

Recyclingpotentiale unverträglicher Werkstoffe

– Trennung von Stoffschlußverbindungen

vorgelegt von
Diplom – Ingenieurin
Louise Helen Stewart
aus Sydney, Australien

Vom Fachbereich 6 – Verfahrenstechnik, Umwelttechnik, Werkstoffwissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuß:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. J. Steinbach
Berichter: Prof. Dr.-Ing. G. Fleischer
Berichter: Prof. Dr.-Ing. K.-J. Thomé-Kozmiensky

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 29. November 1999

Berlin 2000

D83

Danksagung

Ich bedanke mich bei der Heinrich Böll Stiftung, die mich bei der Erarbeitung meiner Dissertation finanziell unterstützt hat. Mein Dank geht an Prof. Fleischer für die Betreuung und Bewertung der Arbeit, Prof. Steinbach für die Übernahme der Aufgaben des Prüfungsvorsitzes und Prof. Thomé-Kozmiensky für die Bewertung der Dissertation.

Am meisten bei R. Ladewig aber auch bei H. Heidrich, M. Janßen, M. Kampe, A. Tisch, und H. Warnst und allen anderen, die mir bei der Erarbeitung dieser Dissertation Hilfe geleistet haben bedanke ich mich.

Abstrakt

Werkstoffe, die sich gegenseitig beim Recycling stören oder gemeinsam bei der Sekundärrohstoffherstellung einen minderwertigen Sekundärwerkstoff ergeben, werden allgemein als unverträglich beschrieben. Um das Recycling technisch zu vereinfachen ist unter anderem die Kombination von nur verträglichen Werkstoffen in einem Produkt vorgeschlagen worden. Komplexe Produkte werden aber aus einem Gemisch von verträglichen und unverträglichen Werkstoffen hergestellt. Beim traditionellen Recycling komplexer Produkte wird zuerst eine Zerkleinerung durchgeführt. Anschließend werden die Altstoffe solange klassiert oder sortiert bis verträgliche Fraktionen vorliegen. Wenn Werkstoffeigenschaften, die für das Recycling von Bedeutung sind, bei der Produktplanung (Auswahl von Werkstoffen) berücksichtigt werden, kann das Recycling verbessert werden. Es ist untersucht worden, in wie weit unterschiedliche chemische und physikalische Werkstoffeigenschaften bei den klassischen Recyclingverfahren ausgenutzt werden, um unverträgliche Altstoffe voneinander zu trennen.

Beim Recycling komplexer Produkte ist ein Zusammenhang zwischen dem Erhalt der Produktfunktion, dem Recyclingaufwand und der zunehmenden Bedeutung der Entfernung unverträglicher Werkstoffe dargestellt worden. Mit jedem Recyclingschritt nimmt der technische Aufwand für die Entfernung unverträglicher Altstoffe aus einem Altstoffgemisch zu. Eine allgemeine Recyclingstrategie für die Verwendung und Verwertung komplexer Produkte ist entwickelt worden. Anhand der Produktgruppe Computer-Leiterplatten wurde die vorgelegte Recyclingstrategie angewendet und mit traditionellen Leiterplattenrecyclingverfahren verglichen.

Hierzu wurden Stoffschlußverbindungen auf ihre Recyclingfähigkeit untersucht. Gelötete Verbindungselemente gelten bislang als nicht recyclinggerecht, da sie zu den nicht trennbaren Verbindungen gehören und möglicherweise unverträgliche Werkstoffe verbinden.

Die Entlötlung von typischen Leiterplattenbauteilverbindungen wurde mathematisch mit Hilfe von finiten Elementen als Transportproblem beschrieben. Diese zeigt, daß die in der gängigen Literatur angegebene Entlötlungsdauer bei gleichbleibenden Entlötlungstemperaturen und –bedingungen erheblich verkürzt werden kann. Durch Experimente sind die berechneten Entlötlungsparameter verifiziert worden. Durch die gewonnenen Ergebnisse ist eine Optimierung der Entlötlung für Leiterplattenbauteile möglich. Die Entlötlung von Verbindungselementen wird als Recyclingstrategie erfolgreich eingesetzt.

Keywords: Recycling, Entlötlung, Leiterplatten

Abstract

Materials that hinder the recycling of each other or produce together a secondary material of poor quality, are often defined as being not compatible. In order to reduce the technical complexity of recycling, it has been suggested, that only compatible materials be used in any one product. Complex products however, can not function correctly if they not are manufactured out of materials with differing characteristics.

The traditional recycling of complex products starts with crushing, grinding and or shredding procedures followed on by the separation of materials through sorting and separation procedures. The goal is to divide the mix of non compatible materials into compatible yields in order produce high quality secondary materials. During the planning of the product, material characteristics should examined in relationship to the recycling procedures. How the chemical and physical attributes of materials can be used to optimise the yields of traditional recycling processes was examined.

A relationship between the remaining function of the product to be recycled and the recycling steps necessary to eliminate materials that are not compatible was developed. With each recycling step it becomes technically more difficult to divide materials into compatible yields. A strategy for the reuse and further recycling of complex products was developed. The strategy was used to recycle printed wiring boards (PWB's).

The recycability of soldered connections and adhesive bonds as elements of PWB's was examined. The desoldering process was described mathematically with the use of finite elements. It was found, that the desoldering time, compared to desoldering times found in literature for the reworking of PWB's, could be significantly reduced. Experiments verified these findings. These results can be used to optimise the recycling or reworking of PWB's. The desoldering process was used effectively for the reuse and the recycling of PWB'S.

Keywords: Recycling, Desoldering, PWB

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
Verzeichnis der Abbildungen	6
Verzeichnis der Tabellen	7
Verwendete Formelzeichen und Ausdrücke	8
1 Einleitung	9
2 Recycling unverträglicher Werkstoffe	11
2.1 Verträgliche und unverträgliche Werkstoffe	11
2.2 Produktfunktionserhalt beim Recycling	11
2.3 Rahmenbedingungen für das Recycling komplexer Produkte	14
2.4 Recyclingstrategieentwicklung für komplexe Produkte	14
3 Demontage und Aufbereitung komplexer Produkte	17
3.1 Werkstoffgruppen	17
3.2 Werkstoffeigenschaften	17
3.3 Verbindungselemente	18
3.3.1 Demontage von Verbindungselementen	20
3.3.2 Stoffschlußverbindungen	20
3.3.2.1 Klebverbindungen	21
3.3.2.2 Lötverbindungen	21
3.3.2.3 Schweißverbindungen	22
3.4 Trennung von Stoffschlußverbindungen	22
3.4.1 Ausnutzung chemischer Eigenschaften	23
3.4.1.1 Klebverbindungen	23
3.4.1.2 Lötverbindungen	25
3.4.2 Ausnutzung thermischer Eigenschaften	26
3.4.2.1 Klebverbindungen	26
3.4.2.2 Lötverbindungen	26
3.5 Aufbereitung komplexer Produkte	26
3.5.1 Metallische Werkstoffe	26
3.6 Produktzerkleinerung	29
3.6.1 Ausnutzung mechanischer Eigenschaften	29
3.6.1.1 Selektive Zerkleinerung	29
3.6.2 Ausnutzung thermischer Eigenschaften	31
3.6.2.1 Tiefkühlshreddern	31
3.7 Altstofftrennung	31
3.7.1 Ausnutzung physikalischer Eigenschaften	31
3.7.1.1 Trennung nach der Dichte	31
3.7.1.2 Trennung durch Flotation	32
3.7.2 Ausnutzung chemischer Eigenschaften	33
3.7.2.1 Trennung nach der Löslichkeit	33
3.7.3 Ausnutzung elektrischer Eigenschaften	34
3.7.3.1 Trennung nach elektrischem Widerstand	34
3.7.3.2 Weitere elektrische Trennverfahren	34
3.7.4 Ausnutzung magnetischer Eigenschaften	35
3.7.4.1 Magnetische Suszeptibilität	35
3.7.4.2 Trennung nach Wirbelstromeigenschaften	36
3.7.5 Ausnutzung optischer Eigenschaften	36
3.7.5.1 Optische Trennung	36
3.7.6 Trennung nach Stoffeigenschaften (Überblick)	36
4 Produktgruppe Leiterplatten	38
4.1 Altleiterplatten	38
4.2 Traditionelle Entsorgung von Leiterplatten	38
5 Entwicklung einer Leiterplattenrecyclingstrategie	40

5.1	Rechtliche Begründung für das Recycling von Leiterplatten.....	40
5.1.1	EU-Recht.....	40
5.1.2	Bundesrecht.....	40
5.2	Rahmenbedingungen für das Leiterplattenrecycling.....	41
5.3	Werkstoffliche Zusammensetzung von Leiterplatten.....	41
5.3.1	Leiterplattensubstrat - leitende Materialien.....	42
5.3.2	Leiterplattensubstrat - isolierende Materialien.....	42
5.3.3	Bauelemente.....	43
5.3.4	Lot.....	44
5.4	Werkstoffeigenschaften.....	45
5.5	Unverträglichkeiten zwischen Leiterplattenwerkstoffen.....	45
5.6	Entfernung unverträglicher Altstoffe beim Leiterplattenrecycling.....	46
5.6.1	Strategien, die vor einer Zerkleinerung einzusetzen sind.....	47
5.6.2	Strategien, die bei einer Zerkleinerung einzusetzen sind.....	48
5.6.3	Strategien, die nach einer Zerkleinerung einzusetzen sind.....	48
5.7	Verfahrensablauf für das Leiterplattenrecycling.....	48
6	Theoretische Grundlagen der Entlötung.....	50
6.1	Entlötung von Verbindungselementen.....	50
6.1.1	Wärmeübertragung bei der Entlötung.....	51
6.2	Mathematische Beschreibung der Entlötung durch Wärmeleitung.....	51
6.2.1	Wärmeleitung.....	52
6.2.2	Wärmefluß.....	53
6.2.3	Bilanzierung des Wärmetransports.....	54
6.2.4	Finite-Element-Berechnung.....	57
6.2.4.1	Programmierung.....	57
6.2.4.2	Ergebnisse der FEM-Berechnungen.....	61
6.3	Entfernung des geschmolzenen Lotes.....	62
6.3.1	Die Oberflächenspannung des Lotes.....	62
6.4	Trennung der Verbindungselemente.....	64
6.4.1	Bauelemententfernung.....	64
7	Entlötung von Leiterplattenbauelementen.....	65
7.1	Untersuchte Leiterplatten.....	65
7.2	Entlötungsstrategien.....	67
7.2.1	Praktische Entlötung von Bauteilen.....	68
7.3	Entfernung des geschmolzenen Lotes.....	69
7.4	Bauelemententfernung.....	70
8	Bewertung der Entlötung.....	71
8.1	Entlötungserfolg in Abhängigkeit von der Entlötungszeit.....	71
8.2	Bestimmung der optimalen Entlötungsparameter.....	71
8.3	Diskussion der Ergebnisse.....	73
8.4	Eingesetzte Entlötungsgeräte.....	74
8.5	Bewertung der Entlötung als Recyclingschritt.....	74
9	Zusammenfassung.....	76
Literatur	77
Anhang 1	83
Anhang 2	88
Anhang 3	93

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Recycling als Teil der Entwicklung ökologischer Produkte	9
Abbildung 2: Recycling komplexer Produkte	12
Abbildung 3: Voraussetzungen für die Entwicklung einer Recyclingstrategie	15
Abbildung 4: Ausnutzung unverträglicher Altstoffeigenschaften beim Recycling	16
Abbildung 5: Werkstoffeigenschaften als ein Faktor bei der Auswahl von Werkstoffen	18
Abbildung 7: Elektrischer Widerstand von Altstoffarten	34
Abbildung 8: Trennung von Altstoffen durch Ausnutzung unterschiedlicher Altstoff- eigenschaften	36
Abbildung 9: Verfahrensschema für traditionelle Leiterplattenverwertung	39
Abbildung 10: Anforderungen an das Leiterplattensubstrat	42
Abbildung 11: Through-hole-Lötverbindung auf Leiterplatten	44
Abbildung 12: Leiterplattenrecyclingstrategie: Ausnutzung unterschiedlicher Altstoffeigenschaften für die Eliminierung unverträglicher Altstoffe	49
Abbildung 13: Wärmefluß in Abhängigkeit von Temperatur, Zeit und Radius (R) der berechneten zylinderförmigen Lötverbindung	53
Abbildung 14: Transport in x-Richtung	55
Abbildung 15: Lösung der Wärmeleitungsgleichung für eine Entlötung	57
Abbildung 16: Programmiertes Lötverbindungsgerüst	58
Abbildung 17: Gitternetz auf dem Lötverbindungsgerüst	58
Abbildung 18: Druck innerhalb eines Lottröpfchens	63
Abbildung 19: Gebogener Bauelementverbindungsdraht	64
Abbildung 20: 386er Leiterplatte	65
Abbildung 21: Verwendungs- und Verwertungsmöglichkeiten für Leiterplattenbauelemente	67
Abbildung 22: Bestimmung von Entlötungsbereichen durch FEM-Berechnungen	68
Abbildung 23: Entlötungszeit für Through-hole Verbindungen für Temperaturen zwischen 325 °C – 415 °C	71
Abbildung 24: Nach der Entlötung nicht trennbare Verbindungen (in Abhängigkeit von der Entlötungszeit)	71
Abbildung 25: Experimentell festgelegte Entlötungsbereiche für Through-hole Verbindungen (Verwendungsstrategie)	72
Abbildung 26: Experimentell festgelegte Entlötungsbereiche bei der Überschußerwärmung (Verwertungsstrategie)	73

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Entfernung unverträglicher Altstoffe	13
Tabelle 2:	Rahmenbedingungen für das Recycling	14
Tabelle 3:	Hierarchie der Werkstoffe mit Beispielen [Hor 1991]	17
Tabelle 4:	Eigenschaften von Form-, Kraft- und Stoffschlußverbindungen [Dub 1990] ..	19
Tabelle 5:	Demontagearten	20
Tabelle 6:	Trennung von Stoffschlußverbindungen (Überblick).....	22
Tabelle 7:	Chemische Trennung von Verbindungen bzw. Verbundstoffen.....	24
Tabelle 8:	Auflösung und Nichtauflösung bestimmter Kunststoffe [Sch 1997].....	25
Tabelle 9:	Bedingungen und Grenzwerte für Altschrotte [BDS 1996], [Mün 1997]	28
Tabelle 10:	Bruchverhalten ausgewählter Altstoffe bei Raumtemperatur	30
Tabelle 11:	Dichte ausgewählter Altstoffe.....	32
Tabelle 12:	Löslichkeit der Altstoffarten	33
Tabelle 13:	Elektrischer Widerstand verschiedener Altstoffarten	34
Tabelle 14:	Magnetische Eigenschaften von Altstoffarten	35
Tabelle 15:	Magnetische Eigenschaften metallischer Altstoffe [Hüt 1996]	35
Tabelle 16:	Voraussetzungen und Ziele für das Recycling von Leiterplatten	41
Tabelle 17:	Durchschnittliche werkstoffliche Zusammensetzung von Leiterplatten [Tar 1994]	41
Tabelle 18:	Eigenschaften von Leiterplattenwerkstoffen im Vergleich	46
Tabelle 19:	Eliminierung unverträglicher Altstoffe beim Leiterplattenrecycling.....	47
Tabelle 20:	Typische Lötverbindungen	50
Tabelle 21:	Spezifische Wärmeleitfähigkeit ausgesuchter Werkstoffe [VDI 1997].....	52
Tabelle 22:	Gesetzmäßigkeit für die mathematische Bilanzierung der Entlötung.....	54
Tabelle 23:	Relevante Temperaturbereiche für Lot (SnPb40).....	59
Tabelle 24:	Verbindungsformen der FEM-Berechnungen.....	60
Tabelle 25:	Zusammenfassung der Ergebnisse der FEM-Berechnungen	61
Tabelle 26:	Anzahl Lötverbindungsstellen 286er, 386er und 486er Platine und Steckkarten	66

Verwendete Formelzeichen und Ausdrücke

Einheiten und Größen

A	Fläche	g	Gramm
c	Spezifische Wärmekapazität	Gew %	Gewichtsprozent
l	Länge	K	Kelvin
m	Masse	m	Meter
P	Druck	N	Newton
Q	Wärmemenge	s	Sekunde
R	Radius	W	Watt
t	Zeit	°C	Grad Celcius
T	Temperatur		
α	Wärmeübergangskoeffizient	ρ	Dichte
γ	Oberflächenspannung	σ	Wärmetransportstrecke
λ	Spezifische Wärmeleitfähigkeit	Φ	Wärmefluß

Kunststoffe

ABS	Acrylnitril/Butadien/Styrol	POM	Polyoxymethylen
CAB	Celluloseacetobutyrat	PP	Polypropylen
CP	Cellulosepropionat	PPO	Polyphenylenoxid
PA	Polyamide	PS	Polystyrol
PB	Polybuten	PSU	Polysulfone
PBPT	Polybutylenterephthalat	PTFE	Polytetrafluoethylen
PC	Polycarbonat	PUR	Polyurethane
PE	Polyethylen	PVC	Polyvinylchlorid
PETP	Polyethylenterephthalat	SAN	Styrol/Acrylnitril
PIB	Polyisobutylen	SB	Styrol/Butadien
PMMA	Polymethylmethacrylat		

Metalle

Al	Aluminium	Mo	Molybdän
Co	Kobalt	Ni	Nickel
Cr	Chrom	Pb	Blei
Cu	Kupfer	Sn	Zinn
Fe	Eisen	Zn	Zink
Hg	Quecksilber		

Weitere Begriffe

Aliph.	Aliphatische
CEN	Comité Européenne Normalisation
DIN	Deutsches Institut für Normung
FEM	Finite-Element-Methode
ISO	International Organisation for Standardisation
NAW	Nichtmetallische anorganische Werkstoffe
NOW	Nichtmetallische organische Werkstoffe
SMD	Surface Mounted Device
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 Einleitung

Produktherstellungsstrategien, die eine maximale Ressourcennutzungsintensität mit minimalen negativen Umweltauswirkungen kombinieren, werden unter dem Sammelbegriff „ökologische Produktentwicklung“ zusammengefaßt. In dem Bericht „Schutz des Menschen und der Umwelt“ nennt die Enquete-Kommission die Entwicklung ökologischer Produkte Teil einer nachhaltigen Entwicklung [Enq 1994]. Das Recycling ist ein Element der Produktentwicklung. Abbildung 1 zeigt schematisch einen Überblick über die einzelnen Aspekte der Entwicklung von ökologischen Produkten und die Stellung des Recyclings.

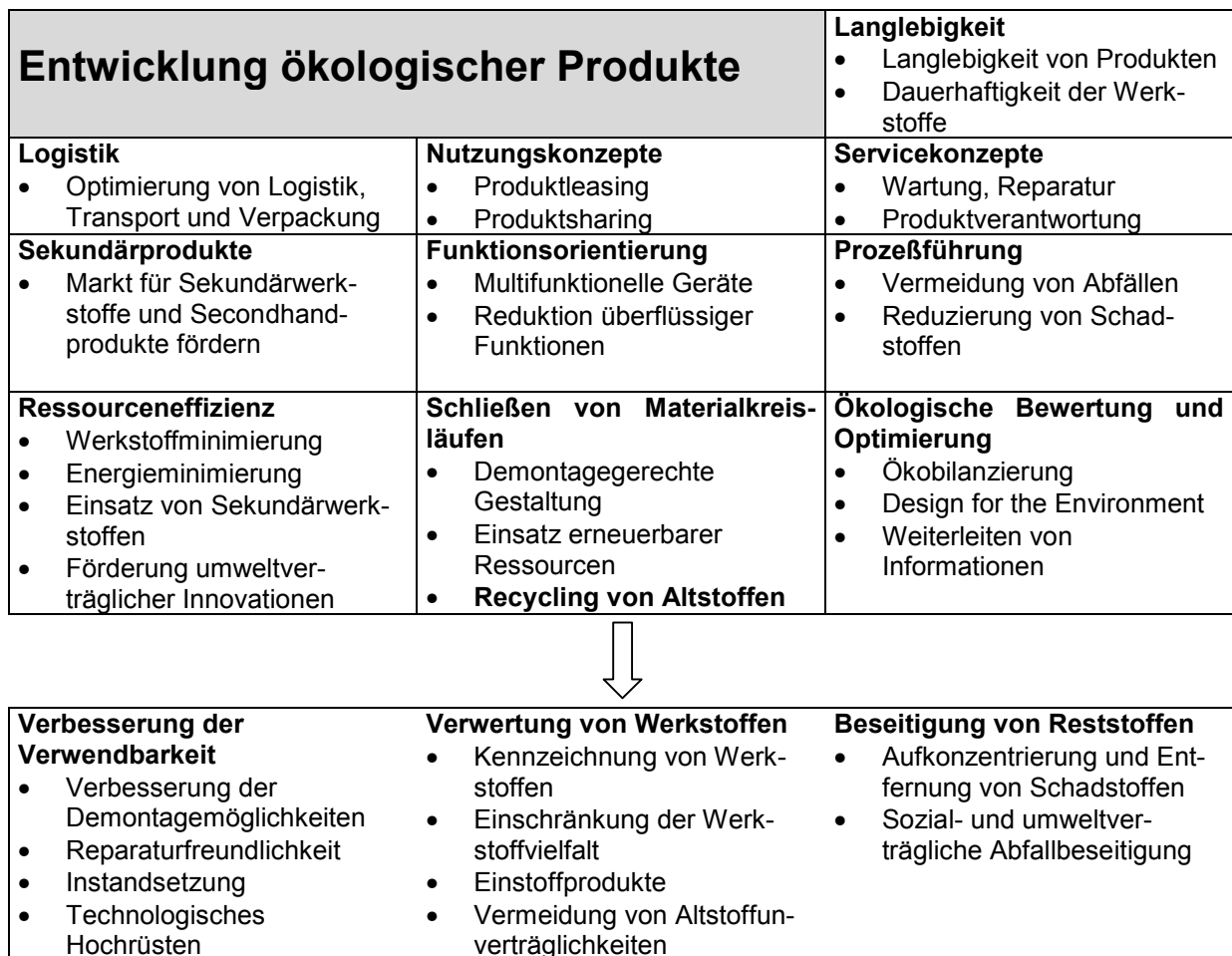


Abbildung 1: Recycling als Teil der Entwicklung ökologischer Produkte

Um das Recycling technisch zu vereinfachen, ist unter anderem die Kombination verträglicher Werkstoffe vorgeschlagen worden. Verträgliche Werkstoffe werden in der VDI-Richtlinie 2243 definiert als Kombinationen von Werkstoffen (auch Lacke und Beschichtungen), die sich wirtschaftlich und mit hoher Qualität verwerten lassen [VDI 2243 1991]. Unverträgliche Werkstoffe setzen bei einer gemeinsamen Verwertung die Qualität der Sekundärwerkstoffe herab.

Um die Verwertung problemlos durchzuführen, sollen in einem Produkt nur verträgliche Werkstoffe zusammengesetzt werden. Außerdem ist die Materialvielfalt zu verringern, um Verträglichkeitsprobleme zu vermeiden. Da unverträgliche Werkstoffe mit Stoffschlußverbindungen verbunden werden können und da Stoffschlußverbindungen als nicht lösbar beschrieben werden, sollen sie vermieden werden.

Aus Altstoffverträglichkeitsmatrizen soll für den Konstrukteur ersichtlich sein, welche Werkstoffe mit anderen Werkstoffen gemeinsam verwertet werden können. Hierzu sind verschiedene Matrizen für die metallischen Legierungen eines Metalls, z.B. Aluminium [Mey 1983], [Pap 1995] und Stahl [Mey 1983] entwickelt worden. Analog zu den Metallen sind für die Verwertung von thermoplastischen Kunststoffen viele, teilweise widersprüchliche Matrizen entwickelt worden [VDI 2243 1991], [Wim 1992], [Myl 1992], [Til 1993], [Sae 1998].

Komplexe Produkte wurden mit dem Ziel der gemeinsamen Verwertung von Altstoffen ausschließlich aus verträglichen Werkstoffen hergestellt [Awj 1994], [Müm 1994], [Geh 1986]. Die Vermarktung dieser Produkte ist jedoch an den zusätzlichen Kosten, dem erhöhten Materialeinsatz und der geringen Akzeptanz der Konsumenten gescheitert [Ede 1999]. Zu kritisieren ist, daß bei dem in der VDI-Richtlinie 2243 beschriebenen Unverträglichkeitsansatz nur die Werkstoffverwertung und nicht die erneute Produktverwendung berücksichtigt wird. Der Verträglichkeitsansatz ist seit der Einführung von VDI 2243 1991 nicht verbessert oder erweitert worden.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Strategie für das Recycling komplexer Produkte, die aus unverträglichen Werkstoffen hergestellt werden, erarbeitet. Das Recycling wird von der Seite der Werkstoffeigenschaften, die bei unverträglichen Werkstoffen unterschiedlich sind, analysiert. Stoffschlußverbindungen, insbesondere Lötverbindungen, werden auf ihre Trennbarkeit bzw. Recyclingfähigkeit untersucht. Hierzu wurden die Entlötungsparameter erst theoretisch ermittelt, durch Experimente bestätigt und anschließend für das Recycling optimiert. Als Produktgruppe für diese Untersuchung wurden für die vorliegende Arbeit Leiterplatten ausgewählt. Leiterplatten sind komplexe Produkte, die aus unverträglichen Werkstoffen hergestellt werden. Da sie eine Vielzahl an Lötverbindungen auf kleinstem Raum besitzen, sind sie für die Entlötungsuntersuchungen hervorragend geeignet.

Werkstoffe werden in dieser Arbeit definiert als Materialien, aus denen durch Be- und Verarbeitungsverfahren Halbfertig- oder Fertigwaren hergestellt werden. Altstoffe dagegen sind Werkstoffe aus Produkten, die recycelt werden müssen.

2 Recycling unverträglicher Werkstoffe

2.1 Verträgliche und unverträgliche Werkstoffe

Verträgliche Werkstoffe (bzw. Altstoffe) bilden bei einer gemeinsamen Verwertung einen Sekundärwerkstoff mit definierten chemischen und physikalischen Werkstoffeigenschaften. Insbesondere bei metallischen Werkstoffen ist die werkstoffliche Zusammensetzung, die durch Normierung geregelt ist, einzuhalten. Unverträgliche Altstoffe setzen bei einer gemeinsamen Verwertung die Werkstoffeigenschaften des Sekundärwerkstoffs herab. Sekundärwerkstoffe, die keine ausreichende Qualität besitzen, sind nur durch eine Vermischung mit kaum verunreinigten Werkstoffen verwertbar, oder sie müssen beseitigt werden. Um eine Verwertung zu ermöglichen, müssen unverträgliche Altstoffe daher vor oder während der Sekundärwerkstoffherstellung entfernt werden.

Unverträgliche Werkstoffe (bzw. Altstoffe) besitzen unterschiedliche chemische und physikalische Werkstoffeigenschaften. Durch Ausnutzung dieser Eigenschaften können beim Recycling und der anschließenden Herstellung von Sekundärwerkstoffen unverträgliche Altstoffe voneinander getrennt werden. Die technischen Phasen der Aufbereitung und Sekundärwerkstoffherstellung dienen dazu, unverträgliche Altstoffe so weit zu trennen, daß verträgliche Altstofffraktionen vorliegen.

2.2 Produktfunktionserhalt beim Recycling

Beim Recycling komplexer Produkte ist die Entfernung unverträglicher Werkstoffe erst bei der Verwertung von Bedeutung. In der Gebrauchsphase des Produktes können unverträgliche Werkstoffkombinationen zu einer Produktzerstörung führen, z.B. durch Korrosion. Durch eine entsprechende Werkstoffauswahl wird das Auftreten von Unverträglichkeitseffekten in der Gebrauchsphase verhindert.

Vorausgesetzt, daß die Funktion des Produktes durch eine unverträgliche Werkstoffkombination nicht zerstört wird, werden zusammengesetzte Werkstoffe in der Gebrauchsphase von Produkten hier als verträglich definiert. Die Bedeutung unverträglicher Werkstoffe nimmt erst bei der Produktverwertung mit anschließender Sekundärrohstoffherstellung zu.

Der Zusammenhang zwischen Erhalt der Produktfunktion, dem Recyclingaufwand und dem Aufwand für die Entfernung unverträglicher Altstoffe wird in Abbildung 2 dargestellt. Die Darstellung bezieht sich nicht auf ein bestimmtes Produkt, sondern ist allgemein für das Recycling von komplexen Produkten repräsentativ.

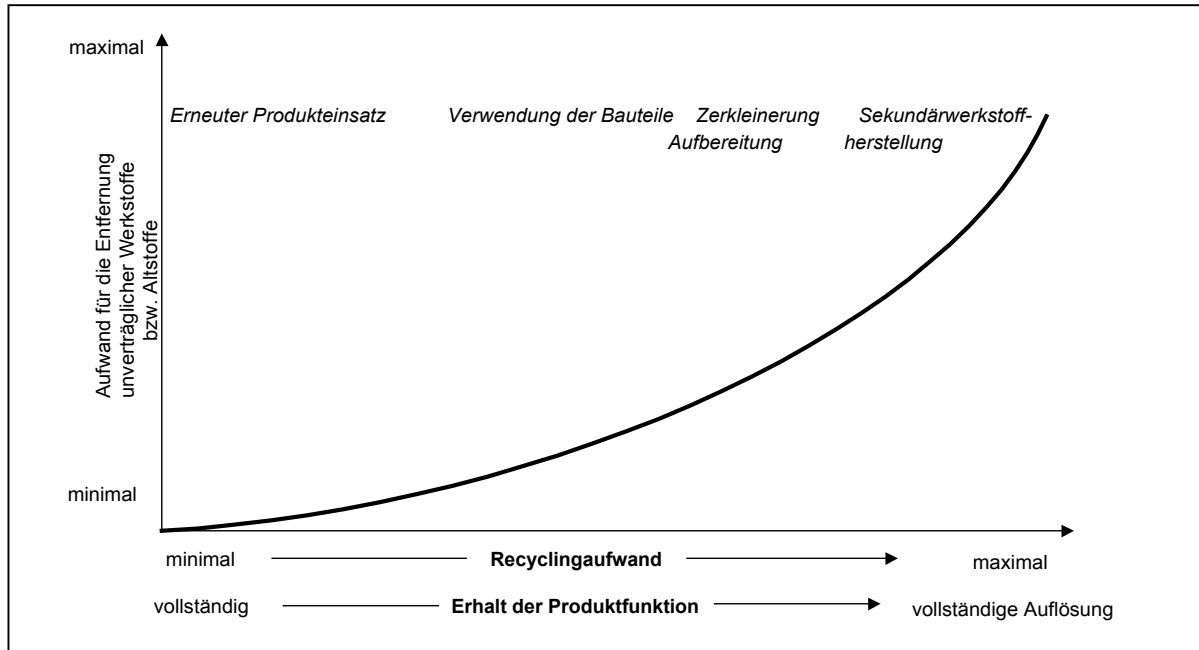


Abbildung 2: Recycling komplexer Produkte

Bei der erneuten Produktverwendung müssen unverträgliche Werkstoffe aus dem Produkt nicht entfernt werden. Der Recyclingaufwand beschränkt sich auf die Instandhaltung und ist daher minimal. Bei der Zerstörung der Produktgestalt geht die Produktfunktion verloren, was zunächst mit einem erheblichen Wertverlust verbunden ist.

Bei der Demontage von komplexen Produkten nimmt der Recyclingaufwand mit jedem Demontageschritt zu und der Erhalt der Produktfunktion ab. Für die Verwendung demontierter Produktteile ist die werkstoffliche Zusammensetzung unbedeutend.

Nicht verwendete Produktteile werden entweder in verträgliche Altstofffraktionen sortiert, die direkt der Sekundärwerkstoffherstellung zugeführt werden können, oder gelangen in die Aufbereitung.

Bei einer Zerkleinerung ist es begrenzt möglich die verschiedenen werkstofflichen Eigenschaften komplexer Produkte auszunutzen, indem ein Korngrößenspektrum erzeugt wird. Hier werden unverträgliche Altstoffe einer bestimmten Korngrößensklasse zugeordnet und durch Klassierung entfernt. Wenn keine Zuordnung in verträgliche und unverträgliche Korngrößen möglich ist, wird bei der Zerkleinerung eine einheitliche Korngröße angestrebt, da die anschließende Altstofftrennung hierdurch begünstigt wird.

Der erforderliche Aufwand um verträgliche und unverträgliche Altstoffe aus einem zerkleinerten Altstoffgemisch zu trennen, nimmt mit der Anzahl der eingesetzten Arbeitsschritte zu. Die meisten Aufbereitungsverfahren trennen das Altstoffgemisch in Abhängigkeit von den ausgenutzten Altstoffeigenschaften (z.B. Dichte) in zwei Fraktionen. Die

gewonnenen Fraktionen werden so lange mit Hilfe verschiedener Verfahren getrennt, bis durch die Eliminierung von unverträglichen Altstoffen verträgliche Fraktionen gebildet werden.

Bei der Sekundärwerkstoffherstellung besteht die Möglichkeit, geringe Mengen unverträglicher Altstoffe zu entfernen. Die Entfernung ist nicht für alle Unverträglichkeiten durchführbar, sie hängt von einer Vielzahl technischer, chemischer und physikalischer Parameter ab. Werden unverträgliche Altstoffe nicht entfernt, ist die Qualität der Sekundärwerkstoffe unzureichend [Sch 1970], [Nef 1988], [Jel 1994], [Jun 1994], [Ree 1998].

Das Recycling komplexer Produkte und die Entfernung unverträglicher Altstoffe wird in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Tabelle 1: Entfernung unverträglicher Altstoffe

Recyclingschritt	Beispiel	Unverträgliche Altstoffe
Wieder- oder Weiterverwendung	Second-Hand-Produkte	Bei der erneuten Produktverwendung ist das Vorhandensein unverträglicher Werkstoffe unproblematisch.
	Demontage	Bei verwendbaren Produktteilen ist das Vorhandensein von unverträglichen Werkstoffen unproblematisch. Nicht verwendbare Produktteile werden in verträgliche Altstofffraktionen getrennt.
Zerkleinerung	Selektive Zerkleinerung	Erzeugung verschiedener Partikelgrößen für verträgliche und unverträgliche Altstoffe mit anschließender Klassierung.
	Shreddern	Erzeugung gleicher Partikelgröße für verträgliche und unverträgliche Altstoffe. Entfernung unverträglicher Altstoffe in weiteren Recyclingverfahren.
Altstofftrennung	Klassierung, Dichtentrennung, Flotation	Ausnutzung unterschiedlicher Altstoffeigenschaften. Erzeugung verträglicher Fraktionen, die verwertet werden.
Wieder- oder Weiterverwertung	Pyrolytische Wiedergewinnung	Herstellung von Sekundärwerkstoffen aus verträglichen Fraktionen mit definierter Zusammensetzung oder Entfernung von unverträglichen Altstoffen durch Prozeßführung.
	Elektrochemische Raffination	
	Chemische Auflösung	

2.3 Rahmenbedingungen für das Recycling komplexer Produkte

Das Recycling komplexer Produkte ist nicht allein von den Werkstoffeigenschaften abhängig. Rahmenbedingungen spielen in der Recyclingwirtschaft eine erhebliche Rolle. Einige wichtige Rahmenbedingungen sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

Tabelle 2: Rahmenbedingungen für das Recycling

Rahmenbedingungen für das Recycling	
Rechtliche Rahmenbedingungen	Gesetze, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften und Standards können das Recycling von Produkten und Altstoffen fördern oder hindern.
Ökonomische Faktoren	Falls kein gesetzlicher Recyclingzwang für bestimmte Produkte oder Altstoffe besteht, hängt das Recycling meist von ökonomischen Faktoren ab.
Verfahrenstechnische Faktoren	Das Recycling von Produkten und Altstoffen ist von den verfahrenstechnischen Möglichkeiten abhängig. Für einige Altstoffe existieren keine Recyclingverfahren (z.B. Flüssigkristalle), andere Altstoffe sind nur bei gleichzeitiger Erzeugung von Schadstoffen recycelbar und werden deshalb nicht recycelt, sondern beseitigt.
Logistik	Produkte und Altstoffe, die recycelt werden sollen, müssen gesammelt und zur Recyclinganlage transportiert werden.
Kommunikation	Um ein optimales Recycling zu erreichen, muß zwischen den relevanten Akteuren der Recyclingbranche eine ausreichende Kommunikation bestehen.

Neben Werkstoffeigenschaften und Rahmenbedingungen sind für die Erstellung einer Recyclingstrategie für komplexe Produkte Recyclingziele und -voraussetzungen und die verwendete Recyclingtechnik entscheidend.

2.4 Recyclingstrategieentwicklung für komplexe Produkte

Das Recycling komplexer Produkte kann nur ausreichend durchgeführt werden, wenn die Produktzusammensetzung, die Rahmenbedingungen und die technischen Möglichkeiten bekannt sind. Eine Vorgehensweise für die Entwicklung von Recyclingstrategien ist in Abbildungen 3 und 4 dargestellt. Die dargestellte Strategie beruht auf die Ausnutzung unterschiedlicher Altstoffeigenschaften von unverträglichen Altstoffen.

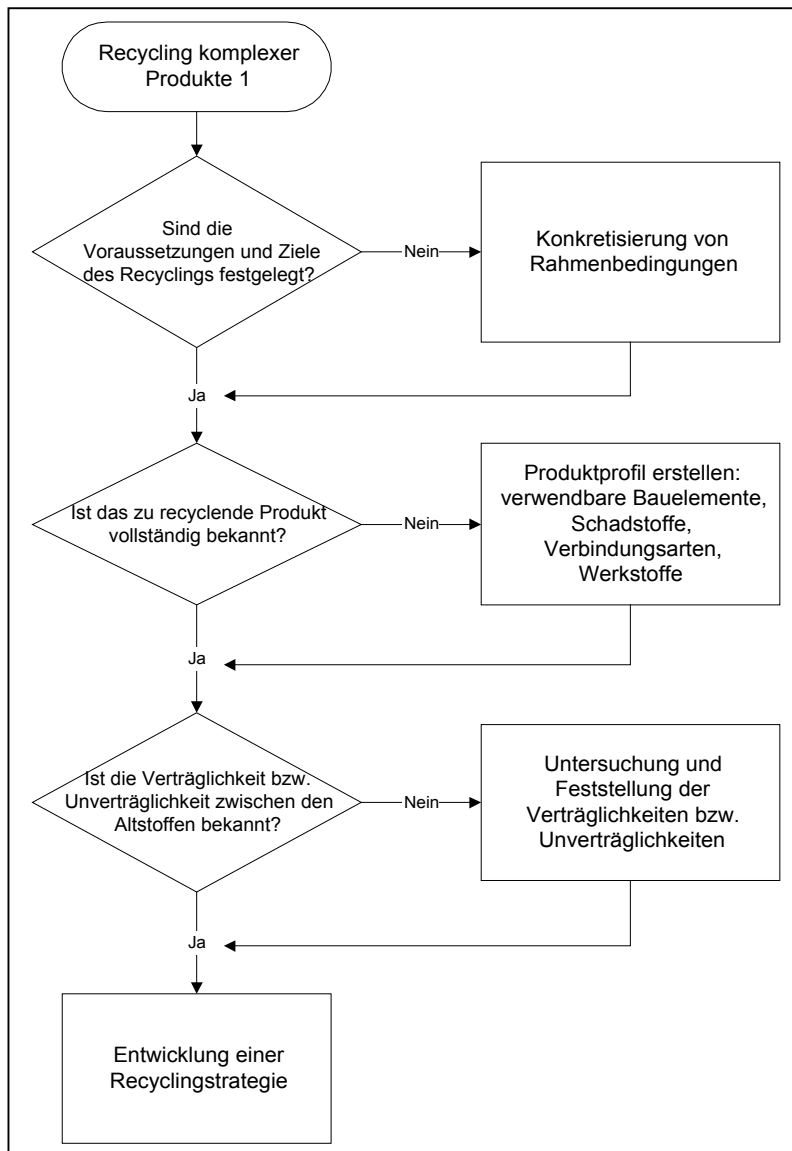


Abbildung 3: Voraussetzungen für die Entwicklung einer Recyclingstrategie

Wenn alle Voraussetzungen aus Abbildung 3 erfüllt sind, kann eine Verfahrensführung für das Recycling ausgearbeitet werden. Bei der Strategie, die in Abbildung 4 vorgestellt ist, hat die Verwendung des Produktes bzw. der Produktteile Priorität vor der Verwertung oder der Beseitigung. Diese Hierarchie ist rechtlich vorgeschrieben und in der Regel ökologisch sinnvoll. Auf die Beziehung zwischen dem Erhalt der Produktfunktion, dem Recyclingaufwand und dem Aufwand für die Entfernung unverträglicher Altstoffe wird in Kapitel 2.2 eingegangen.

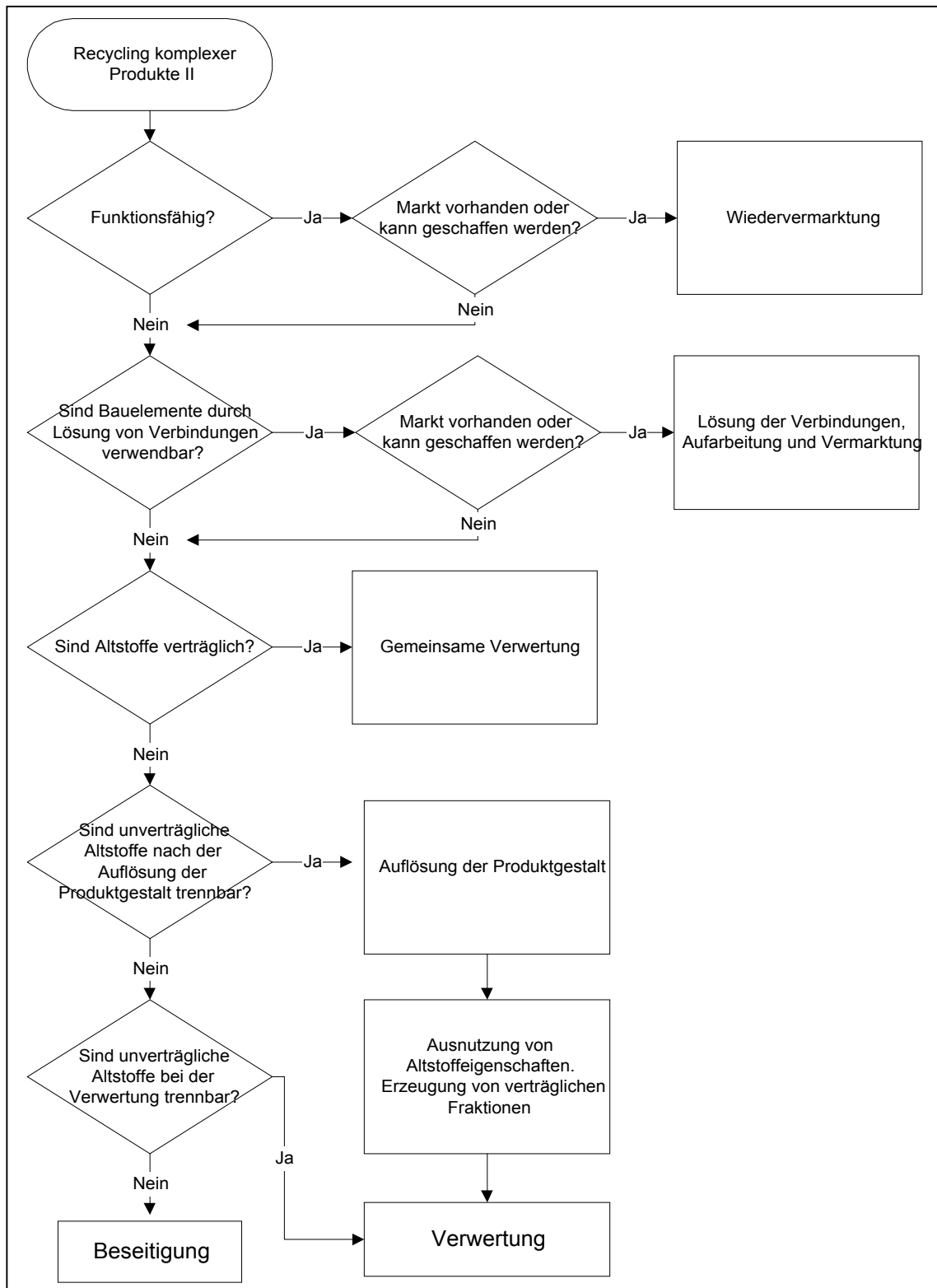


Abbildung 4: Ausnutzung unverträglicher Altstoffeigenschaften beim Recycling

3 Demontage und Aufbereitung komplexer Produkte

3.1 Werkstoffgruppen

Werkstoffe werden nach ihren Eigenschaften und ihrer Beschaffenheit in drei Gruppen (Werkstoffarten) eingeteilt: metallische Werkstoffe, nichtmetallische organische Werkstoffe (NOW) und nichtmetallische anorganische Werkstoffe (NAW). Die Werkstoffarten werden in Werkstoffgruppen und die Werkstoffgruppen in verschiedene Werkstoffe unterteilt, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3: Hierarchie der Werkstoffe mit Beispielen [Hor 1991]

Werkstoffarten	Metallische Werkstoffe z.B. Eisenmetalle	NOW: nichtmetallische organische Werkstoffe z.B. Kunststoffe	NAW: nichtmetallische anorganische Werkstoffe z.B. Glas
Werkstoffgruppen	z.B. Eisen	z.B. Thermoplaste	z.B. Flachglas
Werkstoffe	z.B. spezifische Stahllegierung	z.B. spezifische Kunststoffsorte	z.B. spezifische Glassorte

Als vierte Werkstoffart sind die Verbundstoffe zu nennen, die aus einer gezielten Kombination von zwei oder mehreren Werkstoffen mit spezifischen Eigenschaften hergestellt werden.

Altstoffe sind Werkstoffe aus Produkten, die einer Verwertung zugeführt werden und werden ebenfalls in den o.g. Gruppen als Altstoffart, Altstoffgruppe oder Altstoff unterteilt.

Ziel der Aufbereitung ist die Gewinnung verträglicher Altstofffraktionen durch die Entfernung unverträglicher Altstoffe. Hierzu müssen Altstoffarten und Altstoffgruppen und unverträgliche Altstoffe voneinander getrennt werden. Eine Trennung ist durchführbar, wenn unverträgliche Altstoffe voneinander verschiedene Altstoffeigenschaften aufweisen. Die Trennung in Fraktionen ist abhängig von den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Altstoffe.

3.2 Werkstoffeigenschaften

Werkstoffe müssen spezifische Funktionen erfüllen. Sie werden aufgrund genormter Eigenschaften ausgewählt, um diese Funktionen auszuführen. Faktoren, die für die Auswahl von Werkstoffen von Bedeutung sind, werden in Abbildung 5 dargestellt: siehe auch [BMBF 1995].

Auswahl von Werkstoffen		Rechtliche Rahmenbedingungen:	
		<ul style="list-style-type: none"> • Gesetze • Technische Anleitungen • Verordnungen 	
Normen und Standards:	Werkstoffeigenschaften:	Wirtschaftliche Bedingungen:	
<ul style="list-style-type: none"> • DIN • ISO • CEN 		<ul style="list-style-type: none"> • Primärmaterialwert • Sekundärmaterialwert • Verarbeitungskosten 	
↓			
Elektrische Eigenschaften:	Magnetische Eigenschaften:	Oberflächen Eigenschaften:	Optische Eigenschaften:
<ul style="list-style-type: none"> • Leitfähigkeit • Widerstand • Verlustfaktor 	<ul style="list-style-type: none"> • Ferromagnetisch • Paramagnetisch • Diamagnetisch 	<ul style="list-style-type: none"> • Aussehen • Reibungszahl • Hydrophobie 	<ul style="list-style-type: none"> • Reflexion • Lichtdurchlässigkeit • Brechindex
Thermische Eigenschaften:	Werkstoffeigenschaften f (T, t, p)		Chemische Eigenschaften:
<ul style="list-style-type: none"> • Stabilitätsgrenze • Leitfähigkeit • Ausdehnungskoeffizient • Schmelzpunkt • Siedepunkt 			<ul style="list-style-type: none"> • Zusammensetzung • Dichte • Standardpotential • Korrosionsbeständigkeit • Giftigkeit
Mechanische Eigenschaften			
Verformung:	Statische Eigenschaften:	Zeitstandverhalten:	Zähigkeit:
<ul style="list-style-type: none"> • Elastizitätsmodul • Schubmodul • Kriechmodul • Bruchdehnung 	<ul style="list-style-type: none"> • Zugfestigkeit • Streckgrenze • Elastizitätsgrenze • Druckfestigkeit • Biegefestigkeit • Härte 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitstandfestigkeit • Zeit-Dehngrenze • Wärmefestigkeit • Dauerfestigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Kerbschlagarbeit • Reißfähigkeit • Übergangstemperatur

Abbildung 5: Werkstoffeigenschaften als ein Faktor bei der Auswahl von Werkstoffen

Im folgenden Kapitel werden Recyclingverfahren nach den ausgenutzten chemischen und physikalische Altstoffeigenschaften systematisiert. Wenn Altstoffeigenschaften, die für das Recycling von Bedeutung sind, bei der Produktplanung (Auswahl von Werkstoffen) berücksichtigt werden, kann das Recycling optimiert werden.

3.3 Verbindungselemente

Jedes technische Produkt besteht aus einzelnen Bauteilen, die erst durch Verbindungen zu einer funktionellen Einheit zusammengesetzt werden. Es wird geschätzt, daß 50 % der Zeit und oft noch ein höherer Anteil der Kosten in der metallverarbeitenden Industrie für das Verbinden von Einzelteilen aufgewendet werden. Verbindungstechnik ist damit das wichtigste Verfahren der industriellen Fertigung [Bau 1991]. Verbindungen sind nicht nur für die Demontage, sondern auch für Form, Herstellungsverfahren, Kosten, technische Leistungen, Wirtschaftlichkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit von Produkten entscheidend [PaB 1997].

Die Verbindungsstellen zwischen Bauelementen haben neben den mechanischen Funktionen (Aufnahme von Zug-, Druck- und Scherkräften) weitere Funktionen zu erfüllen; u.a. elektrische Leitung, Dichtigkeit, Wärmeleitung und Korrosionsbeständigkeit.

Verbindungen werden nach DIN 8593 nach ihren physikalischen Merkmalen in die Klassen Formschluß, Kraftschluß und Stoffschluß geordnet [DIN 8593 1985]. Die drei Verbindungsklassen enthalten zahlreiche Verbindungen unterschiedlicher physikalischer Prinzipien, siehe Tabelle 4.

Tabelle.4: Eigenschaften von Form-, Kraft- und Stoffschlußverbindungen [Dub 1990]

	Formschluß	Kraftschluß	Stoffschluß
Verbindungsart	Verbindung zweier Bauteile durch ihre Formgebung	Verbindung zweier Bauteile durch Reibung oder Feldkräfte	Verbindung von Bauteilen durch beteiligte Materialien
Einsatzzweck	Häufig und leicht zu lösen	Einfache und kostengünstige Verbindungen	Kostengünstiges Verbinden bei Einzelstücken und Kleinserien mit guter Reparaturmöglichkeit
	Verbindung von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen	Verbindung von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen	Verbindung von jeweils geeigneten Werkstoffen
Belastungsart	Aufnehmen von Relativbewegungen	Aufnehmen von Überlasten durch Rutschen	Aufnehmen mehrachsiger, auch dynamischer Belastungen
Beispiel	Schnapp- und Spannverbindungen, Band mit Schloß	Magnet- und Klettverbindungen, Schrauben	Löten, Schweißen, Kleben

Verbindungen werden je nach Aufgabenstellung ausgesucht und eingesetzt. Die Auswahl der Verbindungen kann durch eine Verbindungssystematik oder durch Konstruktionskataloge erfolgen [VDI 2232 1990]. Weitere ausführliche Informationen zu Verbindungen und Verbindungstechniken siehe Bauer [Bau 1991] und Roth [Rot 1996].

Form- und Kraftschlußverbindungen werden durch die Verbindungsauswahl und die Positionierung demontagegerecht gestaltet. Faktoren, die von Bedeutung für die Demontage aller Verbindungsarten sind:

- Art und Zahl der Verbindungen,

- Zugänglichkeit der Verbindungsstellen,
- notwendige Relativbewegung von Verbindungselementen oder Bauteilen und
- notwendige Zeit, um die Verbindung oder Verbindungselemente zu trennen.

Spezifische Anforderungen für die Gestaltung von demontagegerechten Form- und Kraftschlußverbindungen und die Konstruktion von demontagegerechten Produkten sind u.a. in [Ste 1994], [PaB 1997] zusammengefaßt.

3.3.1 Demontage von Verbindungselementen

Bei der Demontage erfolgt die Trennung der Produktteile an der Verbindungsstelle. Die Demontage kann in die zerstörungsfreie, teilweise zerstörungsfreie und in die zerstörende Demontage unterteilt werden, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5: Demontagearten

Demontageart	Beschreibung
Zerstörungsfreie Demontage	Die Trennung von Produktbauteilen erfolgt an den Verbindungsstellen bzw. Verbindungselementen. Die Demontage ist zeitintensiv und erfolgt meistens „per Hand“. Eine teilweise Automatisierung ist möglich, z.B. die umgekehrte Montage, die aber nur für wenige Produkte durchführbar ist.
Teilweise zerstörungsfreie Demontage	Zerstörung von Verbindungselementen, aber Erhalt von Bauteilen, z.B. Aufschneiden von Kunststoffverbindungen, Aufbohren von Schrauben, Entlötlung.
Zerstörende Demontage	Erzeugung von neuen Trennstellen mit dem Ziel der Verwertung von Altstoffen und nicht der Verwendung von Bauteilen. Der Übergang zu einer Zerkleinerung ist fließend.

Nur durch eine Demontage von Produkten ist eine Wieder- oder Weiterverwendung von Produktbauteilen möglich. Für die Demontage ist die Trennung von Bauteilen an Verbindungsstellen der bedeutendste Verfahrensschritt. Die Auswahl, Positionierung und Gestaltung von Verbindungen ist eine direkte Aufgabe von Produktdesignern und soll einen erneuten Einsatz von Produkten zulassen. Die mechanische Auflösung von Form- und Kraftschlußverbindungen gehört zu den gängigen Wieder- und Weiterverwendungsstrategien.

3.3.2 Stoffschlußverbindungen

Stoffschlußverbindungen werden im Gegensatz zu Form- und Kraftschlußverbindungen als nicht trennbar und damit nicht recyclinggerecht eingestuft [Dub 1990], obwohl es möglich ist,

die Verbindung aufzulösen, indem unterschiedliche Werkstoffeigenschaften ausgenutzt werden. Abhängig von Verbindungsart und Werkstoffen ist somit eine teilweise zerstörungsfreie Demontage oder eine zerstörende Demontage von Stoffschlußverbindungen durchführbar. Altstoffe, die mit Kleb- oder Lötverbindungen zusammengefügt sind, sind beim Recycling nicht automatisch als verträglich oder unverträglich einzustufen. Die Verträglichkeit hängt von den Altstoffen und vom Recyclingverfahren ab.

3.3.2.1 Klebverbindungen

Kleben ist das Verbinden zweier Oberflächen durch eine meist organische Flüssigkeit, die im Zustand niedriger Viskosität aufgetragen wird. In der anschließenden Härtingsphase erhöht sich die Viskosität der Klebschicht kontinuierlich so lange, bis sie sich wie ein starrer elastischer Festkörper verhält [Dom 1998]. Durch Kleben können Werkstoffe ohne eine wesentliche Änderung ihres Gefüges miteinander verbunden werden.

Adhäsion und Kohäsion sind die Kräfte, die eine Klebeverbindung zusammenhalten und die bei einer Trennung der Altstoffe überwunden werden müssen.

Adhäsion ist die Kraft, die die Haftung von Kunststoffen an den Oberflächen weiterer Werkstoffe bewirkt und durch die folgenden Adhäsionsformen beschrieben werden kann:

- physikalische Adhäsion durch zwischenmolekulare Kräfte zwischen Bauteil und Kunststoff,
- mechanische Verankerung des Kunststoffs in der submikroskopischen Rauigkeit der weiteren Werkstoffe,
- chemische Adsorption durch atomare Bindekräfte zwischen Kunststoff und Werkstoff,
- Diffusion von Kunststoff in die weiteren Werkstoffe.

Kohäsion ist die Summe der Kräfte, die den Kunststoff selbst zusammenhalten:

- Van-der-Waals-Kräfte,
- Massenanziehkräfte,
- Bindung zwischen den einzelnen Molekülen des Kunststoffs [Wim 1992].

3.3.2.2 Lötverbindungen

Löten ist ein Verfahren zum Verbinden metallischer Werkstoffe mit Hilfe eines geschmolzenen Zusatzwerkstoffs (Lot). Das Lot hat eine niedrigere Schmelztemperatur als

die zu verbindenden Grundwerkstoffe, die benetzt werden, ohne zu schmelzen. Nichtmetallische anorganische Werkstoffe sind ebenfalls lötbar, dagegen werden nichtmetallische organische Werkstoffe nicht gelötet, sondern geklebt. Bei einer Entlötung muß die Schmelztemperatur des Lotes überschritten werden und das flüssige Lot abgeführt werden. Lötverbindungen und die Entlötung werden in Kapitel 6 ausführlich beschrieben.

3.3.2.3 Schweißverbindungen

Beim Schweißen werden die zu verbindenden Grundwerkstoffe im plastischen oder flüssigen Zustand durch die Anwendung von Wärme oder Druck oder von beidem in der Schweißzone zusammengefügt. Da bei geschweißten Verbindungen nur ähnliche Werkstoffe verbunden werden können, ist eine gemeinsame Verwertung ohne Herabsetzung der Sekundärwerkstoffqualität durchführbar. Eine Trennung der geschweißten Altstoffe ist nur durch eine Zerstörung der Verbindung möglich (zerstörende Demontage). Die Auflösung von Schweißverbindungen wird deswegen hier nicht weiter untersucht.

3.4 Trennung von Stoffschlußverbindungen

Die chemische und thermische Auflösung von Stoffschlußverbindungen durch die Ausnutzung unterschiedlicher Altstoffeigenschaften kann als Demontageschritt durchgeführt werden, siehe Tabelle 6.

Tabelle 6: Trennung von Stoffschlußverbindungen (Überblick)

Stoffschluß- verbindung	Recycling durch	Zerstörungs- frei	Teilerstörung	Zerstörung
Lot	Entlöten		●	
Kleb	Auflösen		●	
Schweiß	Zerstörung			●

Da nicht alle Werkstoffe und Werkstoffkombinationen löt- oder klebbar sind, ist die Auflösung von Stoffschlußverbindungen als eine spezifische und nicht allgemeine Recyclingstrategie zu verstehen.

3.4.1 Ausnutzung chemischer Eigenschaften

3.4.1.1 Klebverbindungen

Durch Ausnutzung unterschiedlicher chemischer Werkstoffeigenschaften sind Klebverbindungen trennbar. Verbundwerkstoffe können bei der Untersuchung der Werkstoffeigenschaften theoretisch als geklebte Verbindungen betrachtet werden, wenn sie aus Kunststoffen oder Kunststoffen mit weiteren Werkstoffen bestehen. Bei der Auflösung sind dann die gleichen physikalischen und chemischen Parameter anwendbar.

Die Fähigkeit von Kunststoffen, sich in organischen Lösemittel aufzulösen, ist von den einzelnen Werkstoffen, Lösemitteln und Verfahrensparametern abhängig. Verträgliche Altstoffe werden gemeinsam aufgelöst, stören bei der Auflösung nicht und verursachen keine Herabsetzung der Sekundärkunststoffqualität. Als nicht auflösbare Störkomponenten bleiben unverträgliche Altstoffe als Feststoffe in der Lösung enthalten. Falls keine Entfernung aus der Lösung erfolgt, setzen sie als Einschluß die Qualität der Sekundärkunststoffe erheblich herab. Eine Trennung in lösliche und nichtlösliche Altstoffe nutzt unverträgliche Altstoffeigenschaften aus und kann als Recyclingschritt durchgeführt werden.

Bei der Auflösung von Kunststoffen verringern sich die Adhäsions- und Kohäsionskräfte. Die Auflösung eines spezifischen Kunststoffs ist abhängig vom Massenverhältnis Kunststoff zu Lösemittel (Massenwirkungsgesetz), vom Lösemittel selbst und den Betriebsparametern.

Vorausgesetzt, die Polymere werden in sehr niedriger Konzentration aufgelöst, kann die Auflösung mathematisch bzw. chemisch beschrieben werden. Die Auflösung von Polymeren in Lösemitteln (mit vielen Vereinfachungen) ist durch die Flory-Higgins-Theorie erstmals beschrieben worden [Flo 1983]. Eine Zusammenfassung der Theorie der Auflösung von Kunststoffen ist in der Arbeit von Thiele wiedergegeben [Thi 1994]. Hier wird die Auflösung von einzelnen Kunststoffen und auch von Kunststoffgemischen theoretisch beschrieben. Das thermodynamische Verhalten von Polymeren in Lösungen kann beispielsweise aus Elias [Eli 1981] oder Atkins [Atk 1987] entnommen werden.

Für eine erfolgreiche Demontage von Kunststoffverbindungselementen oder Kunststoffverbund muß das Lösemittel in Kontakt mit dem zu lösenden Element kommen, ohne daß eine Zerkleinerung notwendig ist. Wie alle Transportprobleme kann die Auflösung mathematisch als Bilanzgleichung beschrieben werden. Die erfolgreiche Durchführung ist von der Geometrie der Verbindung bzw. des Verbundwerkstoffs abhängig. Nur bei einer ausreichenden Benetzungsfläche ist eine Auflösung möglich. Die Auflösung von Verbindungen mit einer

großflächigen Verklebung zwischen Altstoffen, die für die ausgewählten Lösemittel nicht durchlässig sind, scheitert an der Zeit, die für die Trennung notwendig ist. Verfahrenstechnisch ist die Auflösung thermoplastischer Altstoffe durchführbar, an der Auflösung von Duroplasten und Elastomeren wird intensiv geforscht [Gie 1998].

Verbindungselemente bzw. Verbundstoffe aus der Kombination verschiedenener Altstoffarten und Kunststoffe, die für die Auflösung geeignet sind, sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Chemische Trennung von Verbindungen bzw. Verbundstoffen

Aufzulösender Altstoff	In Form bleibender Altstoff
<ul style="list-style-type: none"> • Thermoplaste • Duroplaste • Elastomere 	<ul style="list-style-type: none"> • Metalle • Nichtmetallische organische Altstoffe (z.B. Holz, Textilien) • Nichtmetallische anorganische Altstoffe (z.B. Glas, Keramik)

Die Trennung von Kunststoffsorten durch eine selektive Auflösung ist auch als Recyclingstrategie für Kunststoffe möglich. In Tabelle 8 (Seite 25) werden bekannte Lösungsmittel und Nichtlösungsmittel für wichtige thermoplastische Kunststoffe wiedergegeben [Sch 1997]. Einige Verfahren zum Auflösen von Kunststoffen sind aus analytischen Methoden der Kunststoffidentifikation abgeleitet und bis jetzt nur im Labormaßstab verwendet worden [Qua 1996]. Weitere Verfahren sind im größeren Maßstab umgesetzt worden [NaL 1990].

Vorteile der Auflösung von Kunststoffen bei Klebverbindungen und Kunststoffverbundwerkstoffen gegenüber traditionellen Recyclingverfahren sind:

- Polymere werden gelöst und später ausgefällt und besitzen eine Qualität ähnlich der Neeware,
- Verbundwerkstoffe, die bis jetzt als nicht recyclingfähig angesehen werden, können gut recycelt werden,
- die Verwendung von Produktteilen nach einer Entklebung der Verbindung ist möglich.

Nachteile der Auflösung sind:

- Die Geometrie der Klebverbindungen ist zum Teil für ein chemisches Recycling nicht geeignet. Die Verbindungsfläche muß zugänglich gestaltet werden.

- Auflösungsverfahren sind gegenüber den traditionellen Kunststoffumschmelzverfahren wenig erprobt, nur wenige spezifische Verfahren sind großtechnisch durchgeführt worden.
- Bei der Verwendung von Lösemitteln besteht immer ein umweltschädigendes Emissionspotential.

Tabelle 8: *Auflösung und Nichtauflösung bestimmter Kunststoffe [Sch 1997]*

Auflösung und Nichtauflösung bestimmter Kunststoffe									
f (spezifische Oberfläche, Temperatur, Druck, Diffusionsgeschwindigkeit, Konzentration)									
● Auflösung ☒ Nichtauflösung - Keine Angabe	PA	PE	PETP	PMMA	POM	PP	PS	PUR	PVC
Aceton	-	☒	☒	●	-	☒	☒	-	☒
Aliphat. Kohlenwasserstoffe	-	-	☒	-	-	-	-	-	-
Ameisensäure	●	-	-	-	-	-	-	●	-
Benzylalkohol	-	-	-	-	●	-	●	-	-
Butyrolaceton	-	-	-	-	●	-	-	-	-
Chloroform	-	-	-	●	-	-	●	-	-
Cyclohexanon	-	-	-	-	-	-	●	-	●
Dekalin	-	●	-	-	-	●	-	-	-
Diethylether	-	-	-	☒	☒	-	-	-	-
Diethylether	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dimethylformamid	-	-	-	-	●	-	-	●	●
Ethylacetat	-	-	-	●	-	-	-	-	-
Heptan	-	-	-	-	-	-	-	-	☒
Kohlenwasserstoffe	☒	-	-	-	-	-	-	☒	-
Konzentrierte Schwefelsäure	●	-	-	-	-	-	-	-	-
Methanol	☒	-	☒	☒	☒	-	-	☒	☒
Methlenchlorid	-	-	-	-	-	-	●	-	-
m-Kersol	●	-	●	-	-	-	-	●	-
Niedere Alkohole	-	☒	-	-	-	☒	☒	-	-
Nitrobenzol	-	-	●	-	-	-	-	-	-
p-Xylol	-	●	-	-	-	●	-	-	-
Tetrahydrofuran	-	-	-	-	-	-	-	-	●
Toluol	-	-	-	●	-	-	●	-	-
Trichlorbenzol	-	●	-	-	-	●	-	-	-
Trichloressigsäure	-	-	●	-	-	-	-	-	-

3.4.1.2 Lötverbindungen

Durch die Anwendung der Elektroerosion können metallische Verbindungselemente theoretisch zerstört werden. Der Verfahrensparameter Wirkung pro Zeiteinheit ist allerdings nicht ausreichend groß, um dieses Verfahren als Recyclingstrategie einzusetzen.

Die selektive Auflösung von Lötverbindungen oder weiteren Verbindungselementen, z.B. Schrauben oder Nieten, in Säuren oder Basen ist als Verwendungs- oder Verwertungsstrategie nicht durchsetzbar, da viel Zeit benötigt wird und die Zugänglichkeit von metallischen

Verbindungselementen für die Lösungsmittel ohne Zerkleinerung nicht oder nur in Ausnahmefällen gegeben ist.

3.4.2 Ausnutzung thermischer Eigenschaften

3.4.2.1 Klebverbindungen

Verbindungselemente aus Kunststoffen schmelzen bei niedrigen Temperaturen und lassen so eine Trennung der verbundenen metallischen bzw. nichtmetallische anorganischen Altstoffe oder Bauelemente zu [Hes 1995].

Das Ausnutzen weiterer Altstoffeigenschaften, um geklebte Altstoffe zu trennen, z.B. die thermische Ausdehnung der verschiedenen Altstoffe, ist theoretisch möglich, findet aber in der Praxis noch keine Anwendung.

3.4.2.2 Lötverbindungen

Altstoffe, die mit Lötverbindungen zusammengefügt werden, können voneinander getrennt werden, indem thermische Altstoffeigenschaften (Schmelzpunkt des Lotes) ausgenutzt werden. Die Entlötlung wird bei der Reparatur von Produkten durchgeführt, als allgemeine Recyclingstrategie für die Demontage von Produkten aber kaum angewendet. Lötstoffe besitzen einen spezifischen Schmelzbereich, der niedriger als die Schmelztemperaturen der verbundenen Bauelemente ist. Sowohl weich- als auch hartgelötete Verbindungen können getrennt werden, indem man thermische Eigenschaften ausnutzt [KrE 1981]. Die Entlötlung wird in den Kapiteln 6 und 7 ausführlich beschrieben.

3.5 Aufbereitung komplexer Produkte

Ziel der Aufbereitung ist die Erzeugung verträglicher Altstofffraktionen, die einen hochwertigen Sekundärwerkstoff ergeben. Eine Trennung von Altstoffarten und Altstoffgruppen wird vorausgesetzt. Die Trennung von Altstoffen in verträglichen Fraktionen muß ebenfalls durchgeführt werden. Fest geregelte Lieferbedingungen für Altstoffe existieren für metallische Altstoffe, sie werden im Abschnitt 3.5.1 zusammengefaßt. Für die Sekundärherstellung nichtmetallischer organischer und anorganischer Werkstoffe werden die Lieferbedingungen in Absprache mit dem Recyclingbetrieb festgelegt. Eine Zusammenfassung ist daher nicht möglich.

3.5.1 Metallische Werkstoffe

Die Überwachung der Schrottzusammensetzung und die Einhaltung der Vorgaben der Schrottklassen sind Aufgaben des Aufbereitungsbetriebs. Die Tendenz verstärkt sich, daß der Aufbereitungsbetrieb die Schrottchargen zusammenstellt und die Verantwortung für die Qua-

lität der daraus gewonnenen Legierung trägt. In Zukunft wird das ökonomische Risiko für die Sekundärmetallherstellung nicht bei der Metallhütte, sondern beim Altmetallaufbereitungsbetrieb liegen.

Qualität und Eigenschaften von Primärmetallen und Sekundärmetallen sind bei Einhaltung der genormten Legierungszusammensetzung gleich. Primär- und Sekundärmetalle werden als Werkstoffe voneinander nicht unterschieden, siehe z.B. [DIN 1708], [DIN 17100], [DIN 1712]. Eine Ausnahme bilden Lötstoffe aus wiedergewonnenen Loten in den USA. Sie müssen gegenüber Lötstoffen aus primären Metallen Grenzwerte für Phosphor und Schwefel einhalten.

Metallschrott wird in drei Hauptklassen unterteilt:

- Kreislaufschrött: fällt bei der Metallherstellung an und wird als Rohstoff sofort wieder eingesetzt.
- Neuschrott: fällt bei der Produktherstellung an, ist von hoher Qualität und wird wegen der Sortenreinheit als Sekundärrohstoff geschätzt.
- Altschrott: gemischter Schrott aus der Produktverwertung oder -beseitigung. Die Zusammensetzung ist selten sortenrein, die Qualität entsprechend schlecht. Gemischter Schrott kann zu Sekundärmetall aufgearbeitet werden, muß aber mit Neuschrott, Kreislaufschrött oder Primärmetall verdünnt werden.

Kreislaufschrött und Neuschrott waren in der Vergangenheit der Haupteinsatzstoff (von der Menge her) für das Recycling von Metallen. Durch bessere Prozeßführung, z.B. bei der Herstellung von Halbzeug, reduziert sich die Masse an Kreislauf- und Neuschrott. Gleichzeitig steigt durch die Einführung von Recyclingquoten die Masse an Altschrott, die einer Verwertung zugeführt werden muß [Bor 1998]. Durch die steigende Masse an zu verwertendem Altschrott nimmt der Anteil unerwünschter Elemente in Sekundärmetallen zu und setzt die Qualität der Sekundärmetalle stark herab [HHS 1988], [DKK 1988].

Für die Anlieferung von Schrotten existieren Lieferbedingungen in Form von Schrotlisten oder Schrottklassen, die teilweise Grenzwerte für Fremdmaterialien enthalten, z.B. die Europäische Sortenliste vom Juni 1995 für Eisen- und Stahlschrott [BDS 1996] und die Allgemeinen Vertragsbedingungen für den Handel mit Nebenmetallen (Aluminium, Blei, Kupfer, Rotguß/Bronze, Messing, Magnesium, Nickel, Zink und Zinn) [Mün 1997].

Allgemeine Anforderungen sind:

- Einhaltung der festgesetzten Schrottklassen,

- Ausschluß von radioaktiven oder explosiven Materialien,
- Ausschluß von Metallen, die physikalische Vorgaben (Abmessung, Gewicht) nicht einhalten und
- Ausschluß von Schrotten, die Fremdbestandteile enthalten (Metalle, Kunststoffe usw.), die nicht ausdrücklich in der Klassifizierung erlaubt sind. Grenzwerte zwischen 0 – 2 % für Öl, Staub, Schmutz, Oxide, Fette und Feuchtigkeit sind in den meisten Qualitätsklassen vorgeschrieben.

Die Zahl der Schrottklassen und Altschrottklassen, vorgeschriebene Trennungen und Grenzwerte sind für die wichtigsten Metalle in Tabelle 9 angegeben.

Tabelle 9: *Bedingungen und Grenzwerte für Altschrotte [BDS 1996], [Mün 1997]*

Metall	Zahl der Schrottklassen	Davon Altschrott	Trennung nach	Grenzwerte für	Mindestgehalt für	Quelle
Aluminium	22	9	Guß- und Knetlegierungen, Legierungsbestandteile	Cu, Fe, Pb, Sn, Zn	-	[Mün 1997]
Blei	5	5	Produktklasse, Weich- und Hartblei	Sn	Pb, Sn	[Mün 1997]
Eisen	11	6	Guß- und Knetlegierungen, Legierungsbestandteile	Cu, Cr, Mo, Ni, Sn	-	[BDS 1996]
Kupfer	13	12	Legierungsart, Legierungsbestandteile	Al, Pb, Sn, Lot	Cu, Sn	[Mün 1997]
Mangan	3	2		Al, Fe, sonstige Metalle	-	[Mün 1997]
Nickel	13	4		Co, Cu, Fe, Pb, Sn	-	[Mün 1997]
Zink	11	3		Fe	-	[Mün 1997]
Zinn	5	2		-	Sn	[Mün 1997]

Die internationalen rechtlichen Grundlagen für die Verwertung von Metallen wurden von Krol und Steil zusammengefaßt [KrS 1997/1], [KrS 1997/2].

Bei einer guten Zusammensetzung von Altmittelklassen können die Parameter des Sekundärmetallherstellungsverfahrens optimiert werden. Bei einer bestmöglichen Zusammensetzung wird ein Minimum an Neu- bzw. Kreislaufsrott, Legierungselementen und primären Rohstoffen eingesetzt und eine dem Primärmetall entsprechende Qualität erreicht.

3.6 Produktzerkleinerung

Unter Zerkleinerung ist das Zerteilen fester Stoffe durch Überwindung der Bindungskräfte an den entstehenden Trennflächen unter Beibehaltung des Aggregatzustandes und ohne wesentliche Veränderung der physikalischen Eigenschaften zu verstehen. Eine Zerkleinerung ist beim Recycling durchzuführen, wenn die nachgeschaltete Aufbereitung durch die Zerkleinerung begünstigt wird oder wenn ein Fertigprodukt aus Altstoffen erzeugt werden soll.

Die Zerkleinerung kann eine Trennung verschiedener Altstoffe bewirken und wird als erste Stufe der Aufbereitung durchgeführt. Altstoffkombinationen werden bei einer Zerkleinerung oft nicht vollständig voneinander getrennt. Im Unterschied zur Demontage ist die Trennfläche nicht gleich der Verbindungsfläche. Es verbleiben immer zerkleinerte Teile, die aus mehreren Altstoffen zusammengesetzt sind.

Für die Aufbereitung von gemischten Schrotten und größeren Produkten, die zu Entsorgung anstehen, werden fast ausschließlich Shredder eingesetzt [Kel 1991]. Metallscheren, Prallmühlen, Schneidemühlen und Hammermühlen finden auch bei der Zerkleinerung von Altstoffen Verwendung. Einen Überblick über Zerkleinerungsaggregate, die bei der Altstoffaufbereitung Verwendung finden, gibt Thomé-Kozmiensky wieder [TKm 1994].

Nach einer Zerkleinerung werden Altstoffarten, Altstoffgruppen und, sofern möglich, Altstoffe durch die Ausnutzung ihrer unterschiedlichen Altstoffeigenschaften voneinander getrennt. Eine einheitliche Korngröße wird bei der Zerkleinerung angestrebt, um die nachfolgenden Trennstufen optimal durchzuführen.

3.6.1 Ausnutzung mechanischer Eigenschaften

3.6.1.1 Selektive Zerkleinerung

Im Gegensatz zur Aufbereitung mineralischer Rohstoffe, die fast ausschließlich sprödes Bruchverhalten besitzen, können Altstoffe hier Unterschiede aufweisen. In Abhängigkeit vom Bruchverhalten und dem verwendeten Zerkleinerungsaggregat werden Altstoffe in bestimmten Korngrößenklassen angereichert. Das Ausnutzen unterschiedlichen Bruchverhaltens während der Zerkleinerung wird als selektive Zerkleinerung definiert. Spröde Altstoffe werden in kleineren Korngrößen als duktile Altstoffe angereichert. Durch eine anschließende Klassierung kann eine Altstofftrennung durchgeführt werden.

Das Bruchverhalten ist ein Merkmal von Altstoffen und ist u.a. eine Funktion von Dichte, Härte, Biege- und Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Temperatur,

Grenzflächenspannung, Zerkleinerungsaggregat und Zerkleinerungsparameter. Bruchphysik, Bruchmechanik und Kerbtheorie beschreiben den theoretischen Bruchvorgang in einem Altstoff. Das Verhalten von realen Altstoffen während einer Zerkleinerung kann aber schwer vorausgesagt werden. Dubbel [Dub 1990] gibt zwei wesentliche Gründe hierfür an:

1. Reale Partikel sind unregelmäßig geformt, d.h. die bei Beanspruchung entstehenden Spannungszustände sind kaum berechenbar und
2. Über Anriß- und Fehlstellen im Partikel, die für Bruchauslösung und Bruchfortschritt verantwortlich sind, liegen wenig Erkenntnisse vor.

Durch Versuchsreihen werden die optimalen Aggregate und Zerkleinerungsparameter festgestellt. Im allgemeinen lassen sich Altstoffe mit einem spröden Verhalten durch Zerkleinerung von Altstoffen mit duktilem Verhalten trennen. Eine grobe Abschätzung des Bruchverhaltens ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Bruchverhalten ausgewählter Altstoffe bei Raumtemperatur

Altstoffart	Spröde	Duktil
Metallische Altstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Aluminiumgußlegierungen • Gußeisen • Zink 	<ul style="list-style-type: none"> • Aluminium und Aluminiumknetlegierungen • Kupfer und Legierungen • Edelmetalle • Stahl • Zinn
Nichtmetallische organische Altstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Duroplaste • PC • PMMA • PS • PVC (hart) 	<ul style="list-style-type: none"> • Elastomere • PE • PP • PVC (weich) • Textilien
Nichtmetallische anorganische Altstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Glas • Keramik 	<ul style="list-style-type: none"> • Ton

Kombination aus spröden und duktilen Altstoffen (zweite und dritte Spalte der obigen Tabelle) können selektiv zerkleinert werden. Dies kann bereits beim Produktdesign berücksichtigt werden.

3.6.2 Ausnutzung thermischer Eigenschaften

3.6.2.1 Tiefkühlshreddern

Das Bruchverhalten ist von der Temperatur während der Zerkleinerung abhängig. Bei niedrigen Temperaturen werden bestimmte Altstoffe, insbesondere Stahl, spröde. Durch die Kaltversprödung wird die benötigte Zerkleinerungsenergie reduziert und das Zerkleinerungsprodukt für die anschließende Klassierung verbessert. Hierzu wird flüssiger Stickstoff bei einer Temperatur von minus 196 °C verwendet. Bei der Arbeitstemperatur der Tiefkühlzerkleinerung sind alle gängigen Kunststoffe spröde. Kupfer und Aluminium bleiben aufgrund von ihres kubisch-flächenzentrierten-Gitters auch bei niedrigen Temperaturen duktil. Die Möglichkeit einer selektiven Zerkleinerung von Stahl und weiteren Metallen, die in Tabelle 10 (Seite 30) unter „Duktil“ stehen, ist damit gegeben. Die Tieftemperaturzerkleinerung scheitert derzeit an den hohen Kosten für flüssigen Stickstoff.

3.7 Altstofftrennung

Ziel aller Aufbereitungsverfahren ist die Gewinnung verträglicher Altstofffraktionen, die bei der Sekundärwerkstoffherstellung genormte Sekundärwerkstoffe ergeben. Eine Trennung in Fraktionen ist nur möglich, wenn die chemischen und physikalischen Eigenschaften der zerkleinerten Altstoffe voneinander ausreichend verschieden sind und ein Trennverfahren, das diese Eigenschaften ausnutzt vorhanden ist. Da unverträgliche Altstoffe unterschiedliche Altstoffeigenschaften aufweisen, können durch die Ausnutzung dieser Eigenschaften die Altstoffe getrennt werden. Nur weil die Altstoffe unverträglich sind, sind sie voneinander zu trennen.

Die Aufbereitungsverfahren, die nach einer Zerkleinerung eingesetzt werden, sind aus bekannten Verfahren des Bergbaus übernommen worden. Sie werden im folgenden nach den ausgenutzten Altstoffeigenschaften geordnet, um den Zusammenhang zwischen Altstoffeigenschaften und Aufbereitungsverfahren zu verdeutlichen.

3.7.1 Ausnutzung physikalischer Eigenschaften

3.7.1.1 Trennung nach der Dichte

Die Dichte ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung der Altstoffe und der Temperatur und wird definiert als Quotient aus Masse und Volumen. Die unterschiedliche Dichte von Altstoffen wird bei der Aufbereitung ausgenutzt, um eine Trennung von gleichförmigen zerkleinerten Partikeln zu erzielen.

Die Dichtesortierung trennt Altstoffe nach ihrem spezifischen Gewicht in zwei Fraktionen (spezifisch schwer und spezifisch leicht). Methoden der Dichtesortierung sind in [Kel 1991] und [Nkl 1996] beschrieben. Verfahrenstechnisch ist die Trennung von Altstoffarten, Altstoffgruppen und Altstoffen, bei ausreichendem Dichteunterschied, durchführbar. Die Verfahren sind ausgereift und werden von mehreren Herstellern angeboten [Til 1995]. Eine Berechnung und Vorhersage für den Trennungserfolg bei einer Dichtentrennung ist nur für ideale Partikel möglich. Der Einsatz von Werkstoffen mit unterschiedlicher Dichte in Produkten, die für eine Wieder- oder Weiterverwendung nicht in Frage kommen, die aber verwertet werden sollen, kann als Teil einer Recyclingstrategie eingesetzt werden.

In Tabelle 11 wird die Dichte von ausgewählten Altstoffen dargestellt. In Abbildung 6 sind Dichtebereiche für die drei Altstoffarten gezeigt.

Tabelle 11: Dichte ausgewählter Altstoffe
[Sch 1997], [FiV 1993]

Dichte [g/cm ³] Bei 20 °C	Altstoffe
0,9 – 1,0	PE, PP, PB, PIB
1,0 – 1,2	PS, SAN,SB, ABS, ASA, PMMA, PPO, CP, CAB, PC, PA
1,2 – 1,5	PVC, POM, CA, PETP, PBTP, PSU, PUR, organisch gefüllte Preßmassen
1,5 – 1,8	Anorganisch gefüllte Preßmassen
1,8 – 2,2	PTFE
1,74	Magnesium
2,6 – 2,75	Aluminiumgußlegierungen
2,7	Aluminium
4,5	Titan
6,3 – 8,2	Stahllegierungen
7,58 – 7,73	Gußeisen
7,83	Stahl
7,14	Zink
7,28	Zinn
8,2 – 8,7	Bronze
8,4 – 8,8	Messing
8,93	Kupfer
8,64	Cadmium
8,9	Nickel
11,35	Blei

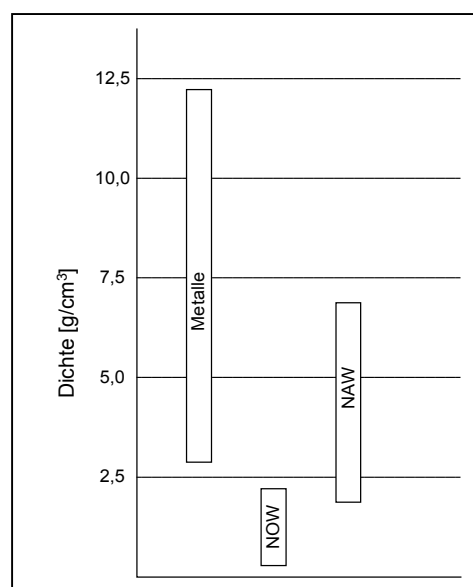


Abbildung 6: Dichte von Altstoffarten

3.7.1.2 Trennung durch Flotation

Die Hydrophobie ist eine Altstoffeigenschaft, die ausgenutzt werden kann, um Partikel mittels Flotation voneinander zu trennen. Die Hydrophobie kann durch die gezielte Verwendung von Chemikalien eingestellt oder herabgesetzt werden, um den Trennungserfolg zu steuern. Die Trennung erfolgt immer in die zwei Fraktionen hydrophob und hydrophil.

Die Flotation ist als Verfahren aufwendig, in der Erzaufbereitung aber weitgehend untersucht [Kel 1991]. Die Trennung erfolgt meist für Altstoffe innerhalb einer Altstoffgruppe, z.B. metallische Stäube oder verschiedene Kunststoffe. Eine Trennung von Altstoffarten und -gruppen ist leichter durch weniger aufwendige Verfahren durchführbar.

3.7.2 Ausnutzung chemischer Eigenschaften

3.7.2.1 Trennung nach der Löslichkeit

Chemische Eigenschaften, die für die Trennung zerkleinerter Altstoffe einsetzbar sind, sind die Löslichkeit in organischen Lösemitteln, die Löslichkeit in Säuren und Basen und das Korrosionsverhalten. Die Löslichkeit wird definiert als die Fähigkeit eines Stoffes, in Lösung zu gehen und ist stark von Temperatur, Konzentrationen und Druck abhängig.

Nach einer Zerkleinerung kann bei geeigneter Verfahrensführung eine Trennung in lösliche und unlösliche Altstoffarten, Altstoffgruppen und Altstoffe durch die Auflösung in organischen Lösemitteln durchgeführt werden. Die Verfahren sind weitgehend in Kapitel 3.4.1.1 beschrieben.

Metalle besitzen eine werkstofftypische chemische Beständigkeit gegenüber verschiedenen Säuren und Basen. Diese Beständigkeit ist nicht nur von der Art der Lösung, sondern auch von Temperatur, Konzentration, Druck und spezifischer Oberfläche abhängig. Bei der Verwertung von Altschrotten wird die Auflösung von Edelmetallen in Säuren als Verwertungsverfahren eingesetzt, z.B. bei der Verwertung von Edelmetallen aus Elektronikschrott. Die Trennung erfolgt in zwei Fraktionen: gelöst (flüssig) und nicht gelöst (fest). Die Löslichkeit der Altstoffarten wird in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Löslichkeit der Altstoffarten

<ul style="list-style-type: none"> ● im allgemeinen löslich (●) in Ausnahmefällen löslich - nicht löslich 	Säuren	Basen	Organische Lösemittel
Metallische Altstoffe	●	●	-
Nichtmetallische organische Altstoffe	-	-	●
Nichtmetallische anorganische Altstoffe	(●)	-	-

Unverträgliche Altstoffe verursachen durch ein unterschiedliches elektrochemisches Potential Altstoffkorrosion und die Auflösung von spezifischen Altstoffen. Die Korrosion als

Recyclingstrategie kommt wegen der dafür notwendigen Zeit nicht in Frage. Werkstoffkombinationen, die zu einer Korrosion führen, sollen nicht eingesetzt werden, da das Produkt während der normalen Produktlebensdauer zerstört werden könnte.

3.7.3 Ausnutzung elektrischer Eigenschaften

3.7.3.1 Trennung nach elektrischem Widerstand

Der elektrische Widerstand ist eine altstoffspezifische Eigenschaft, die nach einer Zerkleinerung eingesetzt werden kann, um metallische Altstoffe von nichtmetallischen Altstoffen zu trennen. Die Verfahren sind ausgereift und stehen zur Verfügung [Til 1996].

In Tabelle 13 und Abbildung 7 ist der elektrische Widerstand der drei verschiedenen Altstoffarten dargestellt.

Tabelle 13: Elektrischer Widerstand verschiedener Altstoffarten

Altstoffart	Widerstand [$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$]
Metallische Altstoffe	$10^{-6} - 10^{-2}$
Nichtmetallische organische Altstoffe	$10^9 - 10^{16}$
Nichtmetallische anorganische Altstoffe	$10^{10} - 10^{14}$

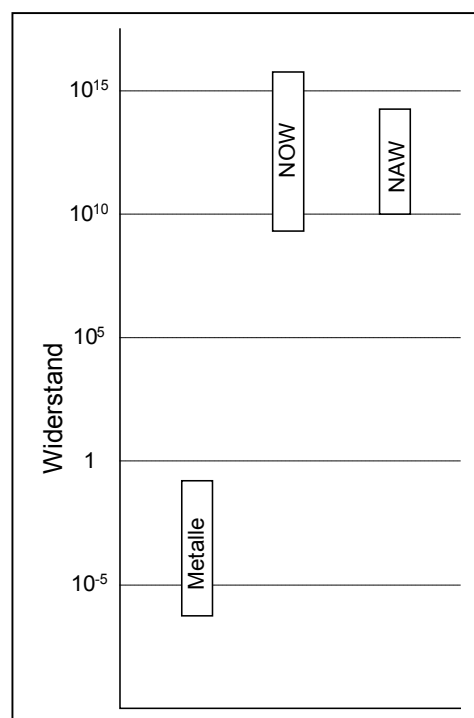


Abbildung 7: Elektrischer Widerstand von Altstoffarten

3.7.3.2 Weitere elektrische Trennverfahren

Nichtmetallische organische Altstoffe, insbesondere verschiedene Kunststoffe, die unterschiedliche Dielektrizitätszahlen aufweisen, können durch eine elektrostatische Sortierung voneinander getrennt werden. Das Trennverfahren befindet sich noch im Versuchsstadium [BBM 1995].

3.7.4 Ausnutzung magnetischer Eigenschaften

3.7.4.1 Magnetische Suszeptibilität

Altstoffe werden in Abhängigkeit von ihrer magnetischen Suszeptibilität als ferromagnetisch, paramagnetisch oder diamagnetisch eingeordnet, siehe Tabelle 14. Die magnetische Suszeptibilität wird definiert als das Verhältnis des Betrages der magnetischen Feldstärke zu einem Magnet.

Bei einer einfachen Magnetscheidung werden die magnetischen Eigenschaften von Altstoffen ausgenutzt, um ferromagnetische Stoffe von para- und diamagnetischen Stoffen zu trennen.

Tabelle 14: Magnetische Eigenschaften von Altstoffarten

Altstoffart	Ferromagnetisch	Paramagnetisch	Diamagnetisch
Metallische Altstoffe	•	•	•
Nichtmetallische organische Altstoffe			•
Nichtmetallische anorganische Altstoffe			•

Die Einteilung von metallischen Altstoffen in ferro-, para- und diamagnetisch ist in Tabelle 15 wiedergegeben.

Tabelle 15: Magnetische Eigenschaften metallischer Altstoffe [Hüt 1996]

Ferromagnetisch	Paramagnetisch	Diamagnetisch
<ul style="list-style-type: none"> • Gußeisen • Kobalt • Nickel • Nickel/Kupfer Legierungen (Ni>63%) • Stahl: hochlegiert (teilweise) • Stahl: un- und niedriglegiert 	<ul style="list-style-type: none"> • Aluminium • Chrom • Kupferlegierungen • Magnesium • Mangan • Platin 	<ul style="list-style-type: none"> • Cr-Ni-Mo Stähle • Hartmanganstahl • Magnesium • Reines Kupfer • Rost- und säuerbeständige Cr-Ni Stähle • Stahl: hochlegiert (teilweise) • Wismut • Zink • Zinn

Nach einer Zerkleinerung kann eine Trennung von Altstoffarten, Altstoffgruppen und Altstoffen durchgeführt werden, indem man unterschiedliche magnetische Suszeptibilitäten ausnutzt.

3.7.4.2 Trennung nach Wirbelstromeigenschaften

Wirbelstromeigenschaften sind für eine Trennung dia- und paramagnetischer Altstoffe ab einer Partikelgröße von 5 mm einsetzbar [Nkl 1996]. Das Verfahren wird verwendet, um Aluminium aus einem Nichteisen-Metallgemisch abzutrennen.

3.7.5 Ausnutzung optischer Eigenschaften

3.7.5.1 Optische Trennung

Unter optischen Altstoffeigenschaften sind Altstofffarbe, Lichtdurchlässigkeit und Lichtreflexion zu verstehen. Sie sind einsetzbar, um eine Trennung von Altstoffarten, Altstoffgruppen und Altstoffen durchzuführen. Die optische Sortierung wird hauptsächlich eingesetzt, um opake Materialien von durchsichtigem Glas zu trennen.

3.7.6 Trennung nach Stoffeigenschaften (Überblick)

Trennungsmöglichkeiten durch die Ausnutzung verschiedener Altstoffeigenschaften sind in Abbildung 8 zusammengefaßt.

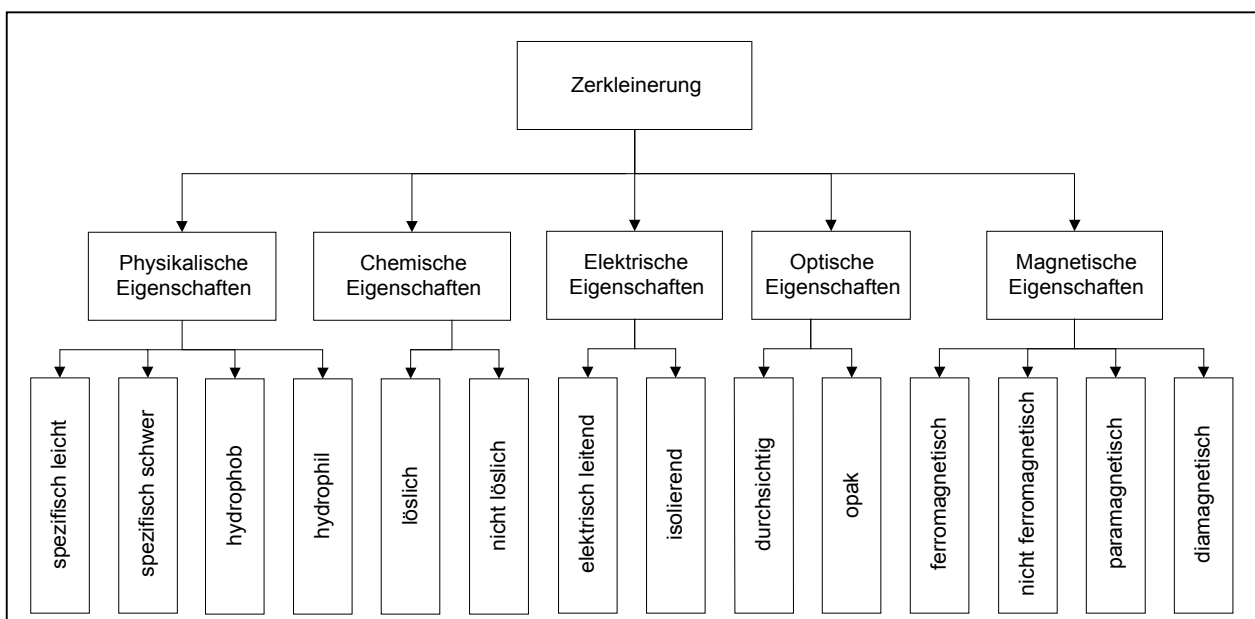


Abbildung 8: Trennung von Altstoffen durch Ausnutzung unterschiedlicher Altstoffeigenschaften

Bei traditionellen Recyclingverfahren werden pro Verfahrensschritt zwei Fraktionen erzeugt. Bei Verträglichkeit innerhalb der Fraktionen kann eine Verwertung (Herstellung eines Sekundärwerkstoffes) durchgeführt werden. Unverträgliche Fraktionen werden weiter getrennt oder beseitigt.

4 Produktgruppe Leiterplatten

Die Erfindung der Leiterplatte wird Charles Ducas zugeschrieben, der am 2. März 1925 den Patentantrag "Electrical Apparatus and Method of Manufacturing the Same" beim US-Patentamt einreichte [Duc 1925]. Leiterplatten sind aus der Technik unserer Zeit nicht mehr wegzudenken. Sie gelten hinsichtlich der Wertstoffanteile zu den wichtigsten, aber hinsichtlich der Schadstoffanteile zu den kritischsten Abfällen, die recycelt oder beseitigt werden müssen. Die Leiterplattenfraktion wird als Hauptproblem bei der Elektronikschrottverwertung und -verwertung eingestuft [Tar 1994]. Leiterplatten werden daher in dieser Arbeit als kritische Recyclingfraktion ausgewählt, um die in Kapitel 2 vorgestellten Prinzipien praktisch anzuwenden.

4.1 Altleiterplatten

Die anfallende Masse an Leiterplattenschrott wird auf ca. 3 % an der Gesamtmasse des Elektronikschrottaufkommens geschätzt [Sen 1996]. Das bedeutet, daß in Deutschland im Jahr 1999 56.000 t anfallen werden. Wird Leiterplattenschrott aus der Kraftfahrzeugentsorgung mitgerechnet, erhöht sich die zu entsorgende Masse auf 100.000 bis 120.000 t/a [Tar 1994].

4.2 Traditionelle Entsorgung von Leiterplatten

Beim Recycling von Leiterplatten wird die zerstörende Verwertung meist der aufwendigeren, nicht zerstörenden Demontage mit anschließender Bauteilverwendung vorgezogen. Begründet wird dies mit den kurzen Innovationszyklen für Leiterplattenbauteile und den rapiden Fortschritten hinsichtlich deren Funktionalität [Sen 1996], [Tar 1994]. Erst in jüngster Zeit wird von der Verwendung als Recyclingstrategie berichtet [Tsa 1999], [AfH 1999].

Die Entsorgung von Leiterplatten erfolgt traditionell durch Zerkleinerung. Ziel ist die Rückgewinnung von Kupfer, Nickel und Edelmetallen. Schadelemente und verkaufsfähige Bauteile werden teilweise vor der Zerkleinerung entfernt, überwiegend werden sie mitzerkleinert. Eine Trennung in die Fraktionen Metalle und Nichtmetalle wird nach der Zerkleinerung durchgeführt. Staub wird verfahrensbedingt produziert und als schadstoffhaltige Fraktion einer Beseitigung zugeführt. Bei der Zerkleinerung ist eine Wärmeentwicklung nicht zu vermeiden. Die Wärme ist ausreichend, um die Entstehung von

halogenhaltigen organischen Verbindungen unvermeidbar zu machen [Blu 1995]. Ein typischer Verfahrensablauf ist in Abbildung 9 dargestellt.

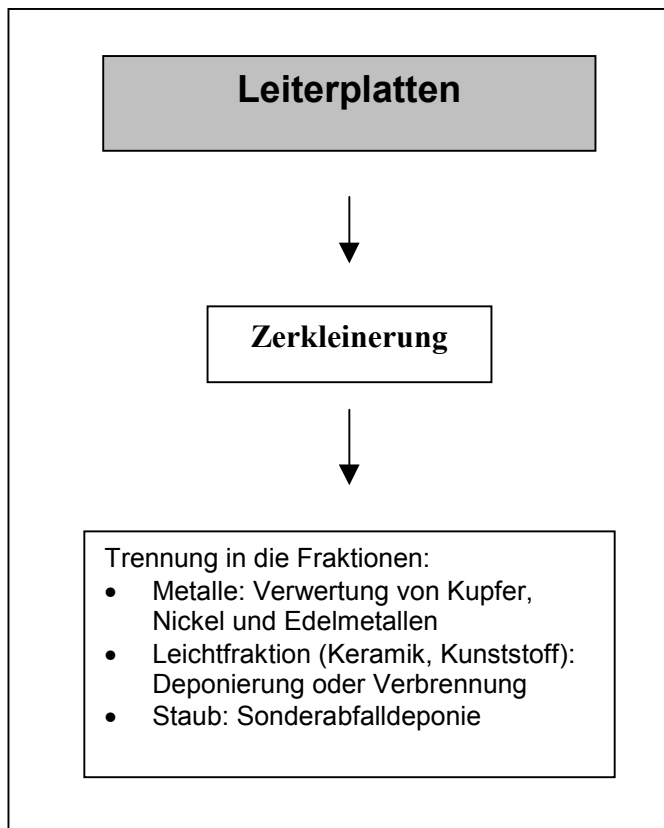


Abbildung 9: Verfahrensschema für traditionelle Leiterplattenverwertung

Beim traditionellen Recyclingverfahren werden unter zehn Massenprozent der gesamten Leiterplattenmasse als Sekundärwerkstoff verwertet. Die restlichen 90 % werden thermisch zersetzt oder beseitigt.

Ein geringer Prozentsatz der Leiterplatten wird recycelt, indem die Leiterplatten bei der Sekundärkupferherstellung im Konverter zugegeben werden. In der heißen Schmelze werden organische Bestandteile oxidiert und nichtmetallische anorganische Altstoffe verschlackt. Unerwünschte metallische Altstoffe werden aus der Metallschmelze entfernt. Kupfer, Gold, und Silber werden in der anschließenden elektrochemischen Raffination wiedergewonnen [Nol 1997], [N.N. 1998]. Das Verfahren ist u.a. wegen der Emission von halogenhaltigen organischen Verbindungen umstritten.

Daneben werden weitere Verwertungsverfahren eingesetzt, wie z.B. das Tiefkühlshreddern oder die thermische Zersetzung der gesamten Leiterplatte durch eine Pyrolyse.

5 Entwicklung einer Leiterplattenrecyclingstrategie

Die Entwicklung einer Leiterplattenrecyclingstrategie wird nach dem in Kapitel 2 dargestellten Schema durchgeführt.

5.1 Rechtliche Begründung für das Recycling von Leiterplatten

5.1.1 EU-Recht

Die EU-Mitgliedsstaaten sind aufgrund der Richtlinien über den Umgang mit Abfällen, z.B. der Richtlinie des Rates über giftige und gefährliche Abfälle (75/442/EWG) vom 15. Juli 1975 in der Fassung vom 31. Dezember 1991 (91/689/EWG), dazu verpflichtet, alle erforderlichen Maßnahmen zur Vermeidung, Verwertung und Verringerung bestimmter Abfälle zu treffen. Seit 1994 erarbeitet eine von der EU-Kommission eingerichtete Arbeitsgruppe Empfehlungen, die als Grundlage für eine „EU-Richtlinie über die Verwertung und Entsorgung von Elektronikschrott“ dienen sollen. Die Richtlinie existiert als Entwurf, eine Verabschiedung wird 1999 nicht erwartet.

5.1.2 Bundesrecht

Die rechtliche Grundlage für das Recycling von Leiterplatten ist in Deutschland das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz KrW/AbfG). Hier ist festgeschrieben, daß die Vermeidung von Abfällen Vorrang vor der Verwertung und Beseitigung genießt (§§4 -5). Hersteller sind (theoretisch) für die Verwertung ihrer Produkte verantwortlich (§§22 -26). Das Gesetz enthält Verordnungsermächtigungen für die produktbezogenen Konkretisierung.

Das Bundesumweltministerium hat am 11.07.1991 den ersten Entwurf einer „Verordnung über die Vermeidung, Verringerung und Verwertung von Abfällen gebrauchter elektrischer und elektronischer Geräte“ (Elektronikschrott-Verordnung) vorgelegt. Der Entwurf wurde zugunsten einer freiwilligen Vereinbarung fallen gelassen. Seit Inkrafttreten des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes wird die Erarbeitung einer Elektronikschrott-Verordnung von Seiten der Regierung gefördert. Der aktuellste Entwurf der Verordnung über die Entsorgung von elektrischen und elektronischen Geräten (Elektrogeräte-Verordnung – EAV) wurde am 24.06.1999 vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit herausgegeben. Hier wird die Verwertung von Leiterplatten aus Geräten der Informationstechnik geregelt. Die Verordnung verpflichtet die Hersteller und Verkäufer von

Geräten der Informationstechnik, die Geräte nach der Gebrauchsphase zurückzunehmen und nach Maßgabe des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes stofflich oder energetisch zu verwerten bzw. gemeinwohlverträglich zu beseitigen. Der Entwurf der Verordnung wird weiterhin diskutiert [EAV 1999].

5.2 Rahmenbedingungen für das Leiterplattenrecycling

Als erster Schritt für den Entwurf einer Strategie für das Leiterplattenrecycling sind die wichtigsten Voraussetzungen und Ziele für das Recycling zu definieren. Sie sind in Tabelle 16 zusammengefaßt.

Tabelle 16: Voraussetzungen und Ziele für das Recycling von Leiterplatten

Voraussetzungen für das Recycling von Leiterplatten	<ul style="list-style-type: none"> • Erfüllung der rechtlichen Rahmenbedingungen. • Die Rentabilität des Verfahrens muß gegeben sein. • Ein Markt für Sekundärprodukte und –Altstoffe muß vorhanden sein. • Eine Recycling-Infrastruktur muß vorhanden sein.
Ziele für das Recycling von Leiterplatten	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung von Bauelementen hat Vorrang vor der Verwertung und Beseitigung. • Vollständige Verwendung oder Verwertung aller Komponenten. • Aufkonzentrierung von Schadstoffen. • Keine Entstehung von Dioxinen und Furanen.

5.3 Werkstoffliche Zusammensetzung von Leiterplatten

Die durchschnittliche werkstoffliche Zusammensetzung von Leiterplattenschrott ist von Tartler [Tar 1994] analytisch untersucht worden. Seine Ergebnisse sind in Tabelle 17 zusammengefaßt.

Tabelle 17: Durchschnittliche werkstoffliche Zusammensetzung von Leiterplatten [Tar 1994]

Werkstoffart	Prozentualer Massenanteil der Werkstoffart	Werkstoffgruppen und Werkstoffe
Metallische Werkstoffe	25 – 30 %	Hauptbestandteile: Kupfer, Eisen, Nickel und Zinn Weitere Metalle: Blei, Silber, Mangan, Gold, Chrom, Cadmium, Platin und Beryllium
Nichtmetallische organische Werkstoffe	20 – 25 %	Thermoplastische Kunststoffe, flammgeschützte Duroplaste
Nichtmetallische anorganische Werkstoffe	40 – 55 %	Glas, Keramik

Leiterplatten, die zu Entsorgung anstehen, bestehen aus einem Substrat und den darauf gelöteten Bauelementen. Das Substrat ist ein stabiler Verbund aus leitenden und isolierenden Materialien. Die zwei Seiten einer Leiterplatte werden Bauteil- und Lötseite genannt [KWa 1984].

5.3.1 Leiterplattensubstrat - leitende Materialien

Überwiegend werden metallkaschierte Lamine als leitende Materialien innerhalb des Substrats eingesetzt. Obwohl die Werkstoffe Kupfer, Nickel, Aluminium und Stahl einsetzbar sind, wird fast ausschließlich Kupfer wegen seiner hohen Leitfähigkeit und guten Verarbeitbarkeit eingesetzt. Kupferlaminat wird in das Substrat geklebt und für die Stromversorgung verwendet. Isolierter Kupferdraht oder Kupferleitbahnen, die die Verbindungen zwischen den Bauelementen schaffen, werden an und direkt unterhalb der Substratoberfläche angebracht. Die Dicke der Kupferschicht wird mit $35 \mu\text{m}$ (35 g/m^2) angegeben. Die Leiterbahnen sind zwischen 0,1 mm und 3 mm breit [KWa 1984].

5.3.2 Leiterplattensubstrat - isolierende Materialien

Epoxidharze werden wegen ihrer variablen Werkstoffeigenschaften als Substrat verwendet. Anforderungen an Werkstoffe, die für das Leiterplattensubstrat von Bedeutung sind, werden in Abbildung 10 zusammengefaßt.

Leiterplattensubstrat		Thermische Eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> • Wärmeleitfähigkeit • Thermische Ausdehnung • Flammverzögerungsvermögen
Kosten: <ul style="list-style-type: none"> • Minimale Herstellungskosten 	Standards: <ul style="list-style-type: none"> • Einhaltung von ISO- und DIN-Vorgaben 	Technische Eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> • Gute Bearbeitbarkeit • Hohe Lebensdauer
Chemische Eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> • Chemische Beständigkeit • Definiertes Gewicht • Definierte Dichte • Minimale Giftigkeit 	Elektrische Eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> • Isolationswiderstand • Kriechstromfestigkeit • Überschlagnfestigkeit • Elektrischer Verlustfaktor 	Mechanische Eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> • Biegefestigkeit • Schlagfestigkeit • Scherfestigkeit • Zugfestigkeit • Härte

Abbildung 10: Anforderungen an das Leiterplattensubstrat

Die duroplastische Trägerplatte hat drei Hauptfunktionen:

1. mechanische Trägerkonstruktion, auf der die Bauteile befestigt sind,
2. elektrische Leitung zwischen den Bauteilen und für die Stromversorgung und
3. Minimierung der thermischen Belastung der Bauelemente.

Durch die Variation der Duroplastzusammensetzung werden die chemischen, elektrischen und technischen Werkstoffeigenschaften eingestellt. Die mechanischen und thermischen Eigenschaften werden durch die Zugabe weiterer Stoffe optimiert.

Um die mechanische Festigkeit zu erhöhen, werden Glasfasermatten aus alkalifreiem Borosilikatglas als Verstärkungsmaterialien schichtweise im Epoxidharzsubstrat eingesetzt. Die Glasfasermatten werden nicht miteinander verbunden, sondern in kleineren Stücken verwendet. Es werden bis zu acht Lagen Glasfasermatten in das Epoxidharzsubstrat eingesetzt. Glasmattenverstärkte Substrate sind mechanisch sehr fest, chemisch resistent gegenüber Trocken- und Naßprozessen und Chemikalien und feuchtigkeitsbeständig. Borosilikatglas ist im Gegensatz zu Verstärkungsmaterialien aus Papier oder Pappe nicht brennbar oder entzündungsfördernd.

Um die thermischen Eigenschaften von Leiterplattensubstraten zu verbessern, werden Flammenschutzmittel eingesetzt. Die zu entsorgenden Leiterplatten sind mit einem Bromanteil von bis zu 6 Gew % flammengeschützt. Bei Überhitzung zersetzen sich bromierte Harze unter Freisetzung gasförmiger Produkte, brennen jedoch nicht. Bei der Zersetzung kann Kupfer als Katalysator fungieren und die Bildung von giftigen bromierten organischen Verbindungen - Dioxinen und Furanen - begünstigen. Bei allen Verwendungs- und Verwertungsverfahren, die eine erhöhte thermische Belastung verursachen (Erwärmung, Zerkleinerung), ist damit zu rechnen, daß bromierte Schadstoffe entstehen [Blu 1996].

5.3.3 Bauelemente

Elektronische Bauelemente, die auf der Leiterplatte befestigt und miteinander leitend verbunden sind, werden nach ihrer Verwend- bzw. Verwertbarkeit in drei Gruppen unterteilt:

1. Bauelemente, die verwendbar sind, z.B. Speicherelemente,
2. Bauelemente, die einer Verwertung zugeführt werden, z.B. Steckverbindungen und
3. Bauelemente, die schadstoffhaltig sind, z.B. Batterien und Akkus.

Bauelemente werden auf der Leiterplatte mit Lötverbindungen befestigt. Unterschieden wird zwischen Through-hole und Surface-Mounted-Verbindungen. Bei Through-hole-Verbindungen werden die Bauelemente mit Anschlußdrähten, die durch das Substrat führen, durch Löten befestigt.

Hierbei sind zwei Arten von Lötstellen bekannt.

1. Von einer Seite gelötete Verbindungen - die Fügstelle ist nur auf der Lötseite der Platte vorhanden.
2. Von beiden Seiten gelötete Verbindungen - die Lötverbindungen gehen von der Oberseite der Leiterplatte durch die Bohrung bis zur Unterseite der Platte.

Die Verbindungsarten 1 und 2 werden in Abbildung 11 dargestellt.

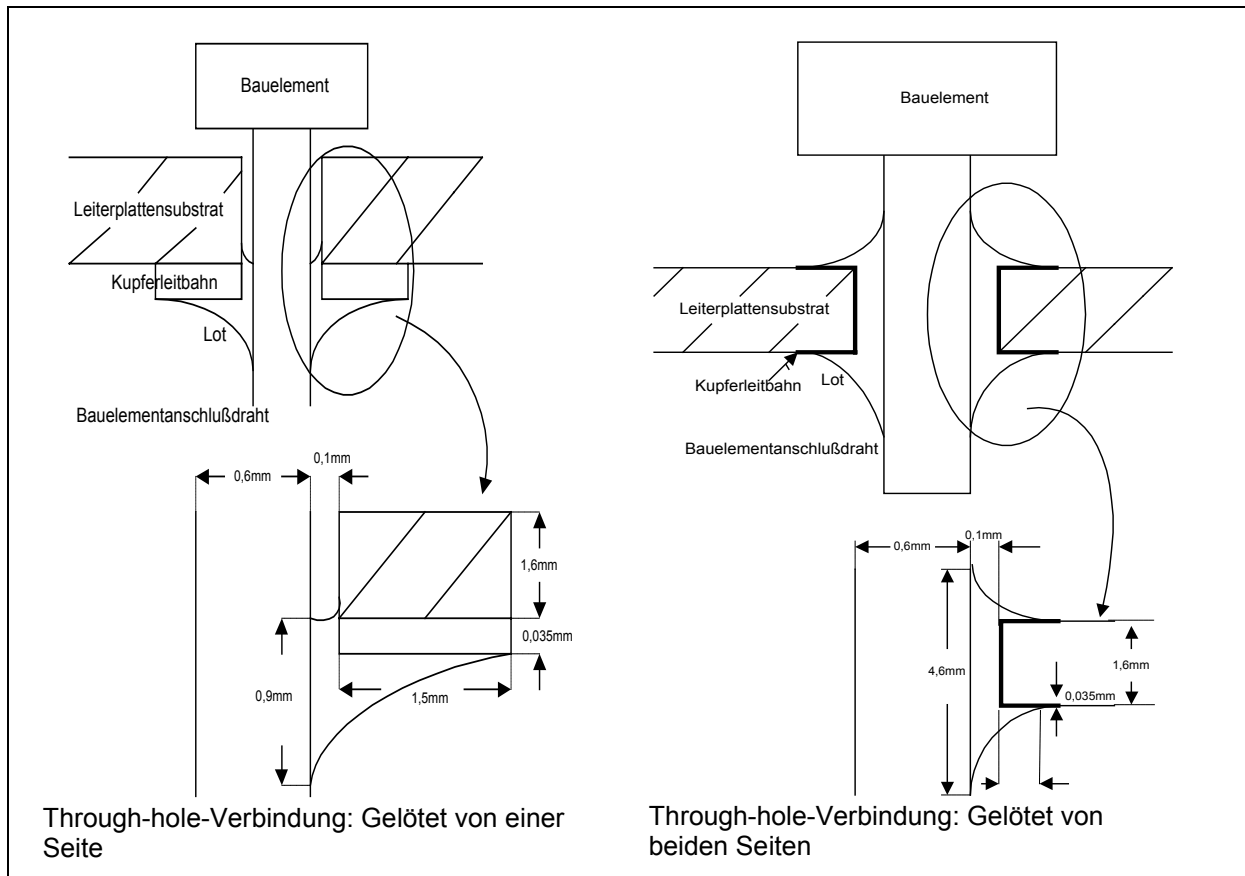


Abbildung 11: *Through-hole-Lötverbindung auf Leiterplatten*

Surface-Mounted-Bauelemente (SMD) werden bei der Herstellung erst an die gewünschte Stelle geklebt und anschließend gelötet. Die SMD-Lötung erfordert keine Durchbohrung der Leiterplatte.

5.3.4 Lot

Bauelemente werden auf der Leiterplatte durch weichgelötete Lötverbindungen befestigt. Neben der mechanischen Stabilität müssen Lötverbindungen die elektrische Leitung zwischen den Bauelementen und den Leiterbahnen auf der Leiterplatte aufrechterhalten. Zinn-Blei-Weichlote mit einem Gehalt von 60 - 64 % Zinn und 36 - 40 % Blei werden eingesetzt [Kwa 1984], [TND 1995]. Das in der Elektronik meist eingesetzte Lot (SnPb40) besteht aus 60 %

Zinn und 40 % Blei. In dieser Massenzusammensetzung hat das Lot einen Schmelzbereich zwischen 183°C und 189°C [DGH 1991]. Bei etwa 62 % Zinn weist die Zinn-Blei-Legierung die eutektische Schmelztemperatur von 183 °C auf [Pet 1991]. Die Verwendung von Lot, das nur aus einem Metall besteht, würde durch die Verringerung der Werkstoffvielfalt die Verwertung vereinfachen. Weder reines Zinn noch reines Blei eignet sich jedoch als Lötwerkstoff bei Leiterplatten.

Reines Zinn kann nicht als Lot für elektronische Geräte eingesetzt werden, obwohl theoretisch der Ausschluß bleihaltigen Lotes die Giftigkeit der Altleiterplatten herabsetzen würde. Bei niedrigen Temperaturen kann reines Zinn eine allotrope Umwandlung erfahren, wobei es in ein graues Pulver übergeht. Außerdem sind die Kosten für Zinn ca. zwanzigmal höher als für Blei.

Reines Blei eignet sich als Lot nicht, da Blei keine intermetallischen Verbindungen mit Kupfer eingeht. Im Gegensatz zu Blei besitzt Zinn eine hohe Affinität zu Metallen, insbesondere Kupfer. Die Kombination beider Metalle ergibt eine Legierung, die keine spröden intermetallischen Verbindungen enthält. Der Schmelzbereich liegt ausreichend über den maximalen Betriebstemperaturen der elektronischen Bauteile.

5.4 Werkstoffeigenschaften

Werkstoffeigenschaften, die für die Leiterplattenfunktion und das –recycling von Bedeutung sind, werden für Kupfer (leitender Werkstoff), Epoxidglashartgewebe (Leiterplattensubstrat) und Zinn-Blei-Lot in Tabelle 18 (auf Seite 45) genannt.

5.5 Unverträglichkeiten zwischen Leiterplattenwerkstoffen

In Leiterplatten werden alle drei Werkstoffarten (metallische, nichtmetallische organische und nichtmetallische anorganische Werkstoffe) verwendet. Werkstoffgruppen und Werkstoffe kommen in verschiedenen Massenprozenten vor. Es ist deutlich, daß eine Verwertung der vollständigen Leiterplatte nur mit einer Herabsetzung der Qualität der Sekundärwerkstoffe durchführbar ist. Die Rückgewinnung von Kupfer und Edelmetallen durch die Einschleusung von geringen Mengen Leiterplatten pro Charge in den Kupferkonverter ist hier eine Ausnahme. Die Prozeßführung ist aufwendig und hat zum Ergebnis, daß mehr als 90% der Leiterplattenmasse beseitigt wird. Dieses Material steht dem Recyclingkreislauf nicht mehr zur Verfügung.

Tabelle 18: Eigenschaften von Leiterplattenwerkstoffen im Vergleich

	Spezifische Werkstoffeigenschaft	Quelle	Kupfer	Epoxidglas-hartgewebe	Lot (SnPb40)
Thermische Eigenschaften	Wärmeleitfähigkeit λ bei 25 °C [W/mK]	[KWa 1984]	370	0,3	51
	Spezifische Wärme [J/kgK]	[KWa 1984]	386	1600	176
	Thermische Diffusion [$10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$]	[KWa 1984]	107	0,1	34
Mechanische Eigenschaften	Elastizitätsmodul [10^9N/m^2]	[KWa 1984]	130	14 – 25	32
	Sprödigkeit bei 20 °C	[Wie 1994]	duktil	spröde	duktil
Chemische Eigenschaften	Dichte [kg/m^3]	[KWa 1984]	8960	2000	8500
	Chemisch nicht beständig in:	[DGH 1991]	Säuren	organischen Lösemitteln	Säuren
Elektrische Eigenschaften	Elektrischer Widerstand [$:\Sigma/\text{cm}$]	[KWa 1984]	1,7	Isolator	17
Magnetische Eigenschaften	Magnetische Suszeptibilität	[Hüt 1996]	diamagnetisch	diamagnetisch	diamagnetisch

5.6 Entfernung unverträglicher Altstoffe beim Leiterplattenrecycling

Für die vorliegende Arbeit wurde untersucht, ob durch die Ausnutzung unterschiedlicher Altstoffeigenschaften, die bei unverträglichen Altstoffen auftreten, eine vollständige und umweltfreundliche Verwendung oder Verwertung von Leiterplatten erfolgen kann. Altstoffeigenschaften, die bei der Verwertung von Leiterplatten ausgenutzt werden können, sind in Tabelle 19 auf Seite 46 wiedergegeben. Die Eigenschaften sind nach Produktfunktionserhalt und Zerkleinerungsschritte geordnet. Eigenschaften, die eine Demontage und Verwendung der Bauteile ermöglichen, haben Priorität vor Eigenschaften, die bei oder nach der Zerkleinerung Einsatz finden (vgl. Abbildung 4, Seite 16).

Tabelle 19: Eliminierung unverträglicher Altstoffe beim Leiterplattenrecycling

	Eigenschaften	Möglicher Recyclingverfahren
Vor der Zerkleinerung	thermisch	Entlötung von Bauelementen (mit anschließender Verwendung der Bauelemente)
	chemisch	Auflösung des Leiterplattensubstrats (ohne Verwendung der Bauelemente)
Während der Zerkleinerung	mechanisch/ thermisch	Selektive Zerkleinerung
	mechanisch	Gleichmäßige Zerkleinerung
Nach der Zerkleinerung (Eliminierung unverträglicher Altstoffen durch Ausnutzung der Altstoffeigenschaften)	chemisch	Trennung nach der Dichte, Auflösung von Altstoffen Trennung durch Flotation
	elektrisch	Trennung von Metallen und Nichtmetallen
	magnetisch	Trennung von ferromagnetischen Altstoffen

5.6.1 Strategien, die vor einer Zerkleinerung einzusetzen sind

Die Wieder- oder Weiterverwendung der gesamten Leiterplatte ist bei einer möglichen Vermarktung anderen Recyclingstrategien vorzuziehen. Leiterplatten, die nicht als ganzes Produkt Verwendung finden, werden durch eine Entlötung in verwendbare Elemente getrennt. Die Entlötung als Verwendungsstrategie für Leiterplattenbauteilrecycling wird in den Kapiteln 6 und 7 vertieft. Nach einer erfolgreichen Entlötung können geeignete Bauelemente wieder benutzt werden. Die Produktfunktion bleibt teilweise erhalten.

Die chemische Auflösung des Leiterplattensubstrates ist als Verwertungsstrategie einsetzbar. Da die Solvolyse mit hohen Temperaturen und Drücken arbeitet, ist eine Wieder- oder Weiterverwendung von Bauteilen, die in die chemische Stufe gelangen, nicht möglich. Verwendbare Bauteile müssen daher vor der Solvolyse von der Leiterplatte getrennt werden. Metallische und nichtmetallische anorganische Altstoffe, die in die chemische Auflösung gelangen, werden nicht aufgelöst. Sie sind aus der Lösung abzutrennen und sind für eine rohstoffliche Verwertung geeignet. Abhängig von ihren chemischen Eigenschaften werden nichtmetallische organische Altstoffe in der Solvolyse mit dem Leiterplattensubstrat aufgelöst oder verbleiben nicht gelöst als verwertbare Fraktionen in fester Form. Die Wiederverwertung von Glasfasermatten und Kupfer, die durch die Solvolyse wiedergewonnen werden, ist ökologisch und ökonomisch sinnvoll. Bromierte Flammschutzmittel, die in den gelösten Kunststoffen bleiben, können in eine unschädliche Form umgewandelt und entfernt werden [Qua 1996]. Kunststoffmonomere finden als Klebstoff Verwendung oder können mit Hilfe von Polymerisationsmitteln wieder vernetzt werden.

5.6.2 Strategien, die bei einer Zerkleinerung einzusetzen sind

Altstoffeigenschaften, die bei unverträglichen Altstoffen unterschiedlich sind, können bei der Zerkleinerung von Leiterplatten ausgenutzt werden, um den Zerkleinerungserfolg zu optimieren. Bei einer rein mechanischen Verwertung ohne Ablötung von Bauelementen werden Leiterplatten mit flüssigem Stickstoff bis auf Temperaturen von minus 70 °C abgekühlt. Eisen wird spröde und die Sprödigkeit der duroplastischen Leiterplattenbasismaterialien nimmt zu. Aluminium und Kupfer bleiben zäh. Eine selektive Zerkleinerung ist möglich. Durch eine mehrstufige Klassierung und weitere Trennverfahren werden Altstoffe voneinander getrennt, um eine optimale Verwertung der wertvollen Metalle zu ermöglichen [N.N. 1997].

Vorteil der selektiven Zerkleinerung gegenüber der Entlötung ist:

- vereinfachte Verfahrensführung

Nachteile sind:

- keine Verwendung möglich,
- Ausbreitung von Schadstoffen bei der Zerkleinerung,
- Kosten für flüssigen Stickstoff machen das Verfahren unrentabel,
- die überwiegende Masse der Platte wird nicht verwertet.

5.6.3 Strategien, die nach einer Zerkleinerung einzusetzen sind

Die Trennung der zerkleinerten Leiterplattenaltstoffe kann nach den Verfahren durchgeführt werden, die in Kapitel 3 beschrieben worden sind. Folgende Altstofffraktionen können durch Ausnutzung unterschiedlicher Altstoffeigenschaften gewonnen werden:

- Eisenmetalle
- Nichteisenmetalle
- Rest Altstoffe

Diese Strategie entspricht dem traditionellen Recyclingverfahren für Leiterplatten.

5.7 Verfahrensablauf für das Leiterplattenrecycling

Eine Strategie für das Leiterplattenrecycling, die nach Kapitel 2 entwickelt worden ist und die unterschiedliche Altstoffeigenschaften unverträglicher Leiterplattenaltstoffe ausnutzt, wird in Abbildung 12 vorgestellt (siehe auch [StF 1998]). Die Strategie ist einzusetzen, wenn keine Wieder- oder Weiterverwendung der gesamten Leiterplatte durchzuführen ist.

Um den Produktfunktionserhalt zu maximieren, werden Bauelemente im ersten Recyclingschritt von der Leiterplatte durch Entlötung getrennt und einer Verwendung zugeführt. Nicht verwendbare Bauelemente werden verwertet, schadstoffhaltige Bauelemente

werden beseitigt. Das durch die Entlötung gewonnene Lot kann einer Lotverwertung zugeführt werden.

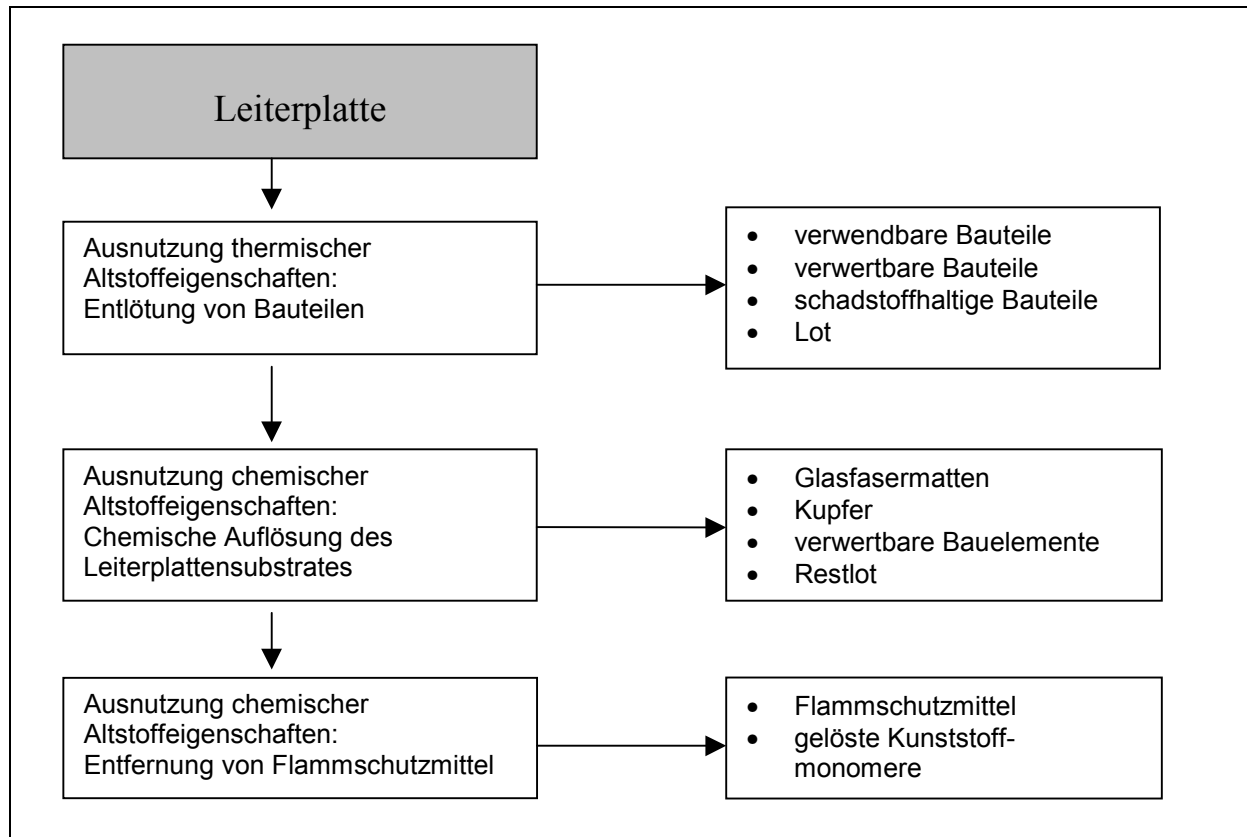


Abbildung 12: Leiterplattenrecyclingstrategie: Ausnutzung unterschiedlicher Altstoffeigenschaften für die Eliminierung unverträglicher Altstoffe

Durch die chemische Auflösung des Leiterplattensubstrats geht die Leiterplattenform verloren. Durch eine geeignete Verfahrensführung werden die Fraktionen, die in Abbildung 12 dargestellt sind, gewonnen. Glasfasermatten sind als Fraktionen gut verwendbar. Kupfer, Lot und Bauelemente, die nicht in der Entlötungsstufe entfernt werden, sind durch Klassierung voneinander zu trennen. Sie werden einer Verwertung zugeführt. Flammschutzmittel, die sich noch in der Kunststofflösung befinden, können ebenfalls aus der Lösung getrennt werden. Sie sind nicht verwertbar, sie werden als Schadstoffe beseitigt.

Durch die Ausnutzung von Altstoffeigenschaften, die bei den unverträglichen Altstoffen der Leiterplatte unterschiedlich sind, ist eine Verwertung aller Leiterplattenwerkstoffe, außer Schadstoffe ermöglicht worden. Im Gegensatz zum traditionellen Recyclingverfahren, durch die weniger als 10 Gew % der Leiterplatte verwertet werden, werden beim vorgeschlagenen Verfahren mehr als 90 Gew % der Platte verwendet oder verwertet.

6 Theoretische Grundlagen der Entlötung

Die Entlötung als Recyclingstrategie wird im folgenden beschrieben und optimiert. Voraussetzung für die Verfahrensführung ist die Minimierung der Entlötungszeit und –temperatur, um die thermische Belastung von Bauelementen, die verwertet werden sollen, zu vermeiden.

6.1 Entlötung von Verbindungselementen

Lötverbindungen können in zwei typische Verbindungsformen unterteilt werden, die in Tabelle 20 dargestellt werden.

Tabelle 20: Typische Lötverbindungen

Verbindungs-kategorie	Merkmale	Abbildung
Weichgelötete Verbindungen	<ul style="list-style-type: none"> • Löttemperatur <450°C • Wenig mechanische Festigkeit • Lötstelle klein und gut zugänglich • Entlötung durch Wärmeleitung 	
Hartgelötete Verbindungen	<ul style="list-style-type: none"> • Löttemperatur >450°C • Hohe mechanische Festigkeit • Lötstelle groß, komplizierte Geometrie • Teilweise in mehreren Schichten gelötet • Entlötung durch Wärmeübergang 	

Auf Leiterplatten kommen ausschließlich weichgelötete Verbindungen vor.

Die Entlötung wird in diesem Kapitel für die theoretische Beschreibung und in Kapitel 7 für die praktischen Entlötungsversuche in drei Prozesse unterteilt:

1. Erwärmung des Lotes durch Wärmeübertragung bis zum Schmelzpunkt,
2. Entfernung des geschmolzenen Lotes von der Verbindungsfläche und
3. Trennung der Verbindungselemente.

6.1.1 Wärmeübertragung bei der Entlötung

Bei der Auflösung von Lötverbindungen ist die Wärmeübertragung durch Strahlung, Wärmeübergang oder Wärmeleitung möglich. Die Entscheidung, wie die Wärmequelle angelegt wird, ist von der Geometrie der Lötverbindung abhängig.

Die Wärmeübertragung durch **Strahlung** wird definiert als Wärmeübertragung mittels elektromagnetischer Strahlung. Für die praktische Entlötung ist die Anwendung von Wärmestrahlung möglich, aber technisch schwierig zu realisieren und wird deswegen nicht weiter beschrieben.

Der **Wärmeübergang** wird definiert als die Übertragung von Wärme durch die Grenzfläche zweier Körper mit verschiedenen Aggregatzuständen. Hierunter ist z.B. die Auflösung von Lötverbindungen in einem Flüssigkeitsbad [Koh 1993] oder die Verwendung von Heißluft [ASE 1997], [Lei 1993] zu verstehen. Für die Auflösung von kleinen, punktförmigen Lötverbindungen (z.B. Lötverbindungen auf Leiterplatten) ist die Wärmeübertragung durch Konvektion durchaus geeignet. Nachteilig ist die Reduzierung der Verwendungsmöglichkeiten durch die Benetzung der Bauteile mit der Entlötungsflüssigkeit. Die Wärmeübertragung durch Heißluft ist zeitaufwendig und für die Reparatur, aber nicht für das Recycling weichgelöteter Verbindungen anwendbar. Die Wärmeübertragung durch Konvektion kann mathematisch beschrieben und optimiert werden [BaS 1994].

Die **Wärmeleitung** ist die Wärmeübertragung zwischen Festkörpern, z.B. zwischen einem LötKolben und dem Lot. Die Wärmeleitung ist ein Energietransport zwischen benachbarten Molekülen aufgrund eines im Werkstoff vorhandenen Temperaturgradienten. Die Entlötung von Verbindungen auf Leiterplatten ist mit Hilfe der Wärmeleitung gut durchführbar.

6.2 Mathematische Beschreibung der Entlötung durch Wärmeleitung

Eine einfache Beschreibung der stationären Wärmeleitung ist mit der Theorie der Wärmeleitung möglich (Kapitel 6.2.1). Die grundlegenden Voraussetzungen für eine Entlötung sind hier erkennbar. Durch die Untersuchung des Wärmeflusses werden Hinweise zu der Geometrie der Lötverbindung, die bei der Entlötung entscheidend ist, gegeben (Kapitel 6.2.2). Die Betrachtung der Wärmeleitung als Transportvorgang erlaubt, nach Erfüllung aller Voraussetzungen, die Wärmeleitung mathematisch als Bilanzgleichung zu beschreiben (Kapitel 6.2.3). Durch die Bilanzierung kann die zeitliche Änderung des Temperaturgradienten bei der Auflösung von Lötverbindungen von einem Punkt aus oder mit Hilfe von numerischen Verfahren durch die ganze Verbindung berechnet werden (Kapitel

6.2.4). In den folgenden Abschnitten wird Entlötung durch Wärmeleitung mathematisch beschrieben.

6.2.1 Wärmeleitung

Um eine Entlötung durchzuführen, muß zuerst das Lot auf Schmelztemperatur gebracht werden. Die Schmelztemperatur einer Lötverbindung kann als eine Funktion von Ort und Zeit verstanden werden: $T = f(x, y, z, t)$.

Bei einem Temperaturunterschied ΔT [K] zwischen Lötverbindung und Wärmequelle kann die übertragene Wärmemenge Q [J] beschrieben werden als:

$$Q = \alpha A \Delta T$$

Mit: Q Wärmemenge [J]
 α Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
 A erwärmte Fläche [m^2].
 ΔT Temperaturdifferenz zwischen Lötverbindung und Wärmequelle [K]

Die Energie, die benötigt wird, um Lot zum Schmelzen zu bringen, ist die Wärmemenge Q . Bei stationärer Wärmeleitung ist die transportierte Wärmemenge proportional zur Fläche und zur Wärmeleitfähigkeit [KKK 1996] und wird in Gleichung 1 wiedergegeben.

$$Q = \lambda \frac{At \cdot \Delta T}{l} \quad \text{Gleichung 1}$$

Mit: λ Stoffspezifische Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}/\text{m K}$]
 t Entlötungszeit [s]
 l Transportstrecke [m]

Um eine große Wärmemenge zu transportieren, sollen Kontaktflächen und Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Lot maximiert werden. Um die Entlötungszeit zu verringern, sollte der Entlötungskolben aus einem Werkstoff bestehen, der einen höheren λ -Wert hat als das Lot. In Tabelle 21 ist die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Werkstoffe dargestellt (siehe auch Tabelle 18 auf Seite 46).

Tabelle 21: Spezifische Wärmeleitfähigkeit ausgesuchter Werkstoffe [VDI 1997]

Werkstoff	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Lot (SnPb40)	51
Eisen	84
Aluminium	236
Kupfer	401
Silber	428

6.2.2 Wärmefluß

Die örtliche Erwärmung eines zylindrischen Elements wird als Wärmefluß von Carslaw und Jaeger mathematisch beschrieben [CaJ 1959]. Die Methode ist von Klein Wassnik auf zylinderförmige Lötverbindungen bei der Lötung von Bauelementen auf Leiterplatten angewendet worden [KWa 1984]. Der Wärmefluß wird mathematisch in Gleichung 2 dargestellt. Es ist erkennbar, daß die Temperaturerhöhung durch Wärmeleitung innerhalb einer zylindrischen Lötverbindung proportional zum Wärmefluß ist.

$$\Delta\Phi = \rho c R \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Gleichung 2}$$

Mit: $\Delta\Phi$ Wärmeflußänderung [W/m^2]
 ρ Dichte [kg/m^3]
 c Spezifische Wärmekapazität [$\text{J}/(\text{kgK})$]
 R Radius der Lötstelle [m]

Berechnungsergebnisse aus Gleichung 2 sind auf die Entlötung übertragbar und werden in Abbildung 13 für verschiedene Löttradien dargestellt.

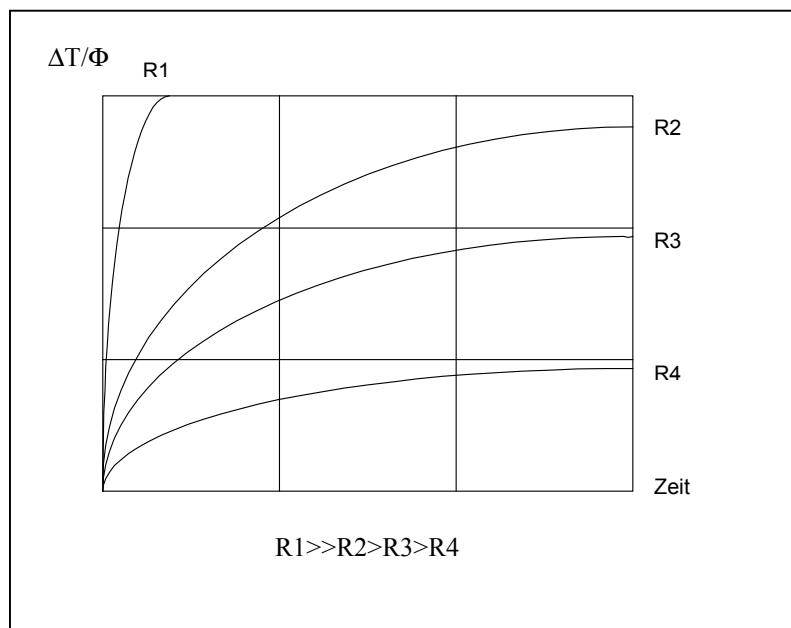


Abbildung 13: Wärmefluß in Abhängigkeit von Temperatur, Zeit und Radius (R) der berechneten zylinderförmigen Lötverbindung

Die Zeit, die benötigt wird, um die Lötstoffe zum Schmelzen zu bringen, ist vom Radius bzw. von der Breite der Lötverbindung abhängig. Bei der Betrachtung von Abbildung 13 ist erkennbar, daß Lötverbindungen mit sehr geringer Breite nicht oder nur mit sehr hohem Zeitbedarf durch Wärmeleitung entlötet werden können.

Da die Entlötung schnell durchgeführt werden soll, muß die thermische bzw. elektrische Leistung möglichst hoch sein. Dabei ist zu beachten, daß die zugeführte thermische Energie keine Bauteile beschädigt, die voraussichtlich verwendet werden können. Die aus der Anwendung von Gleichung 2 gewonnenen Informationen sollen gegebenenfalls bei der Produktplanung berücksichtigt werden, um die optimale Breite von Lötverbindungen zu bestimmen.

6.2.3 Bilanzierung des Wärmetransports

Nach der Berücksichtigung der folgenden Gesetzmäßigkeiten kann eine vollständige Bilanzierung der Wärmeübertragung durch Wärmeleitung bei der Auflösung einer Lötverbindung durchgeführt werden.

Tabelle 22: Gesetzmäßigkeit für die mathematische Bilanzierung der Entlötung

Voraussetzungen	Bedingungen	Erfüllung bei der Betrachtung der Entlötung
Massenerhaltungssatz	$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$	erfüllt: Betrachtung nur von Festkörpern
Energieerhaltungssatz	Die Summe aller Energien bleibt konstant	erfüllt: keine makroskopische Bewegung
Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	Festlegung der Richtung des Wärmetransports	erfüllt
Fouriersches Grundgesetz der Wärmeübertragung	Abhängigkeit zwischen Wärmestromdichte und Temperaturgradient	erfüllt

Bei der Entlötung sind alle Voraussetzungen für die Bilanzierung als Transportprozeß erfüllt. Die Wärmeleitung kann in die allgemeine Form einer Differentialbilanzgleichung gebracht werden, siehe Gleichung 3.

$$\Delta M_s = \Delta M_{Tr} + \Delta M_w \quad \text{Gleichung 3}$$

Mit: ΔM_s Speicherung innerhalb des Systems
 ΔM_{Tr} Transport durch das System
 ΔM_w Wandlung innerhalb des Systems

Für die Betrachtung von Wärmefeldern kann analog zur Gleichung 3 die Änderung der Wärmeströme untersucht werden.

$$dQ_{sp} = dQ_{\lambda} + dQ_w \quad \text{Gleichung 4}$$

Mit: dQ_{sp} Speicherung des thermischem Anteils der inneren Energie U_{th}
 dQ_{λ} Wärmetransport durch die Lötverbindung und die angrenzenden Werkstoffe
 dQ_w Wandlung der thermischen Energie innerhalb der betrachteten Lötverbindung

Die innere Energie U_{th} ($= dQ_{sp}$) wird definiert als:

$$\Delta Q = m c \Delta T.$$

Mit: Q Wärmemenge [J]
m Masse der Lötverbindung [kg]
c Spezifische Wärmekapazität der zu entfernenden Lötstoffe [J/kgK]
 ΔT Temperaturänderung [K]

Die innere Energie wird in der Bilanz als Volumenelement dargestellt, siehe Gleichung 5

$$dQ_{sp} = dU_{th} = \rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \frac{\partial(c \cdot T)}{\partial t} dt \quad \text{Gleichung 5}$$

Der Transport dQ_x wird in eine Richtung (in X-Richtung als $dQ_x + d_x$) berechnet und ist definiert als die einströmende Wärme pro Zeiteinheit, siehe Abbildung 14.

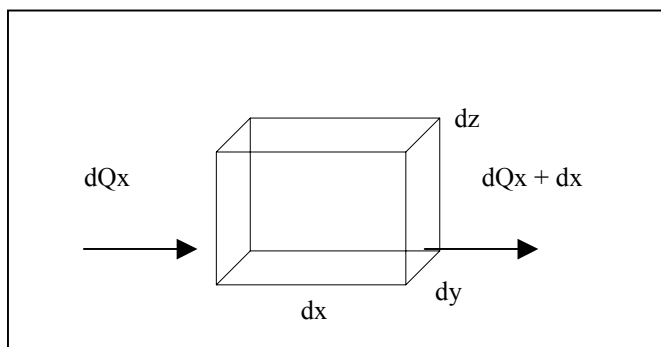


Abbildung 14: Transport in x-Richtung

Das Transportglied $dQ_x + d_x$ kann aus der Taylorsche Reihenentwicklung berechnet werden, die für diese Betrachtung nach dem zweiten Glied abgebrochen wird.

$$dQ_x + d_x = -\lambda \cdot dy \cdot dz \frac{\partial T}{\partial x} dt - dx \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dy \cdot dz \cdot dt \quad \text{Gleichung 6}$$

Die Taylorsche Reihe wird analog Gleichung 6 für die Richtungen y und z gebildet und in Gleichung 7 zusammengefaßt.

$$dQ_x = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad \text{Gleichung 7}$$

Die Wandlung dQ_w enthält alle die thermische Energie betreffenden Wärmequellen und Senken innerhalb der Lötverbindung und kann für den Wärmetransport bei der Entlötung vernachlässigt werden [KWs 1984], [CJa 1959]. Die Bilanzgleichung wird aus Gleichung 5 und 7 in Gleichung 8 zusammengefasst.

$$\rho \frac{\partial(cT)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \text{Gleichung 8}$$

Bilanzgleichung 8 ist eine nichtlineare partielle Differentialgleichung, die die Wärmeleitung bei der Entlötung beschreibt. Bevor die Lösung dieser Gleichung vorgenommen wird, kann Gleichung 8 weiter vereinfacht werden. Bei der Entlötung sind die Stoffwerte λ , ρ und c als konstant zu betrachten (λ , ρ , $c \neq f(x, y, z, T)$), da die Änderung der thermischen Leitfähigkeit, der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität gegenüber der Änderung der Wärmeleitung vernachlässigbar klein sind. Obwohl die Stoffkonstanten von der Temperatur abhängig sind, ist die Vereinfachung mit minimaler Ergebnisverzerrung durchführbar [CJa 1959].

Die Bilanzgleichung 8 vereinfacht sich und wird in Gleichung 9 dargestellt.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \text{Gleichung 9}$$

Da die Wärmeausbreitung bei der Entlötung hauptsächlich in einer Richtung verläuft, kann Gleichung 9 durch Gleichung 10 vereinfacht werden.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad \text{Gleichung 10}$$

Bzw:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) = 0 \quad \text{Gleichung 11}$$

Gleichung 11 ist die klassische Wärmeleitungsgleichung. Diese Differentialgleichung liefert keine vollständige physikalische Beschreibung der Wärmeleitung bei der Entlötung, da jede räumlich und zeitlich konstante Temperaturverteilung zu einer Lösung führt.

Randbedingungen, die bei der Entlötung in zeitliche und örtliche Randbedingung unterteilt sind, werden für eine spezifische Lösung festgelegt. Die Lösung erfolgt durch die Anwendung des Separationsansatzes oder durch die Laplace-Transformation. Beispiele für die Lösung der Wärmeleitungsgleichung sind u.a. in [BaS 1994], [CaJ 1959], [Alv 1988] zu finden. Abhängig von der Verbindungsgeometrie kann Gleichung 11 in Zylinder- oder Kugelkoordinaten umgeschrieben werden.

Bei der Entlötung zeigt die einfache Lösung der Bilanzgleichung 11, daß der Wärmeverlauf durch eine Schar von Lösungsparabeln beschrieben wird. Abbildung 15 zeigt eine einfache Lösung der Wärmeleitungsgleichung für eine Entlötung.

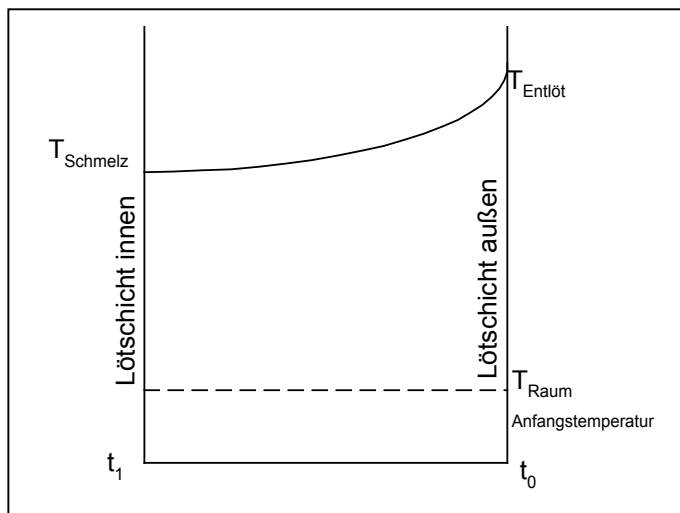


Abbildung 15: Lösung der Wärmeleitungsgleichung für eine Entlötung

Die Gleichung beschreibt nur die Wärmeleitung. Nach einer Zustandsänderung des Lotes muß der weitere Wärmetransport (falls notwendig) durch Konvektion beschrieben werden.

6.2.4 Finite-Element-Berechnung

Die Methode der Finiten Elemente (FEM), deren Hauptanwendungsgebiet die Festkörper- und Strukturmechanik ist, wurde bei der Untersuchung der Entlötung angewendet. Die Berechnung einer exakten Lösung der Wärmeleitungsdifferentialgleichung für verschiedene Lötverbindungen ist hierdurch ermöglicht worden. Die Ergebnisse der FEM-Berechnungen zeigen die Wärmeleitung in dem beschriebenen Element durch Farbgebung für verschiedene Temperaturen oder durch die graphische Ausgabe von Isothermen.

6.2.4.1 Programmierung

Die FEM-Berechnungen sind mit einem gängigen FEM-Programm, das die Berechnung der Wärmeleitungsgleichung unterstützt, durchgeführt worden [Sep 1999]. Die Form und

Stoffwerte der zu untersuchenden Lötverbindung muß innerhalb des Programms beschrieben werden. Durch die Ausnutzung von Symmetrieebenen werden die untersuchten Lötverbindungen für die Berechnung so vereinfacht, daß eine Berechnung in zweidimensionaler Form vorgenommen werden kann. Zuerst wird ein Koordinationssystem definiert und das zu beschreibende Element in quadratischen Teilelementen auf dem Koordinationssystem definiert. Ein Beispiel aus der Berechnung ist in Abbildung 16 wiedergegeben.

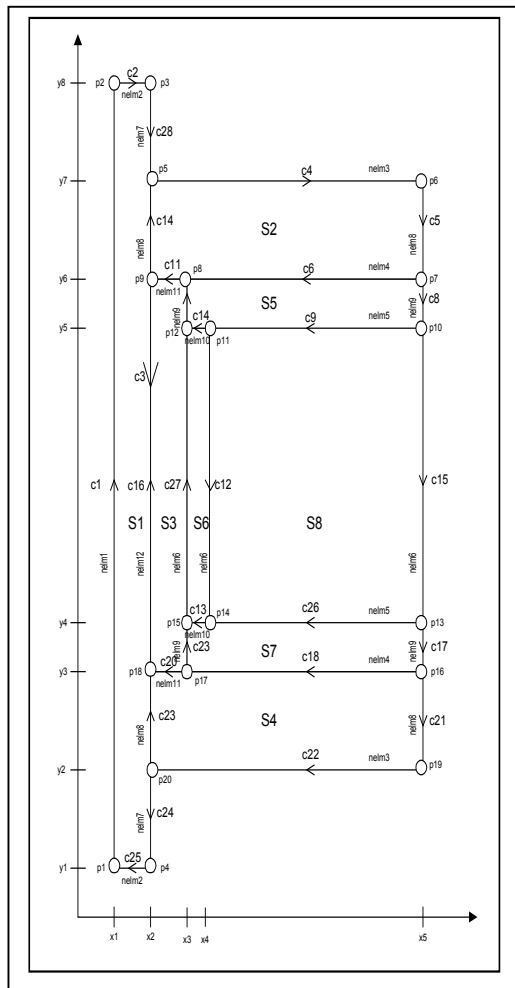


Abbildung 16: Programmiertes Lötverbindungsgerüst

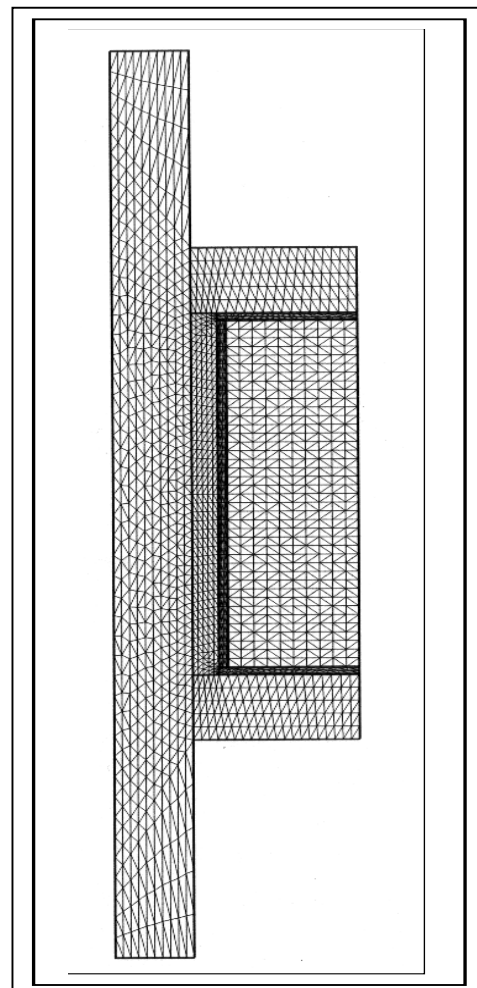


Abbildung 17: Gitternetz auf dem Lötverbindungsgerüst

Alle Eck- und Kreuzpunkte des Elementumrisses werden zunächst innerhalb des Koordinatensystems numeriert (p1 – p20), danach werden die Strecken zwischen jeweils zwei Punkten definiert (c1 - c25). Die Strecken werden durch die Zuweisung von Längen (nelm1- nelm12) definiert. Die Definition von Flächen wird als nächster Programmschritt durchgeführt (S1 – S8). Die Flächen werden zu Elementen verbunden. Als letztes werden die so erzeugten Felder in Feinelemente unterteilt (Abbildung 17).

Durch die Anwendung programminterner Gleichungssysteme werden die Wärmeleitung und der Wärmeübergang zwischen Werkstoffen an jedem Knotenpunkt des Gitternetzes berechnet. Die Randbedingungen (Anfangstemperaturen bei einer Entlötung) sind vor der Berechnung festzulegen. Die Wärmemenge eignet sich auch als Randbedingung bei der Berechnung einer Entlötung. Bei handelsüblichen Entlötungsgeräten ist nur die Arbeitstemperatur einstellbar, die Temperatur wird deswegen als Randbedingung bei der FEM-Berechnung verwendet. Als Variable kann die Erwärmungszeit geändert werden.

Stoffwerte für die untersuchten Werkstoffe müssen für die Berechnung bekannt sein. Die für die Berechnung notwendigen Stoffwerte sind in Tabelle 18 (Seite 46) angegeben. Die Festlegung von Temperaturen für die Randbedingungen ist nur möglich nach einer Untersuchung der thermischen Eigenschaften für das Lot (SnPb40), die Werte sind in Tabelle 23 zusammengefaßt.

Tabelle 23: Relevante Temperaturbereiche für Lot (SnPb40)


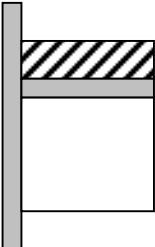
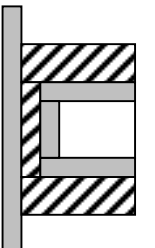


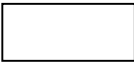
SnPb40	Temperaturbereich [°C]	Temperaturbereich [°K]
Schmelzbereich bei der Erstlötung [DGH 1991]	183 - 189	253 - 459
Optimaler Arbeitsbereich beim Löten [KWA 1984]	240 - 270	510 - 540
Erwarteter Schmelzbereich bei der Entlötung	270 - 300	540 - 570
Einstellbare Entlötungstemperaturen bei handelsüblichen Entlötungsgeräten	300 - 415	570 - 685
Bei FEM-Berechnungen untersuchte Temperaturen	325 - 410	595 - 685

Die untersuchten Temperaturen liegen bei der FEM-Berechnung innerhalb des Bereiches, der bei handelsüblichen Entlötungsgeräten verwendet wird. Der geschätzte Schmelzbereich des Lots bei der Entlötung liegt oberhalb der Lötungstemperatur und ist auf Grund der Herabsetzung der eutektischen Qualitäten des Lots durch Diffusion von Kupfer aus den angrenzenden Schichten als zwischen 270 °C und 300 °C eingeschätzt worden.

Die zwei Arten von untersuchten Through-hole-Verbindungen sind in Tabelle 24 (Seite 60) dargestellt. Die notwendige Reduktion der Verbindungsform auf quadratische Elemente und die Ausnutzung von Symmetrie ist in der Abbildung erkennbar. Die verwendeten Dimensionen und eingesetzten Temperaturen sind ebenfalls angegeben. Die für die Berechnung verwendete Form ist nicht als ein genormtes Verbindungselement zu verstehen. Lötverbindungen einer Art sind grundsätzlich in Größe und Form nicht gleich.

Die Entfernung von oberflächenmontierten Bauelementen mit handelsüblichen Entlötungsgeräten ist nicht durchführbar. Oberflächenmontierte Bauelemente werden deswegen bei der FEM-Berechnung nicht betrachtet.

Tabelle 24: Verbindungsformen der FEM-Berechnungen

Verbindungsform (nicht maßstabgerecht)	Beschreibung der Verbindung	Abmessung der Verbindungselemente L x B [mm]	FEM-Untersuchungsbereich
	Through-hole-Verbindung mit einseitiger Lötverbindung: dünnes Leiterplattensubstrat (1,6 mm)	Cu-Bauelement-Verbindungsdraht: 4,435 x 0,3 Lotschicht: 0,8 x 2,1 Cu-Leitschicht: 0,035 x 2,1 Leiterplattensubstrat: 1,6 x 2,1	0-2 Sekunden bei den Temperaturen: 595 K, 645 K, 685 K
	Through-Hole-Verbindung mit einseitiger Lötverbindung: dickes Leiterplattensubstrat (2,1 mm)	Cu-Bauelement-Verbindungsdraht: 5,435 x 0,3 Lotschicht: 0,8 x 2,1 Cu-Leitschicht: 0,035 x 2,1 Leiterplattensubstrat: 3,5 x 2,1	0-2 Sekunden bei den Temperaturen: 595 K, 645 K, 685 K
	Through-Hole-Verbindung durchgehend gelötet: dünnes Leiterplattensubstrat (1,6 mm)	Cu-Bauelement-Verbindungsdraht: 4,07 x 0,3 Lotschicht: horizontal: 0,3 x 0,5 vertikal: 1,6 x 0,1 Cu-Leitschicht: horizontal: 0,035 x 0,5 vertikal: 1,6 x 0,035 Leiterplattensubstrat: 1,565 x 2,1	0-2 Sekunden bei den Temperaturen: 595 K, 645 K, 685 K
			
Lot (SnPb40)	Kupfer	Leiterplattensubstrat	

Das Programm verwendet die Wärmeleitungsgleichung in der Form der Gleichung 8. Bei der Berechnung wird angenommen, daß die Verbindung vor der Entlötung durchgehend Raumtemperatur (20 °C) besitzt. Bei der Entlötung wird die Temperatur auf der Entlötungsebene (oberste horizontale Schicht) sprunghaft auf die Temperatur des Entlötungsgerätes erhöht. Es wird weiterhin angenommen, daß die Temperatur an den Schichtgrenzen zwischen zwei verschiedenen Werkstoffen konstant ist. Die Schichtgrenztemperatur wird verwendet, um mit den geänderten Stoffwerten weiter zu rechnen. Die Stoff-

werte innerhalb eines Werkstoffs werden als konstant betrachtet ($\lambda, \rho, c \neq f(x, y, z, T)$). Da das Lot nach dem Schmelzen sofort entfernt wird, werden die Schmelzvorgänge nicht berechnet.

6.2.4.2 Ergebnisse der FEM-Berechnungen

Die Ergebnisse der FEM-Berechnungen sind in Tabelle 25 zusammengefaßt. Abbildungen der Berechnungsergebnisse sind für die drei Verbindungen im Anhang 1, 2 und 3 zu finden.

Tabelle 25: Zusammenfassung der Ergebnisse der FEM-Berechnungen

Verbindungsform: Through-hole-Verbindung	Entlötungs-Temperatur [K]	Berechnete Zeit bis zur Löttemperatur 540 K [s]	Berechnete Zeit bis zur Löttemperatur 570 K [s]	Stationäre Wärmeprofil innerhalb der berechneten Zeit (± 1 K) [s]
Leiterplatten-substrat (Breite 1,6 mm). Von einer Seite gelötet	595	0,25	0,35	0,75
	645	0,25	0,30	0,75
	685	0,15	0,20	0,70
Leiterplatten-substrat (Breite 2,1 mm). Von einer Seite gelötet	595	0,35	0,50	1,0
	645	0,25	0,30	1,0
	685	0,20	0,30	1,0
Leiterplatten-substrat (Breite 1,6 mm). Von beiden Seiten durchgehend gelötet	595	0,3	0,30	0,7
	645	0,2	0,20	0,7
	685	0,2	0,20	0,7

Das Lot aus Through-hole-Verbindungen in den in Tabelle 24 (Seite 60) angegebenen Formen ist nach den Berechnungen der FEM-Analyse innerhalb von 0,5 Sekunden geschmolzen (gemessen an der Überschreitung der Schmelztemperatur an der Schichtgrenze Lot/Kupfer für einseitige Verbindungen bzw. an der unteren Lötsschicht der beidseitigen Verbindung). Die Temperatur des gesamten Systems ist für alle Temperaturbereiche innerhalb einer Sekunde annähernd gleich der Entlötungstemperatur.

Die Ergebnisse zeigen, daß sich die Wärme schneller durch die Kupferverbindungsdrähte ausbreitet als durch das Lot, das sich direkt unter der Wärmequelle befindet. Bei Verbindungen, die einseitig gelötet sind, fungiert das Kunststoffsubstrat als Wärmepuffer und entzieht den angrenzenden Schichten Wärme. Bei einseitig gelöteten Leiterplatten mit einer Kunststoffsubstratschichtdicke von 2,1 mm dauert die Entlötung und Einstellung der stationären

Wärmeleitung wegen dieses Isolationseffektes am längsten. Die Bauelemente werden durch die Isolationswirkung des Kunststoffes geschützt. Die Wärmeleitung vom Verbindungsdraht in das Kunststoffsubstrat hinein ist bei den Berechnungsergebnissen deutlich zu sehen (siehe Anhang 2). Dieser Isolationseffekt ist bei Verbindungen, die beidseitig gelötet sind, nicht aufgetreten. Die Verbindungsdrähte auf der Bauteilseite der Leiterplatte werden entsprechend schnell auf Entlötungstemperatur gebracht, die Verwendungschancen sinken durch die thermische Belastung (siehe Anhang 1 und 3).

Durch die Erhöhung der Entlötungstemperatur wird die Schmelzgeschwindigkeit des Lotes nur bei einseitig gelöteten Verbindungen mit einer Kunststoffschicht von 1,6 mm erhöht. Bei den beiden anderen Verbindungsformen bedeutet die Temperaturerhöhung nur eine thermische Belastung aller Leiterplattenkomponenten. Die Entlötung bei Temperaturen von 645 K (375 °C) ist für Bauelemente, die einer Verwendung zugeführt werden, gegenüber der Entlötung bei höheren Temperaturen vorzuziehen.

6.3 Entfernung des geschmolzenen Lotes

6.3.1 Die Oberflächenspannung des Lotes

Die Oberflächenspannung, die in einem Tropfen herrscht, wird durch die interatomaren Bindungsenergien bestimmt. In einem Lötropfen haben die Atome an der Oberfläche eine höhere potentielle Energie als Atome innerhalb des Tropfens, die vollständig mit zwölf Nachbaratomen umgeben sind. Um die Oberfläche zu vergrößern, müssen unter Einsatz von Energie mehrere Atome an die Oberfläche transportiert werden.

Wie sich das Lot nach der Schmelzung ausbreitet, hängt von der Oberflächenspannung des Lottröpfchens ab. Um das Lot von der Verbindung zu entfernen, muß eine Kraft eingesetzt werden, die größer als die Oberflächenspannung des Tröpfchens ist. Die Entfernung muß vor der Wiederaushärtung, also direkt nach dem Schmelzen, erfolgen.

Alle Systeme sind bestrebt, ihre freie Energie zu minimieren, bei flüssigem Lot wird ein Tropfen als Kugel um den Bauelementanschlußdraht angeordnet, um die Tropfenoberfläche zu minimieren.

Vorausgesetzt, daß die Lotkugelradien (R) wesentlich größer als die Abstände zwischen den Atomen sind, was bei der Entlötung der Fall ist, kann der Druck innerhalb eines Lottröpfchens nach der Gleichung von Laplace berechnet werden (Gleichung 12).

Gleichung 12

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

ΔP Innendruck der Tropfen [Pa]

γ Oberflächenspannung [J/m^2]

R_1, R_2 Radien der Tropfen [m]

Für eine Lötugel kann Gleichung 12 vereinfacht werden:

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{2}{R} \right)$$

Es ist zu erkennen, daß bei kleineren Radien (bzw. Tropfen) der Innendruck größer ist als bei größeren Tropfen. Der Innendruck eines Lottröpfchens ist für verschiedene Radien in Abbildung 18 grafisch dargestellt.

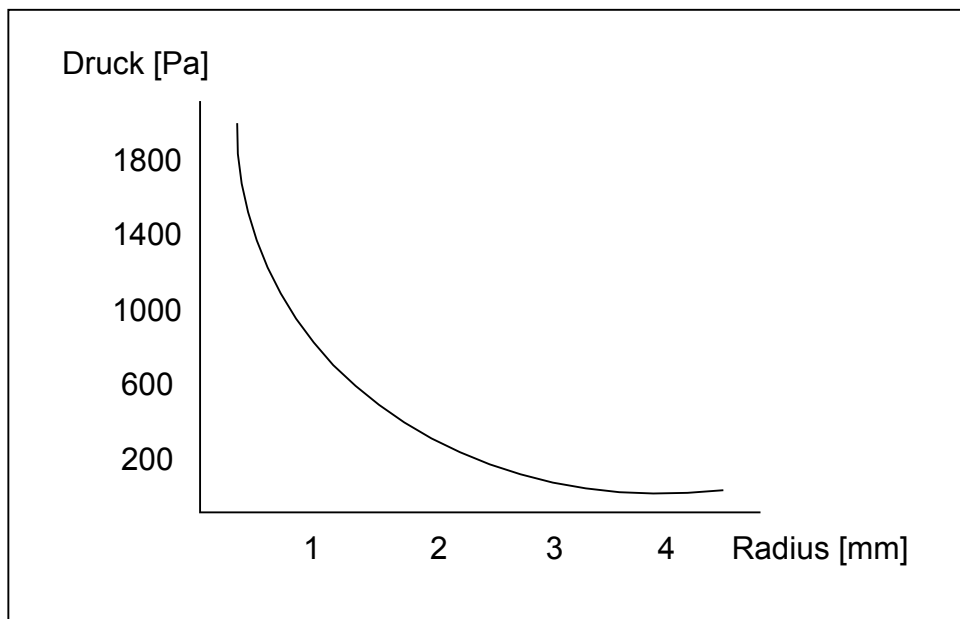


Abbildung 18: Druck innerhalb eines Lottröpfchens

Die Oberflächenspannung γ kann aus der Gleichung 12 nicht berechnet werden, sie muß experimentell bestimmt werden. Die Oberflächenspannung ist von der Temperatur, der Lotzusammensetzung und von den bei der Lötung verwendeten Flußmitteln abhängig. Für das Weichlot (SnPb40), das bei der Leiterplattentechnik verwendet wird, werden Werte zwischen $0,3 \text{ J}/\text{m}^2$ und $0,5 \text{ J}/\text{m}^2$ angegeben [HHo 1982]. Klein Wassink gibt die Oberflächenspannung für Lot (SnPb40) mit $0,4 \text{ J}/\text{m}^2$ an. Die Oberflächenspannung von Lot (SnPb40) nimmt mit dem Zinngehalt zu [KWa 1984].

Bei der Entlötung soll darauf geachtet werden, daß keine Erschütterungen oder weitere Energieeinträge vorkommen, die einen großen Tropfen in kleinere teilen. Nicht nur der Druckanstieg ist von Bedeutung. Bei der Entfernung flüssigen Lotes durch die Anwendung eines Vakuums oder anderer Entfernungsmethoden ist es auch zeitaufwendiger, mehrere kleinere Tropfen als einen großen Tropfen zu entfernen.

6.4 Trennung der Verbindungselemente

6.4.1 Bauelemententfernung

Die Bauelementanschlußdrähte bei Through-hole-Verbindungen sind hauptsächlich aus Kupfer. Teilweise werden die Drähte beschichtet oder aus anderen Metallen, z.B. Aluminium hergestellt. Um mechanische Stabilität zu gewährleisten, werden die Verbindungsdrähte teilweise auf der Lötseite der Leiterplatte in einem Winkel von bis zu 90 Grad gebogen: siehe Abbildung 19.

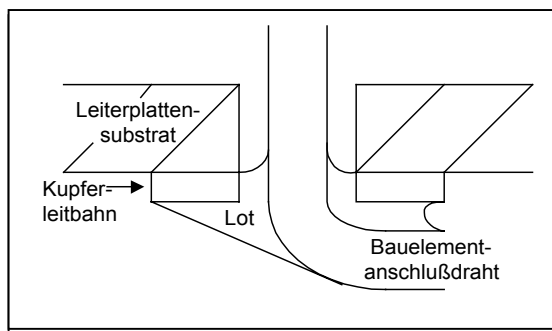


Abbildung 19: *Gebogener Bauelementverbindungsdraht
(nicht maßstabsgerecht)*

Scheller et. al. haben die Kraft gemessen, die notwendig ist, Bauelemente mit gebogenen Verbindungsdrähten von der Leiterplatte zu entfernen. Die Kraft ist abhängig von:

der Zahl der Verbindungselemente,

dem Winkel,

den Werkstoffen und

dem Querschnitt der Verbindungselemente.

Abhängig vom Winkel der gebogenen Bauteilanschlußdrähte war eine Kraft zwischen 1 N und 5 N notwendig, um die vollständig abgelöteten Bauelemente von der Leiterplatte zu lösen [SFM 1995]. In Ausnahmefällen waren bis zu 60 N notwendig, was auf eine nicht vollständige Entlötung hindeutet.

7 Entlötung von Leiterplattenbauelementen

7.1 Untersuchte Leiterplatten

Die untersuchten Leiterplatten (Platinen, Video-Karten, Sound-Karten usw.) sind typische Leiterplatten, die zur Zeit zur Entsorgung anstehen. Sie wurden aus zwanzig Computern unterschiedlicher Hersteller ausgebaut, die in einem Recyclinghof der Berliner Stadtreinigungsbetrieb (BSR) angeliefert worden waren. Der Anteil der Leiterplatten, die nur Through-hole-Bauelemente (außer Prozessor) aufwiesen, betrug über 80 %. Die restlichen Leiterplatten wurden mit Through-hole und SMD Bauelementen hergestellt. Alle Leiterplatten waren aus glasfaserverstärktem Epoxidharz mit einer Plattendicke von ca. 1,6 mm. Erst wenn Leiterplatten an der Lötverbindungen aufgetrennt werden ist erkennbar, ob die Through-hole-Verbindungen von einer oder von beiden Seiten gelötet sind.

In Abbildung 20 ist Teil einer typischer Leiterplatte (Platine) aus einem 386er Rechner zu sehen. Die Platine ist mit Bauelementen von einer Seite gedruckt und hat ca. 1.600 Lötstellen. Die Plattenabmessung beträgt 484 cm^2 . Das entspricht $3,28 \text{ Lötstellen pro cm}^2$.

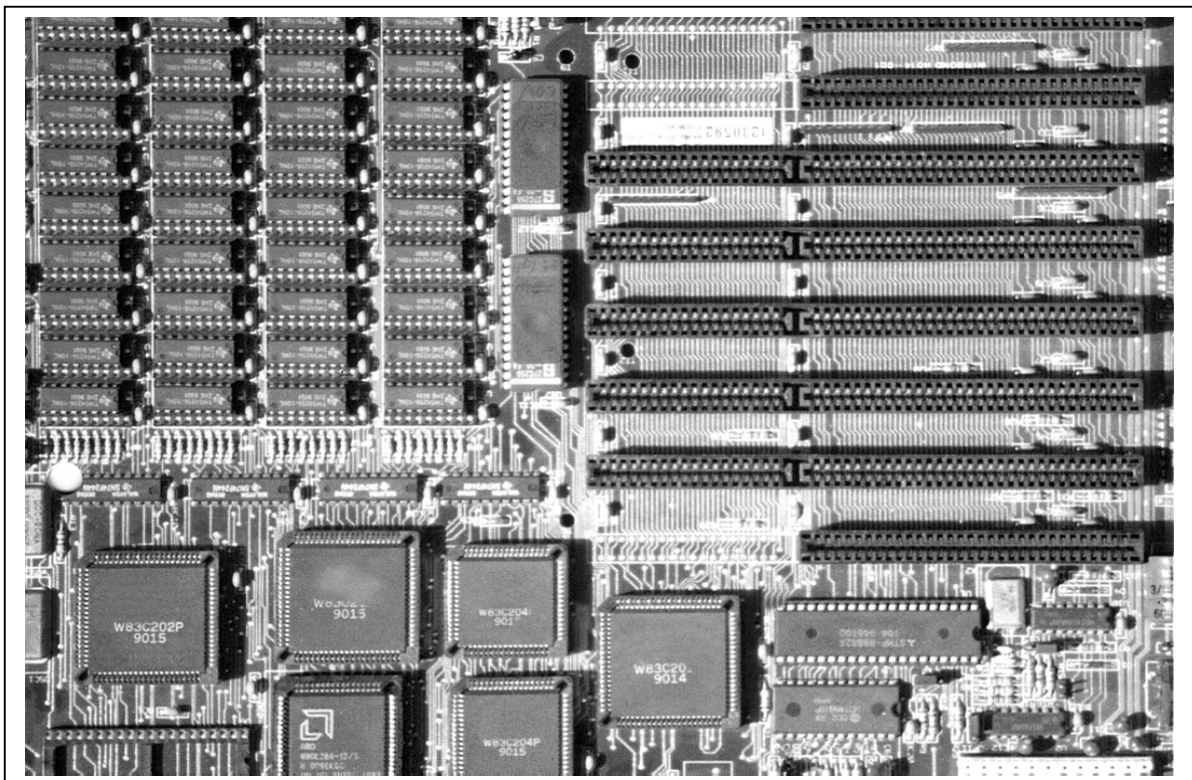


Abbildung 20: 386er Leiterplatte

Auf den untersuchten Platinen waren zwischen ca. 1.500 und 2.700 Lötstellen vorhanden. Eine deutliche Zunahme der Lötverbindungen ist von den 286er zur den 486er Platinen zu beobachten. Auffällig ist, daß bei allen untersuchten Platinen mehr als ein Drittel der Lötstellen auf Steckverbindungen für weitere Komponenten entfallen. Eine Kurzübersicht über die Zahl der Lötstellen für Bauelemente auf beispielhafte Platinen und Steckkarten ist in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: Anzahl Lötverbindungsstellen 286er, 386er und 486er Platine und Steckkarten

	Bauteile	286 (Platine)	386 (Platine)	486 (Platine)	Steckkarte (klein)	Steckkarte (groß)
Verwendbar	Prozessoren	-	68	300	-	88
	Chips (außer BIOS)	344	98	732	160	250
	BIOS – Chips	136	166	98	-	-
Verwertbar	Steckverbindungen	516	614	712	40	-
	RAM – Steckplätze	120	240	240	-	-
	Kleinschalter	15	26	58	24	90
	Kondensatoren	172	100	216	20	86
	Widerstände	120	128	96	18	54
	Andere Bauteile	155	147	259	-	22
	Batterien	4	2	2	-	-
	Gesamte Lötstellen	1582	1589	2713	262	590
	Lötstellen/cm ²	3,27	3,28	3,7	3,43	2,31

Grundsätzlich sind Prozessoren und Speicherelemente (Chips) für eine Wieder- oder Weiterverwendung geeignet. Die Vermarktung dieser Bauteile wird als rentabel eingeschätzt [AfH 1999]. Widerstände, Kondensatoren und weitere Bauelemente sind grundsätzlich wiederverwendbar, werden aber wegen des geringen Neubauteilpreises kaum als Sekundärbau-elemente eingesetzt. Sie werden einer Verwertung zugeführt. Bei den untersuchten Computer-leiterplatten wurden Batterien als einzige Schadstoffquelle identifiziert. Bauelemente, die entweder einer Verwendung oder einer Verwertung zugeführt werden sind in Abbildung 21 (auf Seite 67) prozentual dargestellt.

Der Anteil der verwertbaren Bauelemente steigt von den älteren 286er Platinen bis zu den neueren 486er Platinen an. Die untersuchten Steckkarten haben einen noch höheren Anteil an verwertbaren Bauteilen als die Platinen.

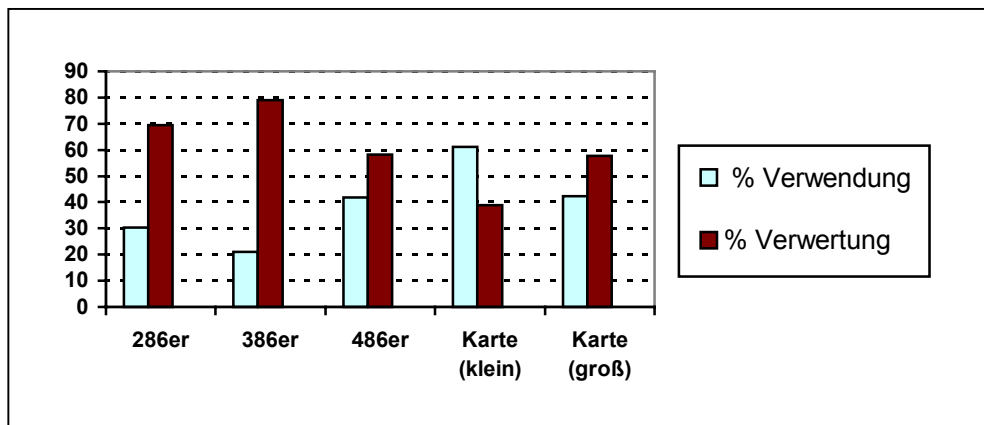


Abbildung 21: Verwendungs- und Verwertungsmöglichkeiten für Leiterplattenbauelemente

7.2 Entlötungsstrategien

Nach den Ergebnissen der FEM-Berechnungen kann zwischen zwei Entlötungsstrategien unterschieden werden:

1. Minimale Erwärmung als Bauteilverwendungsstrategie und
2. Überschüßerwärmung als Bauteilverwertungsstrategie.

Bei der ersten Strategie mit dem Ziel der Wieder- oder Weiterverwendung der entlöteten Bauelemente wird mit einem Minimum an Wärme und Aufheizzeit entlötet. Die Entlötungstemperatur liegt nur wenig über der Lötschmelztemperatur. Bei dieser Entlötung ist die thermische Belastung der Bauelemente minimal. Die Verwendungschancen werden durch die Entlötung nicht herabgesetzt.

Bei der Überschüßerwärmung ist das Ziel nicht die Verwendung der Bauteile, sondern ihre rohstoffliche Verwertung oder die Entfernung nicht verwendbarer schadstoffhaltiger Bauteile, die entsorgt werden müssen. Um eine maximale Zahl von Entlötungen in einer bestimmten Zeit durchzuführen, wird eine erhöhte Wärmezufuhr für die Entlötung ausgewählt. Die Entlötungszeit wird minimiert.

Die Temperatur- und Zeitintervalle, die sich aus den FEM-Berechnungen ergeben, sind in Abbildung 22 auf Seite 68 dargestellt.

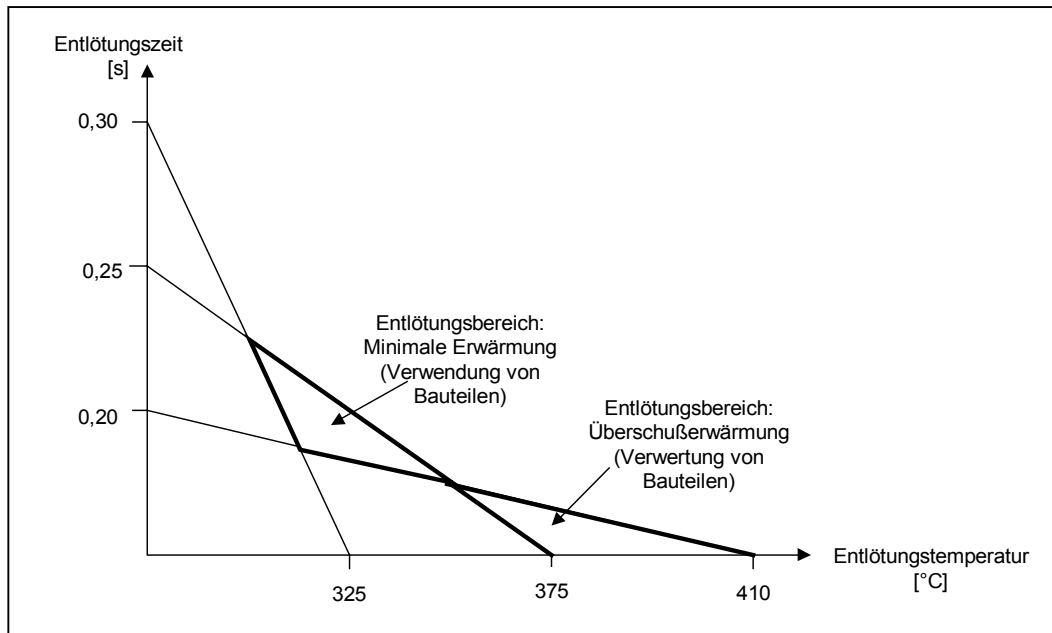


Abbildung 22: Bestimmung von Entlötungsbereichen durch FEM-Berechnungen

Die Werte stammen aus FEM-Berechnungen für einseitige Lötverbindungen mit einem Substrat von 1,6 mm und für Verbindungen, die durchgehend gelötet sind (Tabelle 25, Seite 60). Da Leiterplatten mit einer Substratbreite von 2,1 mm bei den untersuchten Leiterplatten nicht vorhanden waren, sind die Ergebnisse der FEM-Berechnungen für diese Fraktion nicht berücksichtigt.

7.2.1 Praktische Entlötung von Bauteilen

Bei der praktischen Entlötung wurden handelsübliche Vakuum-Entlötlingsgeräte eingesetzt. Sie sind für die Reparatur von Leiterplatten entwickelt worden, aber auch für das Recycling einsetzbar. Die Geräte haben einen zwischen 300 °C und 415 °C einstellbaren Temperaturbereich und eine Vakuumpumpe mit einer festen Pumpleistung für die rasche Entfernung des geschmolzenen Lotes.

Die erwärmte Spitze (LötKolben aus Kupfer hergestellt) wird manuell auf die Lötstelle gebracht. Nachdem das Lot geschmolzen ist, wird es durch das erzeugte Vakuum weggezogen und in einer Patrone gesammelt.

Verwendungsstrategie: Through-hole Lötverbindungen wurden mit Temperaturen zwischen 300 °C und 375 °C entlötet. Temperaturen unterhalb von 325 °C waren nicht ausreichend, um die Bauelemente vollständig zu entlöten. Der Temperaturbereich zwischen 325 °C und 375 °C hat sich als sicherer Entlötungsbereich erwiesen. Bei der Entlötung in diesem Temperatur-

bereich konnten über 80 % der Verbindungen erfolgreich getrennt werden. Die Entlötungszeiten waren höher als nach den FEM-Berechnungen zu erwarten war, siehe Abbildung 22 auf Seite 68 und Abbildung 24 auf Seite 72.

Es konnte beobachtet werden, daß sich bei Verbindungen, die nicht vollständig entlötet werden konnten, stabile Lottropfen auf der Bauteilseite der Platte – unterhalb des zu entfernenden Bauelementes - bildeten. Mit dem Entlötungsgerät als Wärmequelle war es nicht möglich, eine Entlötung von der Lotseite der Leiterplatte durchzuführen. Für die Entfernung der Bauteile muß die Wärmezufuhr auf der Bauteilseite der Platte erfolgen.

Nachteile der Wärmezufuhr von beiden Leiterplattenseiten sind:

- thermische Belastung der gesamten Leiterplatte,
- die Möglichkeit der Verwendung der Bauteile verringert sich und
- die Entlötung ist zeitaufwendig.

Die nicht entlötbaren Lötstellen wurden ausschließlich bei Steckplätzen beobachtet. Hier sind eine Vielzahl von Lötverbindungen auf kleinstem Raum zu finden. Da eine Wiederverwendung von Steckplätzen kaum in Betracht kommt, sind zwei Möglichkeiten der Verwertung gegeben:

1. Nicht entlötete Steckverbindungen werden durch die Anwendung von Kraft zerstört. Die Verbindungsdrähte bleiben in der Leiterplatte.
2. Nicht entlötete Steckverbindungen werden auf der Platte belassen und gehen mit ihr in den nachfolgenden Recyclingschritt.

Verwertungsstrategie: Für Bauelemente, die keiner Verwendung, sondern einer Verwertung zugeführt werden, wurde eine Überschußerwärmung mit Temperaturen zwischen 375 °C und 415 °C durchgeführt. Die hierzu notwendige Zeit beträgt für mehr als 90 % der Verbindungen weniger als 0,5 Sekunden. Restliche Verbindungen, deren Entlötung nicht innerhalb von zwei Sekunden erfolgte, waren generell nicht lösbar.

7.3 Entfernung des geschmolzenen Lotes

Nach der Theorie der Oberflächenspannung und Tropfenbildung bei der Entlötung ist zu erwarten, daß sich bei Through-Hole-Lötverbindungen flüssiges Lot konzentrisch um den Bauelementverbindungsdraht zu einem Tropfen formiert. Bei einer Zunahme der Wärmezufuhr wachsen die Tropfen durch Zufuhr geschmolzenen Lotes (Innendruckminimierung). Die Bildung von mehreren kleineren Tropfen ist nicht zu erwarten.

Bei der Entlötung konnte beobachtet werden, daß sich nur ein einziger Lottropfen bildet. Die Entfernung mit dem Entlötungsgerät ist problemlos durchzuführen. Das Vakuum des Entlötungsgerätes mit maximal 650 mm Hg (ca. 86.654 Pa) ist ausreichend, um die Oberflächenspannung des Lottropfens zu überwinden. Die Geschwindigkeit der Absaugung reicht aus, um das Lot vor einer Wiederaushärtung zu entfernen. Die Tropfenbildung wird durch die Schwerkraft begünstigt, so daß es sich empfiehlt, die Leiterplatte während des Entlötens waagrecht, mit der Lötseite nach unten zu halten.

7.4 Bauelemententfernung

Bauelemente werden auf der Leiterplatte mit geraden oder gebogenen Verbindungsdrähten befestigt. Bei den untersuchten Leiterplatten wurden nur wenige Verbindungen mit gebogenen Drähten beobachtet. Das Schmelzen, die Tropfenbildung und die Entfernung des Lotes sind bei gebogenen Drähten gut durchführbar. Nach der Entlötung sind Bauteile mit geraden Verbindungsdrähten durch einfaches Umdrehen der Leiterplatte entfernbar. Bauelemente mit Drähten, die mehr als 45° gebogen sind, lassen sich nicht durch Umdrehen der Leiterplatte entfernen. Auch die Anwendung allgemeiner mechanischer Energie (Schütteln der Leiterplatte) reicht nicht aus. Es muß Kraft direkt auf das Bauteil ausgeübt werden. Für eine Automatisierung des Verfahrens müssen solche Verbindungen entweder besonders behandelt werden, oder die Bauelemente bleiben auf der Leiterplatte und gelangen in die Substratverwertung.

8 Bewertung der Entlötung

8.1 Entlötungserfolg in Abhängigkeit von der Entlötungszeit

Unabhängig von der eingesetzten Temperatur war zu beobachten, daß Lötstellen, die nach zwei Sekunden nicht entlötet waren, häufig nicht mit Wärmeleitung lösbar waren. Entlötungen, die innerhalb einer Sekunde durchgeführt werden konnten, waren meistens vollständig. Verbindungen, die für die Entlötung länger als eine Sekunde Wärmezufuhr benötigten, waren zu 38 % nicht vollständig entlötet. Die Abbildungen 23 und 24 zeigen den Entlötungserfolg in Abhängigkeit von der Entlötungszeit für Through-hole-Verbindungen bei Temperaturen zwischen 325 °C – 415 °C.

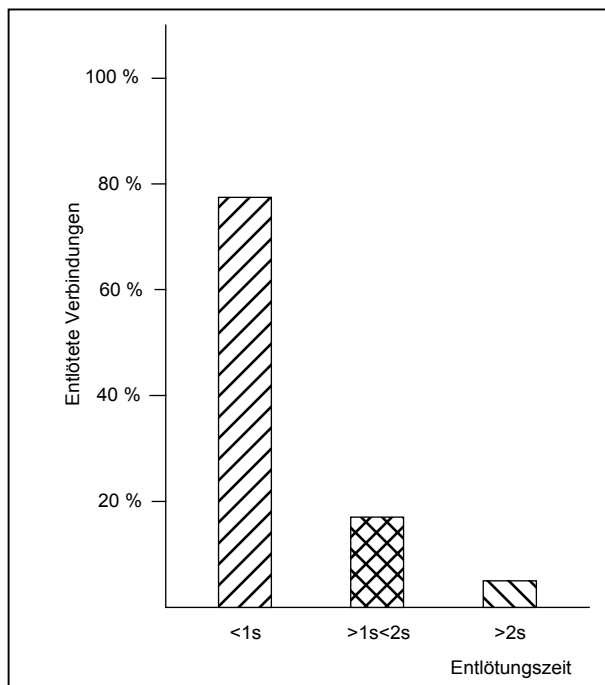


Abbildung 23: Entlötungszeit für Through-hole Verbindungen für Temperaturen zwischen 325 °C – 415 °C

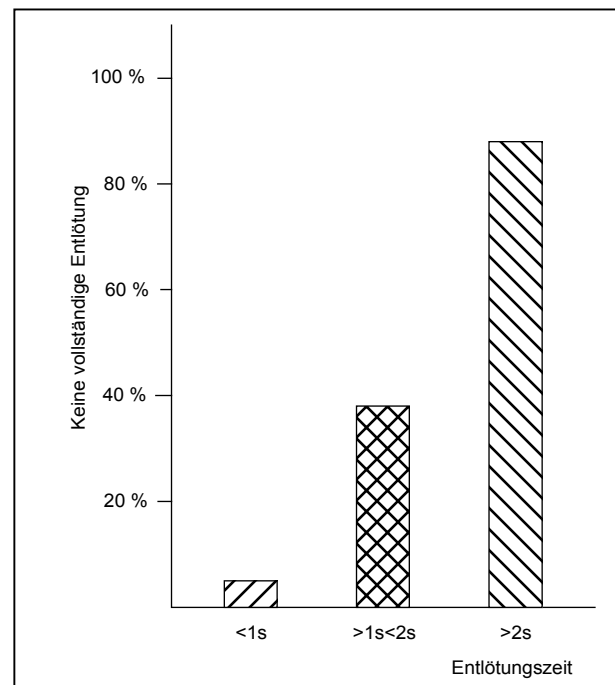


Abbildung 24: Nach der Entlötung nicht trennbare Verbindungen (in Abhängigkeit von der Entlötungszeit)

Nach zwei Sekunden Wärmezufuhr ist das Bauelement durch die thermische Belastung für eine erneute Verwendung nicht mehr geeignet.

8.2 Bestimmung der optimalen Entlötungsparameter

Der optimale Temperaturbereich für die Entlötung von Bauteilen, die einer Verwendung zugeführt werden, ist durch die FEM-Untersuchungen festgelegt und experimentell bestätigt worden. Die Entlötungszeit war bei der praktischen Entlötung länger als nach der Berechnung zu erwarten gewesen wäre.

Nach den Berechnungen beträgt die Entlötdauer weniger als eine Sekunde. Um eine Beschädigung der Bauteile sicher zu verhindern, sollte unterhalb 0,5 Sekunden entlötet werden. Die bei der praktischen Entlötung bestimmten Entlötungsbereiche sind grafisch in Abbildung 25 dargestellt (vergl. Abbildung 22, Seite 68 und KWa 1984).

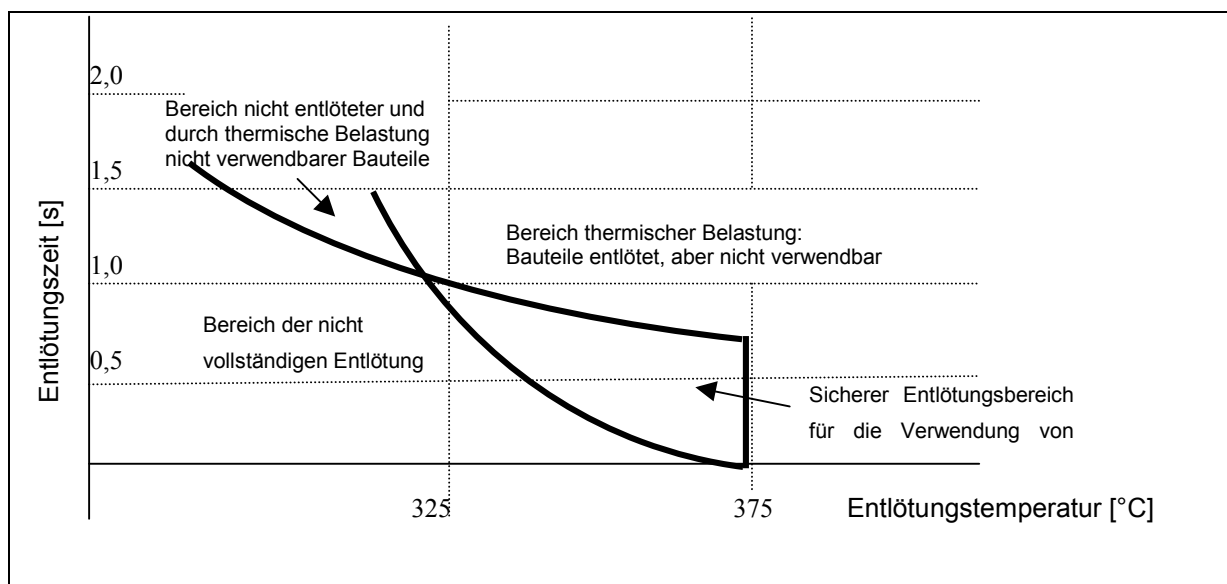


Abbildung 25: Experimentell festgelegte Entlötungsbereiche für Through-hole Verbindungen (Verwendungsstrategie)

Hier ist zu erkennen, daß der Bereich der sicheren Entlötung unter einer Sekunde liegt. Eine Entlötung unter 0,5 Sekunden ist nur bei höheren Temperaturen durchführbar. Bauteile, die im Temperaturbereich zwischen 325 °C und 375 °C entlötet werden und deren Entlötungszeit länger als eine Sekunde beträgt, müssen einer Verwertung zugeführt werden, da sie bei der Entlötung einer zu hohen thermischen Belastung ausgesetzt werden. Bei Temperaturen unter 325 °C findet keine vollständige Entlötung statt. Die Bauteile können von der Leiterplatte nicht getrennt werden. Niedrigere Temperaturen und längere Entlötungszeiten führen ebenfalls nicht zu einer Trennung der Bauelemente. Ab einer Entlötungstemperatur von 375 °C wird das Bauteil so stark thermisch belastet, daß es nicht mehr verwendet werden kann und einer Verwertung zuzuführen ist.

Bauelemente, die verwertet werden sollen, sind möglichst schnell von der Leiterplatte zu trennen. Die Entlötungstemperatur muß unter 415 °C liegen, da bei höheren Temperaturen das Leiterplattensubstrat zerstört wird. Bauelemente, die nach zwei Sekunden Entlötungszeit nicht von der Leiterplatte zu trennen sind, sind in der Regel nicht trennbar. Im Temperaturbereich

zwischen 375 °C und 415 °C ist eine sichere Bauteilentlötung und -entfernung möglich, vorausgesetzt, daß die Entlötung innerhalb von 2 Sekunden durchgeführt werden kann. Für die Verfahrensdurchführung ist eine minimale Entlötungszeit erwünscht. Der Bereich, in dem die Entlötungszeit weniger als 0,5 Sekunden beträgt, wird in Abbildung 26 als idealer Entlötungsbereich für die Überschußerwärmung gekennzeichnet.

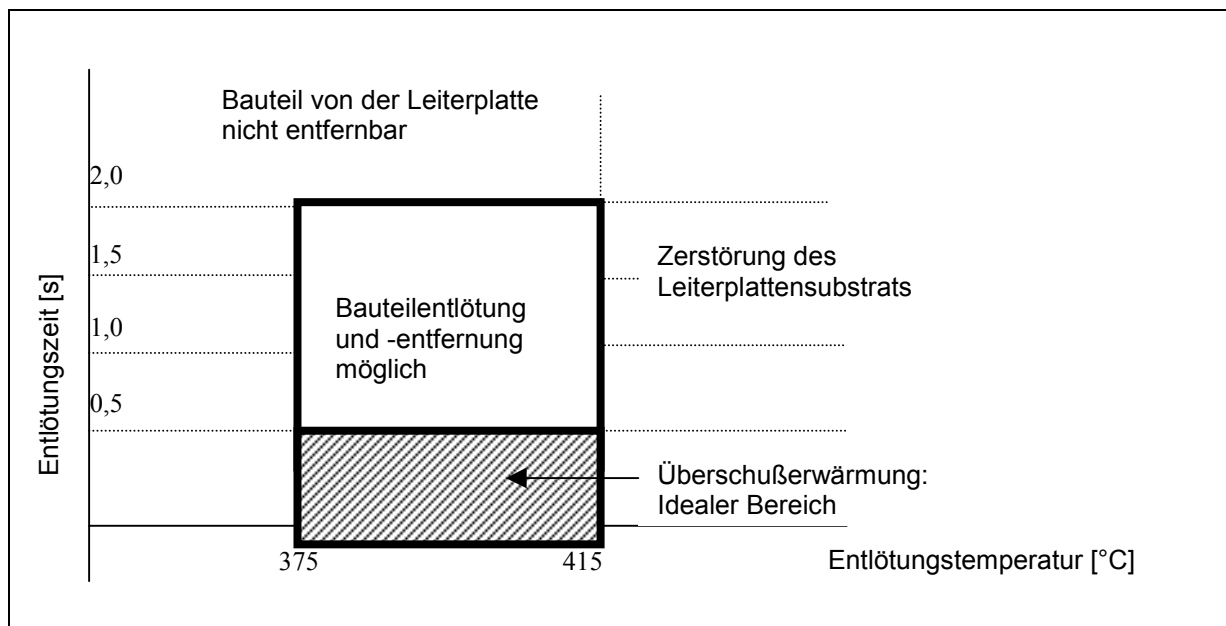


Abbildung 26: Experimentell festgelegte Entlötungsbereiche bei der Überschußerwärmung (Verwertungsstrategie)

8.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Differenz zwischen den berechneten und den empirisch bestimmten Entlötungszeiten könnte sowohl auf die Berechnungsmethoden als auch auf die Parameter der Lötverbindung und des Entlötungsapparates zurückzuführen sein.

Bei der FEM-Berechnung sind Stoffwerte (λ , ρ , c) für reine Werkstoffe verwendet worden. Während der Erstlötung und des Betriebs findet eine unvermeidbare Diffusion zwischen Kupferanschlußdrähten und Lot statt. Durch die Diffusion wird eine Änderung der eutektischen Eigenschaften des Lotes hervorgerufen. Diese Änderung kann nur durch Abschätzungen der geänderten Stoffwerte bei den FEM-Berechnungen berücksichtigt werden. Die Diffusion von Metallen in das Lot kann eine erhöhte Schmelztemperatur oder eine längere Entlötungsdauer verursachen. Die Reduktion der Lötverbindungsform auf quadratische Elemente kann ebenfalls zu Ergebnisverzerrungen führen.

Die Leiterplatten wurden vor der Entlötung nicht gesäubert. Oxidschichten wurden ebenfalls nicht von den Lötstellen entfernt. Schmutz und Oxidschichten wurden bei der Berechnung

nicht berücksichtigt, sie sind mögliche Fehlerquellen bei der Berechnung der Entlötungstemperatur und -dauer.

Die Bauelementanschlußdrähte besitzen keine genormte Länge. Da die Wärme sich schneller in den Kupferdrähten ausbreitet als in den angrenzenden Werkstoffen, könnten abweichende Drähtelänge zu Unterschieden zwischen der Berechnung und der praktischen Durchführung der Entlötung führen.

Die eingesetzten Entlötungsgeräte verwenden eine Vakuumpumpe für die Entfernung des geschmolzenen Lotes. Durch das Ansaugen von Luft kann es zu einer Abkühlung der angrenzenden Verbindungselemente kommen, was eine Verzögerung bei der Entlötung verursacht. Diese Abkühlung ist dennoch erwünscht, da sie die Bauelemente vor thermischen Belastungen schützt.

8.4 Eingesetzte Entlötungsgeräte

Für Through-hole-Verbindungen ist eine Entlötung durch Wärmeleitung möglich, mit dem eingesetzten handelsüblichen Entlötungsgerät ist sie aber zeitaufwendig. Solche Entlötungsgeräte sind besser für eine selektive Entlötung von Schad- oder Wertelementen geeignet. Das Gerät ist für Reworking und nicht für Recycling konzipiert. Für ein gesamtes Recycling von allen Bauteilen dauert der Prozeß zu lange, um die wirtschaftliche Rentabilität zu gewährleisten. Scheller [SFM 1995] hat festgestellt, daß bei Leiterplatten mit mehr als acht zu entfernenden Bauelementen eine gleichzeitige Entlötung aller Bauteile mit anschließender Sortierung wirtschaftlicher als die vereinzelte Entnahme ist. Um die Rentabilität des Verfahrens zu erhöhen, muß die Entlötung durch Wärmeleitung mit Hilfe automatisierter Verfahren gleichzeitig an mehreren Stellen erfolgen. Solche Verfahren sind noch in der Entwicklung.

8.5 Bewertung der Entlötung als Recyclingschritt

Das Recycling der Leiterplatten durch Auflösung von Stoffschlußverbindungen erlaubt die Demontage geeigneter Baugruppen und die Wieder- und Weiterverwendung von Bauelementen. Sie ist als Recyclingstrategie der stofflichen Verwertung oder Beseitigung von Bauteilen vorzuziehen. Nach der Entlötung ermöglicht eine chemische Auflösung der Restleiterplatte eine hochwertige Verwertung bzw. Verwendung der restlichen Werkstoffe.

Bislang scheitert Leiterplattenrecycling an der Vielfalt der eingesetzten Werkstoffe und der damit verbundenen Unverträglichkeiten bei der Verwertung. Die Mannigfaltigkeit der

Leiterplattenwerkstoffe kann wegen der Breite der geforderten Werkstoffeigenschaften nur begrenzt eingeschränkt werden. Leiterplatten aus einem Werkstoff herzustellen ist nicht möglich. Der Einsatz von verträglichen Werkstoffen, die zusammen einer Verwertung zugeführt werden, ist nur für eine geringe Prozentzahl der eingesetzten Werkstoffe möglich.

9 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, in wie weit Werkstoffeigenschaften bei unverträglichen Werkstoffen für das Recycling nutzbar gemacht werden können. Die klassischen Recyclingverfahren wurden in Abhängigkeit von den chemischen und physikalischen Werkstoffeigenschaften bzw. Altstoffeigenschaften, die eine Trennung von Altstoffen erlauben, systematisiert. Ein Zusammenhang zwischen dem Erhalt der Produktfunktion, dem Recyclingaufwand und der zunehmenden Bedeutung der Entfernung unverträglicher Altstoffe wurde dargestellt. In Abhängigkeit vom Funktionserhalt des Produktes konnte eine allgemeine Recyclingstrategie für die Verwendung und Verwertung komplexer Produkte entwickelt werden. Anhand der Produktgruppe Computer-Leiterplatten wurde die vorgelegte Recyclingstrategie angewendet.

Stoffschlußverbindungen wurden in der vorliegenden Arbeit auf ihre Recyclingfähigkeit untersucht. Gelötete Verbindungselemente gelten bislang als nicht recyclinggerecht, da sie zu den nicht trennbaren Verbindungen gehören und möglicherweise unverträgliche Werkstoffe verbinden. Die Entlötung von Verbindungselementen wird als Recyclingstrategie kaum eingesetzt, obwohl die Entlötung als eine teilweise zerstörungsfreie Demontage durchgeführt werden kann.

Die Entlötung von Verbindungen wurde in der vorliegenden Arbeit mathematisch als Transportproblem beschrieben. Die Entlötungsparameter weichgelöteter Bauelemente wurden durch die Anwendung von finiten Elementen berechnet und durch Experimente verifiziert. Durch die gewonnenen Ergebnisse können Entlötungsverfahren für Leiterplattenbauteile optimiert werden. Die Ergebnisse sind auf die Entwicklung automatisierter Entlötungsverfahren übertragbar.

Literatur

- [AfH 1999] Affüpper, Marc ; Holberg, Thomas : „Wiederverwendung von Elektronikbauteilen.“ In *EntsorgungsPraxis* 5/99 S. 16 - 18 Gütersloh : Bertelsmann Fachzeitschriften, 1999
- [Alv 1988] *Wärme- und Stoffübertragung* 2. Auflage. (Skript der Lehrveranstaltung) TU-Berlin Fachbereich 10, 1988
- [ASE 1997] Asscon Systemtechnik-Elektronik GmbH : *Verfahren und Vorrichtung zum Auslöten von Bauelementen, insbesondere elektronischen Bauelementen*. Deutsche Patentanmeldung DE 196 17 618 A1, 1997
- [Atk 1987] Atkins, Peter.W.: *Physikalische Chemie*, Weinheim : Verlag Chemie 1987
- [Awj 1994] Zeitschriftenaufsatz : „Verminderung von Fernsehgeräteschrott“ *AbfallwirtschaftsJournal* 6 (1994) S. 822. Berlin : EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, 1994
- [BaS 1994] Baehr, Hans Dieter ; Stephan, Karl : *Wärme- und Stoffübertragung*. Berlin : Springer, 1994
- [Bau 1991] Bauer, Carl-Otto (Hrsg.) : *Handbuch der Verbindungstechnik*. München : Carl Hanser Verlag, 1991
- [BBM 1995] Brandrup, Johannes ; Bittner, Muna ; Michaeli, Walter; Menes, Georg : *Die Wiederverwertung von Kunststoffen*. München : Hanser, 1995
- [BDS 1996] Bundesverband der Deutschen Stahl-Recycling-Wirtschaft e.V. : *Europäische Stahlschrottsortenliste*, Neue Fassung vom 01.10.1996
- [Blu 1996] Schmidt, Joachim (Hrsg.) ; Blume, Bernhard : *Schadstoffe in elektrischen und elektronischen Geräten. Emissionsquellen, Toxikologie, Entsorgung und Verwertung*. Berlin : Springer Verlag, 1996
- [BMBF 1995] Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie: Projekt „Systematische Auswahlkriterien für die Entwicklung von Verbundwerkstoffen unter Beachtung ökologischer Erfordernisse“ Berlin 1995, Seite 129 - 130
- [Bor 1998] Borowski, Alex : „Entwicklungstrende bei der Stahlerzeugung im Lichtbogenofen“ In *Stahl und Eisen* 118, Nr. 2 S. 51, 1998
- [CaJ 1959] Carslaw, H. S.; Jaeger, J. C. : *Conduction of Heat in Solids*, Second Edition. London, England : Oxford University Press, 1959

- [DGH 1991] Dax, Wilhelm ; Gundelfinger, Klaus ; Häffner, Werner ; et. al. : *Tabellenbuch für Metalltechnik*. 5. Auflage. Hamburg, Handwerk und Technik, 1991
- [DIN 1708] Norm DIN 1708 : *Kupfer, Kathoden und Gußformate*. Berlin : Beuth Verlag, 1973
- [DIN 17100] Norm DIN 17100 (ISO 630) : *Allgemeiner Baustahl*. Berlin : Beuth Verlag, 1980
- [DIN 1725] Norm DIN 1725 : *Aluminiumlegierungen Teil 1. Knetlegierungen*. Berlin : Beuth Verlag, 1983
- [DIN 8593] Norm DIN 8593 : *Fertigungsverfahren Fügen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin : Beuth Verlag, 1985
- [DKK 1988] Degenkolb, Joachim ; Kalwa, Gerhard ; Kaup, Konrad : „Wirkung von Begleitelementen auf die Werkstoffeigenschaften“ In *Stahl und Eisen* 108, 1988 Heft 11 Seite 527 -536
- [Dom 1998] Domininghaus Hans : *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften* 5. Auflage. Berlin : Springer, 1998
- [Dub 1990] Beitz, Wolfgang ; Küttner Karl-Heinz (Hrsg.) : *Dubbel : Taschenbuch für den Maschinenbau*, 17. Auflage Berlin : Springer 1990
- [Duc 1925] Ducas, Charles : *Electrical Apparatus and Method of Manufacturing the Same*. US-Patent number 1563731, 1925
- [EAV 1999] Arbeitsgemeinschaft CYCLE : „Stellungnahme zur Elektroaltgeräte - Verordnung von elektrischen und elektronischen Geräten“ <http://www.fvit-eurobit.de/pages/asg/Agcycle10.html> 1999
- [Ede 1999] Eder, Stephan : „Das Öko-TV läßt auf sich warten“ In *VDI Nachrichten*, Düsseldorf : 27.08.1999
- [Eli 1981] Elias, Hans Georg : *Makromoleküle* 4. Aufl. Basel : Hüthig & Wepf Verl., 1981
- [Enq 1994] Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt – Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft“ Deutscher Bundestag. Bonn : Drucksache 12/8260, 1994
- [FiV 1993] Fischer, Rolf ; Vogelsang, Klaus : *Größen und Einheiten in Physik und Technik*, 6., völlig überarb. und erw. Aufl. Berlin : Verl. Technik, 1993
- [Flo 1983] Flory, Paul J. : *Principles of Polymer Chemistry*. Ithaca : Cornell University Press, 1983

- [Geh 1986] Gehrman, Franz : *Konstruktion und weiterhaltendes Recycling niederwertiger technischer Gebrauchsgüter, dargestellt am Beispiel Haushaltskleinmaschinen*. Düsseldorf : VDI Verlag, 1986
- [Gie 1998] Giese, Dagmar : *Recycling über Lösen von Elastomeren und faserverstärkten Thermoplasten*. Dissertation TU-Berlin, 1998
- [Hes 1995] Hescke, Peer : *Demontage von Klebverbindungen für eine praktikablere Instandhaltung und ein optimiertes Recycling*. Forschungsreihe Kunststoff-Forschung 32. Berlin : TU-Berlin, 1995
- [HHo 1982] Howie, F.; Hondros, E : „The Surface Tension of Tin-Lead Alloys in Contact mit Fluxes“. In *Journal of Mathematic Science* 17, (5) 562 – 565. 1982
- [HHS 1988] Höffken, Erich ; Hammer, Rudolf ; Schicks, Helmut ; Ullrich, Wolfgang : „Chemische Zusammensetzung und Verwendung von aufbereitetem Schrott“ In *Stahl und Eisen*, 108 1988 Nr. 17 S. 801
- [Hor 1991] Hornbogen, Erhard : *Werkstoffe*. 5. Auflage. Berlin, Springer, 1991
- [Hüt 1996] Czichos, Horst (Hrsg.) : Hütter, *Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*. 30. Auflage. Berlin : Springer, 1996
- [Jel 1994] Jellinghaus, Manfred : *Stahlerzeugung im Lichtbogenofen*. Düsseldorf : Verlag Stahleisen, 1994
- [Jun 1994] Jungbauer, Anton : *Recycling von Kunststoffen* 1. Auflage. Würzburg : Vogel, 1994
- [Kel 1991] Kellerwessel, Hans : *Aufbereitung disperser Feststoffe: mineralische Rohstoffe, Sekundärrohstoffe, Abfälle*. Düsseldorf: VDI-Verl., 1991
- [KKK 1986] Körner, Wolfgang ; Kiessling, Günther ; Mende, Dietmar ; et. all. : *Lehr- und Übungsbuch Physik*. Leipzig. Verlag Harri Deutsch, 1986
- [Koh 1993] Kohler, Gerd : *Verfahren zum Separieren von Bauteilen von damit bestückten Leiterplatten*. Deutsche Patentanmeldung DE 41 31 620 A1, 1993
- [KrE 1981] Kreuzberg, Wigbert ; Eberhardt, Lutz : *Rückgewinnung von Hartmetall aus Werkzeugschrott*. Halle : Zentralinstitut für Schweißtechnik der DDR, 1981
- [KrS 1997/1] Krol, W ; Steil, H.-U. : „ Bestandsaufnahme internationaler Umweltschutz-Aktivitäten und deren Auswirkungen auf die deutsche NE-Metallindustrie Teil 1“ In *Metall*, 51. Jahrgang, Nr. 3/97
- [KrS 1997/2] Krol, W ; Steil, H.-U. : „ Bestandsaufnahme internationaler Umweltschutz-Aktivitäten und deren Auswirkungen auf die deutsche NE-Metallindustrie Teil 2“ In *Metall*, 51. Jahrgang, Nr. 9/97

- [KWa 1984] Klein Wassink, R. J.: *Soldering in Electronics*. Ayr, Scotland : Electrochemical Publications Ltd 1984
- [Lei 1993] Leicht, Helmut : *Verfahren und Vorrichtung zum Auslöten von Bauelementen, insbesondere von SMD-Bauelementen*. Deutsche Patentanmeldung DE 42 11 241 A1, 1993
- [Mey 1983] Meyer, Harald : *Recyclingorientierte Produktionsgestaltung*. VDI Reihe 1 Nr. 98. Düsseldorf : VDI Verlag, 1983
- [Mün 1997] Münster, Hans P. (Hrsg.) : *Taschenbuch des Metallhandels*. 9 vollst. Neubearb. Aufl. Heidelberg : Hüthig, 1997
- [Myl 1992] Mylenbusch, Helmut : „Die Wiederverwertung von Altkunststoffen“ In *AbfallwirtschaftsJournal* 4 (1992) S. 392 - 395. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Berlin
- [N.N. 1997] Zeitschriftenaufsatz : „Von Sondermüll zum Rohstoff“ In *Elektronik-Report* 1997 Heft 4 Seite 26 - 29
- [N.N. 1998] Zeitschriftenaufsatz : „Thermisches Recycling von Elektronikschrott“ In *Recycling Magazin*, Band 53 (1998) Heft 3, Seite 20 - 21
- [NaL 1990] Naumann, J.; Lynch, J.C.: *Polymer recycling by Selective Dissolution*, US Patent No.: WO 9103515, 1990
- [Nef 1988] Neff, David : Nonferrous Molten Metal Processes in *Metals Handbook* Ninth Edition, Volume 15 Casting. Ohio USA : Asm, 1988
- [Nkl 1996] Nickel, Werner (Hrsg.) : *Recycling-Handbuch : Strategien, Technologie, Produkte*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1996
- [Nol 1997] Nolte, Andreas : „*Metallurgical Utilisation of Reusable Products from the Recycling Industry in a Secondary Copper Smelter*“ International Conference Recovery, Recycling, Re-integration Geneva : 1997. Band 5 S. 152 – 157
- [PaB 1997] Pahl, Gerhard ; Beitz, Wolfgang : *Konstruktionslehre*. Berlin : Springer, 1997
- [Pap 1995] Pape, Lutz-Peter : *Untersuchung zur Optimierung des Aluminiumkreislaufs*. Dissertation Technische Universität Berlin, 1995
- [Pet 1991] Petrunin, I : *Handbuch Löttechnik*. Berlin : Verlag Technik, 1991
- [Qua 1996] von Quast, Oliver : *Universelle Methode zur Dehalogenierung von Thermoplasten*. Dissertation, Polymertechnik TU-Berlin, 1996
- [Ree 1998] Reed, Elsevier : *Recycling: Fachbuch Stahlrecycling*. München : BDSV, 1998
- [Rot 1996] Roth, Karlheinz : *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*. Band 3: Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsfindung 2. Auflage. Berlin : Springer, 1996

- [Sae 1998] Saechtling, Hansjürgen : *Kunststoff-Taschenbuch* 27. Ausgabe. München : Carl Hanser Verlag ,1998
- [Sch 1970] Schneider, Kurt : *Die Verhüttung von Aluminiumschrott*. 3. Auflage. Berlin : Metall Verlag, 1970
- [Sch 1997] Schwarz, Otto (Hrsg.): *Kunststoffkunde: Aufbau, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendung der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere* 5. Überarb. Aufl. Würzburg: Vogel, 1997
- [Sen 1996] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz (SenStadtUm) Hrsg.: *Verwertung elektrischer und elektronischer Altgeräte in Berlin und Brandenburg*. Berlin : Verwaltungsdruckerei, 1996
- [Sep 1999] Sepran-Handbücher : <http://dutita0.twi.tudelft.nl/sepran/sepran.html> 1999
- [SFM 1995] Scheller, Herbert ; Feldman, Klaus ; Meedt, Otto : *Automated Disassembly of Printed Circuit Boards*. Konferenzbericht R95:Recovery, Recycling, Re-integration Vol111 Seite 336
- [Ste 1994] Steinhilper, Rolf : *Umwelt- und recyclinggerechte Produktentwicklung*. WEKA Fachverlag Augsburg, 1994
- [StF 1998] Stewart, Louise ; Fleischer, Günter : *Verfahren zur Verwendung oder Verwertung von Leiterplatten und darauf befindlichen Bauelementen*. Deutscher Patentantrag Nr. 198 54 298 4-34
- [Tar 1994] Tartler, Dieter : *Analytisch-chemische Behandlung von elementreichen Verbundmaterialien und Möglichkeit ihrer stofflichen Verwertung am Beispiel Elektronikschrott*. Dissertation an der Uni Erlangen – Nürnberg, 27.7.1994
- [Thi 1994] Thiele, Andreas : *Materialrecycling von Thermoplasten über Lösen*, Dissertation, Kunststofftechnikum TU-Berlin, 1994
- [Til 1993] Tiltmann, Karl O. (Hrsg.) : *Recyclingpraxiskunststoff*. Verlag TÜV Rheinland, 1993
- [Til 1995] Tiltmann, Karl : *Recycling betrieblicher Abfälle*. Augsburg : WEKA Fachverlag, 1995
- [TKm 1994] Thomé-Kozmiensky, Karl J : *Kreislaufwirtschaft*. Berlin: Ef-Verlag, 1994
- [TND 1995] Tema Nord : *Waste from electrical and electronic products*. Copenhagen : Nordic Council of Ministers Publication 1995 : 554, 1995
- [Tsa 1999] Tsakiridou, Evdoxia : „Schatz im Schrott“ In *Bild der Wissenschaft* 2/1999 S.76-79

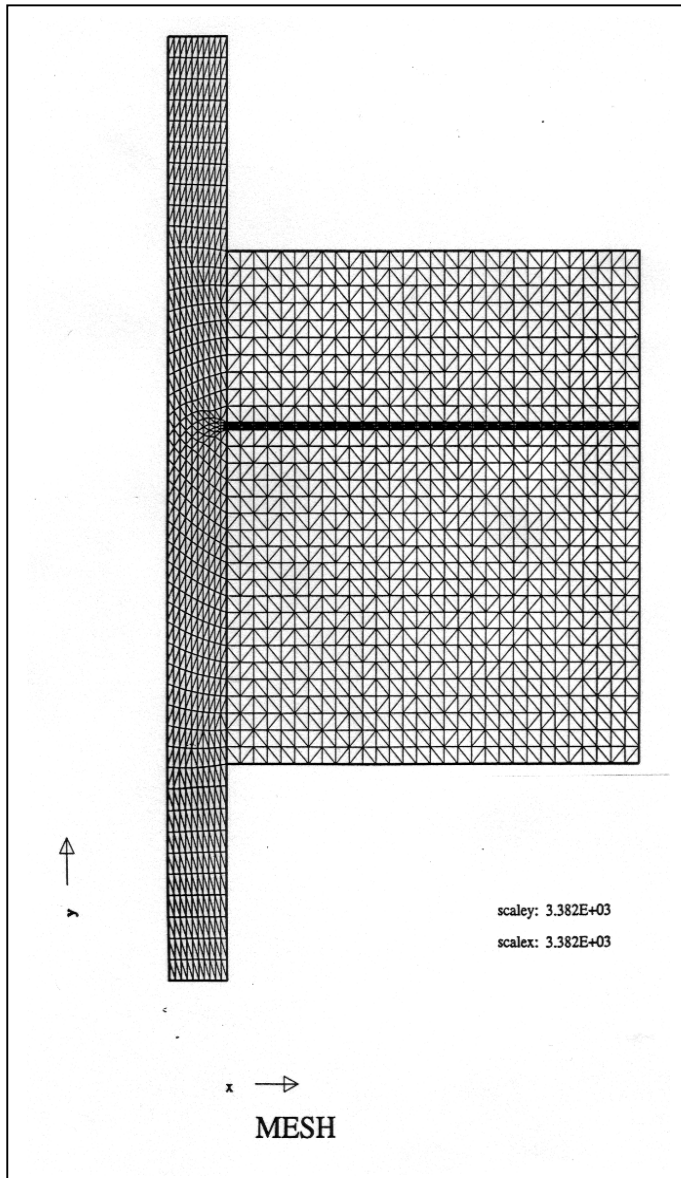
- [VDI 2232] VDI 2232 : *Methodische Auswahl fester Verbindungen. Systematik, Konstruktionskataloge, Arbeitshilfen.* VDI-EKV-Ausschuß Verbindungstechnik. Berlin : Beuth, 1990
- [VDI 1997] *VDI-Wärmeatlas : Berechnungsblätter für den Wärmeübergang.* 8. Aufl.. Berlin : Springer, 1997
- [VDI 2243] Norm VDI 2243 : Entwurf für VDI Richtlinie 2243, *Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte.* Berlin : Beuth, 1991
- [Wie 1994] Weißbach, Wolfgang : *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung.* 11., verb. Aufl.. Braunschweig : Vieweg, 1994
- [Wim 1992] Wimmer, Dieter : *Recyclinggerecht konstruieren mit Kunststoffen.* Darmstadt. Hoppenstedt, 1992

Anhang 1

Anhang 1: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

Typ 1: Substratdicke 1,6 mm
Von einer Seite gelötet

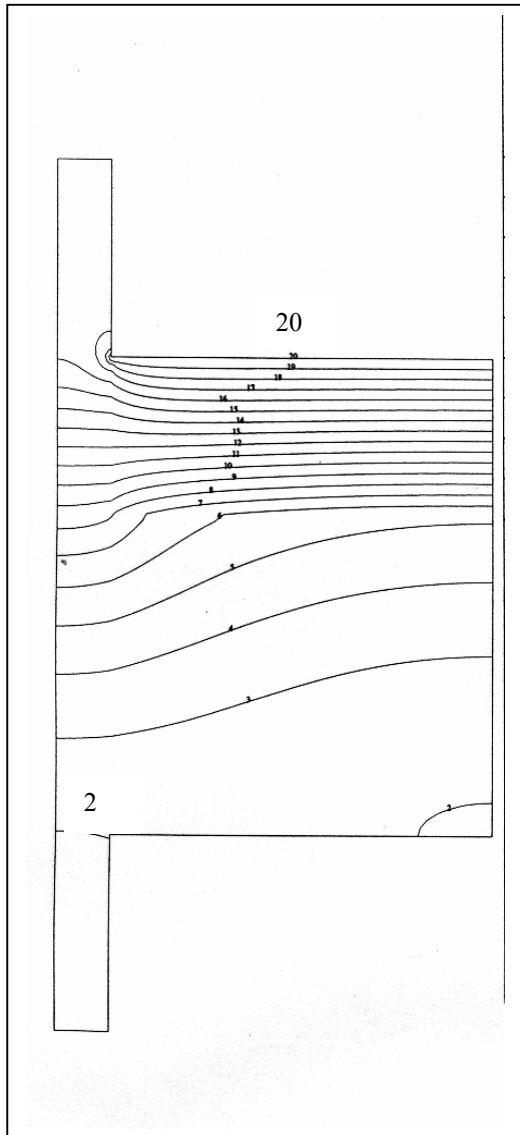
Berechnungsgitter



Anhang 1: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

Typ 1: Substratdicke 1,6 mm

Von einer Seite gelötet

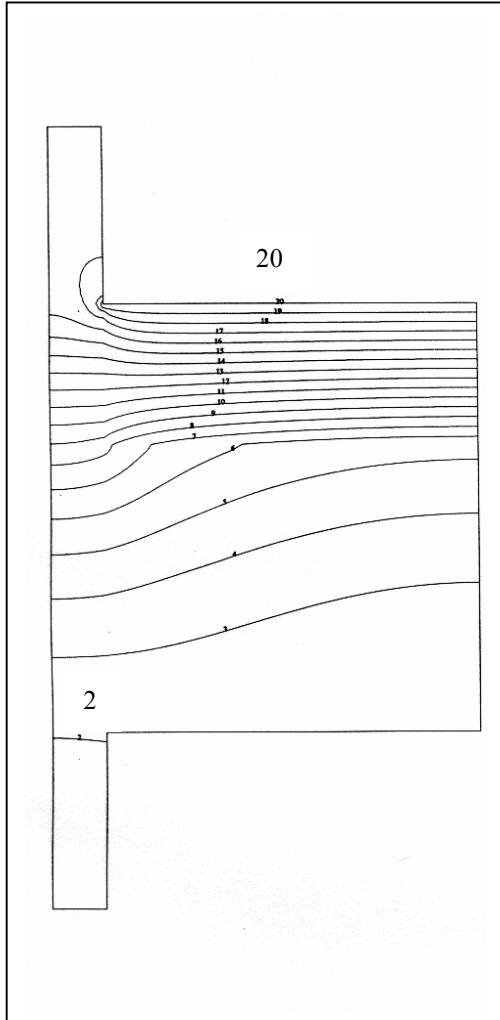


Isotherm	Zeit: 0,1 s		
	Entlötungstemperatur		
	595	645	685
1	325,509	352,836	374,746
2	339,693	368,238	391,075
3	353,876	383,614	407,404
4	368,060	398,990	423,733
5	382,244	414,365	440,062
6	396,428	429,741	456,391
7	410,611	445,117	472,721
8	424,795	460,492	489,050
9	438,979	475,868	505,379
10	453,163	491,243	521,708
11	467,346	506,619	538,037
12	481,530	521,995	554,367
13	495,714	537,370	570,696
14	509,898	552,746	587,025
15	524,081	568,122	603,354
16	538,265	583,497	619,683
17	552,449	598,873	636,012
18	566,633	614,249	652,342
19	580,816	629,624	668,671
20	595,000	645,000	685,000

Anhang 1: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

Typ 1: Substratdicke 1,6 mm

Von einer Seite gelötet

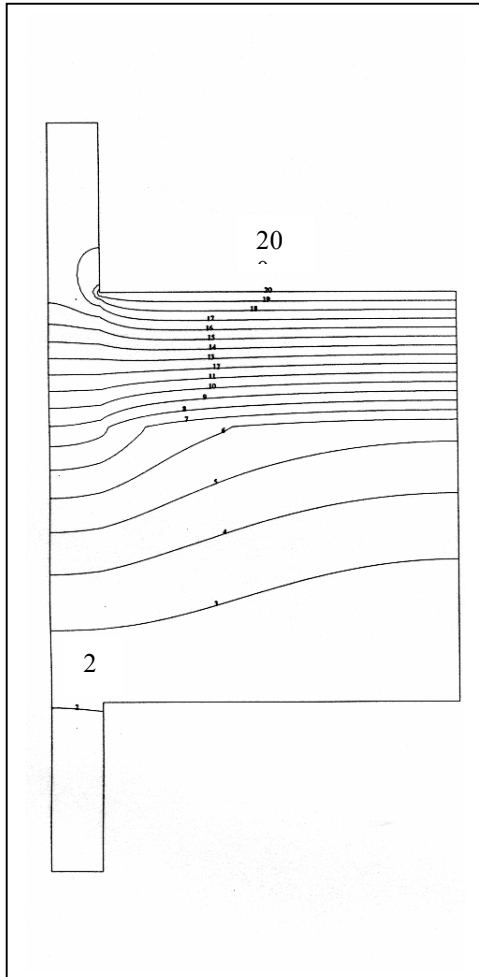


Isotherm	Zeit: 0,3 s		
	Entlötungstemperatur		
	595	645	685
1	570,909	602,583	639,952
2	572,177	604,815	642,323
3	573,445	607,048	644,694
4	574,713	609,280	647,065
5	575,981	611,513	649,436
6	577,249	613,745	651,807
7	578,517	615,978	654,178
8	579,785	618,210	656,549
9	581,053	620,443	658,920
10	582,321	622,675	661,291
11	583,589	624,908	663,662
12	584,856	627,140	666,032
13	586,124	629,373	668,403
14	587,392	631,605	670,774
15	588,660	633,838	673,145
16	589,928	636,070	675,516
17	591,196	638,303	677,887
18	592,464	640,535	680,258
19	593,732	642,768	682,629
20	595,000	645,000	685,000

Anhang 1: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

Typ 1: Substratdicke 1,6 mm

Von einer Seite gelötet

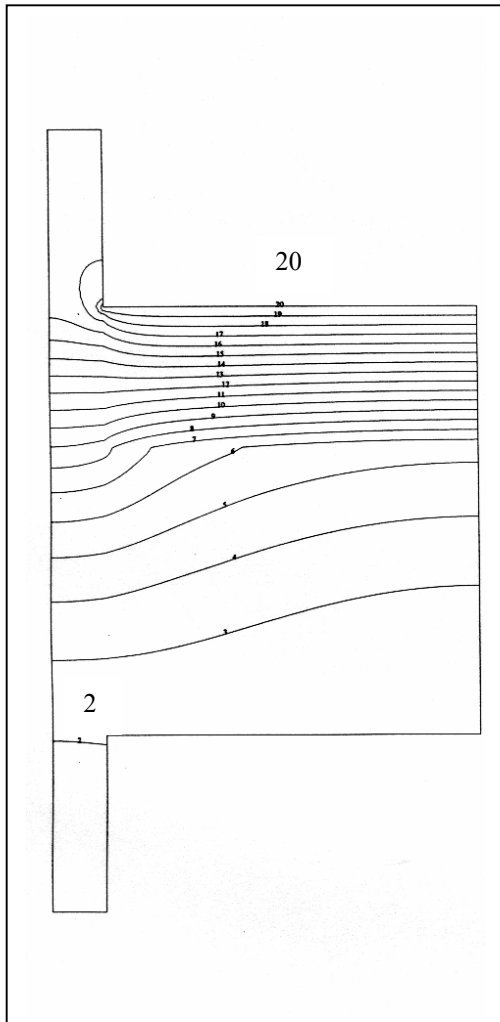


Zeit: 0,5 s			
	Entlötungstemperatur		
	595	645	685
Isotherm			
1	591,539	638,906	678,528
2	591,721	639,226	678,868
3	591,903	639,547	679,209
4	592,085	639,868	679,550
5	592,268	640,189	679,890
6	592,450	640,509	680,231
7	592,632	640,830	680,572
8	592,814	641,151	680,912
9	592,996	641,472	681,253
10	593,178	641,792	681,594
11	593,361	642,113	681,934
12	593,543	642,434	682,275
13	593,725	642,755	682,615
14	593,907	643,075	682,956
15	594,089	643,396	683,297
16	594,271	643,717	683,637
17	594,454	644,038	683,978
18	594,636	644,358	684,319
19	594,818	644,679	684,659
20	595,000	645,000	685,000

Anhang 1: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

Typ 1: Substratdicke 1,6 mm

Von einer Seite gelötet



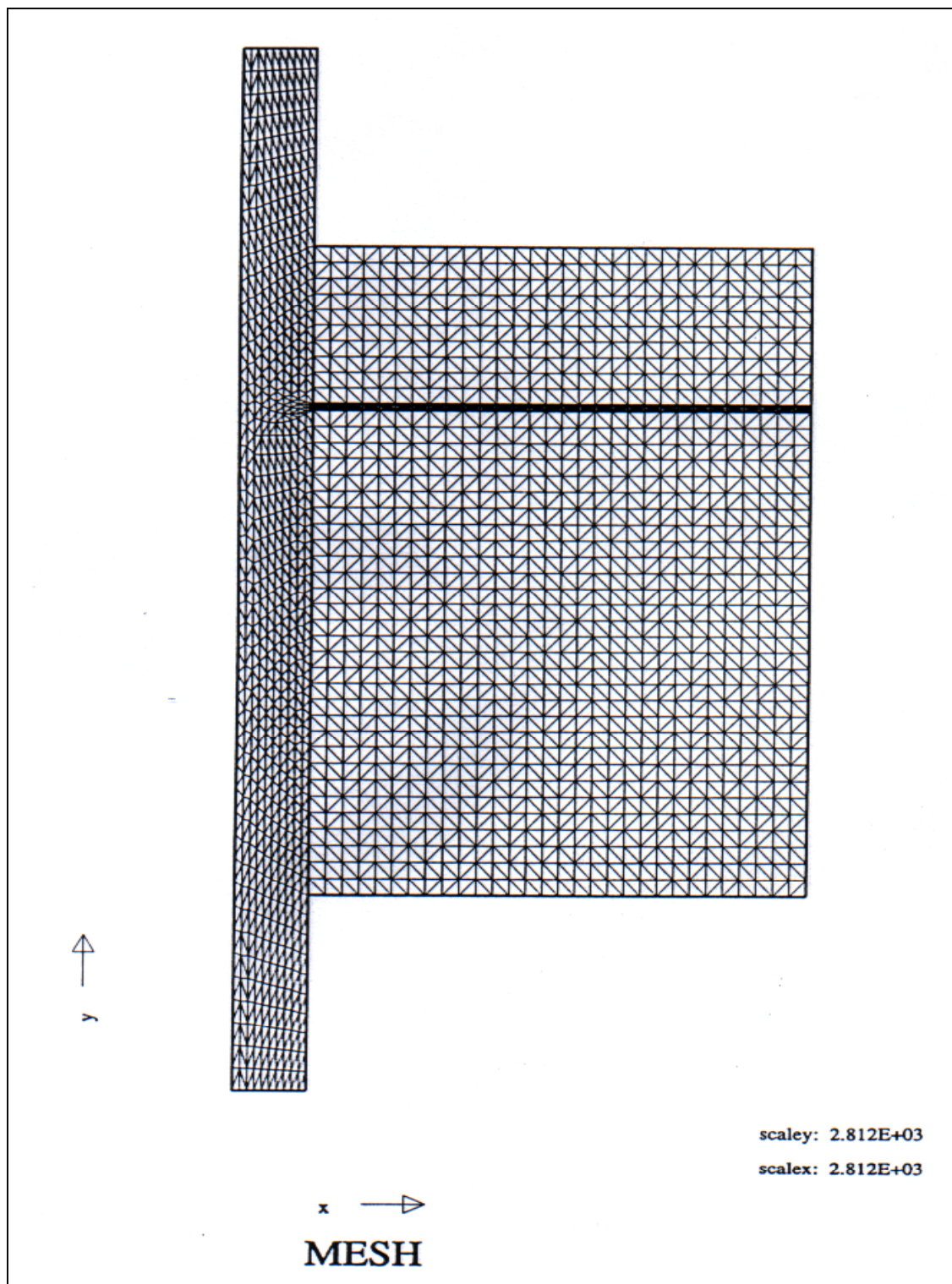
Isotherm	Zeit: 0,7 s		
	Entlötungstemperatur		
	595	645	685
1	594,503	644,124	684,070
2	594,529	644,171	684,119
3	594,555	644,217	684,168
4	594,581	644,263	684,217
5	594,607	644,309	684,266
6	594,634	644,355	684,315
7	594,660	644,401	684,364
8	594,686	644,447	684,413
9	594,712	644,493	684,462
10	594,738	644,539	684,511
11	594,764	644,585	684,560
12	594,791	644,631	684,608
13	594,817	644,677	684,657
14	594,843	644,724	684,706
15	594,869	644,770	684,755
16	594,895	644,816	684,804
17	594,921	644,862	684,853
18	594,948	644,908	684,902
19	594,974	644,954	684,951
20	595,000	645,000	685,000

Anhang 2

Anhang 2: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

Typ 2: Substratdicke 2,1 mm
Von einer Seite gelötet

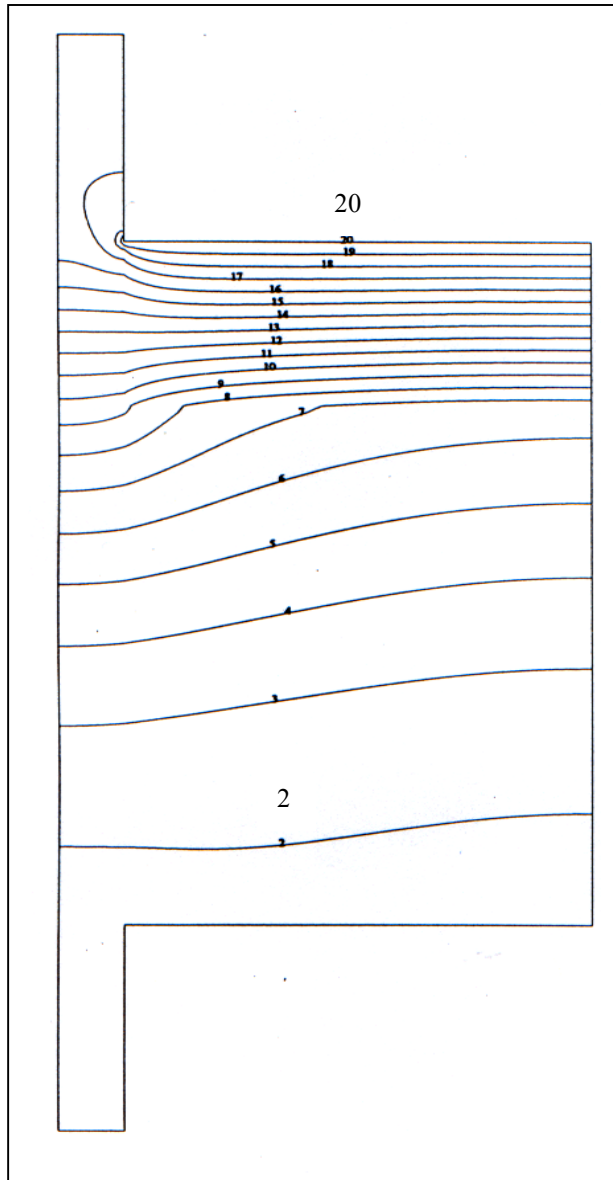
Berechnungsgitter



Anhang 2: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

Typ 2: Substratdicke 2,1 mm

Von einer Seite gelötet

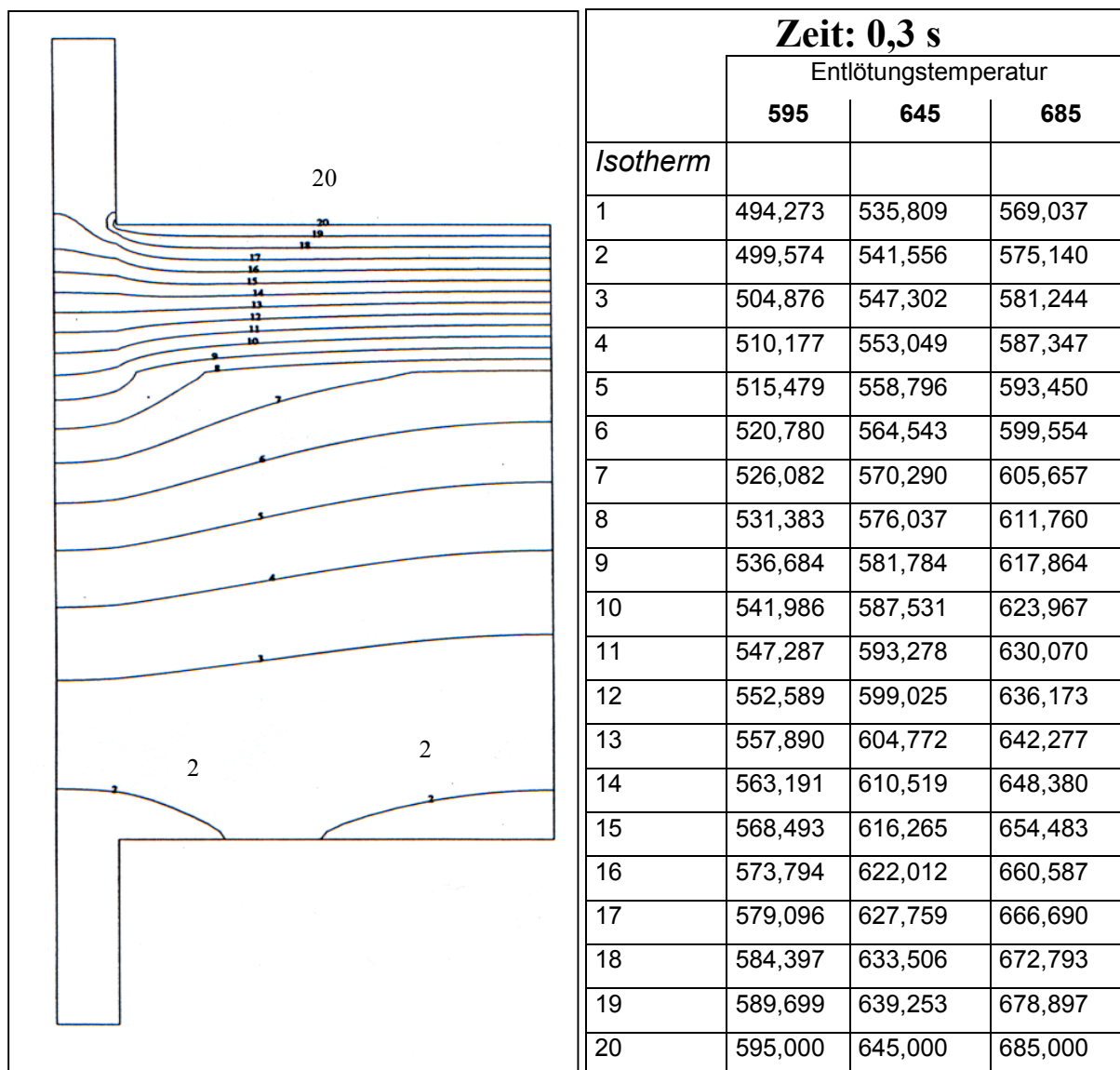


Zeit: 0,1 s			
Entlötungstemperatur			
	595	645	685
<i>Isotherm</i>			
1	ZT	ZT	ZT
2	ZT	ZT	ZT
3	ZT	ZT	307,180
4	ZT	310,169	329,405
5	305,430	331,096	351,629
6	324,735	352,023	373,854
7	344,039	372,950	396,079
8	363,344	393,877	418,303
9	382,649	414,804	440,528
10	401,953	435,731	462,753
11	421,258	456,658	484,978
12	440,563	477,585	507,202
13	459,867	498,512	529,427
14	479,172	519,438	551,652
15	498,477	540,365	573,876
16	517,781	561,292	596,101
17	537,086	582,219	618,326
18	556,391	603,146	640,551
19	575,695	624,073	662,775
20	595,000	645,000	685,000
ZT: Zimmertemperatur (ca. 292K)			

Anhang 2: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

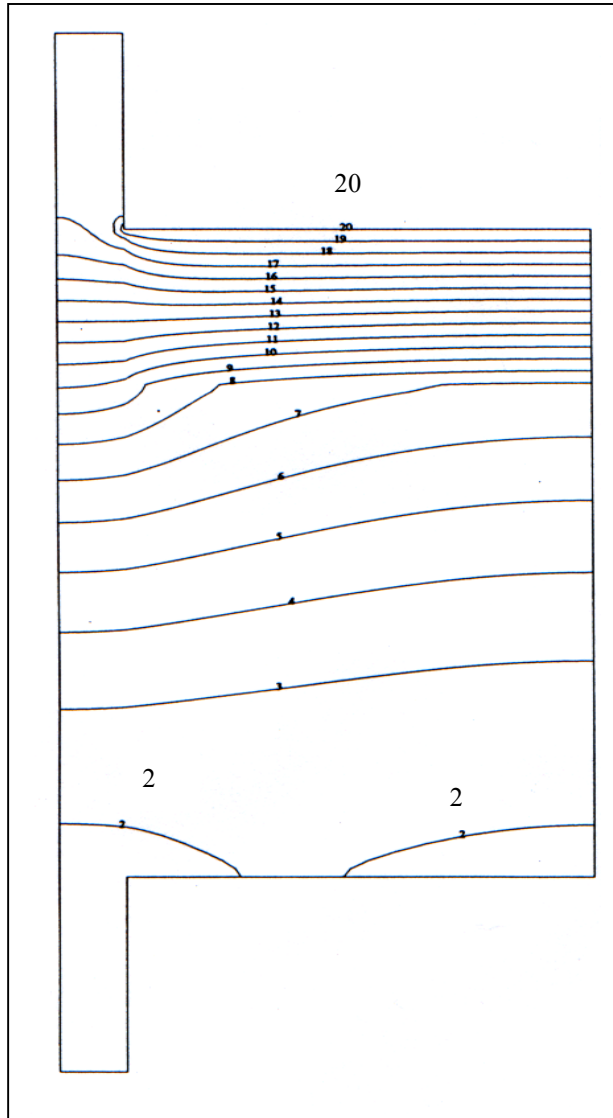
Typ 2: Substratdicke 2,1 mm

Von einer Seite gelötet



Anhang 2: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

Typ 2: Substratdicke 2,1 mm
 Von einer Seite gelötet

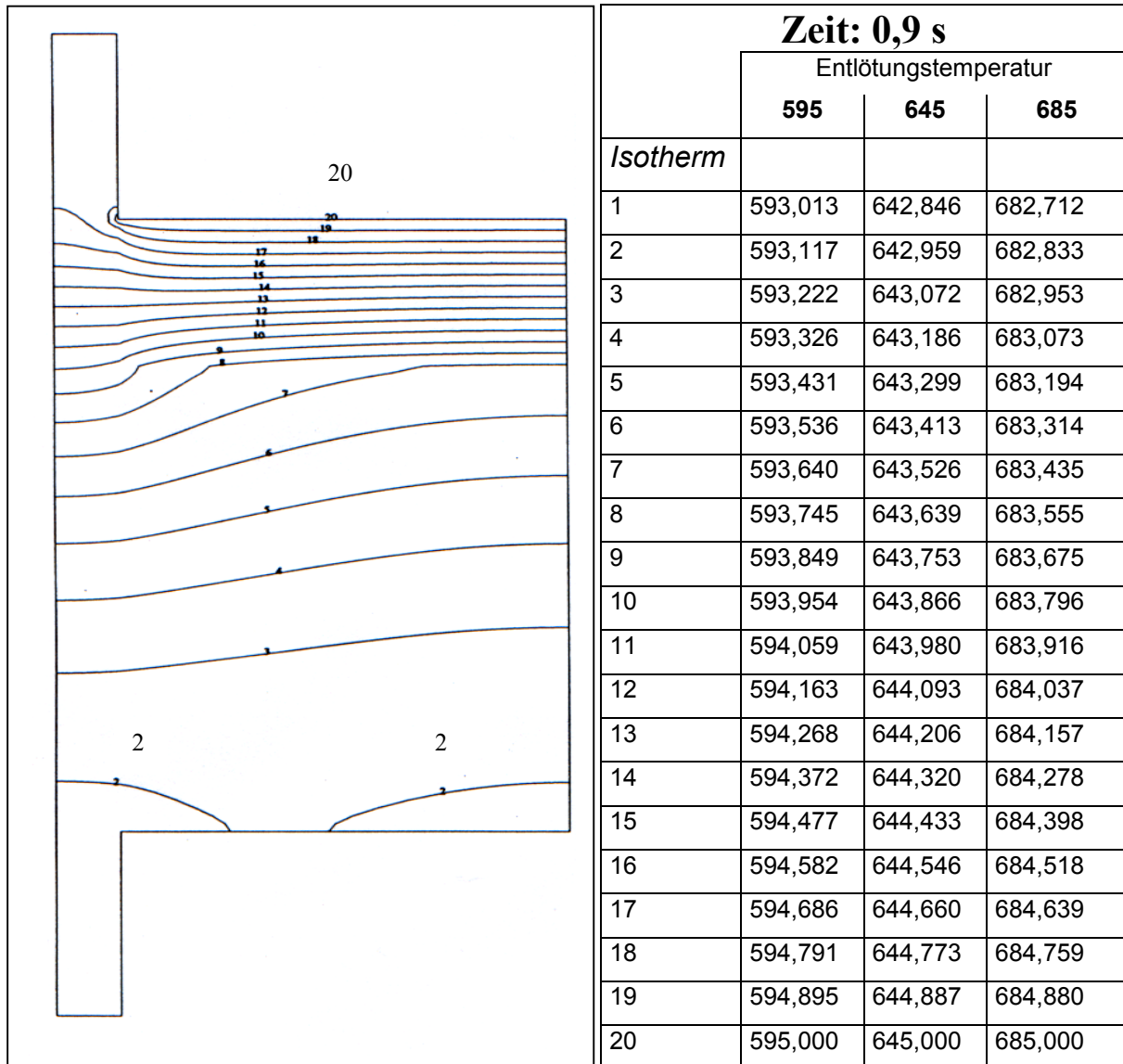


Zeit: 0,5 s			
	Entlötungstemperatur		
	595	645	685
<i>Isotherm</i>			
1	567,781	615,494	653,664
2	569,213	617,046	655,313
3	570,646	618,599	656,962
4	572,079	620,152	658,611
5	573,511	621,705	660,261
6	574,944	623,258	661,910
7	576,376	624,811	663,559
8	577,809	626,364	665,209
9	579,242	627,917	666,858
10	580,674	629,470	668,507
11	582,107	631,023	670,156
12	583,539	632,576	671,806
13	584,972	634,129	673,455
14	586,404	635,682	675,104
15	587,837	637,235	676,754
16	589,270	638,788	678,403
17	590,702	640,341	680,052
18	592,135	641,894	681,701
19	593,567	643,447	683,351
20	595,000	645,000	685,000

Anhang 2: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

Typ 2: Substratdicke 2,1 mm

Von einer Seite gelötet



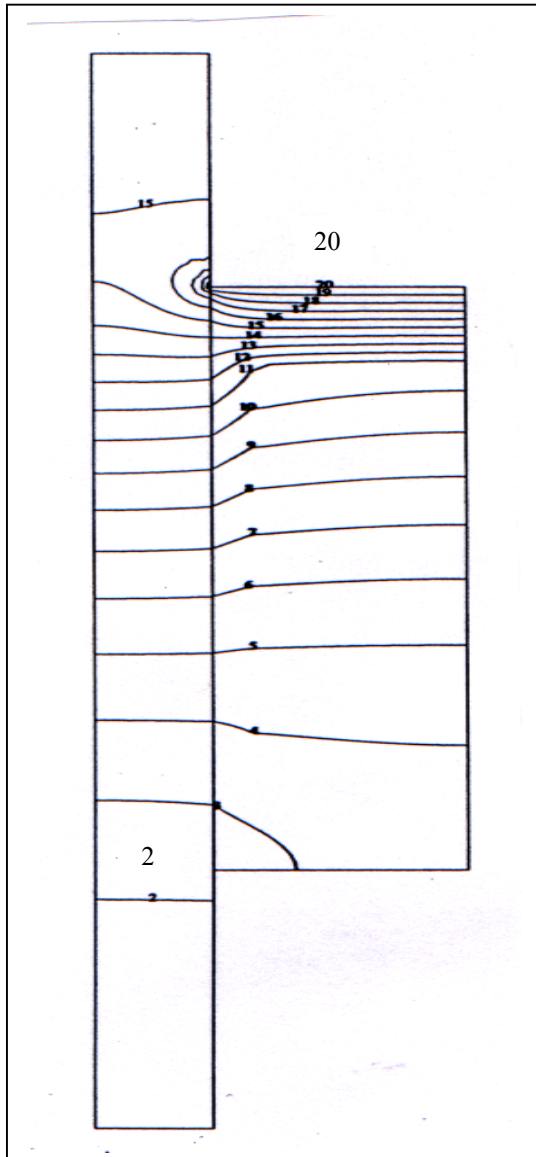
Anhang 3

Anhang 3: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

Typ 3: Substratdicke 1,6 mm

Von beiden Seiten gelötet

Das Gitternetz ist auf Seite 50 abgebildet.

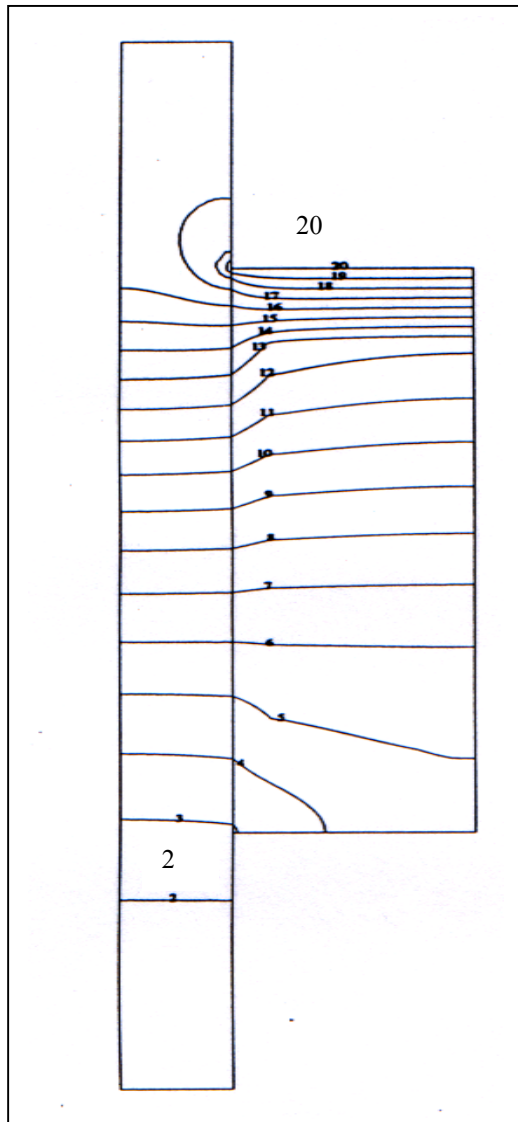


Isotherm	Zeit: 0,1 s		
	Entlötungstemperatur		
	595	645	685
1	471,261	500,842	524,506
2	477,773	508,429	532,953
3	484,286	516,016	541,400
4	490,798	523,603	549,847
5	497,311	531,191	558,294
6	503,824	538,778	566,741
7	510,336	546,365	575,188
8	516,849	553,953	583,636
9	523,361	561,540	592,083
10	529,874	569,127	600,530
11	536,387	576,714	608,977
12	542,899	584,302	617,424
13	549,412	591,889	625,871
14	555,412	599,476	634,318
15	562,437	607,064	642,765
16	568,950	614,651	651,212
17	575,462	622,238	659,659
18	581,975	629,825	668,106
19	588,487	637,413	676,553
20	595,000	645,000	685,000

Anhang 3: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

Typ 3: Substratdicke 1,6 mm

Von beiden Seiten gelötet

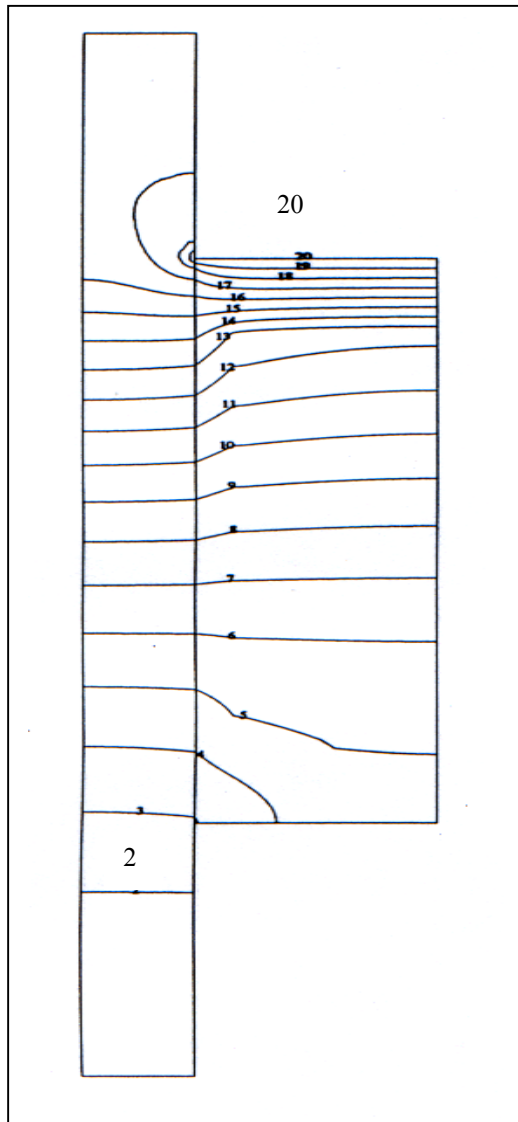


Zeit: 0,3 s			
Entlötungstemperatur			
	595	645	685
Isotherm			
1	581,590	629,377	667,607
2	582,296	630,199	668,522
3	583,001	631,021	669,437
4	583,707	631,844	670,353
5	584,413	632,666	671,268
6	585,119	633,488	672,184
7	585,825	634,310	673,099
8	586,530	635,133	674,015
9	587,236	635,955	674,960
10	587,942	636,777	675,846
11	588,468	637,600	676,761
12	589,354	638,422	677,676
13	590,059	639,244	678,592
14	590,765	640,066	679,507
15	591,471	640,889	680,423
16	592,177	641,711	681,338
17	592,883	642,533	682,254
18	593,588	643,355	683,169
19	594,294	644,178	684,085
20	595,000	645,000	685,000

Anhang 3: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

Typ 3: Substratdicke 1,6 mm

Von beiden Seiten gelötet

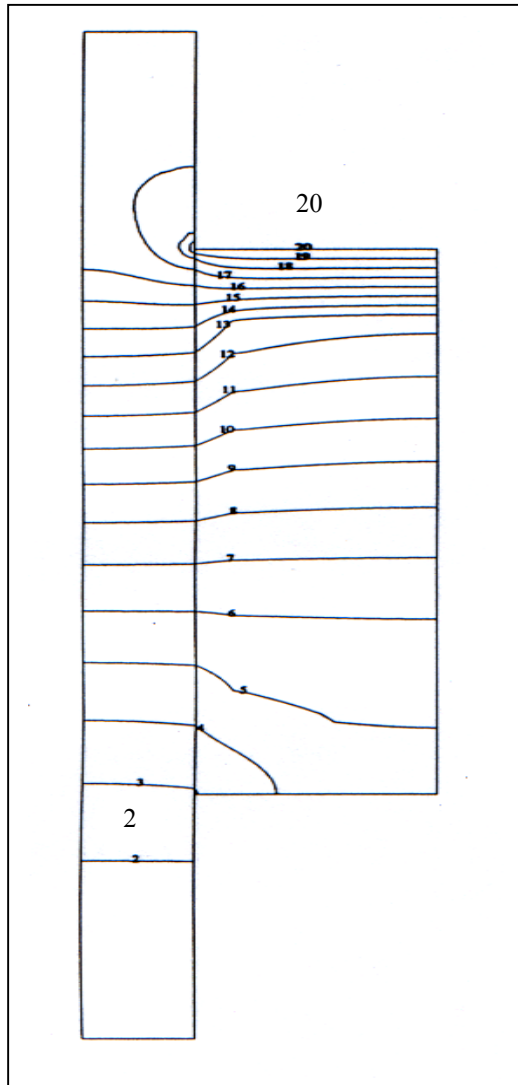


Isotherm	Zeit: 0,5 s		
	Entlötungstemperatur		
	595	645	685
1	593,651	643,428	
2	593,722	643,511	
3	593,793	643,594	
4	593,864	643,677	
5	593,935	643,759	
6	594,006	643,842	
7	594,077	643,925	
8	594,148	644,007	
9	594,219	644,090	
10	594,290	644,173	
11	594,361	644,256	
12	594,432	644,338	
13	594,503	644,421	
14	594,574	644,504	
15	594,645	644,586	
16	594,716	644,669	
17	594,787	644,752	
18	594,858	644,835	
19	594,929	644,917	
20	595,000	645,000	685,000

Anhang 3: Ergebnisse der FEM-Untersuchung für Through-hole-Verbindungen

Typ 3: Substratdicke 1,6 mm

Von beiden Seiten gelötet



Isotherm	Zeit: 0,7 s		
	Entlötungstemperatur		
	595	645	685
1	594,865	644,843	684,825
2	594,872	644,851	684,834
3	594,879	644,859	684,843
4	594,886	644,867	684,852
5	594,893	644,876	684,862
6	594,900	644,884	684,871
7	594,908	644,892	684,880
8	594,915	644,901	684,889
9	594,922	644,909	684,899
10	594,929	644,917	684,908
11	594,936	644,925	684,917
12	594,943	644,934	684,926
13	594,950	644,942	684,935
14	594,957	644,950	684,945
15	594,964	644,959	684,954
16	594,972	644,967	684,963
17	594,979	644,975	684,972
18	594,986	644,983	684,982
19	594,993	644,992	684,991
20	595,000	645,000	685,000