relativ zu den übrigen Strömen, besonders stark belasten. Somit können gezielt und mit großer Effizienz

hohe Umweltbelastungen reduziert oder gar abgestellt werden. Beispielsweise zeigt die Dominanzanalyse bei den THD- und THD/SMD-Versuchsplatinen an, daß das Gesamtergebnis beim Wellenlöten vom Energieeinsatz dominiert wird (Tabelle 7.1). Ökologische Verbesserungsmaßnahmen für den betrachteten Prozeß Wellenlöten sind demzufolge bezüglich des Energieeinsatzes zu treffen.

Anteile am Gesamtergebnis (GE)	Energie in %	Flußmittel in %	Lotkrätze in %	Lotmasse in %
Dominanzanalyse Gesamtergebnis THD-Platine	65,9	10,3	13,9	9,9
Dominanzanalyse Gesamtergebnis THD/SMD-Platine	63,5	9,9	13,4	13,2

Tabelle 7.1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Dominanzanalyse

Vermindern von Umwelt- und Haftungsrisiken

Umwelt- und Haftungsrisiken treten unter anderem dann auf, wenn geringe Schwankungen der Sachbilanzdaten sehr große Umweltauswirkungen nach sich ziehen. Prozesse, bei denen solche Energie- oder Massenströme auftreten, sollten vermieden, zumindest jedoch streng überwacht werden. Die Informationen über derartige kritische Prozesse werden mit Hilfe der Ideellen Analyse gewonnen. Beispielsweise entstehen bei Deponierung der beim Wellenlötprozeß anfallenden Lotkrätze Dioxine. Eine geringe Schwankung der Dioxinmenge nach oben führt zu einer im Vergleich zur Mengenzunahme exponentiell steigenden Umweltbelastung. Demzufolge muß zur Risikominimierung die Lotkrätzenentstehung durch geeignete Maßnahmen wie z.B. Löten unter Schutzgas möglichst gering gehalten werden.

Literaturverzeichnis

- [Alt95] ALTROCK, C.: *Fuzzy Logic*. München. Oldenbourg., Band 1 bis 3, 1995.
- [BZ97] BRÜGGEMANN, R., KAUNE, A., KLEIN, J. und ZELLNER, R: Anwendung der Hasse-Diagrammtechnik zur vergleichenden Bewertung von Umweltveränderungen. In: GDCh - Gesellschaft Deutscher Chemiker, Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie (Veranst.): *Ökobilanzen - Trends und Perspektiven : (Workshop, 26. Juni 1997, Frankfurt/M, Deutschland)*. – Tagungsband, S. 89-96.
- [BG95] BUNKE, D., EBERLE, U. und GRIESSHAMMER, R.: *Umweltziele statt Last-Minute-Umweltziele; Nationale und Internationale stoffbezogene Zielvorgaben*. Freiburg: Öko-Institut e.V., 1995.
- [Ges95] C. A. U. GmbH - Gesellschaft für Consulting und Analytik im Umweltbereich GmbH (Hrsg.): *Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien*. Berlin: C.A.U., 1995.
- [Dob88] DOBRINSKI, P.: *Physik für Ingenieure*. Stuttgart: Teubner, 1988.
- [Enq97] Enquete –Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ (Hrsg.): *Konzept Nachhaltigkeit : Fundamente für die Gesellschaft von morgen*. Bonn: Dt. Bundestag, Referat Öffentlichkeitsarbeit, 1997.
- [Eye96] EYERER, P. (Hrsg.): *Ganzheitliche Bilanzierung : Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen*. Berlin: Springer, 1996.
- [Goe95] GOEDKOOOP, M.: *The Eco-Indicator 95 / Netherlands agency for energy and the environment (Novem) / National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM)*. Amersfoort: PréConsultants, (Final Report Nr. 9523). – Projektabschlußbericht. National Reuse of Waste Research Programme, 1995.
- [Hei92] HEINZLER, M.: *Tabellenbuch Metall*. 38. Aufl. Haan: Europa Lehrmittel, 1992.
- [Hei92] HEIJUNGS, R.: *Environmental Life-Cycle-Assessment of Products. Guide and Backgrounds*. Leiden: CML, 1992.
- [HE90] HERRMANN, G. und EGERER, K.: *Handbuch der Leiterplattentechnik: Neue Verfahren, Neue Technologien*. Bd 2. Saulgau: Eugen G. Leuze, 1990.

- [HO93] HÜBLER, K. und OTTO-ZIMMERMANN, K.: *Bewertung der Umweltverträglichkeit*. Taunusstein: Eberhard Blottner, 1993.
- [IPCC95] IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg): *Climate Change 1994*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [PZ98] PERRONE, G., DIEGA, S. N. la. und ZINNO, A.: A Fuzzy Discret Event Simulator for Fuzzy Production Environment Analysis. In: *Annals of the CIRP* 47 (1998), Nr. 1 (48th General Assembly of CIRP, August 23-29, 1998, Athens, Greece).– Tagungsband, S. 405-408.
- [PR96] POHL, Ch. und ROS, M.: Sind Ökobilanzen präzise? Zum Einsatz von Fuzzy-Set-Theorie und Fehlerrechnung in LCA's. In: RANZE, C., TUMA, A., HILTY, L. M., HAASIS, H.-D. und HERZOG, O. (Hrsg.): *Intelligente Methoden zur Verarbeitung von Umweltinformationen*. Marburg: Metropolis, 1996, S. 121-136.
- [Poh97] POHL, Ch.: Unsichere Entscheide in Ökobilanzen. In: ETH Zürich, Institut für Energietechnik, Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt (Veranst.): *Unsicherheit und Ungenauigkeit in ökologischen Bewertungen (3. Diskussionsforum Ökobilanzen, 30. Oktober, 1996, Zürich, Schweiz)* – Tagungsband, S. 7-19.
- [Rie94] RIEDEL, E.: *Allgemeine und Anorganische Chemie: Ein Lehrbuch für Studenten mit Nebenfach Chemie*. Berlin: De Gruyter, 1994.
- [Sal93] SALSKI, A.: Fuzzy-Sets-Anwendungen in der Umweltforschung. In: REUSCH, B.: *Fuzzy Logic : Theorie und Praxis*. Berlin: Springer, 1993. S. 13-21.
- [SB96] SINGHOFEN, A., HEMMING, Ch., WEIDEMA, Bo P., GRISEL, L., BRETZ, Rolf., SMET, B. und RUSSELL, D.: Life Cycle Inventory Data: Development of a Common Format. In: *International Journal of LCA* 1 (1996), Nr. 3, S. 171-178.
- [Tra93] TRAEGER, D.: *Einführung in die Fuzzy-Logic*. Stuttgart: Teubner, 1993.
- [UBA95a] UBA – Umweltbundesamt.: *Ökobilanzen für Getränkeverpackungen*. Berlin: Umweltbundesamt, 1995 (UBA-Texte 52/97).
- [WW96] WEIDEMA, Bo P. und WESNAES, M.: Data quality management for life cycle inventories : an example of using data quality indicators. In: *Journal of Cleaner Production* 4 (1996), Nr. 3-4, S. 167-174.

Gesetze, Normen und Verordnungen

Norm-Entwurf DIN EN ISO 14040 und Beiblatt August 1996. *Umweltmanagement - Produkt-Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen.*

Norm ISO 14040 1997 Final Draft. *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.*

Anhang A

Fuzzy-Set-Modellierung von Unsicherheitsangaben

P_2	d _A	d _B	d _L	d _Z	b	h	h'
μ	0,60	0,80	1,60	0,61	1,35	0,64	0,65
s	0,05	0,01	0,01	0,05	0,15	0,03	0,08
S _{rel}	0,08	0,01	0,01	0,08	0,11	0,04	0,13
I _{0,5 Min}	0,96	0,99	1,00	0,96	0,95	0,98	0,94
I _{0,5 Max}	1,04	1,01	1,00	1,04	1,06	1,02	1,07
I _{2,5 Min}	0,83	0,97	0,98	0,83	0,78	0,91	0,75
I _{2,5 Max}	1,21	1,03	1,02	1,20	1,28	1,10	1,33
m _L	0,58	0,80	1,60	0,59	1,28	0,63	0,61
m _R	0,63	0,81	1,61	0,64	1,43	0,65	0,69
α	0,08	0,02	0,02	0,08	0,22	0,05	0,12
β	0,10	0,02	0,02	0,10	0,30	0,05	0,17

Tabelle A.1: Modellieren von Fuzzy-Sets gemäß Kapitel 5.1.1 für die Formelparameter d_A, d_B, d_L, d_Z, b, h, h' in mm der Platine P_2 aus Mittelwert und Standardabweichung von 100 Messungen

P_805	H	B	W
μ	0,490	0,980	1,100
s	0,005	0,050	0,050
S _{rel}	0,010	0,051	0,045
I _{0,5 Min}	0,995	0,975	0,978
I _{0,5 Max}	1,005	1,026	1,023
I _{2,5 Min}	0,975	0,887	0,898
I _{2,5 Max}	1,025	1,128	1,114
m _L	0,488	0,956	1,076
m _R	0,493	1,005	1,125
α	0,010	0,086	0,088
β	0,010	0,100	0,100

Tabelle A.2: Modellieren von Fuzzy-Sets gemäß Kapitel 5.1.1 für die Formelparameter H, B und W in mm der Platine P_805 aus Mittelwert und Standardabweichung von 50 Messungen

Anhang B

Berechnete Lotvolumina

Anschluß- typ		Formel
Rund DKL	m_L	$(d_{LL}^2 + d_{LL} d_{AL} - 2 d_{AR}^2) h_L \pi / 12 + (d_{BL}^2 - d_{AR}^2) b_L \pi / 4 + (d_{ZL}^2 - d_{AR}^2) h'_L \pi / 4$
	m_R	$(d_{LR}^2 + d_{LR} d_{AR} - 2 d_{AL}^2) h_R \pi / 12 + (d_{BR}^2 - d_{AL}^2) b_R \pi / 4 + (d_{ZR}^2 - d_{AL}^2) h'_R \pi / 4$
	α	$(d_{LL}^2 + d_{LL} d_{AL} - 2 d_{AR}^2) h_\alpha \pi / 12 + (2 d_{LL} d_{L\alpha} + d_{LL} d_{A\alpha} + d_{AL} d_{L\alpha} + 4 d_{AR} d_{A\beta}) h_L \pi / 12 + (d_{BL}^2 - d_{AR}^2) b_\alpha \pi / 4 + (2 d_{BL} d_{B\alpha} + 2 d_{AR} d_{A\beta}) b_L \pi / 4 + (d_{ZL}^2 - d_{AR}^2) h'_\alpha \pi / 4 + (2 d_{ZL} d_{Z\alpha} + 2 d_{AR} d_{A\beta}) h'_L \pi / 4$
	β	$(d_{LR}^2 + d_{LR} d_{AR} - 2 d_{AL}^2) h_\beta \pi / 12 + (2 d_{LR} d_{L\beta} + d_{LR} d_{A\beta} + d_{AR} d_{L\beta} + 4 d_{AL} d_{A\alpha}) h_R \pi / 12 + (d_{BR}^2 - d_{AL}^2) b_\beta \pi / 4 + (2 d_{BR} d_{B\beta} + 2 d_{AL} d_{A\alpha}) b_R \pi / 4 + (d_{ZR}^2 - d_{AL}^2) h'_\beta \pi / 4 + (2 d_{ZR} d_{Z\beta} + 2 d_{AL} d_{A\alpha}) h'_R \pi / 4$
SMD-Chip	m_L	$\frac{1}{2} \cdot b_{CL} \cdot h_{CGWL} \cdot w_{CGWL}$
	m_R	$\frac{1}{2} \cdot b_{CR} \cdot h_{CGWR} \cdot w_{CGWR}$
	α	$\frac{1}{2} \cdot (b_{CL} \cdot h_{CGWL} \cdot w_{CGW\alpha} + w_{CGWL} (b_{CL} \cdot h_{CGW\alpha} + h_{CGWL} \cdot b_{C\alpha}))$
	β	$\frac{1}{2} \cdot (b_{CR} \cdot h_{CGWR} \cdot w_{CGW\beta} + w_{CGWR} (b_{CR} \cdot h_{CGW\beta} + h_{CGWR} \cdot b_{C\beta}))$

Tabelle B.1: Berechnungsformeln für unscharfe Lotvolumina, Parameter aus den Tabellen A.1 bis A.2

		DKL	NDKL	DKL Rechteck	NDKL Rechteck	Chip	Gull- wing
Skalierungswert k	Gleichung (5.22)	0,31	0,13	0,06	1,0	0,77	0,08
Schwerpunktsfaktor S	Gleichung (5.23)	0,2	0,3	0,0	-0,17	0,1	0,4
Skalierungsfaktor λ	Gleichung (5.24)	0,372	0,169	0,06	1,0	0,847	0,112
Verschiebungskonstante Gleichung (5.27)	m_L	$0,43 \cdot x$	$0,53 \cdot x_s$	$0,94 \cdot x_s$	$0,34 \cdot x_s$	$0,05 \cdot x_s$	$0,49 \cdot x_s$
	m_R	$0,43 \cdot x$	$0,53 \cdot x_s$	$0,94 \cdot x_s$	$0,34 \cdot x_s$	$0,05 \cdot x_s$	$0,49 \cdot x_s$
	α	0	0	0	0	0	0
	β	0	0	0	0	0	0

Tabelle B.2: Parameter für die Ausgleichsrechnung für THDs mit runden (DKL und NDKL für P_1 bis P_4) und rechteckigen (DKL-Rechteck und NDKL-Rechteck für P_5) Anschlüssen und SMD-Chips und -Gullwings

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_N1	P_N2	P_N3	P_N4	P_N5	P_805	P_1206	P_SO14
m_L	61,71	30,46	45,01	67,66	144,92	38,42	15,01	31,35	41,33	58,08	159,06	150,25	83,04
m_R	81,43	34,96	53,03	86,90	146,77	44,56	16,08	33,77	47,12	72,16	175,61	164,95	87,57
α	33,92	7,70	13,56	32,66	3,31	10,43	1,84	4,29	10,38	23,12	28,57	25,78	6,60
β	38,93	8,97	15,88	39,38	3,33	12,31	2,11	4,63	11,25	26,56	34,51	30,59	7,31

Tabelle B.3: Mit Ausgleichsrechnung ermittelte Lotvolumina in mm^3 der Platinen P_1 bis P_5, P_N1 bis P_N5, P_805, P_1206 und P_SO14

Anhang C
Sachbilanz für die THD-, SMD- und THD/SMD-Platine aus Kapitel 6
 Energie- und Massenströme mit Software Umberto ermittelt
 Angaben in kg/tu, wenn nicht anders angegeben

Vollständige Sachbilanz	pro THD-Platine (9,7E-3 m ² und 420 Lötst.)				pro SMD-Platine (4,49E-3 m ² und 420 Lötst.)				pro THD/SMD-Platine (3,97E-3 m ² und 420 Lötst.)			
	m _L	m _L	α	β	m _L	m _L	α	β	m _L	m _L	α	β
el. Energie in kJ	358,63	434,06	95,68	157,84	165,93	200,83	44,27	73,03	144,00	180,00	36,00	72,00
INPUT:												
<i>Energieträger, primär</i>												
Kernenergie in kJ	4,45E+02	5,39E+02	1,19E+02	1,96E+02	2,06E+02	2,49E+02	5,50E+01	9,07E+01	1,82E+02	2,21E+02	4,86E+01	8,02E+01
Wasserkraft in kJ	2,11E+01	2,56E+01	5,63E+00	9,29E+00	9,77E+00	1,18E+01	2,61E+00	4,30E+00	8,64E+00	1,05E+01	2,31E+00	3,80E+00
<i>Rohstoffe in Lagerstätten (RiL)</i>												
<i>Energieträger (RiL)</i>												
Braunkohle (RiL)	2,79E-02	3,37E-02	7,44E-03	1,23E-02	1,29E-02	1,56E-02	3,44E-03	5,68E-03	1,14E-02	1,38E-02	3,04E-03	5,02E-03
Erdgas (RiL)	1,79E-03	2,16E-03	4,76E-04	7,86E-04	8,26E-04	1,00E-03	2,20E-04	3,64E-04	7,31E-04	8,85E-04	1,95E-04	3,22E-04
Erdöl (RiL)	4,75E-04	5,75E-04	1,27E-04	2,09E-04	2,20E-04	2,66E-04	5,86E-05	9,67E-05	1,94E-04	2,35E-04	5,18E-05	8,55E-05
Steinkohle (RiL)	1,05E-02	1,27E-02	2,81E-03	4,63E-03	4,87E-03	5,89E-03	1,30E-03	2,14E-03	4,30E-03	5,21E-03	1,15E-03	1,89E-03
<i>Nichtenergeträger (RiL)</i>												
Kalkstein	5,40E-04	6,53E-04	1,44E-04	2,38E-04	2,50E-04	3,02E-04	6,66E-05	1,10E-04	2,21E-04	2,67E-04	5,89E-05	9,72E-05
Wasser (unspez.)	2,20E+00	2,67E+00	5,88E-01	9,69E-01	1,02E+00	1,23E+00	2,72E-01	4,48E-01	9,01E-01	1,09E+00	2,40E-01	3,97E-01
OUTPUT												
<i>Abfälle zur Beseitigung (AzB)</i>												
Abraum (AzB)	1,75E-01	2,12E-01	4,68E-02	7,71E-02	8,11E-02	9,81E-02	2,16E-02	3,57E-02	7,17E-02	8,68E-02	1,91E-02	3,16E-02
Aschen & Schlacken (AzB)	1,37E-03	1,66E-03	3,65E-04	6,02E-04	6,33E-04	7,67E-04	1,69E-04	2,79E-04	5,60E-04	6,78E-04	1,49E-04	2,47E-04
Sondermüll (AzB)	2,46E-06	2,98E-06	6,56E-07	1,08E-06	1,14E-06	1,38E-06	3,04E-07	5,01E-07	1,01E-06	1,22E-06	2,69E-07	4,43E-07
<i>Abfälle zur Verwertung (AzV)</i>												
Aschen & Schlacken (AzV)	1,37E-03	1,66E-03	3,66E-04	6,04E-04	6,35E-04	7,69E-04	1,70E-04	2,80E-04	5,62E-04	6,80E-04	1,50E-04	2,47E-04
<i>Luftemissionen</i>												
Staub	4,29E-05	5,19E-05	1,14E-05	1,89E-05	1,98E-05	2,40E-05	5,29E-06	8,73E-06	1,76E-05	2,12E-05	4,68E-06	7,73E-06
Ammoniak	2,93E-07	3,55E-07	7,82E-08	1,29E-07	1,36E-07	1,64E-07	3,62E-08	5,97E-08	1,20E-07	1,45E-07	3,20E-08	5,28E-08
Chlorwasserstoff	1,89E-06	2,29E-06	5,04E-07	8,31E-07	8,74E-07	1,06E-06	2,33E-07	3,85E-07	7,73E-07	9,36E-07	2,06E-07	3,40E-07
Distickstoffmonoxid	6,39E-07	7,73E-07	1,70E-07	2,81E-07	2,96E-07	3,58E-07	7,88E-08	1,30E-07	2,61E-07	3,16E-07	6,97E-08	1,15E-07
Fluorwasserstoff	9,61E-08	1,16E-07	2,56E-08	4,23E-08	4,45E-08	5,38E-08	1,19E-08	1,96E-08	3,93E-08	4,76E-08	1,05E-08	1,73E-08
Kohlendioxid, fossil	6,14E-02	7,43E-02	1,64E-02	2,70E-02	2,84E-02	3,44E-02	7,57E-03	1,25E-02	2,51E-02	3,04E-02	6,70E-03	1,11E-02
Kohlenmonoxid	2,24E-05	2,71E-05	5,98E-06	9,87E-06	1,04E-05	1,26E-05	2,77E-06	4,57E-06	9,18E-06	1,11E-05	2,45E-06	4,04E-06
Stickoxide	7,88E-05	9,54E-05	2,10E-05	3,47E-05	3,65E-05	4,41E-05	9,73E-06	1,61E-05	3,23E-05	3,90E-05	8,61E-06	1,42E-05
Schwefeldioxid	6,28E-05	7,60E-05	1,68E-05	2,77E-05	2,91E-05	3,52E-05	7,76E-06	1,28E-05	2,57E-05	3,11E-05	6,86E-06	1,13E-05
Methan	1,55E-04	1,88E-04	4,14E-05	6,82E-05	7,17E-05	8,68E-05	1,91E-05	3,16E-05	6,34E-05	7,68E-05	1,69E-05	2,79E-05
NMVOG, unspez.	4,79E-06	5,80E-06	1,28E-06	2,11E-06	2,22E-06	2,69E-06	5,92E-07	9,76E-07	1,96E-06	2,38E-06	5,24E-07	8,64E-07
<i>Mineralien</i>												
Gips (REA)	9,69E-04	1,17E-03	2,59E-04	4,26E-04	4,48E-04	5,43E-04	1,20E-04	1,97E-04	3,97E-04	4,80E-04	1,06E-04	1,75E-04

Fortsetzung nächste Seite

<i>Wasser</i>												
Abwasser (Kühlwasser)	1,97E+00	2,39E+00	5,26E-01	8,68E-01	9,13E-01	1,10E+00	2,44E-01	4,02E-01	8,08E-01	9,77E-01	2,15E-01	3,55E-01
Abwasser, unspez.	1,32E-01	1,59E-01	3,51E-02	5,79E-02	6,09E-02	7,37E-02	1,62E-02	2,68E-02	5,38E-02	6,52E-02	1,44E-02	2,37E-02
Wasserdampf	9,77E-02	1,18E-01	2,61E-02	4,30E-02	4,52E-02	5,47E-02	1,21E-02	1,99E-02	4,00E-02	4,84E-02	1,07E-02	1,76E-02
Lot	3,55E-03	4,45E-03	3,55E-03	3,88E-03	1,44E-03	1,55E-03	6,77E-05	7,37E-05	2,36E-03	2,84E-03	1,66E-03	1,82E-03
Kupfer	3,47E-06	4,36E-06	3,47E-06	3,81E-06	1,41E-06	1,52E-06	6,64E-08	7,23E-08	2,31E-06	2,78E-06	1,62E-06	1,78E-06
Zink	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08	1,44E-08	1,55E-08	6,77E-10	7,37E-10	2,36E-08	2,84E-08	1,66E-08	1,82E-08
Cadmium	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08	1,44E-08	1,55E-08	6,77E-10	7,37E-10	2,36E-08	2,84E-08	1,66E-08	1,82E-08
Antimon	1,06E-07	1,34E-07	1,06E-07	1,17E-07	4,31E-08	4,65E-08	2,03E-09	2,21E-09	7,07E-08	8,51E-08	4,97E-08	5,45E-08
Arsen	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08	1,44E-08	1,55E-08	6,77E-10	7,37E-10	2,36E-08	2,84E-08	1,66E-08	1,82E-08
Eisen	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08	1,44E-08	1,55E-08	6,77E-10	7,37E-10	2,36E-08	2,84E-08	1,66E-08	1,82E-08
Bismut	5,32E-07	6,68E-07	5,32E-07	5,83E-07	2,15E-07	2,32E-07	1,02E-08	1,11E-08	3,53E-07	4,25E-07	2,49E-07	2,72E-07
Aluminium	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08	1,44E-08	1,55E-08	6,77E-10	7,37E-10	2,36E-08	2,84E-08	1,66E-08	1,82E-08
Silber	1,42E-07	1,78E-07	1,42E-07	1,55E-07	5,74E-08	6,20E-08	2,71E-09	2,95E-09	9,43E-08	1,13E-07	6,63E-08	7,26E-08
Gold	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08	1,44E-08	1,55E-08	6,77E-10	7,37E-10	2,36E-08	2,84E-08	1,66E-08	1,82E-08
Nickel	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08	1,44E-08	1,55E-08	6,77E-10	7,37E-10	2,36E-08	2,84E-08	1,66E-08	1,82E-08
Indium	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08	1,44E-08	1,55E-08	6,77E-10	7,37E-10	2,36E-08	2,84E-08	1,66E-08	1,82E-08
Zinn	2,05E-03	2,58E-03	2,05E-03	2,25E-03	8,31E-04	8,97E-04	3,92E-05	4,27E-05	1,36E-03	1,64E-03	9,60E-04	1,05E-03
Blei	1,49E-03	1,87E-03	1,49E-03	1,63E-03	6,02E-04	6,50E-04	2,84E-05	3,09E-05	9,89E-04	1,19E-03	6,96E-04	7,62E-04
Flußmittel												
Masse in kg	2,91E-04	3,85E-04	9,98E-05	2,01E-04	1,35E-04	1,78E-04	4,62E-05	9,29E-05	1,20E-04	1,60E-04	4,00E-05	8,00E-05
Kolophonium	1,46E-04	1,92E-04	4,99E-05	1,00E-04	6,73E-05	8,90E-05	2,31E-05	4,65E-05	6,00E-05	8,00E-05	2,00E-05	4,00E-05
Isopropylalkohol	1,16E-04	1,54E-04	3,99E-05	8,03E-05	5,39E-05	7,12E-05	1,85E-05	3,72E-05	4,80E-05	6,40E-05	1,60E-05	3,20E-05
Hilfsstoffe, unspez.	2,91E-05	3,85E-05	9,98E-06	2,01E-05	1,35E-05	1,78E-05	4,62E-06	9,29E-06	1,20E-05	1,60E-05	4,00E-06	8,00E-06
Lotkrätze, Aschen/Schlacken												
Masse Aschen/Schlacken	1,37E-03	1,66E-03	3,65E-04	6,02E-04	6,33E-04	7,67E-04	1,69E-04	2,79E-04	5,60E-04	6,78E-04	1,49E-04	2,47E-04
Masse Krätze	1,49E-03	2,33E-03	6,60E-04	1,86E-03	6,90E-04	1,08E-03	3,10E-04	8,60E-04	6,10E-04	9,50E-04	2,70E-04	7,60E-04
Summe:	2,86E-03	3,99E-03	1,03E-03	2,46E-03	1,32E-03	1,85E-03	4,79E-04	1,14E-03	1,17E-03	1,63E-03	4,19E-04	1,01E-03
INPUT:												
Diesel	1,42E-06	1,98E-06	5,08E-07	1,22E-06	6,56E-07	9,16E-07	2,37E-07	5,65E-07	5,80E-07	8,07E-07	2,08E-07	4,99E-07
elektr. Energie in kJ	4,84E-06	6,75E-06	1,74E-06	4,17E-06	2,24E-06	3,13E-06	8,11E-07	1,93E-06	1,98E-06	2,76E-06	7,10E-07	1,70E-06
Hilfsstoffe, unspez.	5,02E-08	7,00E-08	1,80E-08	4,33E-08	2,32E-08	3,24E-08	8,41E-09	2,00E-08	2,06E-08	2,86E-08	7,37E-09	1,77E-08
OUTPUT												
<i>Luftmissionen</i>												
Staub	6,34E-09	8,84E-09	2,27E-09	5,46E-09	2,93E-09	4,09E-09	1,06E-09	2,52E-09	2,59E-09	3,61E-09	9,30E-10	2,23E-09
Chlorwasserstoff	4,72E-12	6,58E-12	1,69E-12	4,07E-12	2,18E-12	3,05E-12	7,91E-13	1,88E-12	1,93E-12	2,69E-12	6,93E-13	1,66E-12

Fortsetzung nächste Seite

Distickstoffmonoxid	5,58E-12	7,78E-12	2,00E-12	4,81E-12	2,58E-12	3,60E-12	9,35E-13	2,22E-12	2,28E-12	3,18E-12	8,19E-13	1,96E-12
Fluorwasserstoff	3,63E-13	5,06E-13	1,30E-13	3,13E-13	1,68E-13	2,35E-13	6,08E-14	1,45E-13	1,49E-13	2,07E-13	5,33E-14	1,28E-13
Kohlendioxid, fossil	4,50E-06	6,28E-06	1,61E-06	3,88E-06	2,08E-06	2,91E-06	7,54E-07	1,79E-06	1,84E-06	2,56E-06	6,61E-07	1,59E-06
Kohlenmonoxid	2,40E-08	3,35E-08	8,60E-09	2,07E-08	1,11E-08	1,55E-08	4,02E-09	9,56E-09	9,82E-09	1,37E-08	3,52E-09	8,45E-09
Stickoxide	6,87E-08	9,57E-08	2,46E-08	5,91E-08	3,18E-08	4,43E-08	1,15E-08	2,73E-08	2,81E-08	3,91E-08	1,01E-08	2,42E-08
Schwefeldioxid	6,34E-09	8,84E-09	2,27E-09	5,46E-09	2,93E-09	4,09E-09	1,06E-09	2,52E-09	2,59E-09	3,61E-09	9,30E-10	2,23E-09
Methan	1,24E-09	1,73E-09	4,46E-10	1,07E-09	5,75E-10	8,03E-10	2,08E-10	4,95E-10	5,09E-10	7,08E-10	1,82E-10	4,38E-10
NMVOC, un spez.	1,27E-08	1,77E-08	4,55E-09	1,09E-08	5,88E-09	8,20E-09	2,13E-09	5,06E-09	5,20E-09	7,23E-09	1,86E-09	4,47E-09
<i>Wasseremissionen</i>												
Arsen	4,47E-12	6,23E-12	1,60E-12	3,85E-12	2,07E-12	2,89E-12	7,49E-13	1,78E-12	1,83E-12	2,54E-12	6,56E-13	1,57E-12
Blei	1,81E-10	2,52E-10	6,47E-11	1,56E-10	8,36E-11	1,17E-10	3,02E-11	7,19E-11	7,39E-11	1,03E-10	2,65E-11	6,36E-11
Cadmium	3,58E-12	4,99E-12	1,28E-12	3,08E-12	1,65E-12	2,31E-12	5,99E-13	1,42E-12	1,46E-12	2,04E-12	5,25E-13	1,26E-12
Chrom	2,86E-11	3,99E-11	1,03E-11	2,46E-11	1,32E-11	1,85E-11	4,79E-12	1,14E-11	1,17E-11	1,63E-11	4,20E-12	1,01E-11
Kupfer	1,00E-10	1,40E-10	3,60E-11	8,64E-11	4,64E-11	6,48E-11	1,68E-11	4,00E-11	4,11E-11	5,71E-11	1,47E-11	3,53E-11
Nickel	1,61E-11	2,24E-11	5,77E-12	1,39E-11	7,45E-12	1,04E-11	2,70E-12	6,41E-12	6,59E-12	9,16E-12	2,36E-12	5,66E-12
Quecksilber	1,79E-12	2,49E-12	6,41E-13	1,54E-12	8,27E-13	1,15E-12	2,99E-13	7,12E-13	7,32E-13	1,02E-12	2,62E-13	6,29E-13
Zink	2,02E-10	2,82E-10	7,25E-11	1,74E-10	9,36E-11	1,31E-10	3,39E-11	8,05E-11	8,28E-11	1,15E-10	2,97E-11	7,12E-11
Ammonium	1,18E-09	1,64E-09	4,22E-10	1,01E-09	5,44E-10	7,59E-10	1,97E-10	4,68E-10	4,81E-10	6,70E-10	1,73E-10	4,14E-10
Nitrat	8,04E-10	1,12E-09	2,88E-10	6,93E-10	3,72E-10	5,20E-10	1,35E-10	3,20E-10	3,29E-10	4,58E-10	1,18E-10	2,83E-10
Nitrit	1,79E-10	2,49E-10	6,41E-11	1,54E-10	8,27E-11	1,15E-10	2,99E-11	7,12E-11	7,32E-11	1,02E-10	2,62E-11	6,29E-11
<i>Kohlenwasserstoffe (in Wasser)</i>												
Benzo(a)pyren	3,34E-13	4,66E-13	1,20E-13	2,88E-13	1,55E-13	2,16E-13	5,60E-14	1,33E-13	1,37E-13	1,90E-13	4,90E-14	1,18E-13
Phenole	4,18E-09	5,83E-09	1,50E-09	3,60E-09	1,93E-09	2,70E-09	7,00E-10	1,66E-09	1,71E-09	2,38E-09	6,13E-10	1,47E-09
<i>Stoffe, org., halogeniert (in Wasser)</i>												
Dioxine	3,01E-19	4,20E-19	1,08E-19	2,59E-19	1,39E-19	1,94E-19	5,04E-20	1,20E-19	1,23E-19	1,71E-19	4,41E-20	1,06E-19
Stoffe, org., halogeniert, un spez.	1,67E-12	2,33E-12	5,99E-13	1,44E-12	7,74E-13	1,08E-12	2,80E-13	6,66E-13	6,84E-13	9,52E-13	2,45E-13	5,88E-13
<i>Indikatorparameter (Wasser)</i>												
AOX	4,26E-11	5,94E-11	1,53E-11	3,67E-11	1,97E-11	2,75E-11	7,14E-12	1,70E-11	1,74E-11	2,43E-11	6,25E-12	1,50E-11
CSB	4,40E-08	6,13E-08	1,58E-08	3,79E-08	2,04E-08	2,84E-08	7,37E-09	1,75E-08	1,80E-08	2,50E-08	6,45E-09	1,55E-08
Wasser												
Sickerwasser	1,79E-03	2,49E-03	6,41E-04	1,54E-03	8,27E-04	1,15E-03	2,99E-04	7,12E-04	7,32E-04	1,02E-03	2,62E-04	6,29E-04
Flächenbedarf	Berechnung in Tabelle C.4											
Lärm	Berechnung in Tabelle C.5											
Abwärme	Berechnung in Tabelle C.6											

Tabelle C.1: Vollständige Sachbilanz für die SMD-, THD- und THD/SMD-Platine aus Kapitel 6.1

Ressource	Prozeß	THD-Platine: Masse in kg / fu			
		m_L	m_R	α	β
Braunkohle	el. Energie-Erzeug.	2,79E-02	3,37E-02	7,44E-03	1,23E-02
Erdgas	el. Energie-Erzeug.	1,79E-03	2,16E-03	4,76E-04	7,86E-04
Erdöl	el. Energie-Erzeug.	4,75E-04	5,75E-04	1,27E-04	2,09E-04
Steinkohle	el. Energie-Erzeug.	1,05E-02	1,27E-02	2,81E-03	4,63E-03
Kalkstein	el. Energie-Erzeug.	5,40E-04	6,53E-04	1,44E-04	2,38E-04
Kupfer	Löten	3,47E-06	4,36E-06	3,47E-06	3,81E-06
Zink	Löten	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08
Cadmium	Löten	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08
Antimon	Löten	1,06E-07	1,34E-07	1,06E-07	1,17E-07
Arsen	Löten	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08
Eisen	Löten	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08
Bismut	Löten	5,32E-07	6,68E-07	5,32E-07	5,83E-07
Aluminium	Löten	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08
Silber	Löten	1,42E-07	1,78E-07	1,42E-07	1,55E-07
Gold	Löten	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08
Nickel	Löten	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08
Indium	Löten	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08
Zinn	Löten	2,05E-03	2,58E-03	2,05E-03	2,25E-03
Blei	Löten	1,49E-03	1,87E-03	1,49E-03	1,63E-03

Tabelle C.2: Sachbilanzgliederungspunkt „Ressourcen“ für die THD-Platine

Bezeichnung (primäre Zuordnung)	Anmerkung	Sekundäre Zuordnung	Tertiäre Zuordnung	Quartäre Zuordnung	Prozeß	Medium	Arbeits- platz	Masse in kg / fu			
								m _L	m _R	α	β
Ammoniak					el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	2,93E-07	3,55E-07	7,82E-08	1,29E-07
Kohlenw. chloriert		Kohlenw. chloriert	Kohlenw. halog.	Kohlenw.	el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	1,89E-06	2,29E-06	5,04E-07	8,31E-07
Lachgas	Distickstoffmonoxid				el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	6,39E-07	7,73E-07	1,70E-07	2,81E-07
Kohlenw. halog.		Kohlenw. halog.	Kohlenw.		el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	9,61E-08	1,16E-07	2,56E-08	4,23E-08
Kohlendioxid					el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	6,14E-02	7,43E-02	1,64E-02	2,70E-02
Kohlenmonoxid					el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	2,24E-05	2,71E-05	5,98E-06	9,87E-06
Stickoxide		Stickoxide			el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	7,88E-05	9,54E-05	2,10E-05	3,47E-05
Schwefeldioxid					el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	6,28E-05	7,60E-05	1,68E-05	2,77E-05
Methan					el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	1,55E-04	1,88E-04	4,14E-05	6,82E-05
VOC					el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	4,79E-06	5,80E-06	1,28E-06	2,11E-06
Kolophonium					Fluxen	Luft	ja	1,46E-04	1,92E-04	4,99E-05	1,00E-04
Isopropylalkohol		Alkohole			Fluxen	Luft	ja	1,16E-04	1,54E-04	3,99E-05	8,03E-05
Kohlenw. chloriert		Kohlenw. chloriert	Kohlenw. halog.	Kohlenw.	Deponierung Schlacken	Luft	nein	4,72E-12	6,58E-12	1,69E-12	4,07E-12
Lachgas					Deponierung Schlacken	Luft	nein	5,58E-12	7,78E-12	2,00E-12	4,81E-12
Kohlenw. halog.		Kohlenw. halog.	Kohlenw.		Deponierung Schlacken	Luft	nein	3,63E-13	5,06E-13	1,30E-13	3,13E-13
Kohlendioxid					Deponierung Schlacken	Luft	nein	4,50E-06	6,28E-06	1,61E-06	3,88E-06
Kohlenmonoxid					Deponierung Schlacken	Luft	nein	2,40E-08	3,35E-08	8,60E-09	2,07E-08
Stickoxide					Deponierung Schlacken	Luft	nein	6,87E-08	9,57E-08	2,46E-08	5,91E-08
Schwefeldioxid					Deponierung Schlacken	Luft	nein	6,34E-09	8,84E-09	2,27E-09	5,46E-09
Methan					Deponierung Schlacken	Luft	nein	1,24E-09	1,73E-09	4,46E-10	1,07E-09
VOC					Deponierung Schlacken	Luft	nein	1,27E-08	1,77E-08	4,55E-09	1,09E-08
Arsen					Deponierung Schlacken	Wasser	nein	4,47E-12	6,23E-12	1,60E-12	3,85E-12
Blei					Deponierung Schlacken	Wasser	nein	1,81E-10	2,52E-10	6,47E-11	1,56E-10
Cadmium					Deponierung Schlacken	Wasser	nein	3,58E-12	4,99E-12	1,28E-12	3,08E-12
Chrom					Deponierung Schlacken	Wasser	nein	2,86E-11	3,99E-11	1,03E-11	2,46E-11
Kupfer					Deponierung Schlacken	Wasser	nein	1,00E-10	1,40E-10	3,60E-11	8,64E-11
Nickel					Deponierung Schlacken	Wasser	nein	1,61E-11	2,24E-11	5,77E-12	1,39E-11
Quecksilber					Deponierung Schlacken	Wasser	nein	1,79E-12	2,49E-12	6,41E-13	1,54E-12
Zink					Deponierung Schlacken	Wasser	nein	2,02E-10	2,82E-10	7,25E-11	1,74E-10
Ammonium					Deponierung Schlacken	Wasser	nein	1,18E-09	1,64E-09	4,22E-10	1,01E-09
Nitrat					Deponierung Schlacken	Wasser	nein	8,04E-10	1,12E-09	2,88E-10	6,93E-10
Nitrit					Deponierung Schlacken	Wasser	nein	1,79E-10	2,49E-10	6,41E-11	1,54E-10
Benzo(a)pyren		Kohlenw. polycycl. arom.	Kohlenw. arom.	Kohlenw.	Deponierung Schlacken	Wasser	nein	3,34E-13	4,66E-13	1,20E-13	2,88E-13
Phenole		Kohlenw. arom.	Kohlenw.		Deponierung Schlacken	Wasser	nein	4,18E-09	5,83E-09	1,50E-09	3,60E-09
Dioxine		TEQ	Kohlenw. arom.		Deponierung Schlacken	Wasser	nein	3,01E-19	4,20E-19	1,08E-19	2,59E-19
Stoffe, org., halog	unspezifiziert	Kohlenw. halog.	Kohlenw.		Deponierung Schlacken	Wasser	nein	1,67E-12	2,33E-12	5,99E-13	1,44E-12
CSB	Indikator	COD			Deponierung Schlacken	Wasser	nein	4,40E-08	6,13E-08	1,58E-08	3,79E-08

Tabelle C.3: Sachbilanzgliederungspunkt „Stoffe“ für die THD-Platine

Bezeichnung	Produktionsvolumen in fu/a				Flächengröße in m ²				Hemerobiestufe
	m _{L1}	m _{R1}	α ₁	β ₁	m _{L2}	m _{R2}	α ₂	β ₂	
Schlackendeponie	./.	./.	./.	./.	9,43E-06	1,32E-05	3,38E-06	8,13E-06	6
Sondermülldeponie	./.	./.	./.	./.	8,12E-09	9,83E-09	2,17E-09	3,57E-09	7
Lötanlage mit Vorstationen	3,32E+06	4,01E+06	8,85E+05	1,46E+06	3,00E+00	4,00E+00	5,00E-01	1,00E+00	7

Tabelle C.4: Sachbilanzgliederungspunkt „Flächenbedarf“ für die THD-Platine

Berechnung der Tabellenwerte C.4:

Der Sachbilanzgliederungspunkt Flächenbedarf enthält folgender Daten:

- Bezeichnung der Fläche,
- Jährliches Produktionsvolumen auf der Fläche i in funktionellen Einheiten (fu) pro Jahr als unscharfe Zahl in LR-Darstellung (Eine Angabe entfällt, wenn auf der Fläche nichts produziert wird wie beispielsweise bei Deponien),
- Größe der Fläche in m² als unscharfe Zahl in LR-Darstellung,
- Bodengebrauchsstufe (Hemerobiestufe) der Fläche (dimensionslos).

Die Flächengröße der Lötanlage mit Vorstationen wurde geschätzt.

Das jährliche flächenbezogene Produktionsvolumen wurde Tabelle 5.3 entnommen und beträgt 35.400 m² fu/a

Dividiert durch die Fläche einer THD Platine = 3.649.484,5 fu/a

Dividiert durch die Fläche einer SMD Platine = 7.884.187,1 fu/a

Dividiert durch die Fläche einer THD/SMD-Platine = 8.916.876,6 fu/a

Mit einer Fehlerschätzung von 20% ergeben sich nach Kap. 5.1 oben genannte Fuzzy-Sets für die Lötanlage mit Vorstation.

Prozeß	Ort der Emiss.	Arb.-platz	Art	Dauer in h/fu				Schallpegel in dB			
				m _{L1}	m _{R1}	α ₁	β ₁	m _{L2}	m _{R2}	α ₂	β ₂
Abluftabsaugung	Halle	ja	kont.	5,03E-04	6,07E-04	1,34E-04	2,21E-04	60	65	5	5

Tabelle C.5: Sachbilanzgliederungspunkt „Lärm“ für die THD-Platine

Berechnung der Tabellenwerte C.5:

Der Sachbilanzgliederungspunkt Lärm enthält folgender Daten

- Angabe des Prozesses bei dem Lärm emittiert wird
- Angaben über den Ort der Emission zur genaueren Kennzeichnung (Lärm durch Abluftanlagen kann beispielsweise an mehreren Orten auftreten)
- Angabe darüber, ob der Lärm am Arbeitsplatz freigesetzt wird
- Art des Lärms (periodisch (per.) oder kontinuierlich (kont.))
- Dauer des Lärms in Stunden pro funktionelle Einheit als unscharfe Zahl in LR-Darstellung in der Form (m_{L1}, m_{R1}, α₁, β₁)_{LR}
- Schallpegel des Lärms in dB, als unscharfe Zahl in LR-Darstellung in der Form (m_{L2}, m_{R2}, α₂, β₂)_{LR}

Über das Produktionsvolumen aus Tabelle 5.3 kann die benötigte Zeit pro funktioneller Einheit abgeschätzt werden. Der Schallpegel wurde geschätzt.

Prozeß	Abwärme in MJ/fu			
	m _L	m _R	α	β
el. Energieerzeugung (Kühlwasser)	2,47E-02	2,99E-02	6,60E-03	1,09E-02

Tabelle C.6: Sachbilanzgliederungspunkt „Abwärme“ für die THD-Platine

Erklärung zur Berechnung der Tabellenwerte C.6:

Unter Abwärme wird die Abgabe von Wärme über Abwässer verstanden. Energie in Form von Hitze, die in die Atmosphäre emittiert wird, ist zu vernachlässigen, da die anthropologischen im Vergleich zu den natürlichen Wärmequellen nur geringen Einfluß auf die Ökosphäre haben [HEIJUNGS 1992].

Die Abwärme wird mit Hilfe der Formel $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$ berechnet.

Für die Masse m des Kühlwassers werden die Werte aus Tabelle C.1 „Elektrische Energieerzeugung, Abwasser (Kühlwasser)“ verwendet. Für die spezifische Wärmekapazität von Wasser wird $c_p = 4,18 \text{ J/kg K}$ angenommen [DOBRINSKI 1988].

Für die Temperaturdifferenz ΔT wird 3 K angenommen, da Kühlwasser im allgemeinen zwischen 2 bis 3 K wärmer als das Flußwasser ist.

Abfall	Prozeß	Masse in kg/fu				Entsorgung	Umweltbelastungen
		m _L	m _R	α	β		
Aschen und Schlacken	el. Energieerzeugung	1,37E-03	1,66E-03	3,65E-04	6,02E-04	Schlackendeponie	Schlackendeponie-Transition
Sondermüll	el. Energieerzeugung	2,46E-06	2,98E-06	6,56E-07	1,08E-06	Sondermüll	keine bei richtiger Lagerung
Krätze	Löten	1,49E-03	2,33E-03	6,60E-04	1,86E-03	Schlackendeponie	Schlackendeponie-Transition

Tabelle C.7: Sachbilanzgliederungspunkt „Abfall“ für die THD-Platine

Berechnung der Tabellenwerte C.7:

Die durch Abfall verursachten Umweltbelastungen, die beispielsweise beim Deponieren und Verbrennen von Hausmüll entstehen, sind in den Sachbilanzgliederungspunkten Ressourcen, Stoffe, Flächenbedarf, Lärm, Abwärme und Naturschutz zu erfassen.

Somit könnte die Kategorie Abfall entfallen – dies würde jedoch zu folgendem Effekt führen: Gefährliche Abfälle, die ordnungsgemäß auf Sondermülldeponien beispielsweise in verschlossenen Behältnissen endgelagert werden, verursachen lediglich Flächenbedarf, jedoch keine weiteren Umweltbelastungen wie sie z.B. bei der Hausmüllverbrennung entstehen. Dies hätte zur Konsequenz, daß das Ergebnis der Ökobilanz um so besser wäre, je mehr Sondermüll anfiel. Es ist weder wirtschaftlich noch umweltverträglich, wenn möglichst viel Sondermüll produziert oder knapper und teurer Sondermülldeponieraum mit haushaltsähnlichen Abfällen gefüllt wird. Deshalb wird bei der Charakterisierung ein Abfallindikator berechnet, mit dessen Hilfe erkannt werden kann, ob zuviel Müll - insbesondere Sondermüll - entsteht.

Anhang D

Filtertabellen zur Klassifizierung der Sachbilanz

Wirkungskategorie Ressourcen						
Ressource	Verbrauch je a in Mio. kg	Reserven in Mio. kg	RV in 1/a	Quelle	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
Blei	5.800	85.000	0,0682	[RIEDEL 1994]	17,73	17,73
Zinn	230	4.500	0,0511	[RIEDEL 1994]	13,28	31,01
Zink	7	147	0,0476	[EYERER 1996]	12,37	43,38
Wolfram	43	1.500	0,0287	[RIEDEL 1994]	7,46	50,84
Talkum	7	278	0,0262	[EYERER 1996]	6,81	57,66
Kupfer	9.301	381.341	0,0244	[EYERER, 1996]	6,34	64,00
Erdöl	3.172.600	142.132.480	0,0223	[EYERER 1996]	5,80	69,79
Molybdän	95	5.000	0,0190	[RIEDEL 1994]	4,94	74,73
Nickel	831	54.015	0,0154	[EYERER 1996]	4,00	78,74
Silber	15	1.000	0,0150	[RIEDEL 1994]	3,90	82,64
Erdgas	1.817.800	122.519.720	0,0148	[EYERER 1996]	3,85	86,48
Uran	0,05	3,73	0,0134	[EYERER 1996]	3,48	89,97
Chrom	11	1.058	0,0103	[EYERER 1996]	2,68	92,64
Quecksilber	6	590	0,0093	[RIEDEL 1994]	2,42	95,06
Steinkohle	3.451.000	528.003.000	0,0065	[EYERER 1996]	1,69	96,75
Eisenerz	917.000	153.139.000	0,0060	[EYERER 1996]	1,56	98,31
Aluminium	25.400	5.689.600	0,0045	[EYERER 1996]	1,17	99,48
Braunkohle	40	150.040	0,0003	[EYERER 1996]	0,08	100,00

Tabelle D.1: Filtertabelle für die Wirkungskategorie Ressourcen mit Angabe der Normierungsfaktoren RV

Wirkungskategorie Treibhauseffekt					
Zu verwendende Bezeichnung	Beschreibung	GWP (Bezug 100 Jahre)	Quelle	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
Schwefelhexafluorid	SF ₆	24.900	[IPCC 1995]	13,59	13,59
R13	CF ₃ Cl	13.000	[GOEDKOOP 1995]	7,10	20,69
Hexafluorethan	C ₂ F ₆	12.500	[EYERER 1996]	6,82	27,52
R23	CHF ₃	12.100	[IPCC 1995]	6,61	34,12
R114	C ₂ F ₄ Cl ₂	9.300	[EYERER 1996]	5,08	39,20
R115	C ₂ Cl ₂ F ₅	9.300	[IPCC 1995]	5,08	44,28
Perfluoro cyclobutan	c-C ₄ F ₈	9.100	[IPCC 1995]	4,97	49,25
R12	CF ₂ Cl ₂	8.500	[EYERER 1996]	4,64	53,89
R236fa	C ₃ H ₂ F ₆	8.000	[IPCC 1995]	4,37	58,25
FCKW (hart)		7.100	[GOEDKOOP 1995]	3,88	62,13
Perfluorohexan	C ₆ F ₁₄	6.800	[IPCC 1995]	3,71	65,84
Tetrafluoromethan	CF ₄	6.300	[EYERER 1996]	3,44	69,28
R116	C ₂ F ₆	6.200	[HEIJUNGS 1992]	3,38	72,67
.....

Tabelle D.2: Filtertabelle (Auszug) für die Wirkungskategorie Treibhauseffekt mit Angabe der Normierungsfaktoren GWP

Wirkungskategorie Ozonabbau					
Zu verwendende Bezeichnung	Beschreibung	ODP	Quelle	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
Halon1301	CF ₃ Br	16,00	[EYERER 1996]	41,27	41,27
Halon2402	C ₂ F ₄ Br ₂	7,00	[EYERER 1996]	18,06	59,33
Halon1211	CF ₂ BrCl	4,00	[EYERER 1996]	10,32	69,65
Halon1201	CF ₂ Br	1,40	[EYERER 1996]	3,61	73,26
Halon1202	CF ₂ Br ₂	1,25	[EYERER 1996]	3,22	76,48
R113	C ₂ F ₃ Cl ₃	1,10	[EYERER 1996]	2,84	79,32
Tetrachlormethan	CCl ₄	1,08	[EYERER 1996]	2,79	82,11
FCKW (hart)		1,00	[GOEDKOOP 1995]	2,58	84,69
R11	CFCl ₃	1,00	[EYERER 1996]	2,58	87,27
R12	CF ₂ Cl ₂	1,00	[EYERER 1996]	2,58	89,85
R13	CF ₃ Cl ₂	1,00	[GOEDKOOP 1995]	2,58	92,43
R114	C ₂ F ₄ Cl ₂	0,80	[EYERER 1996]	2,06	94,49
Methylbromid	CH ₃ Br	0,60	[EYERER 1996]	1,55	96,04
R115	C ₂ Cl ₂ F ₅	0,50	[GOEDKOOP 1995]	1,29	97,33
Halon2401	C ₂ F ₄ Br	0,25	[EYERER 1996]	0,64	97,97
Halon2311	C ₂ F ₃ ClBr	0,14	[EYERER 1996]	0,36	98,33
1,1,1-Trichlorethan	CH ₃ CCl ₃	0,12	[HEIJUNGS 1992]	0,31	98,64
.....

Tabelle D.3: Filtertabelle (Auszug) für die Wirkungskategorie Ozonabbau mit Angabe der Normierungsfaktoren ODP

Wirkungskategorie Humantoxizität-Luft				
Zu verwendende Bezeichnung	Beschreibung	HCA	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
2,3,7,8-TCDD	„Dioxin“, (C ₁₂ H ₂ Cl ₄) ₂ O ₂	3.300.000	98,07	98,07
Chromion(VI)	Cr ⁶⁺	47.000	1,40	99,47
Arsen	As	4.700	0,14	99,61
b-HCH	b-Hexachlorcyclohexan	1.700	0,05	99,66
Tetrachlorovinphos		1.700	0,05	99,71
Amitrol		1.100	0,03	99,74
Cadmium	Cd	580	0,02	99,76
a-HCH	a-Hexachlorcyclohexan	470	0,01	99,78
g-HCH	g-Hexachlorcyclohexan, Lindan	470	0,01	99,79
d-HCH	d-Hexachlorcyclohexan	470	0,01	99,80
Nickel	Ni	470	0,01	99,82
2,5,2-Trichlorbiphenyl	C ₁₂ H ₃ Cl ₂ C ₆ H ₄ Cl	370	0,01	99,83
Hexachlorbiphenyl	C ₁₂ H ₄ Cl ₆	370	0,01	99,84
PCBs	Polychlorbiphenyle	370	0,01	99,85
Dieldrin		330	0,01	99,86
Aldrin		330	0,01	99,87
Drine	z.B. Endrin	330	0,01	99,88
Endrin		330	0,01	99,89
Phorat		170	0,01	99,89
Terbufos		170	0,01	99,90
.....

Tabelle D.4: Filtertabelle (Auszug aus [HEIJUNGS 1992]) für die Wirkungskategorie Humantoxizität-Luft mit Angabe der Normierungsfaktoren HCA

Wirkungskategorie Humantoxizität-Wasser				
Zu verwendende Bezeichnung	Beschreibung	HCW	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
2,3,7,8-TCDD	„Dioxin“, (C ₆ H ₂ Cl ₂) ₂ O ₂	290.000	98,30	98,30
Chromion(VI)	Cr ⁶⁺	4.100	1,39	99,69
b-HCH	b-Hexachlorcyclohexan	140	0,05	99,74
Tetrachlorvinphos		140	0,05	99,79
Amitrol		95	0,03	99,82
2,5,2-Trichlorbiphenyl	C ₆ H ₃ Cl ₂ C ₆ H ₄ Cl	32	0,01	99,83
Hexachlorbiphenyl	C ₁₂ H ₄ Cl ₆	32	0,01	99,84
PCBs	Polychlorbiphenyle	32	0,01	99,85
Dieldrin		29	0,01	99,86
Aldrin		29	0,01	99,87
Drine	z.B. Endrin	29	0,01	99,88
Endrin		29	0,01	99,89
Phorat		14	0,00	99,90
Terbufos		14	0,00	99,90
Triazofos		14	0,00	99,91
Demeton-S-Methyl	Demeton-S-Methylsulfon	9,5	0,00	99,91
Ethoprophos		9,5	0,00	99,91
Fensulfothion		9,5	0,00	99,92
Omethoat		9,5	0,00	99,92
Oxydemeton-Methyl		9,5	0,00	99,92
.....

Tabelle D.5: Filtertabelle (Auszug aus [HEIJUNGS 1992]) für die Wirkungskategorie Humantoxizität-Wasser mit Angabe der Normierungsfaktoren HCW

Wirkungskategorie Humantoxizität-Boden				
Zu verwendende Bezeichnung	Beschreibung	HCS	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
Monochlorethen	CH ₂ CHCl, Vinylchlorid	320	38,19	38,19
Chromion(VI)	Cr ⁶⁺	130	15,51	53,70
b-HCH	b-Hexachlorcyclohexan	113	13,49	67,19
Tetrahydrofuran	C ₄ H ₈ O	68	8,11	75,30
Tetrachlormethan	CCl ₄ , Tetrachlorkohlenstoff	32	3,82	79,12
Pyridin	C ₅ H ₅ N	31	3,70	82,82
2,5,2-Trichlorbiphenyl	C ₆ H ₃ Cl ₂ C ₆ H ₄ Cl	13	1,55	84,37
Dieldrin		13	1,55	85,92
Hexachlorbiphenyl	C ₁₂ H ₄ Cl ₆	7,6	0,91	86,83
Tetrachlorethen	C ₂ Cl ₄ , Perchlorethen	7,6	0,91	87,74
Chlornaphtalin		7,2	0,86	88,60
1,2-Dichlorethan	CH ₂ ClCH ₂ Cl	7,1	0,85	89,44
Cadmium	Cd	7	0,84	90,28
1,2,4-Trichlorbenzol	C ₆ H ₃ Cl ₃	6,8	0,81	91,09
Thiocyanat	SCN-	6,4	0,76	91,85
Tetrahydrothiophen	C ₄ H ₈ S	5,8	0,69	92,55
Cyanid	gebunden als CN	5,4	0,64	93,19
Aldrin		4,5	0,54	93,73
2-Monochlorphenol	C ₆ H ₄ ClOH	4,5	0,54	94,27
.....

Tabelle D.6: Filtertabelle (Auszug aus [HEIJUNGS 1992]) für die Wirkungskategorie Humantoxizität-Boden mit Angabe der Normierungsfaktoren HCS

Wirkungskategorie Ökotoxizität						
Zu verwendende Bezeichnung	Beschreibung	ECA in m³/kg	ECT	ECA+ECT	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
Isobenzan		0	5.000	5.000	10,58	10,58
Zinophos		0	2.900	2.900	6,14	16,72
Pyrazophos		2.100	0	2.100	4,44	21,16
Endrin		53	2.000	2.053	4,34	25,51
Dichlorovos		2.000	13	2.013	4,26	29,77
Heptachlor		12	2.000	2.012	4,26	34,03
Cumafos		2.000	0	2.000	4,23	38,26
Phorat		0	2.000	2.000	4,23	42,49
Parathion-Ethyl		250	1.400	1.650	3,49	45,98
Aldrin		83	1.400	1.483	3,14	49,12
Diazinon		50	1.400	1.450	3,07	52,19
2,3,7,8-TCDD	Dioxin, „Seveso-Gift“	0	1.400	1.400	2,96	55,15
Benomyl		0	1.400	1.400	2,96	58,12
g-HCH	Lindan, g-Hexachlorcyclohexan	2,5	1.300	1.302,5	2,76	60,87
Trichlorfon		1.000	14	1.014	2,15	63,02
Mevinphos		1.000	7,7	1.007,7	2,13	65,15
Deltamethrin	Decamethrin	1.000	0	1.000	2,12	67,27
Dieldrin		83	900	983	2,08	69,35
Disulfoton		3,8	910	913,8	1,93	71,28
Bifenthrin		910	0	910	1,93	73,21
Chlorpyrifos		0	910	910	1,93	75,13
Quecksilber	Hg	500	29	529	1,12	77,76
.....

Tabelle D.7: Filtertabelle (Auszug aus [HEIJUNGS 1992]) für die Wirkungskategorie Ökotoxizität mit Angabe der Normierungsfaktoren ECA und ECT

Wirkungskategorie Versauerung					
Zu verwendende Bezeichnung	Beschreibung	AP	Quelle	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	1,88	[EYERER 1996]	11,66	11,66
Ammoniumion	NH ⁴⁺	1,88	[EYERER 1996]	11,66	23,31
Ammoniak	NH ₃	1,88	[EYERER 1996]	11,66	34,97
Flußsäure	HF	1,6	[EYERER 1996]	9,92	44,89
Stickstoffmonoxid	NO	1,07	[EYERER 1996]	6,63	51,52
Schwefeldioxid	SO ₂	1	[EYERER 1996]	6,20	57,72
Schwefeloxide	SO _x	1	[EYERER 1996]	6,20	63,92
Salzsäure	HCl	0,88	[EYERER 1996]	5,46	69,37
Tetrachlormethan	CCl ₄	0,83	[EYERER 1996]	5,15	74,52
Trichlorethan	CH ₃ Cl ₃	0,72	[EYERER 1996]	4,46	78,98
1,1,1-Trichlorethan	CH ₃ CCl ₃	0,72	[EYERER 1996]	4,46	83,45
Stickoxide	NO _x	0,7	[EYERER 1996]	4,34	87,79
Stickstoffdioxid	NO ₂	0,7	[GOEDKOOP 1995]	4,34	92,13
Hexachlorbenzol		0,67	[EYERER 1996]	4,15	96,28
.....

Tabelle D.8: Filtertabelle (Auszug) für die Wirkungskategorie Versauerung mit Angabe der Normierungsfaktoren AP

Wirkungskategorie Eutrophierung					
Zu verwendende Bezeichnung	Beschreibung	NP	Quelle	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
Phosphor	P	3,06	[HEIJUNGS 1992]	29,25	29,25
Ptot		3,06	[GOEDKOOOP 1995]	29,25	58,50
Phosphoroxid	P ₂ O ₅	1,34	[HEIJUNGS 1992]	12,81	71,31
Phosphate	PO ₄ ³⁻	1	[EYERER 1996]	9,56	80,86
Nitrate	NO ³⁻	0,42	[EYERER 1996]	4,01	84,88
Ntot		0,42	[GOEDKOOOP 1995]	4,01	88,89
Ammoniak	NH ₃	0,35	[HEIJUNGS 1992]	3,35	92,24
Ammoniumion	NH ⁴⁺	0,33	[EYERER 1996]	3,15	95,39
.....

Tabelle D.9: Filtertabelle (Auszug) für die Wirkungskategorie Eutrophierung mit Angabe der Normierungsfaktoren NP

Wirkungskategorie Photooxidantien					
Zu verwendende Bezeichnung	Beschreibung	POCP	Quelle	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
1,2,4-Trimethylbenzol	Pseudocumol, 1,2,3-C ₆ H ₃ (CH ₃) ₃	1,2	[HEIJUNGS 1992]	2,28	2,28
1,2,3-Trimethylbenzol	Hemimellitol, 1,2,3-C ₆ H ₃ (CH ₃) ₃	1,17	[HEIJUNGS 1992]	2,22	4,49
1,3,5-Trimethylbenzol	Mesitylen, 1,2,3-C ₆ H ₃ (CH ₃) ₃	1,15	[HEIJUNGS 1992]	2,18	6,68
1-Penten	CH ₂ =CH(CH ₂) ₂ CH ₃	1,059	[HEIJUNGS 1992]	2,01	8,68
Propen	CH ₃ -CH=CH ₂ , Propylen	1,03	[HEIJUNGS 1992]	1,95	10,64
Ethen	CH ₂ =CH ₂ , Ethylen	1	[HEIJUNGS 1992]	1,90	12,53
m-Xylol	1,3-Dimethylbenzol, 1,3-C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	0,993	[HEIJUNGS 1992]	1,88	14,42
.....

Tabelle D.10: Filtertabelle (Auszug, weitere Werte in [EYERER 1996], [GOEDKOOOP 1995], [HEIJUNGS 1992]) für die Wirkungskategorie Photooxidantien mit Angabe der Normierungsfaktoren POCP

Wirkungskategorie Flächenbedarf				
Hemerobiestufe	Bezeichnung	HS	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
1	ahemerob	1.000	70,00	70,00
2	oligohemerob	250	17,50	87,50
3	mesohemerob	100	7,00	94,50
4	b-euhemerob	50	3,50	98,00
5	a-euhemerob	25	1,75	99,75
6	polyhemerob	2,5	0,18	99,93
7	metahemerob	1	0,07	100,00

Tabelle D.11: Filtertabelle nach [EYERER 1996] für die Wirkungskategorie Flächenbedarf mit Angabe der Normierungsfaktoren HS

Wirkungskategorie Belästigungen-Gestank					
Zu verwendende Bezeichnung	Beschreibung	OTV in kg/m ³	1/OTV in m ³ /kg	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
2-Ethyl-5,5-dimethyl-1,3-dioxan		0,0000056	178.571,4	64,93	64,93
Ethylbutyrat		0,00003	33.333,3	12,12	77,05
Ethanethiol	Ethylmercaptan	0,000044	22.727,3	8,26	85,31
p-Kresol	4-Methylphenol	0,00018	5.555,6	2,02	87,33
Isovaleriansäure	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ COOH	0,00022	4.545,5	1,65	88,98
Methylmercaptan	Methanethiol	0,00024	4.166,7	1,51	90,50
Trimethylamin		0,00026	3.846,2	1,40	91,90
Acetaldehyd	Ethanal	0,00027	3.703,7	1,35	93,24
Methylthiomethan	Dimethylsulfid	0,0003	3.333,3	1,21	94,46
Butansäure		0,00035	2.857,1	1,04	95,49
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	0,00043	2.325,6	0,85	96,34
m-Kresol	3-Methylphenol	0,00057	1.754,4	0,64	96,98
n-Butylacetat	CH ₃ CO ₂ C ₄ H ₉	0,031	32,3	0,01	99,92
.....

Tabelle D.12: Filtertabelle (Auszug aus [HEIJUNGS 1992]) für die Wirkungskategorie Belästigungen-Gestank mit Angabe der Normierungsfaktoren OTV

Wirkungskategorie Belästigungen Lärm			
Art der Lärmemission	GL in 1/(dB h)	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
diskontinuierlich	2	66,67	66,67
kontinuierlich	1	33,33	100,00

Tabelle D.13: Filtertabelle für die Wirkungskategorie Belästigungen-Lärm mit Angabe der Normierungsfaktoren GL

Wirkungskategorie Abfall			
Entsorgungsart	AF in 1/kg	Anteil an Summe in %	Schleppsumme in %
Sondermüll	10	66,67	66,67
Schlackendeponie	2	13,33	80,00
Hausmüll	2	13,33	93,33
Recycling	1	6,67	100,00

Tabelle D.14: Filtertabelle für die Wirkungskategorie Abfall mit Angabe der Normierungsfaktoren AF

Ressource	Prozeß	Masse in kg/fu				RV in a ⁻¹	Masse in kg fu ⁻¹ a ⁻¹				Masse in kg fu ⁻¹ a ⁻¹ (defuzzi- fiziert)	Anteil an de- fuzzifizierter Summe in %
		m _{L1}	m _{R1}	α ₁	β ₁		m _{L2}	m _{R2}	α ₂	β ₂		
Zinn	Löten	2,05E-03	2,58E-03	2,05E-03	2,25E-03	0,0511	1,05E-04	1,32E-04	1,05E-04	1,15E-04	1,21E-04	32,6550
Blei	Löten	1,49E-03	1,87E-03	1,49E-03	1,63E-03	0,0682	1,01E-04	1,27E-04	1,01E-04	1,11E-04	1,18E-04	31,5932
Steinkohle	el. Energie-Erzeug.	1,05E-02	1,27E-02	2,81E-03	4,63E-03	0,0065	6,83E-05	8,27E-05	1,82E-05	3,01E-05	7,91E-05	21,2690
Erdgas	el. Energie-Erzeug.	1,79E-03	2,16E-03	4,76E-04	7,86E-04	0,0148	2,64E-05	3,20E-05	7,05E-06	1,16E-05	3,06E-05	8,2238
Erdöl	el. Energie-Erzeug.	4,75E-04	5,75E-04	1,27E-04	2,09E-04	0,0223	1,06E-05	1,28E-05	2,82E-06	4,66E-06	1,23E-05	3,2951
Braunkohle	el. Energie-Erzeug.	2,79E-02	3,37E-02	7,44E-03	1,23E-02	0,0003	8,36E-06	1,01E-05	2,23E-06	3,68E-06	9,68E-06	2,6021
Kalkstein	el. Energie-Erzeug.	5,40E-04	6,53E-04	1,44E-04	2,38E-04	0,0017	9,18E-07	1,11E-06	2,45E-07	4,04E-07	1,06E-06	0,2855
Kupfer	Löten	3,47E-06	4,36E-06	3,47E-06	3,81E-06	0,0244	8,48E-08	1,06E-07	8,48E-08	9,29E-08	9,82E-08	0,0264
Silber	Löten	1,42E-07	1,78E-07	1,42E-07	1,55E-07	0,015	2,13E-09	2,67E-09	2,13E-09	2,33E-09	2,46E-09	0,0007
Zink	Löten	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08	0,0476	1,69E-09	2,12E-09	1,69E-09	1,85E-09	1,95E-09	0,0005
Nickel	Löten	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08	0,0154	5,46E-10	6,85E-10	5,46E-10	5,98E-10	6,32E-10	0,0002
Eisen	Löten	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08	0,006	2,13E-10	2,67E-10	2,13E-10	2,33E-10	2,46E-10	0,0001
Aluminium	Löten	3,55E-08	4,45E-08	3,55E-08	3,88E-08	0,0045	1,60E-10	2,00E-10	1,60E-10	1,75E-10	1,85E-10	0,0000
Summe							3,21E-04	3,98E-04	2,37E-04	2,77E-04		
defuzzifizierte Summe							3,72E-04					

Tabelle E.1: Ergebnistabelle Ressourcen für die THD-Platine

Bezeichnung	Prozeß	Masse in kg/fu				GWP	Masse in kg-CO ₂ -Äq./fu				Masse in kg-CO ₂ -Äq./fu (defuzzifiziert)	Anteil an defuzzifizierter Summe in %
		m _{L1}	m _{R1}	α ₁	β ₁		m _{L2}	m _{R2}	α ₂	β ₂		
Kohlendioxid	el. Energie-Erzeug.	6,14E-02	7,43E-02	1,64E-02	2,70E-02	1	6,14E-02	7,43E-02	1,64E-02	2,70E-02	7,10E-02	92,9566
Methan	el. Energie-Erzeug.	1,55E-04	1,88E-04	4,14E-05	6,82E-05	24,5	3,80E-03	4,60E-03	1,01E-03	1,67E-03	4,40E-03	5,7539
Stickoxide	el. Energie-Erzeug.	7,88E-05	9,54E-05	2,10E-05	3,47E-05	7	5,52E-04	6,68E-04	1,47E-04	2,43E-04	6,39E-04	0,8359
Lachgas	el. Energie-Erzeug.	6,39E-07	7,73E-07	1,70E-07	2,81E-07	320	2,04E-04	2,47E-04	5,45E-05	9,00E-05	2,37E-04	0,3096
Kohlenmonoxid	el. Energie-Erzeug.	2,24E-05	2,71E-05	5,98E-06	9,87E-06	3	6,73E-05	8,14E-05	1,79E-05	2,96E-05	7,79E-05	0,1019
Kohlenw. chloriert	el. Energie-Erzeug.	1,89E-06	2,29E-06	5,04E-07	8,31E-07	11	2,08E-05	2,51E-05	5,54E-06	9,14E-06	2,41E-05	0,0315
Kohlendioxid	Deponierung Schlacken	4,50E-06	6,28E-06	1,61E-06	3,88E-06	1	4,50E-06	6,28E-06	1,61E-06	3,88E-06	6,07E-06	0,0079
Kohlenw. halog.	el. Energie-Erzeug.	9,61E-08	1,16E-07	2,56E-08	4,23E-08	11	1,06E-06	1,28E-06	2,82E-07	4,65E-07	1,22E-06	0,0016
Stickoxide	Deponierung Schlacken	6,87E-08	9,57E-08	2,46E-08	5,91E-08	7	4,81E-07	6,70E-07	1,72E-07	4,14E-07	6,48E-07	0,0008
Kohlenmonoxid	Deponierung Schlacken	2,40E-08	3,35E-08	8,60E-09	2,07E-08	3	7,20E-08	1,00E-07	2,58E-08	6,20E-08	9,71E-08	0,0001
Methan	Deponierung Schlacken	1,24E-09	1,73E-09	4,46E-10	1,07E-09	24,5	3,05E-08	4,25E-08	1,09E-08	2,62E-08	4,11E-08	0,0001
Lachgas	Deponierung Schlacken	5,58E-12	7,78E-12	2,00E-12	4,81E-12	320	1,79E-09	2,49E-09	6,40E-10	1,54E-09	2,41E-09	0,0000
Kohlenw. chloriert	Deponierung Schlacken	4,72E-12	6,58E-12	1,69E-12	4,07E-12	11	5,19E-11	7,24E-11	1,86E-11	4,47E-11	7,00E-11	0,0000
Kohlenw. halog.	Deponierung Schlacken	3,63E-13	5,06E-13	1,30E-13	3,13E-13	11	3,99E-12	5,57E-12	1,43E-12	3,44E-12	5,39E-12	0,0000
Summe							6,60E-02	7,99E-02	1,76E-02	2,91E-02		
defuzzifizierte Summe							7,64E-02					

Tabelle E.2: Ergebnistabelle Treibhauseffekt für die THD-Platine

Bezeichnung	Prozeß	Masse in kg/fu				AP	Masse in kg-SO ₂ -Äq./fu				Masse in kg-SO ₂ -Äq./fu (defuzzifiziert)	Anteil an defuzzifizierter Summe in %
		m _{L1}	m _{R1}	α ₁	β ₁		m _{L2}	m _{R2}	α ₂	β ₂		
Schwefeldioxid	el. Energie-Erzeug.	6,28E-05	7,60E-05	1,68E-05	2,77E-05	1	6,28E-05	7,60E-05	1,68E-05	2,77E-05	7,27E-05	52,9652
Stickoxide	el. Energie-Erzeug.	7,88E-05	9,54E-05	2,10E-05	3,47E-05	0,7	5,52E-05	6,68E-05	1,47E-05	2,43E-05	6,39E-05	46,5138
Ammoniak	el. Energie-Erzeug.	2,93E-07	3,55E-07	7,82E-08	1,29E-07	1,88	5,51E-07	6,67E-07	1,47E-07	2,43E-07	6,38E-07	0,4647
Stickoxide	Deponierung Schlacken	6,87E-08	9,57E-08	2,46E-08	5,91E-08	0,7	4,81E-08	6,70E-08	1,72E-08	4,14E-08	6,48E-08	0,0472
Schwefeldioxid	Deponierung Schlacken	6,34E-09	8,84E-09	2,27E-09	5,46E-09	1	6,34E-09	8,84E-09	2,27E-09	5,46E-09	8,54E-09	0,0062
Ammonium	Deponierung Schlacken	1,18E-09	1,64E-09	4,22E-10	1,01E-09	1,88	2,21E-09	3,08E-09	7,93E-10	1,90E-09	2,98E-09	0,0022
Nitrat	Deponierung Schlacken	8,04E-10	1,12E-09	2,88E-10	6,93E-10	0,7	5,63E-10	7,85E-10	2,02E-10	4,85E-10	7,59E-10	0,0006
Nitrit	Deponierung Schlacken	1,79E-10	2,49E-10	6,41E-11	1,54E-10	0,7	1,25E-10	1,74E-10	4,49E-11	1,08E-10	1,69E-10	0,0001
Summe							1,19E-04	1,44E-04	3,17E-05	5,22E-05		
defuzzifizierte Summe							1,37E-04					

Tabelle E.3: Ergebnistabelle Versauerung für die THD-Platine

Bezeichnung	Prozeß	Masse in kg/fu				NP	Masse in kg-Phos.-Äq./fu				Masse in kg-Phos.-Äq./fu (defuzzifiziert)	Anteil an defuzzifizierter Summe in %
		m _{L1}	m _{R1}	α ₁	β ₁		m _{L2}	m _{R2}	α ₂	β ₂		
Stickoxide	el. Energie-Erzeug.	7,88E-05	9,54E-05	2,10E-05	3,47E-05	0,13	1,02E-05	1,24E-05	2,73E-06	4,51E-06	1,19E-05	98,8894
Ammoniak	el. Energie-Erzeug.	2,93E-07	3,55E-07	7,82E-08	1,29E-07	0,35	1,03E-07	1,24E-07	2,74E-08	4,52E-08	1,19E-07	0,9903
Stickoxide	Deponierung Schlacken	6,87E-08	9,57E-08	2,46E-08	5,91E-08	0,13	8,93E-09	1,24E-08	3,20E-09	7,69E-09	1,20E-08	0,1003
CSB	Deponierung Schlacken	4,40E-08	6,13E-08	1,58E-08	3,79E-08	0,022	9,67E-10	1,35E-09	3,47E-10	8,33E-10	1,30E-09	0,0109
Ammonium	Deponierung Schlacken	1,18E-09	1,64E-09	4,22E-10	1,01E-09	0,33	3,88E-10	5,41E-10	1,39E-10	3,34E-10	5,23E-10	0,0044
Nitrat	Deponierung Schlacken	8,04E-10	1,12E-09	2,88E-10	6,93E-10	0,42	3,38E-10	4,71E-10	1,21E-10	2,91E-10	4,56E-10	0,0038
Nitrit	Deponierung Schlacken	1,79E-10	2,49E-10	6,41E-11	1,54E-10	0,42	7,51E-11	1,05E-10	2,69E-11	6,47E-11	1,01E-10	0,0008
Summe							1,04E-05	1,25E-05	2,77E-06	4,56E-06		
defuzzifizierte Summe							1,20E-05					

Tabelle E.4: Ergebnistabelle Eutrophierung für die THD-Platine

Wirkungs- kategorie	Ergebnisse						normalisierte Ergebnisse				ggf. Mittelwert				Ge- wich- tung F	gewichtete, normalisierte Ergebnisse				
	m _{L1}	m _{R1}	α ₁	β ₁	SMD- Platine	Einheit	m _{L2}	m _{R2}	α ₂	β ₂	m _{L3}	m _{R3}	α ₃	β ₃		m _{L4}	m _{R4}	α ₄	β ₄	
Ressourcen	3,2E-04	4,0E-04	2,4E-04	2,8E-04	1,4E-04	kg/(a fu)	2,23	2,76	1,65	1,92					6,00	13,38	16,58	9,88	11,53	
Treibhauseffekt	6,6E-02	8,0E-02	1,8E-02	2,9E-02	3,5E-02	kg-CO ₂ - Äq./fu	1,87	2,26	0,50	0,82					8,00	14,91	18,05	3,98	6,56	
Humantoxizität	1,4E-04	1,7E-04	3,7E-05	6,1E-05	7,4E-05	kg-Körper- gew./fu	1,87	2,26	0,50	0,82					9,00	16,82	20,36	4,49	7,41	
Ökotoxizität- Aquatisch	2,7E-08	3,8E-08	9,7E-09	2,3E-08	1,7E-08	m ³ -Wasser	1,60	2,24	0,58	1,38										
Ökotoxizität- Terrestrisch	2,3E-08	3,2E-08	8,2E-09	2,0E-08	1,4E-08	kg-Boden	1,60	2,24	0,58	1,38										
Ökotoxizität Mittelwert											1,60	2,24	0,58	1,38	9,00	14,45	20,15	5,19	12,45	
Versauerung	1,2E-04	1,4E-04	3,2E-05	5,2E-05	6,4E-05	kg-SO ₂ - Äq./fu	1,87	2,26	0,50	0,82					9,00	16,81	20,35	4,49	7,40	
Eutrophierung	1,0E-05	1,3E-05	2,8E-06	4,6E-06	5,6E-06	kg-Phos.- Äq./fu	1,87	2,26	0,50	0,82					8,00	14,93	18,08	3,99	6,58	
Photooxidantien	2,6E-05	3,4E-05	8,7E-06	1,7E-05	1,5E-05	kg-Ethen- Äq./fu	1,73	2,25	0,57	1,13					8,00	13,76	18,00	4,59	9,06	
Flächenbedarf	2,4E-05	3,4E-05	8,8E-06	2,1E-05	1,5E-05	(m ² a)/fu	1,59	2,22	0,57	1,38					4,00	6,36	8,92	2,30	5,51	
Belästig.-Gestank	2,9E-07	3,5E-07	7,8E-08	1,3E-07	1,6E-07	m ³ /fu	1,87	2,26	0,50	0,82										
Belästig.-Lärm	3,0E-02	3,9E-02	2,5E-02	5,7E-02	2,1E-02	1/fu	1,44	1,89	1,18	2,72										
Belästig. Mittelwert						-					1,66	2,08	0,84	1,77	4,00	6,63	8,30	3,35	7,09	
Arbeits.-Lärm	3,0E-02	3,9E-02	2,5E-02	5,7E-02	2,1E-02	1/fu	1,44	1,89	1,18	2,72					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Abwärme	2,5E-02	3,0E-02	6,6E-03	1,1E-02	1,3E-02	MJ/fu	1,87	2,26	0,50	0,82					2,50	4,65	5,63	1,24	2,05	
Abfall	5,7E-03	8,0E-03	2,1E-03	4,9E-03	3,6E-03	1/fu	1,60	2,24	0,57	1,38					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
															Summe	67,50	122,70	154,42	43,50	75,64
															gewichteter Mittelwert	1,82	2,29	0,64	1,12	
															defuzzifizierter gewichteter Mittelwert	2,20				

Tabelle E.5: Übersicht über die Wirkungskategorie-Ergebnisse und Berechnung des Gesamtergebnisses für die THD-Platine im Vergleich zur SMD-Platine

Wirkungskategorie	gewichtete, normalisierte Ergebnisse					defuzzifiziert	Anteil der Wirkungskategorie am Ergebnis in %
	m_L	m_R	α	β			
Ökotoxizität Mittelwert	14,45	20,15	5,19	12,45	19,51	13,14	
Ökotoxizität-Terr.						6,57	
Ökotoxizität-Aqua.						6,57	
Humantoxizität	16,82	20,36	4,49	7,41	19,49	13,13	
Versauerung	16,81	20,35	4,49	7,40	19,48	13,12	
Eutrophierung	14,93	18,08	3,99	6,58	17,30	11,65	
Treibhauseffekt	14,91	18,05	3,98	6,56	17,28	11,64	
Photooxidantien	13,76	18,00	4,59	9,06	17,25	11,62	
Ressourcen	13,38	16,58	9,88	11,53	15,51	10,45	
Belästigung Mittelwert	6,63	8,30	3,35	7,09	8,64	5,82	
Belästig.-Lärm						2,91	
Belästig.-Gestank						2,91	
Flächenbedarf	6,36	8,92	2,30	5,51	8,61	5,80	
Abwärme	4,65	5,63	1,24	2,05	5,39	3,63	
Arbeitsschutz-Lärm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Abfall	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Summe	122,70	154,42	43,50	75,63			
defuzzifiziert	148,46						

Tabelle E.6: Berechnung der Anteile der Wirkungskategorie-Ergebnisse am Gesamtergebnis für die THD-Platine im Vergleich zur SMD-Platine

Prozeßemission		Anteil am Gesamtergebnis in %
Stickoxide	el. Energie-Erzeugung	23,61
Schwefeldioxid	el. Energie-Erzeugung	14,16
Phenole	Deponierung Schlacken	12,34
Kohlendioxid	el. Energie-Erzeugung	10,82
Isopropylalkohol	Fluxen	10,25
Fläche Schlackendeponie	Deponierung Schlacken	5,60
Kühlwasser	el. Energieerzeugung	3,63
Zinn	Löten	3,41
Blei	Löten	3,30
Ammoniak	el. Energie-Erzeugung	3,09
Lärm Abluftabsaugung	Löten	2,91
Steinkohle	el. Energie-Erzeugung	2,22
Methan	el. Energie-Erzeugung	1,12
VOC	el. Energie-Erzeugung	0,92
Erdgas	el. Energie-Erzeugung	0,86
Erdöl	el. Energie-Erzeugung	0,34
Braunkohle	el. Energie-Erzeugung	0,27
Rest		1,15
Summe		100,00

Tabelle E.7: „Dominanzanalyse“ - Anteil der Prozeßemissionen am Gesamtergebnis für die THD-Platine im Vergleich zur SMD-Platine (Fettgedruckte Prozeßemissionen sind mehreren Wirkungskategorien zugeordnet)

Prozeßemission		Anteil an der Streuung des Gesamtergebnisses in %
Stickoxide	el. Energie-Erzeugung	18,69
Phenole	Deponierung Schlacken	14,93
Schwefeldioxid	el. Energie-Erzeugung	11,21
Isopropylalkohol	Fluxen	11,04
Kohlendioxid	el. Energie-Erzeugung	8,56
Fläche Schlackendeponie	Deponierung Schlacken	6,80
Zinn	Löten	6,24
Blei	Löten	6,04
Ammoniak	el. Energie-Erzeugung	3,92
Lärm Abluftabsaugung	Löten	3,78
Kühlwasser	el. Energie-Erzeugung	2,88
Steinkohle	el. Energie-Erzeugung	1,76
Methan	el. Energie-Erzeugung	0,88
VOC	el. Energie-Erzeugung	0,73
Erdgas	el. Energie-Erzeugung	0,68
Fläche Lötanlage mit Vorstationen	Löten	0,28
Quecksilber	Deponierung Schlacken	0,28
Erdöl	el. Energie-Erzeugung	0,27
Cadmium	Deponierung Schlacken	0,23
Rest		0,80
Summe		100,00

Tabelle E.8: „Unschärfe-Dominanzanalyse“ - Anteil der Unschärfe der Prozeßemissionen an der Unschärfe des Gesamtergebnisses für die THD-Platine im Vergleich zur SMD-Platine (Fettgedruckte Prozeßemissionen sind mehreren Wirkungskategorien zugeordnet)

Prozeßemission		Veränderungspotential
Dioxine	Deponierung Schlacken	8,45E+11
Quecksilber	Deponierung Schlacken	1,43E+11
Cadmium	Deponierung Schlacken	5,77E+10
Benzo(a)pyren	Deponierung Schlacken	1,07E+10
Chrom	Deponierung Schlacken	6,16E+09
Phenole	Deponierung Schlacken	3,25E+09
Arsen	Deponierung Schlacken	1,76E+09
Zink	Deponierung Schlacken	9,20E+08
Kupfer	Deponierung Schlacken	7,78E+08
Blei	Deponierung Schlacken	6,91E+08
Nickel	Deponierung Schlacken	6,81E+08
Ammoniak	el. Energie-Erzeugung	1,35E+07
Nitrit	Deponierung Schlacken	1,61E+06
Ammonium	Deponierung Schlacken	8,12E+05
Fläche Schlackendeponie	Deponierung Schlacken	6,54E+05
Stickoxide	el. Energie-Erzeugung	3,84E+05
.....

Tabelle E.9: Ideelle Analyse für die THD-Platine im Vergleich zur SMD-Platine (Fettgedruckte Prozeßemissionen sind mehreren Wirkungskategorien zugeordnet)

DATA	Kartondruck				Rollendruck				Siebdruck			
	m _L	m _R	a	b	m _L	m _R	a	b	m _L	m _R	a	b
Energie	1,15E+02	1,80E+02	5,13E+01	1,44E+02	88,905	144,585	41,164	124,74	5,30E+02	8,28E+02	2,36E+02	6,62E+02
Druckfarbe	1,15E-04	1,80E-04	5,13E-05	1,44E-04	1,21E-04	1,89E-04	5,38E-05	1,51E-04	4,65E-02	7,26E-02	2,07E-02	5,81E-02
Wachs	6,91E-05	1,08E-04	3,08E-05	8,64E-05	7,25E-05	1,13E-04	3,23E-05	9,07E-05				
Harz	4,03E-05	6,30E-05	1,79E-05	5,04E-05	4,23E-05	6,62E-05	1,90E-05	5,29E-05				
Farbpigmente	5,76E-06	9,00E-06	2,56E-06	7,20E-06	6,05E-06	9,45E-06	2,69E-06	7,56E-06				
Papier					5,00E-01	5,51E-01	7,98E-02	1,05E-01				
Kleber					1,24E-01	1,38E-01	2,00E-02	2,63E-02				
Entsorgung	8,33E-01	1,20E+00	3,33E-01	8,00E-01	5,77E-01	8,32E-01	2,31E-01	5,54E-01	7,36E-04	1,15E-03	3,28E-04	9,20E-04
PET	1,33E-01	1,47E-01	2,13E-02	2,80E-02	1,60E-01	1,76E-01	2,55E-02	3,36E-02	5,52E+00	8,63E+00	2,46E+00	6,90E+00

Tabelle F.1: Das Unschärfe Intervall für Kartondruck, Rollendruck und Siebdruck

Vollständige	Rollendruck/Siebdruck					
	kg/t*km	kg	m _L	m _R	a	b
Transport						
Eisenerz	1,02E-03	4,08E-02	3,14E-02	5,30E-02	1,50E-02	4,90E-02
Blei	3,40E-04	1,36E-02	1,04E-02	1,77E-02	5,02E-03	1,63E-02
Emissionen						
CSB	2,00E-04	8,00E-03	6,15E-03	1,04E-02	2,95E-03	9,60E-03
Kohlenmonoxid	3,26E-04	1,30E-02	1,02E-02	1,70E-02	4,81E-03	1,56E-02
NMVOG	3,64E-04	1,46E-02	1,11E-02	1,89E-02	5,37E-03	1,75E-02
Lachgas	5,26E-06	2,10E-04	1,60E-04	2,70E-04	7,68E-05	2,50E-04
Methan	6,63E-06	2,65E-04	2,04E-04	3,45E-04	9,79E-05	3,18E-04
Schwefeldioxid	1,29E-04	5,16E-03	3,97E-03	6,71E-03	1,90E-03	6,19E-03
Stickstoffoxide	9,95E-04	3,98E-02	3,06E-02	5,17E-02	1,47E-02	4,78E-02
Kohlendioxid	2,01E-01	8,04E+00	6,18	1,05E+01	2,966	9,648

Tabelle F.2: Transportbilanz für Rollendruck und Siebdruck

Vollständige	Kartondruck				Rollendruck				Siebdruck			
	m _L	m _R	a	b	m _L	m _R	a	b	m _L	m _R	a	b
el Energie in kJ	115,2	180	51,264	144	88,905	144,585	41,164	124,74	529,92	828	235,814	662,4
INPUT												
Rohstoffe in Lagerstätten(RiL)												
Energieträger												
Braunkohle	8,95E-03	1,40E-02	3,98E-03	1,12E-02	6,91E-03	1,12E-02	3,20E-03	9,69E-03	4,12E-02	6,43E-02	1,83E-02	5,15E-02
Erdgas	5,64E-04	8,82E-04	2,51E-04	7,06E-04	4,36E-04	7,08E-04	2,02E-04	6,11E-04	2,60E-03	4,06E-03	1,16E-03	3,25E-03
Erdöl	1,50E-04	2,34E-04	6,66E-05	1,87E-04	1,16E-04	1,88E-04	5,35E-05	1,62E-04	6,89E-04	1,08E-03	3,07E-04	8,61E-04
Steinkohle	3,36E-03	5,26E-03	1,50E-03	4,20E-03	2,60E-03	4,22E-03	1,20E-03	3,64E-03	1,55E-02	2,42E-02	6,89E-03	1,93E-02
Nichtenergieträger (RiL)												
Kalkstein	1,73E-04	2,70E-04	7,69E-05	2,16E-04	1,33E-04	2,17E-04	6,17E-05	1,87E-04	7,95E-04	1,24E-03	3,54E-04	9,94E-04
OUTPUT												
Abfälle zur Beseitigung (AzB)												
Aschen&Schlacken	4,38E-04	6,84E-04	1,95E-04	5,47E-04	3,38E-04	5,49E-04	1,56E-04	4,74E-04	2,01E-03	3,15E-03	8,96E-04	2,52E-03
Sondermüll	7,90E-07	1,23E-06	3,52E-07	9,88E-07	6,10E-07	9,92E-07	2,82E-07	8,56E-07	3,63E-06	5,68E-06	1,62E-06	4,54E-06
Abfälle zur Verwertung(AzV)												
Aschen&Schlacken	4,38E-04	6,84E-04	1,95E-04	5,47E-04	3,38E-04	5,49E-04	1,56E-04	4,74E-04	2,01E-03	3,15E-03	8,96E-04	2,52E-03
Luftemissionen												
Ammoniak	9,41E-08	1,47E-07	4,19E-08	1,18E-07	7,26E-08	1,18E-07	3,36E-08	1,02E-07	4,33E-07	6,76E-07	1,93E-07	5,41E-07
Chlorwasserstoff	6,07E-07	9,49E-07	2,70E-07	7,59E-07	4,69E-07	7,62E-07	2,17E-07	6,57E-07	2,79E-06	4,36E-06	1,24E-06	3,49E-06
Distickstoffmonoxid	2,05E-07	3,20E-07	9,12E-08	2,56E-07	1,58E-07	2,57E-07	7,33E-08	2,22E-07	9,43E-07	1,47E-06	4,20E-07	1,18E-06
Fluorwasserstoff	3,09E-08	4,82E-08	1,37E-08	3,86E-08	2,38E-08	3,87E-08	1,10E-08	3,34E-08	1,42E-07	2,22E-07	6,32E-08	1,78E-07
Kohlendioxid,fossil	1,97E-02	3,08E-02	8,77E-03	2,46E-02	1,52E-02	2,47E-02	7,04E-03	2,13E-02	9,06E-02	1,42E-01	4,03E-02	1,13E-01
Kohlenmonoxid	7,20E-06	1,12E-05	3,20E-06	8,99E-06	5,55E-06	9,03E-06	2,57E-06	7,79E-06	3,31E-05	5,17E-05	1,47E-05	4,14E-05
Stickoxide	2,53E-05	3,96E-05	1,13E-05	3,16E-05	1,95E-05	3,18E-05	9,04E-06	2,74E-05	1,16E-04	1,82E-04	5,18E-05	1,46E-04
Schwefeldioxyde	2,02E-05	3,15E-05	8,98E-06	2,52E-05	1,56E-05	2,53E-05	7,21E-06	2,18E-05	9,28E-05	1,45E-04	4,13E-05	1,16E-04
Methan	4,98E-05	7,78E-05	2,22E-05	6,22E-05	3,84E-05	6,25E-05	1,78E-05	5,39E-05	2,29E-04	3,58E-04	1,02E-04	2,86E-04
NMVOC,unspez.	1,53E-06	2,39E-06	6,82E-07	1,92E-06	1,18E-06	1,92E-06	5,47E-07	1,66E-06	7,05E-06	1,10E-05	3,14E-06	8,81E-06
Abwasser(Kühlwasser)	6,33E-01	9,89E-01	2,82E-01	7,91E-01	4,88E-01	7,94E-01	2,26E-01	6,85E-01	2,91E+00	4,55E+00	1,30+00	3,64E+00

Tabelle F.3: Energiebilanz für Kartondruck, Rollendruck und Siebdruck

Ressource	Prozeß	Siebdruck: Masse in kg/ fu			
		m1	m2	a	b
Braunkohle	el. Energie-Erzeug.	4,12E-02	6,43E-02	1,83E-02	5,15E-02
Erdgas	el. Energie-Erzeug.	2,60E-03	4,06E-03	1,16E-03	3,25E-03
Erdöl	el. Energie-Erzeug.	6,89E-04	1,08E-03	3,07E-04	8,61E-04
Steinkohle	el. Energie-Erzeug.	1,55E-02	2,42E-02	6,89E-03	1,93E-02
Kalkstein	el. Energie-Erzeug.	7,95E-04	1,24E-03	3,54E-04	9,94E-04
Eisen	Transport	3,14E-02	5,30E-02	1,50E-02	4,90E-02
Blei	Transport	1,04E-02	1,77E-02	5,02E-03	1,63E-02

Tabelle F.4: Sachbilanzgliederungspunkt 'Ressourcen' für Siebdruck

Abfall	Prozeß	Masse in kg/fu				Entsorgung
		m1	m2	a	b	
Aschen und Schlacken	el. Energieerzeugung	2,01E-03	3,15E-03	8,96E-04	2,52E-03	Schlackendeponie
Sondermüll	el. Energieerzeugung	3,63E-06	5,68E-06	1,62E-06	4,54E-06	Sondermüll
Aschen und Schlacken	el. Energieerzeugung	2,01E-03	3,15E-03	8,96E-04	2,52E-03	Schlackendeponie

Tabelle F.5: Sachbilanzgliederungspunkt 'Abfall' für Siebdruck

Stoffe							Siebdruck: Masse in kg			
Bezeichnungung) (primäre Zuordn.)	Anmerkung	Sekundäre Zuordnung	Tertiäre Zuordnung	Prozeß	Medium	Arbeits platz	m1	m2	a	b
Ammoniak				el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	4,33E-07	6,76E-07	1,93E-07	5,41E-07
Chlorwasserstoff				el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	2,79E-06	4,36E-06	1,24E-06	3,49E-06
Lachgas	Distickstoffm.			el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	9,43E-07	1,47E-06	4,20E-07	1,18E-06
Kohlenw. halog.		Kohlenw. hal.	Kohlenw.	el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	1,42E-07	2,22E-07	6,32E-08	1,78E-07
Kohlendioxid				el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	9,06E-02	1,42E-01	4,03E-02	1,13E-01
Kohlenmonoxid				el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	3,31E-05	5,17E-05	1,47E-05	4,14E-05
Stickoxide		Stickoxide		el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	1,16E-04	1,82E-04	5,18E-05	1,46E-04
Schwefeldioxid				el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	9,28E-05	1,45E-04	4,13E-05	1,16E-04
Methan				el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	2,29E-04	3,58E-04	1,02E-04	2,86E-04
VOC				el. Energie-Erzeug.	Luft	nein	7,05E-06	1,10E-05	3,14E-06	8,81E-06
CSB	Indikator	COD		Transport	Luft	nein	6,15E-03	1,04E-02	2,95E-03	9,60E-03
CO				Transport	Luft	nein	1,00E-02	1,70E-02	4,81E-03	1,56E-02
NMVOG				Transport	Luft	nein	1,11E-02	1,89E-02	5,37E-03	1,75E-02
Lachgas	Distickstoffm.			Transport	Luft	nein	1,60E-04	2,70E-04	7,68E-05	2,50E-04
Methan				Transport	Luft	nein	2,04E-04	3,45E-04	9,79E-05	3,18E-04
SO2				Transport	Luft	nein	3,97E-03	6,71E-03	1,90E-03	6,19E-03
Stichstoffoxide				Transport	Luft	nein	3,06E-02	5,17E-02	1,47E-02	4,78E-02
CO2				Transport	Luft	nein	6,18E+00	1,05E+01	2,97E+00	9,65E+00

Tabelle F.6: Sachbilanzgliederungspunkt 'Stoffe' für Siebdruck

Abwärme	Abwärme in MJ/fu			
Prozeß				
el.Energie-Erzeug.Kühlwasser	2,91E+00	4,55E+00	1,30E+00	3,64E+00

Tabelle F.7: Sachbilanzgliederungspunkt 'Abwärme' für Siebdruck

