

M&M Elektronik GmbH
Witten

**Entwicklung
eines miniaturisierten Schmelzsicherungssystems
für moderne Leiterplatten mit abgestimmtem
Auslösungsverhalten zur gleichzeitigen
Verbesserung der Gerätesicherheit und
Verminderung des Bleieintrages in die Umwelt**

Acronym: PCB-Sicherungen

Abschlußbericht

**über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert von der**

DBU Deutschen Bundesstiftung Umwelt

unter AZ: 27125 – 21 / 0

von

Dipl. Ing. Peter Meisel
und
Manfred Rupalla (staatl. gepr. Techniker)

September 2010

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	27125	Referat	21/0	Fördersumme	75.000,00 EUR
Antragstitel		Entwicklung eines miniaturisierten Schmelzsicherungssystems für moderne Leiterplatten mit abgestimmtem Auslöungsverhalten zur gleichzeitigen Verbesserung der Gerätesicherheit und Verminderung des Bleieintrages in die Umwelt Acronym: PCB-Sicherungen			
Stichworte		Sicherungen, Strombegrenzung, Leiterplatten, PCB			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
18 Monate		16.03.2009		15.09.2010	
Projektphase(n)		keine			
Zwischenberichte		alle 6 Monate Kurzbericht			
Bewilligungsempfänger		M&M Elektronik GmbH		Tel 02302 698128	
		Wullener Feld 44		Fax 02302 69572	
		58454 Witten		Projektleitung	
				Dipl. Ing. Peter Meisel	
				Bearbeiter	
				Manfred Rupalla	
Kooperationspartner					
Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens					
<p>Ziel ist die Entwicklung einer thermisch auslösenden Sicherung zu niedrigsten Kosten als integriertem Bestandteil moderner Leiterplatten. Im Gegensatz zu herkömmlichen Schmelzsicherungen zielt die Entwicklung darauf ab, elektrische Systeme und/oder Schaltungskreise zuverlässig bei Auftreten definierter Überlasten mit individuell abgestimmter Kennlinie abzuschalten, um damit Gefahren für Menschen, Anlagen und die Umwelt abzuwenden. Damit erhält dieser neue Sicherungstyp folgende Merkmale:</p> <ul style="list-style-type: none"> • bisherige Lötstellen für die Sicherungen werden verzichtbar: ökologische Vorteile; beträchtliche Kosteneinsparungen in der Fertigung • definierte und eng tolerierte individuelle Absicherung der elektronischen Schaltung hochdivers in allen lastrelevanten Stufen und Verzweigungen • Ermöglichen eines beträchtlichen Zugewinns an Geräte-Betriebssicherheit und nachhaltige Verbesserung der Schadensverhütung (Brandgefahr, Personen- und Sachschäden, ökologische Folgeschäden). <p>Die Auslösungsgründe liegen in der Verfolgung des Ziele, den Gebrauch und Einsatz von gefährlichen Stoffen weiter zu reduzieren (RoHS-Richtlinie), Kosten in der Elektronik-Fertigung einzudämmen (Know-how-Gewinn, hiesige Arbeitsplätze) und die Gerätesicherheit signifikant zu erhöhen.</p>					

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Erreicht wurde das Projektziel durch die Abfolge der Arbeitsschritte

- Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der geometrischen Gestaltung der leiterbahnintegrierten Sicherungstrecken
- Untersuchung der Möglichkeiten neuer Materialkombinationen
- Untersuchung Neuer Möglichkeiten
- Entwicklung und Fertigung von Sicherungselementen
- Eingang in das Normungsverfahren.

Die dabei angewandten Methoden umfassen experimentelle Arbeiten (Berechnen, Herstellen und Testen von Labormustern) und schließen Auswertungen der einschlägigen Literatur und Ansätze im Normungsverfahren ein.

Ergebnisse und Diskussion

Das wichtigste Ergebnis des Projektes ist, daß das Vorhabensziel, eine integrierte Leiterbahnsicherung zu entwickeln, erreicht wurde.

Die dafür notwendige Grundvoraussetzung war, die Übertragung wesentlicher Sicherungsfunktionen wie z. B.

- Einhalten eines definierten Abschaltstroms,
- Beherrschung der Abschalttemperatur und des Ausschaltvermögen

von der bekannten SMD-Sicherungstechnik auf definierte Leiterbahnabschnitte des PCB-Layout zu übertragen. Die Eigenschaften der dazu notwendigen Materialien wurden ermittelt und untersucht sowie notwendige Herstellungsverfahren erprobt.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- Präsentation Internetseite www.schmelzleiter.de
- Beitrag in der Elektronik-Praxis (in Bearbeitung)
- Fragebogen / Kundenbefragung (in Bearbeitung)

Fazit

Mit der eingeleiteten und von der DBU geförderten Entwicklung konnte gezeigt werden, daß wesentliche Funktionen des Überstromschutzes auf einer Standard-Leiterplatte realisiert werden können, und daß elementare Grundlagen der Sicherungstechnik auf Leiterbahnsicherungen angewandt werden können.

Damit kann der industriellen Leiterplatten- und Elektronikfertigung im Ansatz eine neue Technologie in Aussicht gestellt werden, die der fortschreitenden Miniaturisierung einerseits und der Erhöhung der Gerätesicherheit bei gleichzeitig reduzierten Kosten und erhöhtem Umweltnutzen andererseits Rechnung trägt.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt ● An der Bornau 2 ● 49090 Osnabrück ● Tel 0541/9633-0 ● Fax 0541/9633-190

Inhalt

- 1 Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen**
- 2 Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen**
- 3 Zusammenfassung, erzielte Ergebnisse, Empfehlungen**
- 4 Einleitung, Aufgabenstellung**
- 5 Hauptteil**
 - 5.1 Untersuchung der Möglichkeiten neuer Materialkombinationen
 - 5.2 Möglichkeiten der Schmelzleitertrennung durch chem. Additive
 - 5.3 Untersuchung neuer Möglichkeiten
 - 5.4 Entwicklung und Fertigung von Sicherungselementen
 - 5.5 Approbierbarkeit einer Leiterbahnsicherung
- 6 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung**
- 7 Fazit**
- 8 Literaturliste**

1 Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

- Abb. 1: Wickmann-Katalog 1.8.2000
- Abb. 2: IFS-Statistik
- Abb. 3: PCB-Design-Tipp Strombelastbarkeit von Leiterbahnen
- Abb. 4: Versuchslayout
- Abb. 5 : Wärmebild Firma Elschukom
- Abb. 6: Unterätzung
- Abb. 7: Schematische Darstellung Unterätzung für Berechnungen
- Abb. 8: Schliffbildauswertung am Versuchslayout
- Abb. 9: Schliffbild zur Rautiefe
- Abb. 10 : Laser des Lehrstuhls „Elektronische Meß- und Schaltungstechnik“ an der Ruhr-Universität Bochum und Trimmschnitt
- Abb. 11: Laserabgleich mit Beschriftungslaser der Firma Fischer
- Abb. 12: Vorrichtung für lokal begrenzte Ätzung
- Abb. 13: Diagramm „Ätz-Zeit“
- Abb. 14: Ätzfehler
- Abb. 15: Minimale Restschichtdicke
- Abb. 16: Diagramm I_A/R -Funktion
- Abb. 17: Wärmebild mit Wärmeprofil - Firma Elschukom
- Abb. 18: Diagramm Sn/Cu-Lösungsverhalten Veröffentlichung der Firma Eutect
- Abb. 19: Fehler bei Abschaltungen ohne Sn-Depot
- Abb. 20: Fehler bei Abschaltungen mit Sn-Depot
- Abb. 21: Wärmebild mit Sn-Depot - Firma Elschukom
- Abb. 22: Fehlerfreie Abschaltungen mit Sn-Depot
- Abb. 23: Mäander-Schmelzleiter mit Sn-Depot
- Abb. 24: Abschaltfehler mit Abdeckmasse Delo Monoprox.
- Abb. 25: Einsatz von Thermit als Unterbrecher
- Abb. 26: I_A/R -Diagramm für Beispielauslegung
- Abb. 27: Leiterbahnsicherungen
- Abb. 28: Fertige Platine des Handgeräts
- Abb. 29: Vorversuchsmuster
- Abb. 30: Brandstatistik der Düsseldorfer Feuerwehr 2007

2 Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

Es werden durchgängig die in der Physik üblichen Einheiten benutzt¹.

Abkürzungen

THT	Through Hole Technology
SMT	Surface mounted Technology
HS	Hot Spot ; die heißeste Stelle der Sicherung während der Auslösung
PCB	Printed circuit board ; gedruckte Schaltung

¹ Symbole, Einheiten und Nomenklatur in der Physik, Dt. Ausgabe von *Symbols, Units and Nomenclature in Physics*, Document U. I. P. 20 (1978), Physik Verlag, Weinheim, 1980

3 Zusammenfassung

Durchgeführte Untersuchungen, Entwicklungen, Modellanwendungen mit Angabe des Ziels

Ziel:

Entwicklung eines miniaturisierten Schmelzsicherungssystems für moderne Leiterplatten mit abgestimmtem Auslöungsverhalten zur gleichzeitigen Verbesserung der Gerätesicherheit und Verminderung des Bleieintrages in die Umwelt

Das Projekt zeigt Möglichkeiten auf, durch

Integration der Sicherungsfunktionen in die Leiterbahn selbst

vielfältige Probleme in der Leiterplattenfertigung und dem Betrieb elektronischer Geräte zu beheben. Damit wechselt ein Teil der Leiterbahnen die Funktion des möglichst niederohmigen Leiters und übernimmt nach Modifikation die Rolle des Sicherungselementes.

Damit wird das Ziel verfolgt, trotz fortschreitender Miniaturisierung eine noch spezifischere und detailliertere elektrische Absicherung auch sehr kleiner Baugruppen und Schaltungsabschnitte zu ermöglichen, die bisher mit konkreten Sicherungen nicht möglich war.

Vorrangig werden ökologische- und Sicherheitsaspekte behandelt; gleichwohl stehen aber auch fertigungstechnische Fragen aufgrund der fortschreitenden Miniaturisierung im Mittelpunkt des Projektes.

Um ggf. patentrechtlich freie Entwicklungsrichtungen für das Projekt zu erschließen, werden Untersuchungen bzw. Recherchen mit „neuen“ Materialien und Materialkombinationen im Projekt beschrieben.

Durchgeführte Untersuchungen an eigens hergestellten Versuchsmustern dienen dem Ziel, die am „Hot Spot“ einer Sicherungen herrschenden Verhältnisse bezgl. Auslösung- und Trennverhalten zeitlich aufzulösen und Erkenntnisse über verschiedene geometrische Gestaltungen der Sicherungszonen zu gewinnen. Die Untersuchung verschiedener Methoden zum „Trimmen“ der Sicherungen (Einstellen der Auslöungsbedingungen) runden die Suche nach Optimierungsmöglichkeiten der Sicherungen ab.

Die Zielsetzung besteht in der Entwicklung einer leiterplattenintegrierten Sicherung mit folgenden Merkmalen:

- bisherige Lötstellen für die Sicherungen werden verzichtbar: ökologische Vorteile; beträchtliche Kosteneinsparungen in der Fertigung

- definierte und eng tolerierte individuelle Absicherung der elektronischen Schaltung hochdivers in allen lastrelevanten Stufen und Verzweigungen
- Ermöglichen eines beträchtlichen Zugewinns an Geräte-Betriebssicherheit und nachhaltige Verbesserung der Schadensverhütung (Brandgefahr, Personen- und Sachschäden, ökologische Folgeschäden).

Erzielte Ergebnisse

Erzielte Hauptergebnisse aus den Versuchen	
Verzicht auf diskrete Sicherungen	Das entwickelte Verfahren erlaubt, herkömmliche Sicherungen durch Leiterbahnsicherungen zu ersetzen. Einsatzmöglichkeit im Strombereich von 0,8A DC bis ca. 10A DC bei Spannungen bis ca. 24V DC
Einsparungspotential Blei	Die für herkömmliche Sicherungen verwendeten bleihaltigen Lote sind nicht erforderlich.
Erhöhung der Gerätesicherheit	Das definierte Auslöungsverhalten der entwickelten Sicherungen erlaubt eine fein abgestufte und diversifizierte Absicherung von einzelnen Schaltkreisen und kompletten Leiterplatten. Damit einher geht eine deutlich verbesserte Betriebssicherheit der elektronischen Geräte.
Reduzierung der Umweltbelastungen	Es konnte gezeigt werden, daß sich durch Anwendungen der neuartigen Sicherungen zahlreiche Umweltbelastungen reduzieren bzw. eliminieren lassen. Hierzu zählen: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Belastung durch Blei eliminiert ✓ Belastung durch brandbedingte Schadstofffreisetzungen erheblich reduziert ✓ Energieeinsatz im Herstellungsprozeß reduziert ✓ Ausschußreduzierung durch Eliminierung der Fehlerquelle „Lötung“

Verträglichkeit der neuen Komponenten mit Trends in der Elektronik**Miniaturisierung**

- ✓ voll verträglich, da die neuen Sicherungen erheblich kleiner zu bauen sind

erhöhte Auslastung des Leistungs-Headrooms z. B. von Halbleitern

- ✓ voll verträglich, da örtlich eng eingegrenzte Zonen individuell abgesichert werden können (mit globalen Sicherungen nicht leistbar)

Senkung Herstellkosten

- ✓ Sicherungen sind äußerst preiswert
- ✓ kein separater Einbau erforderlich
- ✓ erhöhte Produktionssicherheit durch Absicherung einzelner Komponenten (z. B. Verpolungsschutz)

Empfehlungen für das weitere Vorgehen

- Informations- und Schulungsangebot an Kunden der Firma „Leiterplattentechnik Fischer“.
- Information und Schulungsangebot auf der Internetseite „Schmelzleiter.de“
- Angebot über Fachartikel in der Fachpresse (z.B. Elektronikpraxis)

Angaben von Kooperationspartnern und Hinweis auf die Förderung durch die DBU

Es wurde Interesse seitens verschiedener Unternehmen – u.a. Elschukom², und Schurter-Gruppe (Schweiz) – geäußert. Es ist beabsichtigt, mit diesen Firmen Kooperationsmöglichkeiten zu sondieren.

² Tätigkeitsfelder: Entwicklung und Produktion von Feinstdrähten aus NE-Metallen, Sondersicherungslösungen für den Geräteschutz und Beratung & Service zum Produktdesign

4 Einleitung

Ausgangssituation

Seit mehr als 100 Jahren werden in der Elektrotechnik Schmelzsicherungen zum Schutz elektrischer Geräte und Bauteile eingesetzt. Sie schützen elektrische Verbraucher vor einer durch fehlerhafte Belastung ausgelösten Überhitzung und der damit verbundenen Brandgefahr.

Seit den 60-er Jahren werden zunehmend Leiterplatten – in Anlehnung an die Herstellung von drucktechnischen Erzeugnissen spricht man von sog. „gedruckten Schaltungen“ – eingesetzt. Sicherungen werden nicht mehr nur in gehäusemontierten Haltern eingesetzt sondern direkt in (THT) oder auf (SMT) die Platine gelötet.

Der geänderte Einsatzort, der direkte Einbezug in eine Bauteilumgebung macht nicht nur neue Fertigungstechniken und Sicherungskonstruktionen notwendig sondern auch eine Neudefinition von Funktionseigenschaften für diese Schmelzsicherungen.

Während die ökologischen Auswirkungen der erheblich komplexeren Fertigungsverfahren für die neu entwickelten Schaltungstechnik anfangs noch nebensächlich waren, erhielt dieser Aspekt mit zunehmender Miniaturisierung und steigenden Stückzahlen mehr und mehr an Bedeutung. Die fortschreitende Miniaturisierung der Sicherungen führten nicht nur zu schwerer beherrschbaren Lötstellen sondern auch zu zunehmend aufwendigeren Konstruktionen und Produktionsprozessen.

Hinzu kam und kommt eine mit der Miniaturisierung proportional steigende Abhängigkeit der Sicherungsfunktionen von der Bauteilumgebung.

Zwar versuchen die Normen auf die geänderten Anforderungen zu reagieren, aber die Schere zwischen Praxisanforderungen und international vergleichbaren Laborprüfungen öffnete sich immer weiter.

Vor dieser Ausgangssituation zeigt das vorliegend beschriebene Projekt Möglichkeiten auf, wie die vorhandenen Defizite in der Praxis behoben werden können, indem die Sicherung die äußere Form des diskreten einzulötenden Bauteiles verläßt und zum festen Bestandteil der Leiterplatte wird.

Aufgabenstellung

Gemäß Antrag war die Aufgabenstellung gegliedert in:

- Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der geometrischen Gestaltung der leiterbahnintegrierten Sicherungsstrecken
- Untersuchung der Möglichkeiten neuer Materialkombinationen
- Untersuchung Neuer Möglichkeiten
- Entwicklung und Fertigung von Sicherungselementen
- Eingang in das Normungsverfahren.

5 Hauptteil

Darstellung Arbeitsschritte mit dabei angewandten Methoden und den erzielten Ergebnissen





Vorbemerkungen

Mit der im Projekt erreichten Übertragung von elementaren Funktionen der Schmelzsicherungen auf definiert gestaltete Leiterbahnabschnitte einer komplexen Leiterplatte können in vielen Bereichen und Applikationen deutliche ökologische und sicherheitstechnische Vorteile realisiert werden.

Anforderungen der Sicherheit

Gerätesicherungen schützen Geräte, Baugruppen oder einzelne Bauteile vor Überhitzung, indem sie schädliche Überströme durch Aufschmelzen eines definierten Leiterbereichs abschalten. Die notwendigen Eigenschaften wie Nennstrom, Abschaltkennlinie (Strom-Zeit-Kennlinie) und Ausschaltvermögen sind durch internationale Normen einheitlich vorgegeben.

Das hat einerseits den Vorteil der Vergleich- und Prüfbarkeit dieser Eigenschaften, hat aber andererseits den Nachteil, daß die Kenndaten ein festgefügtes Raster bilden, in dem sich die jeweilige Applikation mit ihren Schutzansprüchen wiederfinden muß.

Grenzwerte der Schmelzzeit						   
Nennstrom	$1.5 \times I_{Rat}$	$2.1 \times I_{Rat}$	$2.75 \times I_{Rat}$	$4 \times I_{Rat}$	$10 \times I_{Rat}$	
50mA ... 5.00A	> 1h	< 2 min	400ms ... 10s	150ms ... 3s	20ms ... 150ms	

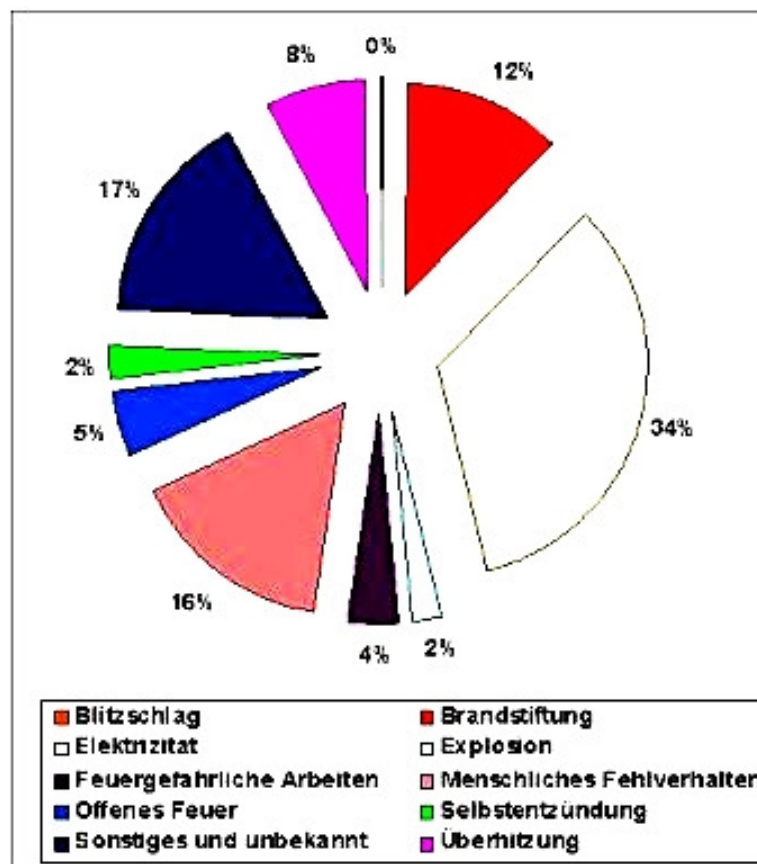
Zulässiger Dauerstrom ist ≤ 100% bei einer Umgebungstemperatur von 23°C (73.4°F).							
Nennstrom	Ampere-Code	Spannung	Schaltvermögen	Spannungsfall $1.0 \times I_{Rat}$ max. (mV)	Verlustleistung $1.5 \times I_{Rat}$ max. (mW)	Schmelzintegral $10 \times I_{Rat}$ min. (A ² s)	Approbationen VDE SEMKO cULus MITI
50mA	0050	250V		500	70	0.01	• • •
63mA	0063	250V		400	80	0.02	• • •
80mA	0080	250V		370	100	0.023	• • •
100mA	0100	250V		300	110	0.047	• • •
125mA	0125	250V		260	120	0.066	• • •
160mA	0160	250V		200	130	0.14	• • •
200mA	0200	250V		170	140	0.2	• • •
250mA	0250	250V		150	150	0.28	• • •
315mA	0315	250V	35A / 250VAC ¹	140	160	0.36	• • •
400mA	0400	250V	50-60Hz	130	170	0.9	• • •
500mA	0500	250V	cos φ = 1.0	125	180	1.3	• • •
630mA	0630	250V		120	200	2.5	• • •
800mA	0800	250V		110	220	3.8	• • •
1.00A	1100	250V		110	250	5.5	• • •
1.25A	1125	250V		100	300	7.9	• • •
1.60A	1160	250V		100	350	14	• • •
2.00A ²	1200	250V		100	500	17	• • •
2.50A ²	1250	250V		90	700	25	• • •
3.15A ²	1315	250V		90	900	46	• • •
4.00A	1400	250V	40A / 250VAC	90	1200	91	• • •
5.00A	1500	250V	50A / 250VAC	80	1300	94	G G •

Abb. 1: Wickmann-Katalog 1.8.2000

Aus Abbildung 1 gehen die Raster hervor.

Betrachtet man die Brandursachenstatistik des IFS Kiel, fällt auf, daß eine mangelnde Sicherheit von Elektrogeräten eine ernstzunehmende Brandquelle darstellt.

Brandursachenstatistik des IFS 1999 - 2007



Auch die Konsequenzen für die Schadenverhütung sind unverändert:

1. Die Sicherheit von Elektrogeräten muss weiter verbessert werden - keine leichte Aufgabe im Zeitalter billiger Importe.
2. Durch Aufklärung und Schulung muss versucht werden, menschliche Verhaltensweisen in Bezug auf den Brandschutz positiv zu verändern.
3. Auch Brandstiftungen muß gezielt vorgebeugt werden, etwa durch Zutrittskontrollen. Die offene Lagerung brennbarer Stoffe wird manchmal als Einladung zur Brandstiftung verstanden - sie muss vermieden werden.

Vierteljährlich gibt das IFS den IFS-Report heraus. Neben dem Printmedium gibt es auch eine online-Ausgabe. Die [Ausgabe 4/2007](#) steht aktuell im Netz. Ältere Ausgaben sind unter dem Menüpunkt "Informationsangebote / IFS Report" abrufbar.

© 2008 IFS Kiel
Letztes Update: 11.01.2008

Abb. 2: IFS-Statistik, Brandauslöser

Inwieweit Wohnungsbrände durch geeignete oder besser angepaßte Sicherungen vermieden werden können, geht daraus nicht hervor. Dennoch mahnt das IFS regelmäßig eine Verbesserung der Gerätesicherheit an.

Die notwendige Anpassung der Sicherungseigenschaften an die Gegebenheiten einer Applikation (wie das bis etwa 1943 üblich war) ist aber nur durch direkte Integration der Sicherung in die Applikation möglich. Die häufig komplexen Herstellungsprozesse von kleinsten Schmelzsicherungen machen eine Individualisierung des Bauteils Sicherung jedoch kaum möglich.

Das im Projekt entwickelte Konzept der Leiterbahnsicherung ist für alle Möglichkeiten einer applikationsgerechten Anpassung wichtiger Sicherungsfunktionen (z.B. Abschaltstrom, Erwärmung und Ausschaltvermögen) geeignet. Dabei können Auswirkungen der Schaltungsumgebung (Einbaulage, Erwärmung benachbarter Bauteile, kühlende Luftströmungen,) ggf. in die Auslegung der Sicherungen einbezogen werden.

In vielen Fällen läßt sich so die Gerätesicherheit deutlich verbessern.

Anforderungen der Ökologie

Eine Studie der Uni-Zürich³ aus dem Jahr 2006 belegt, daß mögliche Verbesserungen der Öko-Bilanz einer bestückten Leiterplatte und einzelner Bauteile unter einem ganzheitlichen Ansatz bewertet werden müssen. Insofern ist das im Projektantrag aufgezeigte ökologische Verbesserungspotential auszuweiten.

In der Studie wird nachgewiesen, daß die Herstellung von Bauteilen sowie ihre Lagerung, Verpackung, Transport, Montage und Entsorgung in eine Bewertung der Öko-Bilanz mit einbezogen werden müssen.

Der Ersatz von Sicherungen als SMT- oder THT-Bauelement durch Leiterbahnsicherungen reduziert nicht nur den Einsatz von Schadstoffen wie z.B. Blei in Lotverbindungen sondern vermeidet u. a. naßchemische Prozesse der Sicherungsherstellung. Allgemein wird durch den Einsatz von Leiterbahnsicherungen der Bedarf an Energie für Herstellung, Transport und Montage eingespart.

So weist die Studie z.B. für die Montage eines SMD-Bauteils einen Energiebedarf von ca. 0,01 kWh nach. Bei THT-Bauteilen kommen noch etwa 12% des gesamten Herstell-Energiebedarfs für das Bohren der Montagelöcher hinzu!

³ [Kra 06]

Der geschätzte Bauteilbedarf aus dem Projektantrag konnte bis zum Projektende noch nicht verifiziert werden weil das Ergebnis einer Kundenbefragung noch nicht vorliegt. Es wird aber davon ausgegangen, daß ca. 50% des geschätzten Bedarfs an SMT-/THT-Sicherungen durch Leiterbahnsicherungen ersetzt werden können.

5.1 Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der geometrischen Gestaltung der leiterbahnintegrierten Sicherungsstrecken

In Analogie zur herkömmlichen Schmelzsicherung ist das in die Leiterbahn zu integrierende Schmelzelement – der „hot spot“ – eine definierte Engstelle mit reduziertem Querschnitt in der stromführenden Leiterbahn.

Der verbleibende Engstellenquerschnitt bestimmt als dominante Größe sowohl die max. Strombelastbarkeit der gesamten Leiterbahn als auch den Durchschmelzstrom der Engstelle.

Je nach Querschnitt der Leiterbahn muß der Querschnitt des Schmelzelementes erheblich geringer sein. Diese Reduzierung kann durch Verringerung der Schmelzelementbreite oder –dicke erreicht werden. Dabei sind nach aktuell üblicher Technik die Möglichkeiten – sowohl die Breite als auch die Dicke des Schmelzelements betreffend – begrenzt.

Beherrschung der Abschaltcharakteristik

Als Edison um 1890 die erste Schmelzsicherung zum Schutz von Leitungen und Maschinen entwickelte, eröffnete er ein weites Feld der Erforschung komplexer physikalischer Vorgänge, deren Kenntnis für die Beherrschung eines definierten Abschaltvorganges notwendig ist.

Die Sicherung muß sozusagen „erkennen“ können, ob die momentane Strombelastung bestimmungsgemäß ist oder den Beginn einer Überlastung darstellt und daher den Stromkreis unterbrechen muß.

Hinzu kommt: anders als bei Schmelzsicherungen der ersten Generation, deren Abmessungen noch in cm gemessen wurden, müssen moderne Schmelzsicherungen bei einer Größe von z.B. nur 1,6*3,2mm (Chip 1206) kurzzeitig Schmelztemperaturen von z.T. mehr als 1000°C und Abschaltleistungen von mehreren 100W beherrschen.

Möglich wird dies durch die geeignete Gestaltung eines „hot spot“ (HS), der bei der geforderten Miniaturisierung (Fläche und Volumen!) eine hohe Wärmekonzentration im Fehlerfall ermöglicht.

In der Gestaltung des HS müssen zwei wesentliche Voraussetzungen für ein sicheres Funktionieren einer Schmelzsicherungen erfüllt werden:

Gestaltungsvoraussetzungen für einen Hot Spot

- Der elektrische Widerstand des HS muß in der Regel mindestens 3 bis 5 mal höher sein als seine in den Wärmetransport einbezogenen Zuleitungsbereiche. Hierbei handelt es sich um Erfahrungswerte und Grundlagenuntersuchungen aus der Entwicklung von SMD-Sicherungen der Firma „Wickmann Werke“
- Die in den Wärmetransport einbezogenen Zuleitungsbereiche sollten hohe Wärmewiderstände aufweisen.

Diese Voraussetzungen müssen in besonderem Maße für HS mit großem Volumen bzw. großer Grundfläche und bei Verwendung von HS-Materialien mit hohem Schmelzpunkt (Ag/Cu~750 °C oder Cu~1083 °C) erfüllt sein.

Aber auch für andere „Schmelzmechanismen“ – wie bei der Nutzung des „M-Effekts“ (wird weiter unten noch erläutert) – gelten diese Voraussetzungen grundsätzlich.

Gestaltung der HS-Geometrie

Das Schaltungslayout der Leiterplatten wird heute häufig entsprechend oder in Anlehnung der Design-Richtlinie IPC-2221⁴ oder IEC 60326-3 ausgeführt. Ähnlich wie bei der Normung wird bei der IPC2221-Richtlinie häufig eine mangelnde Praxisnähe kritisiert.

So wie z.B. in Fachartikeln des FED (Fachverband Elektronik Design) auf das Problem hingewiesen:

Die Design-Richtlinie IPC-2221 (=MIL-STD-275) ist eine klassische Datenquelle für die Gleichstrom-Temperaturbelastbarkeit von Leiterbahnen. Die Messungen dazu stammen vom National Bureau of Standards aus den späten 1950er Jahren. Doch Vorsicht bei unbefangener Anwendung!

Abb. 3: PCB-Design-Tipp Strombelastbarkeit von Leiterbahnen⁵

⁴ erschien 2009 in überarbeiteter Ausgabe als IPC 2152

⁵ [Ada 08] PCB-Design-Tipp, Strombelastbarkeit von Leiterbahnen

Häufig wird über Mängel der Richtlinie hinsichtlich der Berücksichtigung von leiter-spezifischen Charakteristika in der Praxis wie Leiterbahngeometrie, Bestückung, Einbaulage der Leiterplatte geklagt.

Für die folgenden Erläuterungen der grundlegenden Zusammenhänge sind die Vorgaben der Design-Richtlinie jedoch nicht relevant.

Da aus der gängigen Praxis derzeit keine Leiterbahnschmelzleiter bekannt sind, die nach sicherungsspezifischen Regeln ausgelegt wurden, wurden als Versuchslayout für eine Testplatine diejenigen Leiterbahnabmessungen gewählt, die in der Leiterplattenherstellung üblich und ohne produktionstechnische Besonderheiten herstellbar sind (vgl. Abb 4). Die Meßpunkte wurden 10mm vom HS entfernt angebracht, um eine Wärmeableitung über die Meßleitungen zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren, damit Näherungsberechnungen möglich wurden.



Abb. 4: Versuchslayout

Die Konzentration der Erwärmung auf den HS zeigt ein Wärmebild, das bei der Firma ELSCHUKOM aufgenommen wurde. Bei einer Belastung des HS-Widerstandes von 33mOhm mit einem Strom von 3A ($I \approx$ Nennstrom) werden die Anschlußbahnen kaum erwärmt.

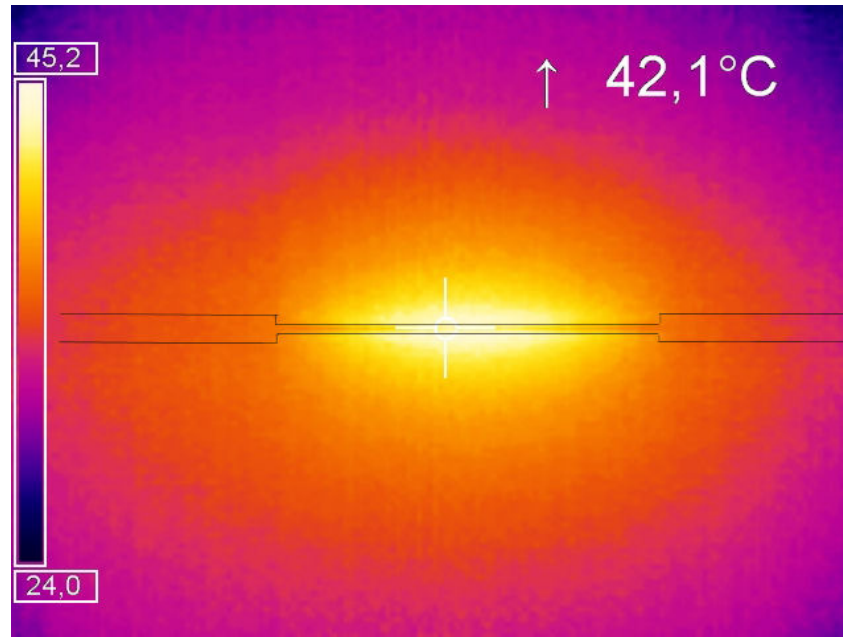


Abb. 5 : Wärmebild - Firma Elschukom

Als Leiterplattenmaterial wurde Standard-FR4 mit 35µm Cu-Beschichtung gewählt.

Die Engstellenbreite von 0,2mm entspricht dabei der allgemein empfohlenen Minimalgrenze⁶.

Bei der gewählten Leiterbahnbreite des HS mit 0,2mm und der in die Rechnung einbezogenen Zuleitung von 10mm x 1,5mm errechnet sich nach

$$R = (\rho \cdot l) / A$$

ein Widerstandsverhältnis von 1/1,87

In fast allen Berechnungen der Strombelastbarkeit von Leiterbahnen wird in Literatur und Fachartikeln für die Bestimmung des Leiterbahnwiderstands von einem idealen, rechteckigen Leiterbahnquerschnitt ausgegangen. Für die gewählten Geometrien wurde nach $R = (\rho \cdot l) / A$ für die Zuleitungen ein Widerstand von 6,28mOhm und für den HS ein Widerstand von 12,28mOhm errechnet. Der gemessene Widerstand des HS lag aber bei durchschnittlich 33mOhm mit einer Streuung von ± 6%.

Während die geringen Widerstandsfluktuationen in den Zuleitungen unberücksichtigt bleiben können, sind die Widerstandsstreuungen im HS erheblich und führen bei unterschiedlicher Strombelastung zu völlig anderen Erwärmungsmustern. Der Grund für

⁶ z.B. perfrag3c für Cu 35µm min.Breite 0,3mm - andere Quellen lassen noch 0,2mm zu

diese Widerstandsabweichung vom errechneten Wert ist in folgenden Einfluß-Faktoren zu finden:

Unterätzung

In den Berechnungen der Leiterbahnerwärmung unter verschiedenen Belastungen wird in der Regel von einem rechteckigen Leiterbahnquerschnitt ausgegangen. Das ist nur eingeschränkt richtig:

Während die Unterätzungen bei Leiterbahnen in der Größenordnung von einigen mm vernachlässigt werden dürfen, spielen sie bei Leiterbahnbreiten von $200\mu\text{m}$ und hohen Strombelastungen durchaus eine erhebliche Rolle, wie nachfolgendes Beispiel zeigt.

In vielen Designvorgaben wie z.B der „PERFAG2C“ wird von einer Unterätzung ausgegangen, deren Maß von vielen Faktoren abhängig ist.

- Die Ätzmethode,
- der Ätzprozeß und
- die Cu-Dicke

sind besonders bei geringen Leiterbahnbreiten (z.B. Breite $< 0,3\text{mm}$ bei einer Dicke $= 35\mu\text{m}$) bedeutende Faktoren. Demnach kann eine Unterätzung zwischen verschiedenen Erscheinungsbildern variieren:

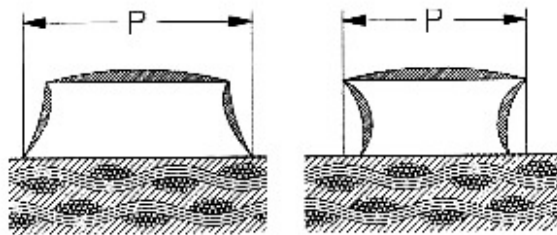


Abb. 6: Unterätzung⁷

Einige wenige Berechnungen gehen darauf ein und legen eine trapezartige Querschnittsform zu Grunde:

⁷ [PER 99]

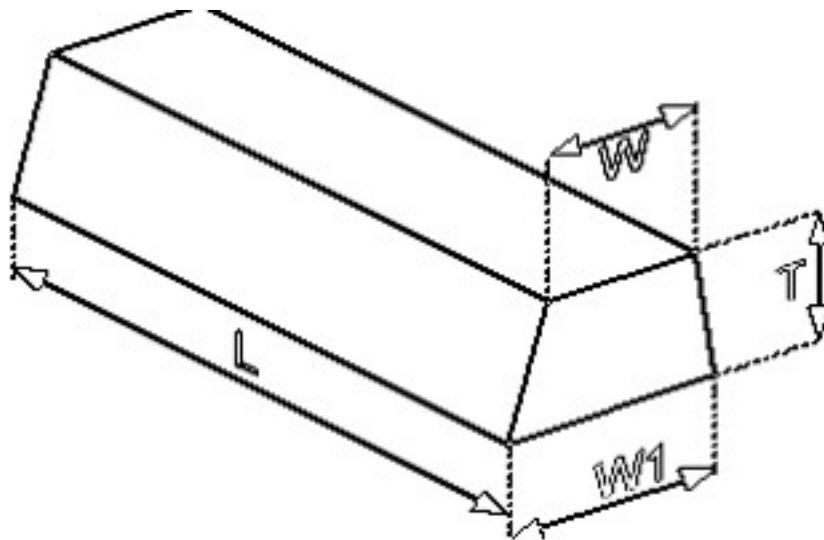


Abb. 7: Schematische Darstellung der Unterätzung für Berechnungen

Aber auch diese modellhafte Annahme wird der Praxis nicht vollständig gerecht. Ohne Messung oder Schliffbild sind weder die Maße „W“ noch „W1“ zu definieren. In der Praxis ergibt sich in der Regel keine ideale geometrische Form für die Querschnittsfläche.

Eine Schliffbildaufnahme des aktuell untersuchten HS zeigt eine Form der Schnittfläche die nur durch eine Bildanalyse halbwegs genau bestimmt werden kann.

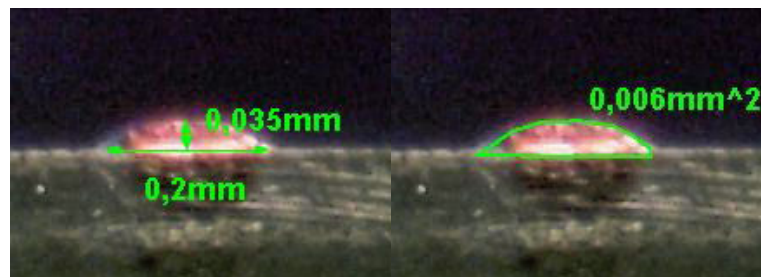


Abb 8: Schliffbildauswertung am Versuchslayout

Im Gegensatz zu der

gerechneten Fläche $F = 0,2\text{mm} \times 0,035\text{mm} = 0,007\text{mm}^2$

ergibt sich aus der

Bildanalyse eine Fläche von $A \leq 0,006 \text{ mm}^2$

und damit ein HS-Widerstand von $R_{\text{HS}} \geq 14,4 \text{ m}\Omega$. Zusammen mit dem Widerstand der Anschlußleitungen ergibt sich ein R_{ges} von $\approx 21 \text{ m}\Omega$. Das Ergebnis trifft noch nicht den gemessenen Wertebereich von $R = 30\text{--}33 \text{ m}\Omega$. Weitere Einflußfaktoren müssen wirksam sein.

Rautiefe

Die Oberflächen-Rauheit der Kupferlage hat bei niedrigen Frequenzen keine Auswirkung auf den Stromfluß. Erst bei hohen Frequenzen (GHz-Bereich) wird der sog. *Skin*-Effekt wirksam, der eine Verringerung des Leitungsquerschnittes bewirkt. Die Skin-Eindringtiefe δ folgt der Beziehung

$$\delta \propto \frac{1}{\sqrt{f}},$$

worin f die Frequenz des angelegten Wechselstroms angibt. Während die Eindringtiefe bei einer Frequenz von 1 kHz etwa 2 mm beträgt, verringert sich diese bei 100 GHz auf 0,2 μm .

Das heißt, daß mit steigender Frequenz der Wechselspannung die Rauhtiefe an Bedeutung gewinnt. Außerdem bewirkt die Rauhtiefe eine weitere Querschnittreduzierung, wie das folgende Bild deutlich macht:

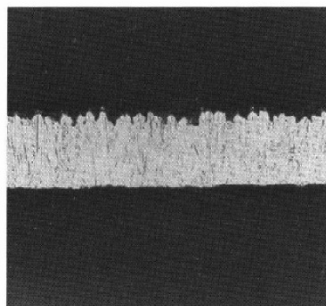


Abb. 9: Schliffbild zur Rautiefe⁸

⁸ [Hus 88]

Die mittleren Standardrautiefen R_a werden von den Herstellern mit bis zu $2\mu\text{m}$ angegeben. Wobei, je nach Qualität, Rautiefen von bis zu 10μ erreicht werden. Bei einer Cu-Folienstärke von $17\mu\text{m}$ oder $35\mu\text{m}$ und einer Leiterbahnbreite von $b \leq 0,2\text{mm}$ ist in jedem Fall mit einer wirksamen Querschnittreduzierung durch die Rautiefe zu rechnen.

Unter Berücksichtigung dieses Sachverhalts hat sich der errechnete Gesamtwiderstand von etwa $25\text{m}\Omega$ weiter dem gemessenen Widerstand angenähert.

Weitere Einflußgrößen

Hinsichtlich der weiteren einflußnehmenden Tatbestände ist zu berücksichtigen, daß

- für das Cu der Leiterbahnen andere spez. Leitwerte angegeben werden, als allgemein der Literatur entnommen werden kann.
- bei rechtwinkligen Leiterbahnübergängen (Zuleitung/HS) nicht alle Bereiche der Leiterbahn von Strom durchflossen werden,
- Streuungen der Cu-Dicke von bis zu 10% bereits von den Herstellern angegeben werden,
- mit Nachbearbeitungen - z.B. Bürsten - eine weitere Reduktion der Cu-Schichtdicke verbunden ist.

Es gibt viele noch nicht abschließend untersuchte Unwägbarkeiten in der Widerstandsberechnung von Leiterbahnen mit geringer Breite, sodaß in Ermangelung von geschlossenen Berechnungsverfahren derzeit von den empirisch gewonnenen Widerstandsmeßwerten Gebrauch gemacht wird.

Das bedeutet aber auch, daß eine numerische Bestimmung des HS-Widerstands – der für die definierte Funktion der Leiterbahnsicherung von essentieller Bedeutung ist – nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich ist.

Damit scheidet die Möglichkeit einer reproduzierbaren Realisierung von Leiterbahnsicherungen allein durch Standard-Herstellungsprozesse aus.

Ableich der HS-Geometrie durch Lasertrimmen

Die obenstehenden Vorüberlegungen zeigen, daß die Herstellung einer „fertigen“ Leiterbahnsicherung auf **nachgehende** Behandlung angewiesen ist, um das angestrebte Sicherungsverhalten zu erreichen.

Eine Möglichkeit des nachgehenden HS-Widerstandsabgleich besteht in der nachträglichen Strukturierung durch Laser-Einschnitte. Dieses Verfahren, das von der Herstellung von Dick- und Dünnschichtwiderständen bekannt ist, setzt aber folgendes voraus:

- temperaturstabile Substrate (i.d.R. Keramik),
- das Laserlicht gut absorbierende Widerstandsschichten und
- einen leistungsstarken Laser.

Diese Voraussetzungen sind bei der Standard-Leiterplatte nicht gegeben:

- Cu absorbiert das Licht eines YAG-Lasers ($\lambda = 1024\text{nm}$) erst bei einer Wellenlänge von ca. 350nm ;
- Der Widerstandsabgleich einer Cu-Leiterbahn auf FR4-Material eines PCB ist möglich (wie im Projekt gezeigt) jedoch sehr problematisch, da das FR4-Basismaterial bereits bei $T > 200^\circ\text{C}$ verkohlt und der hohe Temperaturkoeffizient des Cu-Materials einen zielgenauen Widerstandsabgleich zumindest erschwert.

Abgleichversuche wurden u. a. mit einem speziellen YAG-Trimmlaser der Firma MLS (max. 10W) an der Ruhr-Universität Bochum (Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik) durchgeführt. Es waren einfache Schnittgeometrien möglich ohne das Leiterplattenmaterial zu verbrennen.

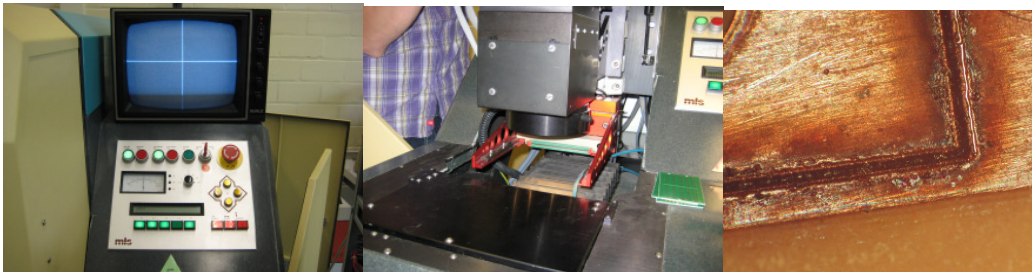


Abb. 10 : Laser des Lehrstuhls „Elektronische Meß- und Schaltungstechnik“ an der RUB und Trimmschnitt

Obwohl die Ergebnisse von Vorversuchen erfolversprechend waren, wurde die Entwicklungslinie mit einem „Trimmlaser“ nicht weiterverfolgt, weil spezielle Trimmlaser in der Leiterplattenfertigung ungebräuchlich sind.

Es wurde daher versucht, mit einem weiter verbreiteten vorhandenen Dioden-Laser, der für Beschriftungen eingesetzt wird, ähnliche Ergebnisse zu erzielen.

Die Wellenlänge des vorhandenen Beschriftungslasers der Firma NWL-Lasertechnologie GmbH vom Typ *evolution II* ist mit 1064 nm und einer Leistung von 10W zwar mit den Leistungsdaten des MLS-Lasers vergleichbar. Allerdings mußte die Einwirkdauer auf eine Leistung zwischen 0,4 W und max. 1 W und die Pulsfrequenz auf max. 100 Pulse/s begrenzt werden, weil sich die Einstellbedingungen von Fokus und Position für die Trimmvorgänge als ungünstig herausgestellt haben. Die Cu-Beschichtung des HS wurde so zwar aufgeschmolzen und durchtrennt, aber die gleichzeitig verlängerte Einwirkzeit führte zu einer Verbrennung des Leiterplattenmaterials.

Die so entstehenden Kohlenstoffrückstände führten nach dem Abschalten des HS zu geringen Isolationswiderständen und zu Kriechströmen von bis zu 10mA bei Meßspannungen von 200V DC, die dann zum Platinen- bzw. Gerätebrand führen können.

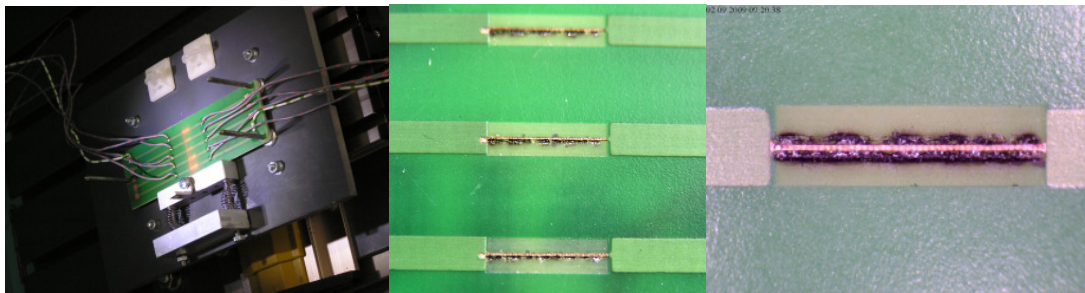


Abb. 11: Laserabgleich mit Beschriftungslaser der Firma Fischer

Hinzu kommt, daß die Einrichtpräzision des Beschriftungslasers unzureichend ist. Der fehlende xy-Tisch (wurde nachgerüstet), die unpräzise Positionierung durch einen Laserpointer und die fehlende, parallaxenfreie Positionskontrolle des Laserstrahls ließ eine präzise Positionierung mit der notwendigen Genauigkeit von min. 10µm nicht zu. Daher wurden die Versuche an dieser Stelle abgebrochen.

Abgleich der HS-Geometrie durch Ätzen

Während mit einem Laser die Einstellung des Widerstandverhältnisses zwischen Zuleitung und HS von min. 1:3 überwiegend durch die **Reduzierung**

der Leiterbahnbreite erfolgt, ist durch einen weiteren Ätzvorgang auch eine **Reduzierung der Kupferschichtdicke** möglich.

Grundsätzlich würde auch durch einen zusätzlichen Aufbau der Zuleitungsschicht die Relation von min. 1:3 ermöglicht. Allerdings sind dann in jedem Fall mehrere zusätzliche Prozeßschritte notwendig, die in der Praxis als problematisch bewertet werden und oft auch gar nicht möglich sind:

Sogenannte „Hoch- Tief-Strukturierungen“ sind in der Leiterplattentechnik selten, da sie eine Vielzahl von zusätzlichen Maskierungs-, Ätz- oder Aufbau- und Stripprozesse notwendig machen.

Im Projekt wurde daher ein lokal wirkendes Verfahren entwickelt und erprobt, das eine nachträgliche, lokale Ätzung einzelner Leiterbahnabschnitte möglich macht. Bei gleichzeitiger Messung des HS-Widerstands wurde eine exakte Trimmung des Widerstands erreicht.

Die Laboreinrichtung besteht im Wesentlichen aus einer Ätzmittelpumpe und einem Tubus, der auf den Leiterbahnbereich aufgesetzt wird und den Ätzprozeß auf den abgedichteten Bereich beschränkt.

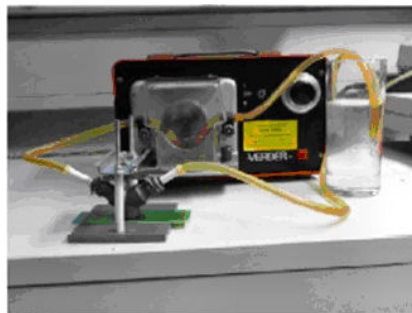


Abb. 12: Vorrichtung für lokal begrenzte Ätzung

Im Versuch wurde mit verschiedenen

- Ätzmitteln,
- Ätzmittelkonzentrationen,
- Temperaturen und
- Strömungsgeschwindigkeiten

experimentiert. Bei gegebenem Tubus sind hohe Widerstandsänderungen in verschiedenen Einwirkzeiten des Ätz-Mediums möglich. Die Ätzzeit ergibt sich

aus dem verwendeten Ätz-Medium und kann durch geeignete Maßnahmen (z.B. stärkere Säure, höhere Temperatur) erheblich verkürzt werden.

Das folgende Diagramm gibt den Überblick über eine Versuchsserie.

Diagramm Testplatinen Ätzversuch mit Säure NR.2

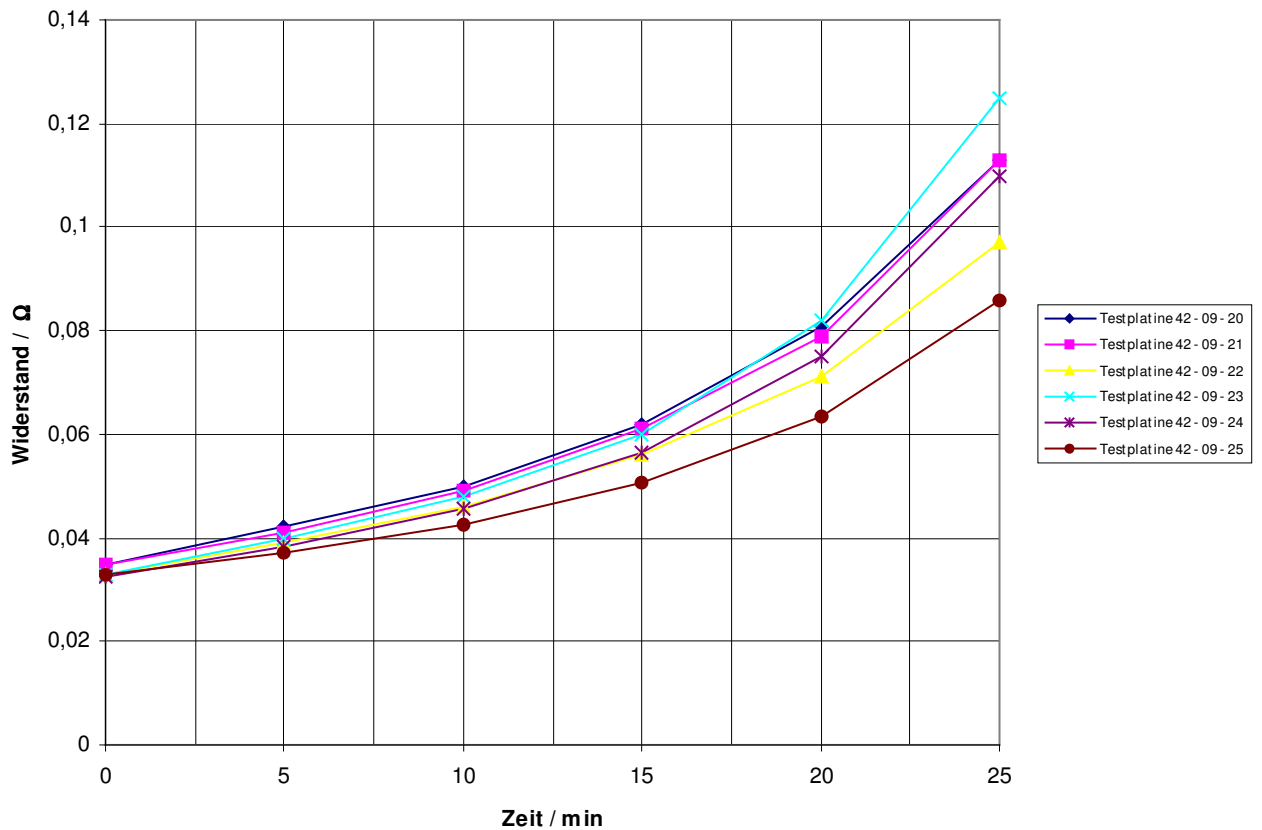


Abb. 13: Diagramm „Ätz-Zeit“; die Graphen geben sechs Versuchsdurchführungen wieder

Das Diagramm zeigt eine zunehmende Widerstandsstreuung mit dünner werdender Restschichtdicke. Je nach Anforderungen an die Widerstandsstreuung ist ein zeitgesteuerter Abgleich in kurzer Zeit möglich.

Grundsätzlich sind beliebige Schichtreduktionen möglich. Es wurde jedoch festgestellt, daß Ätzraten, die zu einer Restschichtdicke nahe der Rautiefe der Cu-Kaschierung zu einer stark inhomogenen Schicht führten (Löcher in der Beschichtung), die wiederum zu starken Streuungen in der Strom-Abschaltung führten.

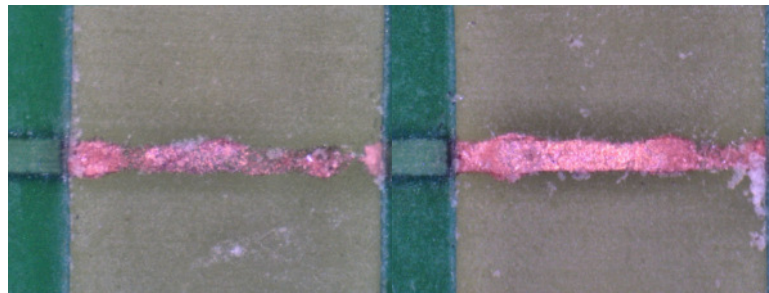


Abb. 14: Ätzfehler; deutlich sind die „Ausfressungen“ in den beiden Beispielen zu erkennen

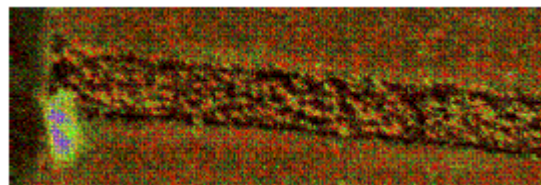


Abb. 15: Minimale Restschichtdicke

Die oberen Bilder zeigen auch eine „Verwischung“ der Kanten, die bei dichter Leiterbahnführung zu Impedanz- oder Isolationswiderstandsproblemen führen kann. Hier ist eine Optimierung des Tubus bzw. der Strömungsverhältnisse im Tubus notwendig.

Die Ätz- und Abschalt-Versuche ließen eine deutliche Korrelation von Abschaltstrom und HS-Widerstand erkennen.

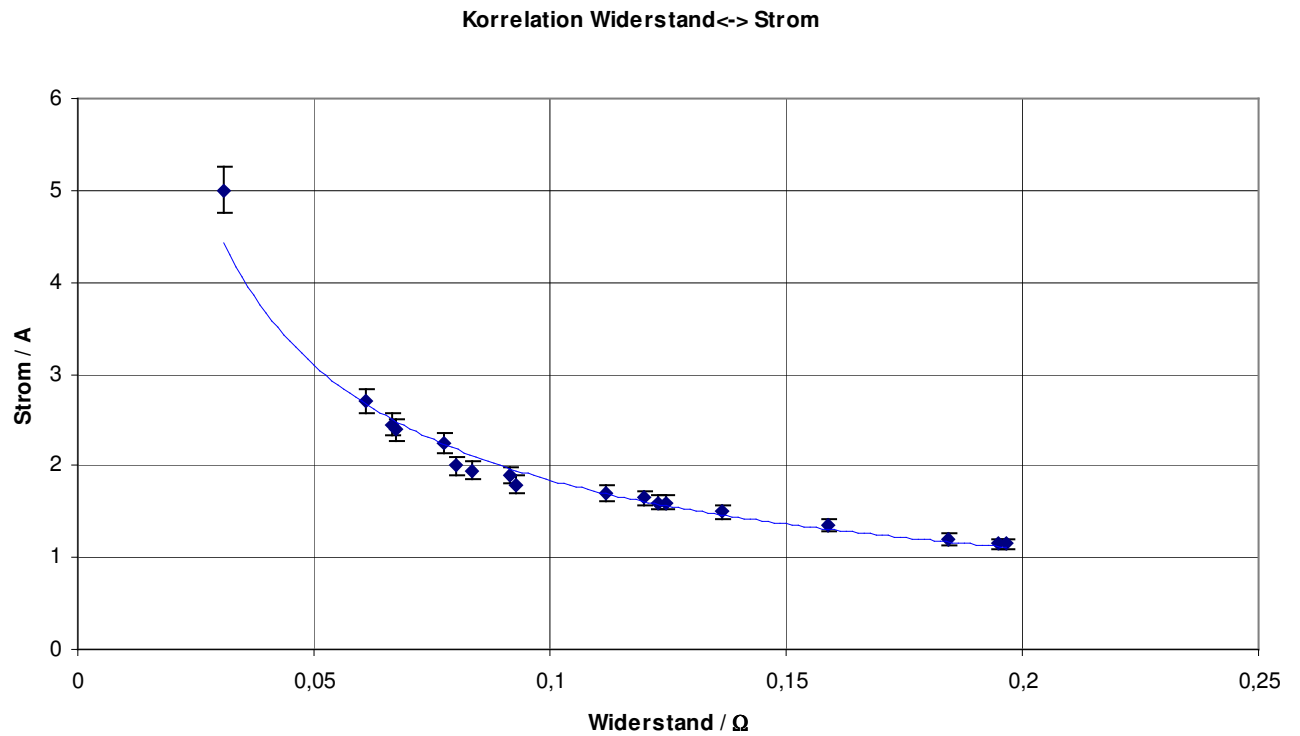


Abb.16: Diagramm I_A/R -Funktion

Die gefundene Gesetzmäßigkeit ist zwar im Detail auf die gegebenen Wärmeverhältnisse der Zuleitung/HS Relation begrenzt, aber weitgehend auch auf andere Zuleitungs- und HS-Geometrien übertragbar.

Ein Wärmebild mit einer Darstellung des Wärmeprofiles zeigt den Abgleich-Erfolg einer HS-Konzentrierung :

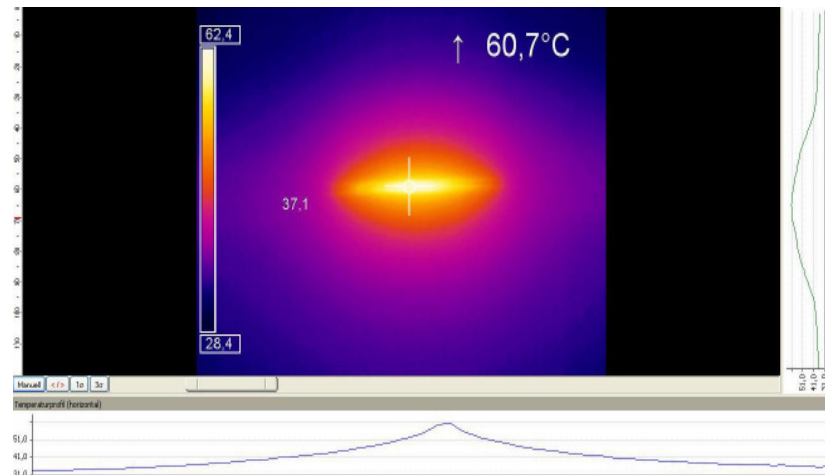


Abb. 17: Wärmebild mit Wärmeprofil - Firma Elschukom

Damit kann für einen gewünschten Abschaltstrom der notwendige HS-Widerstand dem Diagramm entnommen werden. Allerdings ist ein Kontrollversuch im jeweils aktuellen Design immer sinnvoll.

Nutzen und Optimierung des „M-Effekts“ (Lot- oder Sn-Abdeckung)

Der oben beschriebene Widerstandsabgleich des HS nach der Regel

$$R_{HS}:R_{Zuleitung} > 3:1$$

führt bei höheren Verhältnissen als 3:1 zunehmend zu einem „flinken“ Abschaltverhalten des HS. Von Chipsicherungen her ist bekannt, daß mit abnehmendem HS-Volumen eine Abschaltung bereits bei geringen Überströmen erfolgt. Man spricht von einer „superflinken Charakteristik“. Diese Eigenschaft ist auch in gleicher Art bei Leiterbahnsicherungen zu finden. Allerdings ist diese schnelle „flinke“ Abschaltung bei bereits geringen Überströmen häufig nicht gewünscht. Kurzzeitige Überströme, die z.B. durch Einschaltvorgänge auftreten, sollen nicht zu einer Stromunterbrechung durch die Sicherung führen. Um einen Überstrom erst nach Sekunden oder Minuten abzuschalten darf das HS-Volumen nicht zu stark gesenkt werden d.h. für das Intervall der HS-Relation gilt etwa

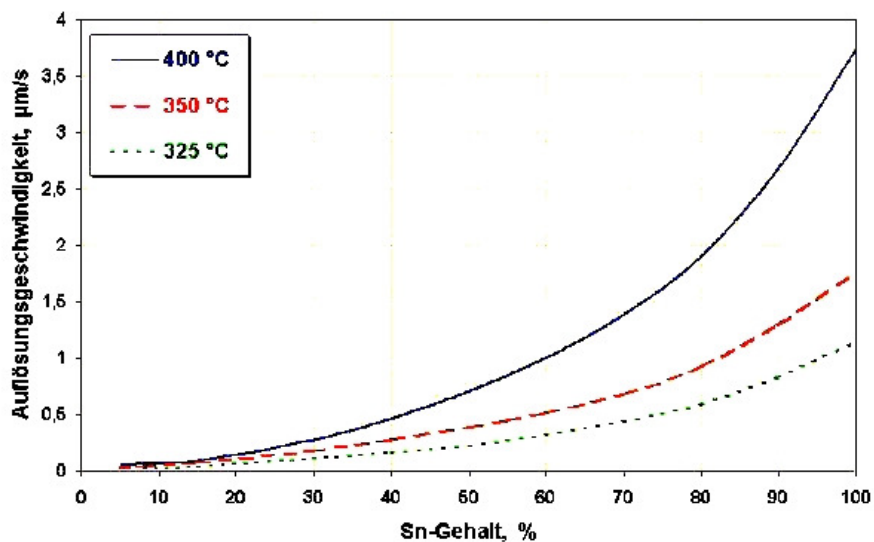
$$5:1 > R_{HS}:R_{Zuleitung} > 3:1.$$

Damit wird der HS-Widerstand auf geringere Werte begrenzt und der Abschaltstrom würde wieder steigen. Um dennoch eine Abschaltung zu errei-

chen, wird in der Sicherungstechnik seit jeher die Wirkung des so genannten „M-Effekts“ genutzt.

Funktion und Auswirkung

Der M-Effekt basiert auf der chemischen Grundlage der Löslichkeit von Metallen in Metallen. Das Schmelzleitmaterial einer Sicherung besteht überwiegend aus Ag, Cu oder einer Legierung aus beiden Metallen, Leiterbahnschmelzleiter bestehen i.d.R. aus Cu. Die Löslichkeit von Cu in Sn oder SnPb (Weichlote) ist im folgenden Diagramm dargestellt:



Auflösungsgeschwindigkeit von Cu-Werkstoffen in Abhängigkeit des Sn-Gehaltes

Abb. 18: Diagramm Sn/Cu-Lösungsverhalten Veröffentlichung der Firma Eutect

Der Vorgang wird folgendermaßen beschrieben⁹ :

Bei Sicherungen mit träger Strom-Zeit-Charakteristik wird zur Beeinflussung der Ansprechkenlinie im Bereich geringer Überströme bzw. langer Ansprechzeiten (Minuten- bis Stundenbereich) zusätzlich ein Weichlotauftrag auf dem Cu- oder Ag-Schmelzleiter verwendet (sog. „M-Effekt“). Durch Auflösung des Schmelzleiters im flüssiggewordenen Lot, einen Diffusionsprozeß, nimmt die lokale Schmelzleiterdicke zunehmend ab, der Widerstand steigt, bis schließlich der Schmelzleiter durchdiffundiert ist und die Sicherung anspricht.“

⁹ [Lin 01]

Die Zusammenhänge wurden an der TU-Braunschweig in mehreren Dissertationen an Bandschmelzleitern untersucht. Aus diesen Arbeiten konnten Grundregeln für die Schmelzleiterkonstruktion abgeleitet werden, die im Projekt an mehreren Versuchsstrukturen erprobt wurden.

In der Praxis sind neben einfachen Leiterbahnverengungen häufig ganz- oder teilverzinnte Leiterbahnbereiche anzutreffen, deren Abschaltverhalten im Überstrombereich starke Verkohlungen des direkt einbezogenen Platinenmaterials bis hin zum Platinen- oder Gerätebrand zur Folge hat (siehe Isolationswiderstand beim Laserabgleich).

Überstromabschaltungen können dann so aussehen wie in Abb. 19 (links) gezeigt oder bestenfalls, wie auf dem rechten Foto zu sehen ist.

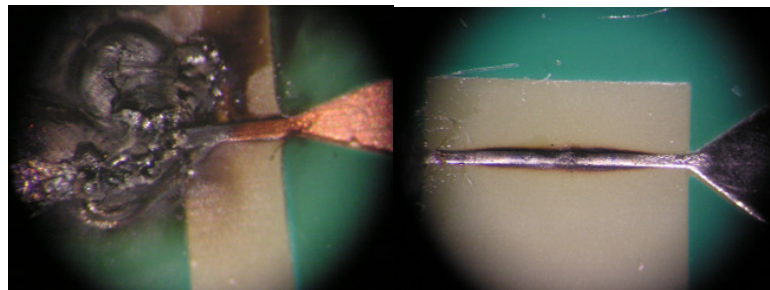


Abb. 19: Fehler bei Abschaltungen ohne Sn-Depot

Problematisch ist hier die große Streuung im Abschaltverhalten und der sehr niedrige Isolationswiderstand der Trennstelle.

Sowohl bei der Teilverzinnung als auch bei der vollständigen Verzinnung steht zu wenig Sn für den Auflösungsprozeß zur Verfügung.

Hinzu kommt, daß das Sn wg. der hohen Temperaturen (das Sn bleibt als flüssige Schicht auf der Cu-Bahn liegen) stark oxidiert und so ein Abschalten zusätzlich behindert.

Das Aufbringen einer ausreichend großen Sn-Menge führt allerdings nicht zu dem gewünschten Effekt, wenn das Sn zu weit vom HS entfernt oder auf dem HS aufgebracht wurde, wie die folgenden Bilder zeigen:

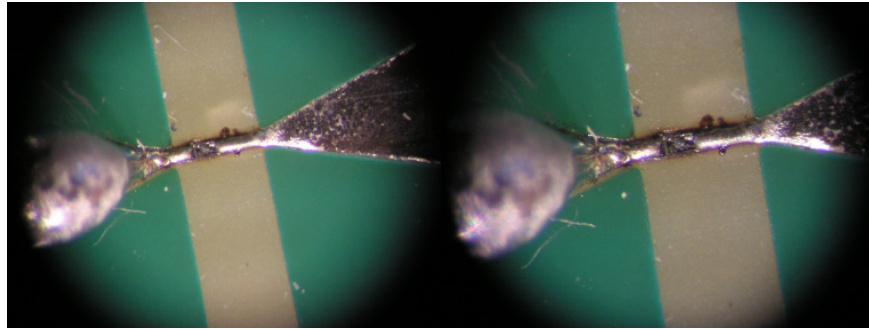


Abb. 20: Fehler bei Abschaltungen mit Sn-Depot

Die Trennung der Leiterbahn erfolgt nicht am „Sn-Blob“ sondern - wie gehabt - in der HS-Mitte. Die oben beschriebenen Risiken bleiben erhalten bzw. werden durch den Kühleffekt des Sn ggf. noch verstärkt.

Ein Wärmebild (Belastung $I=3A$) zeigt die rel. kühlen Leiterbahnflächen (Anschlußdreiecke) in Relation zum HS.

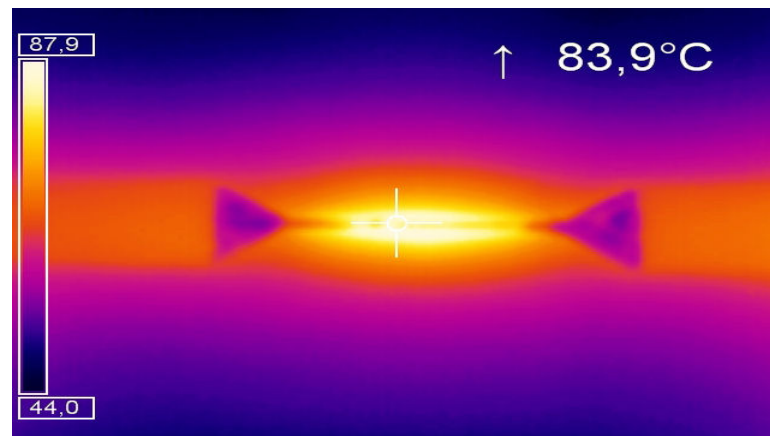


Abb. 21: Wärmebild mit Sn-Depot - Firma Elschukom

Ausreichend gute bis sehr gute Ergebnisse wurden mit der korrekten Platzierung des Sn-Blob und der richtigen Sn-Menge erreicht. Dabei konnten die in der Dissertation „Über das Abschmelzverhalten von Sicherungsschmelzleitern im Überstrombereich“¹⁰ beschriebenen Ergebnisse der untersuchten Sn-Mengen und Schmelzleitergeometrien von Bandschmelzleitern in den Grundaussagen auf Cu-Leiterbahnen übertragen werden.

¹⁰ [Kle 82]

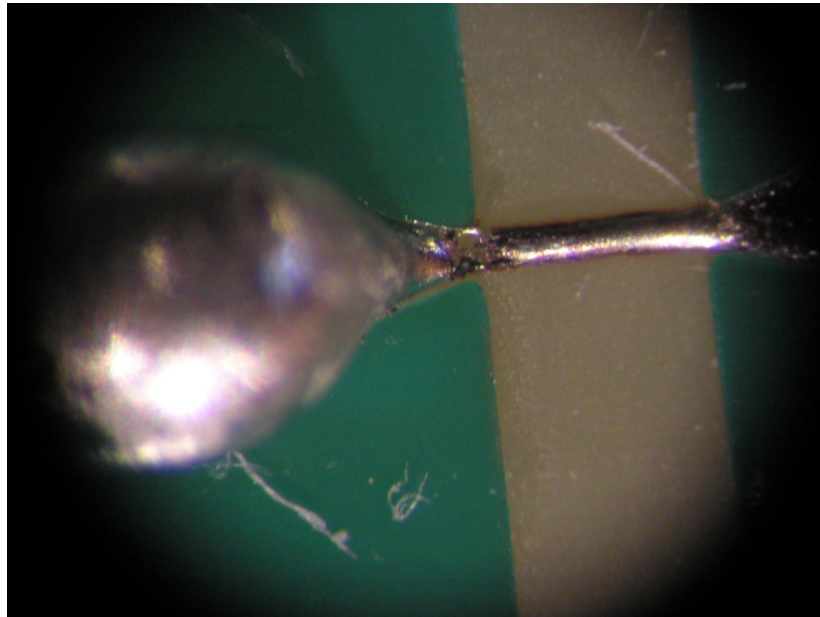


Abb. 22: Fehlerfreie Abschaltungen mit Sn-Depot

Im Bild ist die Trennung d.h. die Auflösung des Cu durch das Sn am Rande des Sn-Blob zu sehen.

Eine applikationsbezogene Optimierung der Sn-Menge und Position wurde in den weiter unten beschriebenen Praxisbeispielen vorgenommen.

Abschaltstromreduzierung durch Leiterbahnverlängerung

Da die Nutzung des „M-Effekt“ eine Überhitzung der Leiterbahn und ihrer Umgebung vermeidet, kann eine Absenkung des Abschaltstromes (bzw. des Nennstromes) durch die Verlängerung der Leiterbahn bewirkt werden. Wie bei Chipsicherungen (und im weitesten Sinne bei gewickelten Drahtschmelzleitern) ist die Gestaltung eines Mäanderförmigen Schmelzleiters möglich. Im Projekt wurden folgende Varianten untersucht:

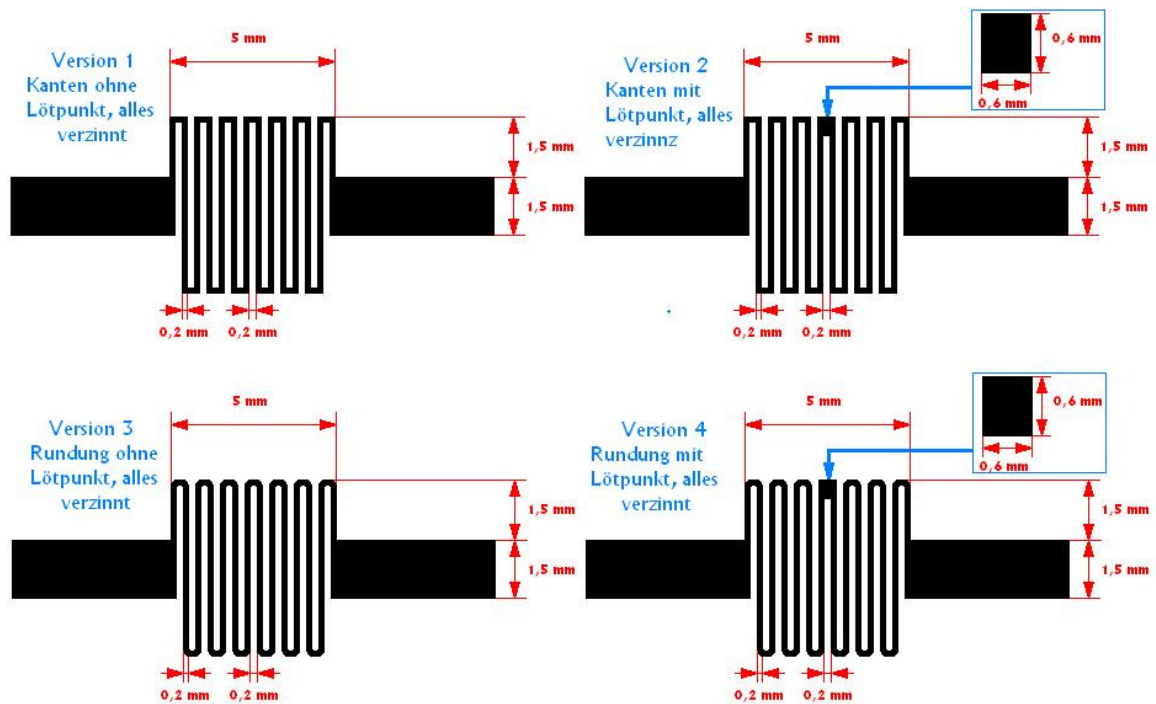


Abb. 23: Mäander-Schmelzleiter mit Sn-Depot

Abschließende Ergebnisse lagen zum Projektende noch nicht vor. In ersten Versuchen wurde bei einem Widerstand des verzinnten Mäanders von 0,2 bis 0,25 Ohm Abschaltströme von $I < 2$ A ermittelt. Wie bei gestreckten HS-Geometrien ist eine sichere Abschaltung ohne eine sicherungsspezifische Maßnahme nicht möglich. Der Bereich des Mäanders wird so heiß, daß es zu Verbrennungen des Leiterplattenmaterials kommt. Die Verzinnung des Mäander-HS führte zu erheblich verbessertem Abschaltverhalten. Dabei ist in weiteren Versuchen die Fläche für das Sn-Depot sowohl in der Größe als auch in der Anordnung zu verbessern.

5.1 Untersuchung der Möglichkeiten neuer Materialkombinationen

Betriebs-Spannungsebenen und Schmelzleiterabdeckungen

Eine der wichtigsten Kenngrößen einer Sicherung ist die Angabe einer Spannung, Betriebsspannung oder Nennspannung (Rated Voltage). Die Nennspannung gibt an, bis zu welcher Spannung ein Abschaltlichtbogen beherrscht bzw. gelöscht wird, ohne daß die Umgebung der Sicherung gefährdet wird

oder die Sicherung selbst (eine in den Normen geforderte Eigenschaft) äußeren Schaden nimmt.

Zusammen mit der Nennspannung bedeutsam ist die Angabe eines „Schaltvermögens“ d.h. die Angabe eines max. Stromes, der bei Nennspannung abgeschaltet werden kann.

Für Gerätesicherungen, die auf der Sekundärseite einer Applikation eingesetzt werden, werden in der Regel Werte von 35A/32V DC/AC angegeben bzw. von Normen gefordert (Z.B. IEC 127-4, Normblatt 2, 1996-08). Für Kleinst-Chip-Sicherungen werden vereinzelt auch kleinere Spannungen zugelassen, z. B. 24V DC/AC.

Konstruktive Maßnahmen zu finden, die die Beherrschung des Abschaltlichtbogens ermöglichen, ist eine große Herausforderung für die Entwicklungsingenieure eines Sicherungsherstellers. Die Lichtbogenenergie kann auch bei Spannungen von 24V noch Werte von mehreren 100W erreichen. Es wird daher versucht, einen Abschaltlichtbogen durch geeignete Abdeckungen aus lichtbogenlöschenden Materialien zu vermeiden oder durch Hohlräume – „gehäuseartige Abdeckungen“ – den entstehenden Druck aus ionisierter Luft und/oder Metaldampf zu kapseln.

Anders als bei Sicherungen, deren konkrete Einsatzbedingungen dem Sicherungshersteller im allgemeinen nicht bekannt ist, werden Leiterbahnsicherungen speziell auf die jeweilige Applikation abgestimmt.

Die Erprobung von konstruktiven Lösungen der Kleinst- und Chip-Sicherungen an Leiterbahnsicherungen sollte die bisher im Projekt definierte Nennspannungsebene von $U_{\text{Nenn}} \leq 12\text{V DC}$ anheben und so den Einsatzbereich erweitern.

Spannungsebene ohne Abdeckung

Je nach Fehlerart und Vorbelastung des Leiterplattenbereichs um und unter dem definierten Leiterbahnschmelzleiter sind bei FR4-Material Zerstörungen/Vorschäden des Materials unter dem HS-Bereich nicht gänzlich auszuschließen. Bei Betriebsspannungen oberhalb von 10V können daher Kriechstrecken aus verkohltem, kohlenstoffhaltigen Materialien zu geringen Isolationswiderständen führen, die wiederum ungewollte Kriechströme in einem hohen Leistungsbereich zulassen. Im Versuch wurden solche Isolationswiderstände bei $U \leq 12\text{V DC}$ in keinem Fall gemessen. Die Nennspannungsebene wurde daher auf $U_{\text{Nenn}} \leq 12\text{V DC}$ festgesetzt.

Abdeckung mit Standard Silicon- und Epoxidharz-Vergußmassen

Einfache Abdeckungen des HS-Bereichs mit Standard Silicon- oder Epoxidharz-Vergußmassen führten zu negativen Ergebnissen.



Abb 24: Abschaltfehler mit Abdeckmasse Delo Monoprox. Man erkennt, daß die auf dem HS aufliegende Vergußmasse im Vergleich zu den verkohlten Ausläufern der Masse (rechts) noch „unbeschädigt“ ist.

Durch Temperatur und Druck schafft sich die abschmelzende Leiterbahn einen Weg „unter“ der ausgehärteten Abdeckung hindurch und führt so zu Verbrennungen und Verkohlungen der Leiterbahn und der angrenzenden Umgebung.

Eine Brandgefahr wird dadurch noch verstärkt.

Auch „weichere“ Abdeckmassen wie Silikon führten zu keiner deutlichen Verbesserung des Abschaltverhaltens.

Erst Versuche mit „Zweischicht Abdeckungen“ führten einer erheblichen Verbesserung des Abschaltverhaltens und damit zu einer Spannungsebene von (min) 24V DC. Dabei wurde davon ausgegangen, daß Druck, Metaldampf und Schmelze von einem Medium im Abschaltaugenblick aufgenommen wird, und Metallanteile nach dem Erkalten gekapselt werden.

Für die aus der Entwicklung von Chipsicherungen bekannten Konstruktion der Zweischichtabdeckung wurde ein niedrig schmelzender Kunststoff eingesetzt der mit einer Vergußmasse abgedeckt wurde. Da zur Abdeckung nur Materialien in Frage kamen, die selbst nicht exotherm aushärten oder zum Aushärten

Wärme benötigen, wurde ein Silikon der Firma Sinus Electronic GmbH eingesetzt.

Alle Abschaltungen mit 24V DC im Kurzzeitbereich von $t < 1s$ und im Langzeitbereich von $t > 1\text{Minute}$ führten zu keinen äußerlich sichtbaren Verkohlungen oder Beschädigungen. Die Temperatur über dem HS wurde mit max. 41 °C ermittelt.

Messungen der Isolationswiderstände ergaben Werte von $R_{ISO} > 20\text{mOhm}$ bei 500V DC.

Rechercheergebnisse:

5.2 Möglichkeiten der Schmelzleitertrennung durch chem. Additive

Als Schmelzleitermaterialien werden bereits seit Erfindung der Schmelzsicherung die gut leitenden Metalle Ag und Cu bevorzugt eingesetzt. Zwar wurden andere Metalle wie Zn oder Al oder deren Kombinationen erprobt aber nie in großem Maße eingesetzt.

Von Widerstandslegierungen (für sehr kleine Stromstufen $I_n < 0,1A$) wie FeNi oder CuNi abgesehen werden Cu und Ag, trotz ihrer Nachteile z.B der hohen Schmelztemperatur und der damit verbundenen flinken Abschaltcharakteristik, heute umfassend eingesetzt.

Um abschaltträge Sicherungen zu erhalten oder um das Ausschaltvermögen zu optimieren, werden diese Schmelzleiter mit „Wirkstoff-Aditiven“ kombiniert. Das geschichtlich und aktuell häufigste Wirkstoff-Aditiv ist Sn mit oder ohne Pb (Weichlote) mit den bei Weichloten mehr oder weniger häufigen Zusatzstoffen wie z.B. Antimon, Kupfer, Silber, Zink und Cadmium.

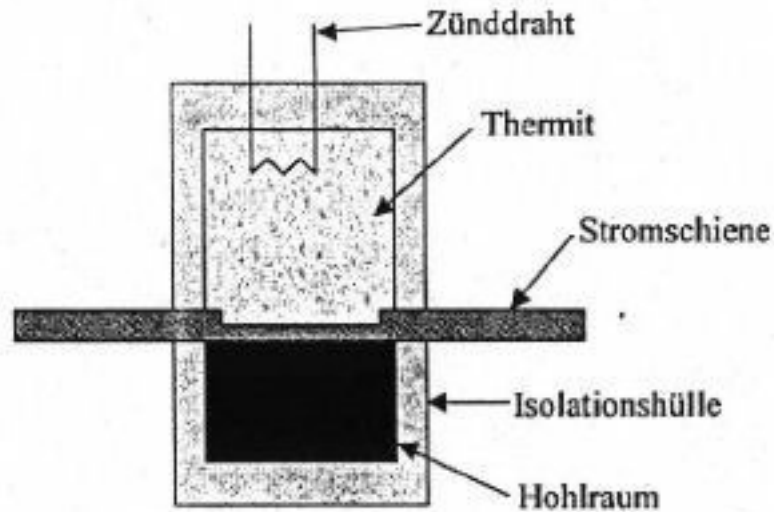
Aus der Geschichte sind Experimente u. a. mit chemischen Additiven bekannt, die ggf. auch das Ausschaltvermögen verbessern sollten.

So berichtet Baxter¹¹ über Experimente mit Magnesium:

„....This is overcome in one type of small fuse by attaching to the wire a small blob of magnesium mixture, which ignites at a relatively low temperature and disrupts the wire....“

In einer Informationsschrift des VDI (die leider nur als Fragment vorliegt) über das „Temperaturverhalten elektrischer Leitungen“ wird über die Wirkung von Thermit berichtet¹²:

¹¹ [Bax 50]



Versuchsaufbau für das Zuheizen mittels exothermer Reaktion

Abb. 25: Einsatz von Thermit als Unterbrecher

„...besteht die Möglichkeit, ein Material auf die Sicherungsoberfläche aufzubringen, das chemische Energie in sich trägt.....Bei unseren Versuchen wurde Thermit als Reaktionsmittel genommen.“

Über die wohl bekanntesten Varianten wird bei Johann berichtet. „Zur Verbesserung der Oberflächenspannung niedrig schmelzender Materialien (SnPb-Legierungen) im Abschmelzzeitpunkt erleichtert eine Umhüllung des Schmelzleiters mit Borsäure den Zerfall in Tropfen und verhindert eine Oxidation.“

Oder:

„Eine andere gelegentlich angewandte Methode zur Herabsetzung der Verlustleistung beruht auf chemischen Vorgängen. Eine Perle oder Pille umhüllt einen kurzen Abschnitt des Schmelzleiters.....die Stoffe freigeben, insbesondere Halogene, etwa Jod, die ihrerseits mit dem Schmelzleiter elektrisch isolierende Verbindungen eingehen.“¹³

¹² „Temperaturverhalten elektrischer Leitungen“, VDI-Verlag, Düsseldorf 2003

¹³ [Joh 82]

Nach dem Ergebnis der im Projekt durchgeführten Recherche haben es alle Varianten aber nicht bis zur Marktreife gebracht. Soweit aus der Recherche bekannt, ist es bei Versuchen oder vereinzelt Einsatz als Exoten geblieben.

Probleme bei Beschaffung, Lagerung und Verarbeitung (Magnesium und Thermit wird u. a. bei der Sprengstoffherstellung eingesetzt und Borsäure ist giftig), vor allem aber fehlende Langzeituntersuchungen über den Einsatz an Schmelzsicherungen führten zu der Entscheidung, keine Versuche im Projekt-rahmen durchzuführen.

5.3 Untersuchung neuer Möglichkeiten

Patentsituation

Einerseits sind die in der Praxis realisierten „Leiterbahnsicherungen“ in der Regel sehr unprofessionell und lassen auf wenig Sicherungs-Fachwissen der Design-Ingenieure schließen. Andererseits werden seit etwa 100 Jahren Geräte-Schmelzsicherungen entwickelt und gebaut, sodaß ein engmaschiges Netz von Patenten und anderen Schutzrechten erwartet werden kann.

Eine einfache Patent-Recherche in der Datenbank des deutschen Patentamtes¹⁴ sowie den Datenbanken der Institutionen¹⁵ <http://www.freepatentsonline.com>,¹⁶ und <http://www.freshpatents.com> ergab eine hohe Trefferzahl für Patente aus dem Bereich der Schmelzsicherungen. In allen DE, US, WIPO (PCT) und EP Datenbanken wurden bis zu 5.500 Patentschriften gefunden, die inhaltlich auf ihre Bedeutung für Chip- oder Leiterbahnsicherungen zu untersuchen sind.

Allein die Firma Wickmann hat seit 1945 mehr als 50 Patente zu Schmelzsicherungen erhalten. Davon beziehen sich 10 Patente auf Chipsicherungen.

Patente, deren Titel auf eine Relevanz zum Projekt schließen ließ, wurden in Stichproben genauer analysiert.

Neben einer starken Analogie der technischen Lösungen, die sich überwiegend in konstruktiven Einzelheiten differenzierten, konnte eine wesentliche Gemeinsamkeit gefunden werden.

¹⁴ <http://depatisnet.dpma.de>

¹⁵ <http://www.freepatentsonline.com>

¹⁶ <http://www.freshpatents.com>

Alle Patente bezogen sich sowohl in der Beschreibung als auch in den Ansprüchen auf eine Sicherung als „diskretes Bauelement“.

Die Formulierungen sind fast immer ähnlich, wie die folgenden Beispiele zeigen:

Patent PCT „WO 99/12178“ – „*An electrical fuse element (1), which comprise a substrate (4) with two contacts.....*“

Patent PCT “WO 99/16097” - „*In an electrical fuse element (1), comprising a substrate (2) with contacts (11) arranged on two opposite sides.....*“

Patent DE 101 50 027 C1 – “*Ein Dickschicht-Sicherungselement weist ein Schmelzleiterelement,.....*“

Offenlegungsschrift DE 3044711 A1 – „*Schmelzsicherung, bestehend aus einem Substrat und einem aufgedruckten Schmelzleiter mit einer Verengung der Leiterbreite zur Bildung einer Schmelzstelle,....*“

Es wurden lediglich zwei Patente recherchiert, die sich direkt auf eine Leiterbahnsicherung im Sinne des Projekts bezogen.

Im Patent EP 1308978 A2 wurde jedoch speziell eine Kapselung des Schmelzleiters geschützt „The fuse housing has hollow body with bounding walls formed by housing (1), web (2) and printed circuit board (9).“

Im Patent EP 1045625A wird im Anspruch 1 speziell eine „...Sicherungsvorrichtung zum sichern eines Elektrogerätes gegen Überstrom...“ geschützt.

Die durchgeführte Untersuchung der Patentsituation kann im Einzelfall eine gezielte Recherche durch einen Fachanwalt nicht ersetzen, zeigt aber, daß sich eine Konzentration der Projektarbeiten auf eine mögliche Übertragung der grundsätzlichen Techniken von Chip-Sicherungen auf eine integrierte Leiterbahnsicherung begründet ist.

Zur Erreichung der Projektziele „individuelle Sicherheit“ und „Verbesserung der Ökobilanz“ konnte die im Projektantrag erwähnte Erprobung neuer, bisher nicht erprobter Materialien bzw. Materialkombinationen zu Gunsten der Funktionsübertragung entfallen.

5.4 Entwicklung und Fertigung von Sicherungselementen

Aus den beschriebenen Untersuchungen und Versuchsergebnissen können für die Praxis Grundregeln für die Sicherungsauslegung abgeleitet werden:

Allgemeine Regeln für die Auslegung von Leiterbahnsicherungen	
1	Welche Fehlerstromhöhe kann auftreten und soll in welcher Zeit abgeschaltet werden?
2	Ermitteln des notwendigen HS-Widerstand anhand von Meßdiagrammen
3	Berechnung der HS-Geometrie unter Berücksichtigung der Querschnittsreduzierenden Einflüsse (z.B. Unterätzung); Auswahl der HS-Geometrie
4	Ermitteln der Leiterbahnwiderstände des hs und der Anschlüsse nach der Grundregel $\max. R=(HS\text{-Widerstand})/3$ und Auswahl der Anschlußleiterbahn-Breite
5	Berechnung der Erwärmung der Anschlußleiterbahnen und ggf. Anpassung der Geometrien
6	Versuche und ggf. Korrekturen

Alle folgenden Beschreibungen der Beispiele sind für eine max. DC-Spannung von 12V ausgelegt. Höhere Spannungen sind nur durch besondere Maßnahmen (z.B. Zweischicht-Abdeckung des HS mit lichtbogenlöschenden Materialien und/oder geeignete Layoutvarianten) möglich.

Ebenso beziehen sich alle Auswahlkriterien auf die im Versuch untersuchten Layout-Varianten.

Beispiel 1

M&M-Beispiel : Handgerät zu drahtlosen Datenerfassung

Mit dem von der Firma M&M entwickelten Handgerät sollen drahtlos Waagen- bzw. Kraftmeßwerte erfaßt, gespeichert und angezeigt werden. Die Sicherungen sollen verhindern, daß zu hohe Ströme während der Lade- bzw. Entlade-phase die Leiterbahn, die Platine oder Bauelemente zerstören oder im Extremfall sogar einen Platinenbrand erzeugen. Diese Fälle können z. B. bei durch einen defekten Akku entstehen.

Die als Schmelzsicherung gestaltete Leiterbahn-Engstelle soll bei einem Fehlerstrom von 3,2A abgeschaltet werden. Um eine Resistenz bei geringen Einschaltpulsen-Amplituden zu erreichen wird eine Abschaltzeit von ca. 1-3 Minuten gewählt. Die Kurzschlußabschaltung kann „flink“ sein da keine Stromspitzen von mehr als dem zweifachen Abschaltstrom auftreten können. Auf eine Sn-Beschichtung (M-Effekt) wird daher verzichtet. Die Auswahl des notwendigen Widerstands wird nach dem im Versuch ermittelten Diagramm vorgenommen:

Verhältnis Strom- Widerstand / Beispiel 2

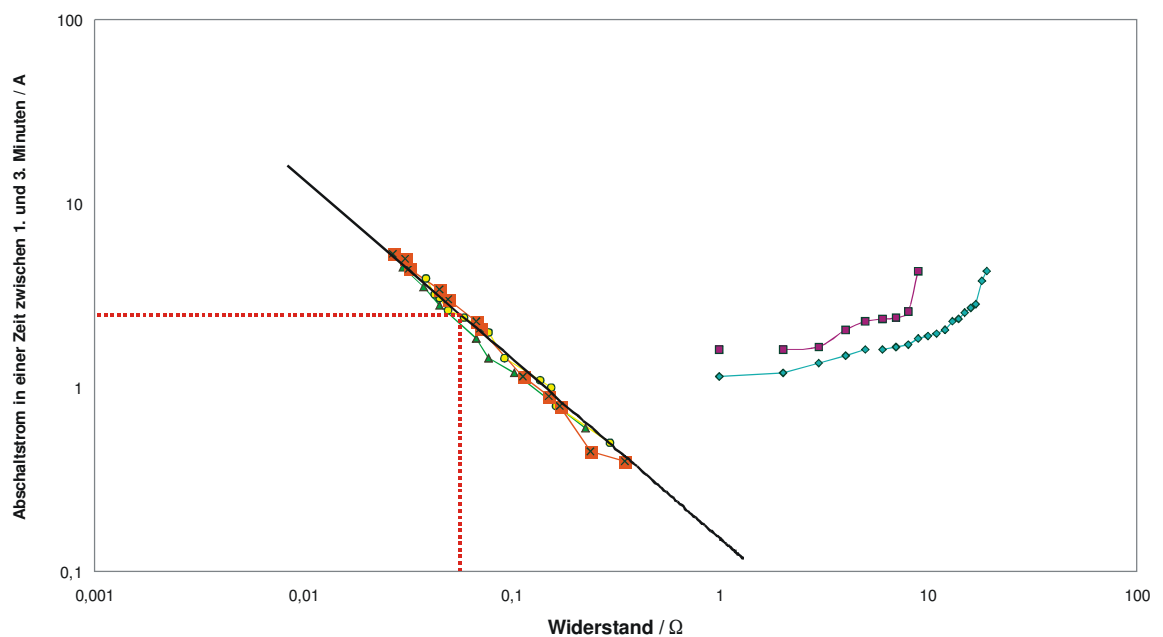


Bild 26: I_A/R -Diagramm für Beispielauslegung

Daraus ergibt sich ein Widerstand von ca. 45mOhm. Nach den oben beschriebenen Grundregeln darf der Widerstand der zuführenden Leiterbahn auf einer Länge von 10mm je Anschlußseite max. $R=(HS\text{-Widerstand})/3$ betragen. In diesem Beispiel also max. 15mOhm.

Daraus ergeben sich folgende Layoutvorgaben:

Zuführende Leiterbahn:

Für 10mm; $D=35\mu\text{m}$; $R<15\text{mOhm}$ wäre nach

$$R=2*(\zeta*I)/A = 13,47\text{mOhm}$$

eine Leiterbahnbreite von 0,7 mm ausreichen. Eine Unterätzung der Leiterbahn und deren Einfluß auf die Querschnittsfläche muß bei dieser Breite nicht berücksichtigt werden. Nach einer abschätzenden Berechnung¹⁷

$$\Delta T \approx B_{LP} \left(\frac{b}{\text{mm}} \right)^{-1,45} \left(\frac{d}{35 \mu\text{m}} \right)^{-1} I^2$$

würde die Leiterbahn im Fehlerfall ein ΔT von 54K erreichen.

Der Erwärmungsvorgang bei Leiterbahngstellen (hot spot) ist allerdings erheblich komplexer, da zwischen lokal unterschiedlichen Erwärmungen ein Temperaturengleich stattfindet. Um den im Diagramm abgelesenen HS-Widerstand anzupassen, wurden die im Versuch verwendeten Leiterbahnen von 1,5mm Breite und einem Widerstand von 6,28mOhm verwendet.

Die Eigenerwärmung im Fehlerfall wird dadurch auf $\Delta T=18\text{K}$ begrenzt.

Die Vorteile liegen in einer $R_{HS}/R_{Leitung}$ -Relation von 1:7 und damit in einer geringeren Temperaturbelastung des Leiterplattenmaterials unter dem HS, da unter Normalbelastung mehr Wärme in die Anschlußleiterbahnen abgeführt wird.

HS-Geometrie:

Im Versuch wurde eine HS-Geometrie von $b=0,2\text{mm}$ und $l=5\text{mm}$ gewählt. Die Breite von 0,2mm ist die Minimalgrenze, die prozeßtechnisch mit cpk-Werten von $>1,33$ noch gut beherrschbar ist. Allerdings muß bei dieser Leiterbahnbreite bereits der Einfluß der Unterätzung rechnerisch berücksichtigt werden.

¹⁷ b ist die Breite der Leiterbahn, d ist die Dicke in μm ; der Koeffizient B_{LP} ist von Lagenaufbau und Leiterplatte abhängig und beträgt numerisch 3,6 für eine einlagige Leiterplatte

Das Versuchslayout war so gestaltet, daß der HS-Widerstand auch während des Abgleichens gemessen werden konnte.

Für das Versuchslayout ergab sich ein Faktor $R_{\text{gemessen}} / R_{\text{Theorie}} \approx (35-7)/11,8 \approx 2,35$.

Der notwendige, aus dem Diagramm abgelesene Widerstand liegt bei 45mOhm . Für die Abgleich-Berechnungen ($45\text{mOhm}/2,35 = 19,2\text{mOhm}$) ist eine Reduktion der Leiterbahndicke durch Abgleichen auf 21µm notwendig.

Eine Anpassung des Unterätzungs-Faktor wurde nicht untersucht.

Daraus ergibt sich ein Layout für die Leiterbahnsicherung mit einem auf 45mOhm (entspricht ca. 21µm Schichtdicke) abgeglichenem HS.

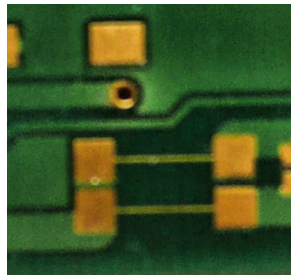


Abb. 27: Leiterbahnsicherungen

Für beide Schutzansprüche (Lade- und Entladeströme) wurden auf der Platine jeweils zwei Sicherungen angeordnet.

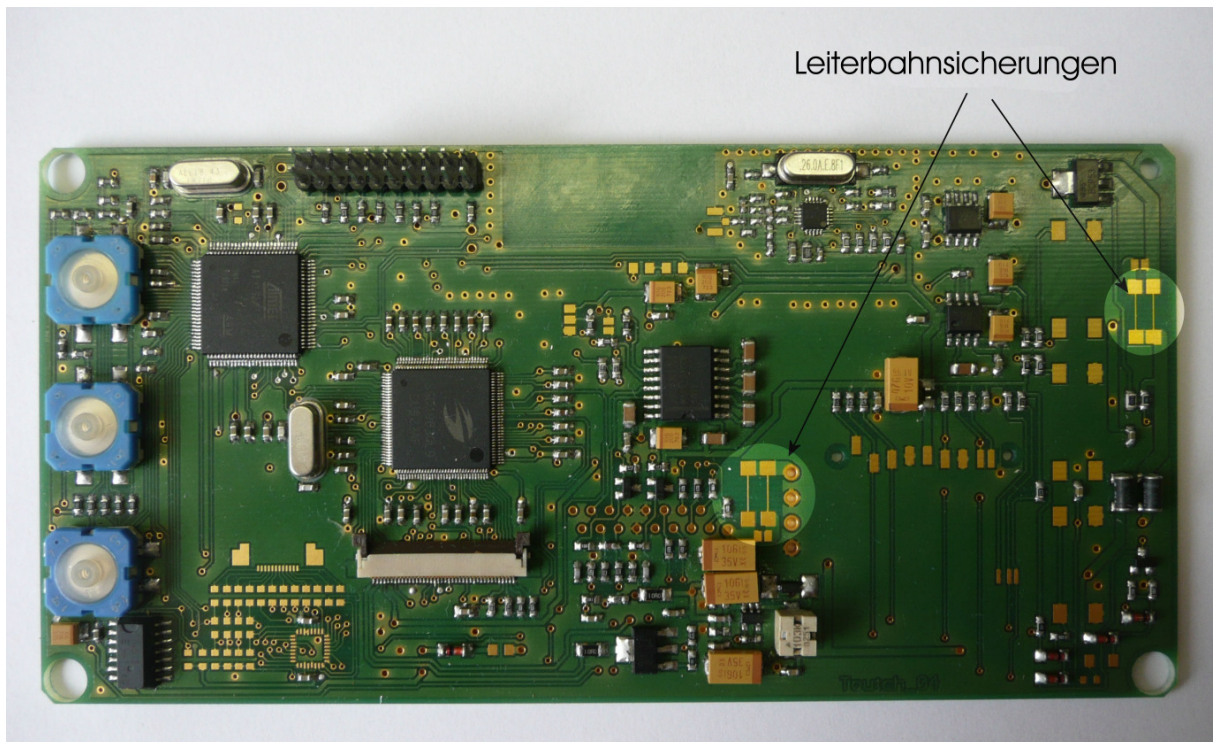


Abb. 28: Fertige Platine des Handgeräts

Beispiel 2

Das folgende Beispiel beschreibt erste Vorversuche, angestoßen durch eine Anfrage einer Firma, die elektrische Antriebssysteme für Motorboote und Fahrzeuge entwickelt.

In diesem Betriebsbereich sind im batterietechnischen Teil – nach letzter Recherche – bisher noch nie Leiterbahnsicherungen eingesetzt worden. Eventl. mögliche Auslegungen müssen zum gegebenen Zeitpunkt in umfangreichen Tests geprüft werden z. B. bezüglich

- aller Standardprüfungen für Schmelzsicherungen
- der einwirkenden Alterungs- und Betriebsprofile (Pulstests).

Dennoch ist es jetzt sinnvoll, Entwicklungsmöglichkeiten vorzuprüfen bzw. zu testen. In Umsetzung der Ergebnisse des DBU-Projektes könnten hier ggf. sowohl ökologische- als auch Sicherheits-Vorteile genutzt werden.

Gefordert ist eine Leiterbahnsicherung als Absicherung einer jeweils einzelnen Akku-Zelle von insgesamt 10 parallel geschalteten Zellen. Die Zellspannung und damit die abzuschaltende Spannung beträgt 3,6V. Der Belastungsstrom kann für mehrere Sekunden 40A betragen. Im Fehlerfall – ein Kurzschluß der Zelle – kann $I > 80A$ betragen.

Wie im vorherigen Fall wird anhand des Meßwert-Diagramms (vgl. Abb.26) der HS-Widerstand ermittelt.

Danach wäre für einen Abschaltstrom von 80A ein Widerstand von ca. 1,7mOhm notwendig. Die sich daraus ergebende HS-Breite und Länge wäre ca. 0,27mm bei einer Länge von 2mm. Als Leiterbahndicke wurde wg. der restlichen umgebenden Leiterbahnen 70µm gewählt.

Nach den oben gewählten Berechnungen würden die Anschlußleiterbahnen nur einen max. Widerstand von 0,72mOhm haben dürfen. Daraus ergibt sich eine Leiterbahnbreite von 6,5mm.

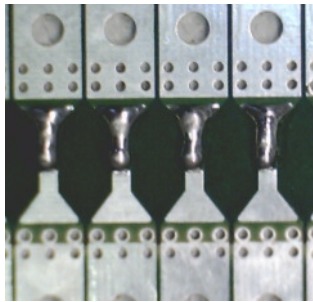


Abb. 29: Vorversuchsmuster zur Absicherung einzelner Akku-Zellen; man erkennt die mit Lot versehenen HS zur Ausnutzung des sog. „M-Effekts“

Die unter starker Extrapolation aus dem Diagramm entnommenen Werte sowie die notwendige Layout-Änderung ließen von vornherein nur einen Näherungswert erwarten.

Im Ergebnis führten die Versuche zu einem Abschaltstrom von ca. 50A. Dabei hielten sich sowohl die Erwärmung als auch die Isolationswiderstände in einem Bereich auf, der weitere Versuche sinnvoll macht.

5.5 Approbierbarkeit einer Leiterbahnsicherung

In einer im Rahmen des vorliegenden Projektes durchgeführten Untersuchung hat RBEEngineering die Frage der Approbierbarkeit einer Leiterbahnsicherung im Auftrag der Zuwendungsempfängerin untersucht.

Die Approbierbarkeit wurde darin auf Basis eines offenen Normblattes für Geräteschutzsicherungen, die in vorhandene Standards integriert werden kann, betrachtet. Das Hauptaugenmerk lag auf der deutschen VDE-Norm, internationale bzw. nationale Standards anderer Länder wurden nicht berücksichtigt.

In Deutschland gibt es derzeit keine speziellen Normen für Leiterbahnsicherungen.

Die Untersuchung¹⁸ kommt zu folgender Bewertung:

Rein technisch ist eine Standardisierung der (...) Leiterbahnsicherung möglich, da sie eine definierte Charakteristik besitzt. Auch die Spezifikation eines definierten Temperaturverhaltens im Überlastbereich erleichtert die Beschreibung in einem Normblatt.

Da zurzeit keine Norm für Leiterbahnsicherungen existiert, und auch kein geeignetes Normblatt in bestehenden Sicherheitsstandards vorhanden ist, muß ein neues Normblatt erstellt werden. Der zeitlich Aufwand hierfür beträgt mindestens 2 – 3 Jahre und ist mit erheblichen Kosten verbunden, da es sich hierbei um ein neues Produkt aus Sicht der Normung handelt. In jedem Fall sollte das Verfahren von einem renommierten Sicherungshersteller beantragt und betreut werden.

6 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse im Abgleich mit dem Stand des Wissens, der Technik, des Handelns und der gesetzlichen Mindestanforderungen; besonders darstellen: Umfang der zusätzlichen Umweltentlastung

Vorbemerkung

Abgesehen von den nachfolgend beschriebenen Umweltentlastungen ist festzustellen, daß in eine ökologische Gesamtbilanzierung auch weitere Herstellungsstufen der Leiterplatten einbezogen werden müssen.

Eine Studie der Uni-Zürich aus dem Jahr 2006 zeigt, daß eine mögliche Verbesserung der Öko-Bilanz einer bestückten Leiterplatte und einzelner Bauteile unter einem ganzheitlichen Ansatz bewertet werden müssen.

In sofern ist das im Projektantrag aufgezeigte ökologische Verbesserungspotential deutlich auszuweiten.

¹⁸ [RBB 10]

In der Studie wird nachgewiesen, dass die Herstellung von Bauteilen sowie ihre Lagerung, Verpackung, Transport, Montage und Entsorgung in eine Bewertung der Öko-Bilanz mit einbezogen werden müssen.

Der Ersatz von Sicherungen als SMT- oder THT-Bauelement durch Leiterbahnsicherungen reduziert nicht nur den Einsatz von Schadstoffen wie z.B. Blei in Lotverbindungen sondern vermeidet z.B. naß-chemische Prozesse der Sicherungsherstellung. Allgemein wird durch den Einsatz von Leiterbahnsicherungen der Bedarf an Energie für Herstellung, Transport und Montage eingespart.

So weist die Studie z.B. für die Montage eines SMD-Bauteils einen Energiebedarf von ca. 0,01 kWh nach. Bei THT-Bauteilen kommen noch etwa 12% des gesamten Herstell-Energiebedarfs für das Bohren der Montagelöcher hinzu.

Der geschätzte Bauteilbedarf aus dem Projektantrag konnte bis zum Projektende noch nicht verifiziert werden weil das Ergebnis einer Kundenbefragung noch aussteht. Es wird aber davon ausgegangen, daß ca. 50% des geschätzten Bedarfs an SMT-/THT-Sicherungen durch Leiterbahnsicherungen ersetzt werden können.

Umweltentlastung

Wie im Antrag zu diesem Vorhaben dargelegt, ergeben sich durch die Anwendung von Leiterbahnsicherungen verschiedene Umweltentlastungseffekte:

Blei

Wiewohl die RoHS-Richtlinie die Verwendung von bleifreien Loten vorschreibt, ist es nicht möglich, den Bleigehalt in Lötverbindungen auf den Wert null zu senken. Erstens gibt es metallurgische Gründe, in bestimmten Fällen auch weiterhin bleihaltige Lote zu verwenden (hohe Haftfähigkeit der Bauteile auf der Platine und niedrigere Prozeßtemperaturen), und in den Fällen der Verwendung sog. bleifreier Lote findet sich immer noch ein Restgehalt an Blei wieder. Hierzu wurde abgeschätzt:

Anzahl von Schmelzsicherungen	250 Mio Stück / Jahr ¹⁹	in Geräte eingebaut, in Verkehr gebracht und später zu entsorgen
Anzahl von Lötunkten / Sicherung	4	zwei Lötunkte in der Sicherung und zwei weitere Lötunkte zur Befestigung in der Leiterplatte
Menge an Lötinn / Löt-punkt	200 mg	
ergibt Lötinnmenge für den Einsatz herkömmlicher Sicherungen	200 t / Jahr	

Unter der Annahme, daß 90 % der Lötvorgänge mit „bleifreien“ (0,1 % Restbleigehalt) und 10 % mit bleihaltigen Loten ausgeführt werden, enthalten die Lötungen

über 8 t Blei pro Jahr.

Hinzu kommen weitere „Verunreinigungen“ des Lots mit Quecksilber, Cadmium und sechswertigem Chrom.

Der Verzicht auf diskrete Sicherungselemente zugunsten der hier entwickelten Leiterbahnsicherung erlaubt also bereits eine Reduzierung von jährlich ca. 8 t Blei, die nach Ablauf der Lebenszyklen der Geräte zur Entsorgung anfallen.

Kollateral auftretende Umweltbelastungen

Die im Antrag beschriebenen kollateralen Schäden – die qualitativ wie quantitativ nach wie vor Bestand haben – werden nachfolgend wiedergegeben. Dabei handelt es sich um Schäden bzw. Schädigungen, die infolge unzureichender Sicherungsstrategien in den Geräten (global abgesicherte Bereiche anstatt individueller Absicherungen) auftreten.

Bedingt durch unzureichende bzw. nicht optimal angepaßte Sicherungen in elektronischen Geräten ist ein weiterer Zusammenhang zu betrachten. U. a. sind nicht näher quantifizierbare Umweltbelastungen zu beklagen.

6.000 Verletzte und 600 Tote jährlich

¹⁹ davon allein ca. 150.000.000 Sicherungen von Fa. Wickmann

sind die besorgniserregende Statistik der Opfer von Bränden.

Die genannten Werte für die monetäre Schadenshöhe variieren zwar, aber die Auswertung unterschiedlicher Quellen²⁰ führt auf einen Wert bei

3 Mrd. EURO.

Ca. 200.000 bis 230.000 Brände werden jährlich bundesweit gemeldet.

Und das IFS²¹ zieht im Januar 2008 aus Analysen der Schadensfälle als wichtigste Konsequenz:

***„Die Sicherheit von Elektrogeräten muß weiter verbessert werden
– keine leichte Aufgabe im Zeitalter billiger Importe“.***

Die Brandstatistik der Düsseldorfer Feuerwehr weist für 2007 aus, daß heimische Elektrogeräte, dazu gehören

- *Fernsehgeräte,*
- *Radio*
- *DVD*
- *PC etc.*

²⁰ IFS Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung der öffentlichen Versicherer eV, Kiel, VdS Schadenverhütung Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft eV und bvbf Bundesverband Brandschutz-Fachbetriebe eV

²¹ IFS http://www.ifs-kiel.de/08_titel/2008/present0108.htm

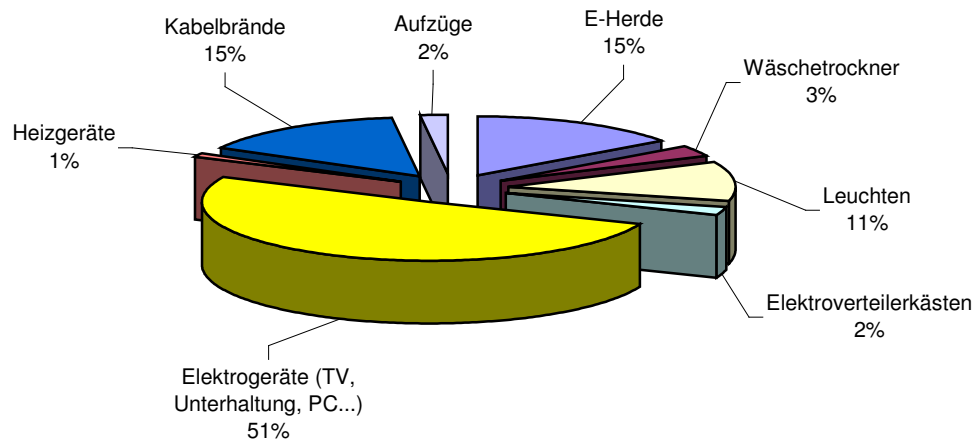


Abb. 30: Brandstatistik der Düsseldorfer Feuerwehr 2007

zu über 50 % Brandauslöser waren.

Da die Feuerwehr in der Regel erst dann herbeigerufen wird, wenn das Brandgeschehen sich bereits durch Qualmausbreitung bzw. durch Qualmgeruch bemerkbar gemacht hat, muß davon ausgegangen werden, daß Gegenstände in der Umgebung der Brandquelle entzündet werden bzw. schwelen. Damit verbunden ist die Freisetzung von umweltrelevanten Stoffen und Gasen zu besorgen. Es ist wegen der Bandbreite der Schäden und Folgeschäden nahezu unmöglich, die Umweltschäden zutreffend zu quantifizieren, die durch die Brände entstehen.

In den elektronischen Geräten für Unterhaltungs- und Büro Zwecke kommen elektronische Bauelemente zum Einsatz, die sich während des Betriebes erwärmen. Um thermische Überlastungen, die Entzündungsenergie und –temperatur der umliegenden Bauteile, Gehäuseteile etc. zu verhindern, werden Sicherungen eingesetzt, die bei Überschreiten von vordefinierten Strömen auslösen, indem sie durchbrennen. Jährlich werden zum Schutz von Geräten, Bauteilen und Leiterplatten mehrere hundert Millionen Schmelzsicherungen eingesetzt. Als „through hole“ (bedrahtetes) oder als SMD (Chip) Bauelement sollen sie vor Brand durch Überlast oder Kurzschluß schützen. In vielen Geräten (z.B. TV-Geräten) werden bis zu 8 Sicherungen eingesetzt.

Trotz dieser Sicherungsmaßnahmen werden mehrere hunderttausend Brände jährlich durch elektrische Geräte ausgelöst - wobei Art und Menge der nachfolgenden Schadstoffbelastung unbekannt ist.

Technologische Bewertung und Zusatznutzen

Die Übertragung wesentlicher Sicherungsfunktionen auf definierte Leiterbahnabschnitte war zentrale Aufgabe des Projektes. Die Aufgabe wurde im Projekt gelöst und damit die Grundlage für einen ökologisch effizienten und individualisierten Überstromschutz geschaffen.

Durch die Anwendung von Leiterbahnsicherungen sind zusätzliche Nutzen möglich:

Bessere Ausnutzung des Leistungs-Headrooms von Bauteilen

Während bei globaler Absicherung mit herkömmlichen Sicherungen die Forderung nach Sicherheit dazu führen kann, daß einzelne Komponenten unterhalb ihrer Leistungsgrenze betrieben werden (z. B. Halbleiter), besteht wegen der individualisierten Absicherung mittels PCB-Sicherung die Option, die Leistungsgrenzen besser auszunutzen (Baugröße, Leistung).

Zielgerichtete individuelle Absicherung

Bisher erfolgt u. a. aus Kosten- und Platzgründen eine „kollektive“ Absicherung mehrerer stromaufnehmender Komponenten / Baugruppen / Bauteile über eine Sicherung. Der Nachteil besteht darin, daß nur das Überschreiten des maximalen Belastungsfalls abgesichert werden kann. Eine separate Absicherung eines geringeren Stromaufnehmers ist dabei nicht möglich; kommt es in diesem zu Überhitzungen, löst die Sicherung nicht aus mit der Folge, daß eine Gefahrenstelle entsteht. Dieser Fall kann nicht mehr eintreten, wenn die Stromaufnehmer einzeln und präzise (bezügl. Auslösungsverhalten und Auslösungswert) abgesichert werden können. Dies wird mit den miniaturisierten Leiterbahn-Sicherungen möglich und ist wg. der geringen Abmessungen auch schaltungsverträglich.

Verbesserte Sicherheit bei Montagefehlern

Montagefehler – etwa durch Verwechslung von Steckverbindern – können zu Fehlfunktionen bzw. erhöhtem Ausschuß führen. Leiterbahnsicherungen sind ein probates Mittel, diese Art der Fehler sozusagen zum „Nulltarif“ zu beseitigen.

Langlebigkeit und Reparaturfreundlichkeit / Ferndiagnose

Wie im Antrag dargelegt, ergeben sich auch Möglichkeiten der Verbesserung der Langlebigkeit und Reparaturfreundlichkeit. Die Ausschöpfung dieser Möglichkeiten bedingt die Verfügbarkeit von PCB-Sicherungen, ist aber im Einzelfall eine Frage des Schaltungslayouts eines elektronischen Gerätes. Denkbar wäre:

- Diversifikation von Schaltungswegen nach Erreichen von definierten kritischen Schaltkreis-Lastzuständen,
- ferngesteuerte Inbetriebnahme von Reserveschaltkreisen bzw. Freischaltung von Ersatzsicherungen
- automatisches Routen von Stromläufen nach Fehlbedienung / Montagefehlern / Entfall von Reparatur- und Wartungsmaßnahmen
- zuverlässige Vermeidung von Bauteil-/ Baugruppenschäden auch in verzweigten Stromlaufsystemen.

Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse (geplante Veröffentlichungen, Messe- oder Vortragspräsentation usw. und ggf. Quellenangabe im Text)

Die Vorhabensergebnisse werden der Öffentlichkeit im Rahmen einer Internet-Präsentation²² zugänglich gemacht.

In Bearbeitung befindet sich ein Beitrag in der Zeitschrift „Elektronik-Praxis“.

Ebenfalls in Bearbeitung befindet sich eine fragebogengestützte Kundenbefragung.

7 **Fazit**

Kritische kurze Zusammenfassung der Vorhabensergebnisse und Feststellungen über künftige, für nötig erachtete Arbeiten

Die Übertragung wesentlicher Sicherungsfunktionen auf definierte Leiterbahnabschnitte war zentrale Aufgabe des Projektes. Die Aufgabe wurde im Projekt gelöst und damit die Grundlage für einen ökologisch effizienten und individualisierten Überschutz geschaffen.

Die entwickelten Verfahren z.B. des Nennstromabgleichs durch selektives Ätzen können noch über den Versuchstatus der Anlagen hinaus erheblich verbessert und so effizienter gestaltet werden.

²² www.schmelzleiter.de

Einschränkungen wurden nur insofern festgestellt, als der betriebene Aufwand bei Konstruktion und Herstellung von Leiterbahnsicherungen teilweise die Möglichkeiten einer Standard-Leiterplattenfertigung übersteigt.

So kann etwa die Betriebsspannungsebene durch die entwickelte Mehrschichtabdeckung des HS deutlich angehoben werden, wenn die Verarbeitung der Materialien in den Herstellprozeß integrierbar ist. Wo das nicht möglich oder nicht gewollt ist, sind Einschränkungen bei der Höhe der Betriebsspannung oder des Ausschaltvermögens sinnvoll und in sofern z.T. nicht vermeidbar.

Die Versuchsergebnisse der realisierten Schutzkonzepte und Herstellverfahren wurden an Mustermengen von $n \leq 50$ Stück ermittelt.

Auf umfangreichere Mustermengen wurde im Projekt-Rahmen u. a. wegen des starken individuellen Charakters der Design-Lösungen verzichtet. Da in der Entwicklung und Normung der verwandten Chipsicherungen umfangreiche - statistisch gesicherte - Versuchsergebnisse erarbeitet wurden, kann die statistische Absicherung der Schutzkonzepte auf zukünftige individuelle Lösungen verlagert werden.

Mit Abschluß des Projektes werden die beteiligten Firmen daher Beratung und Unterstützung zur Realisierung eines ökologisch effizienten und individualisierten Überschutz anbieten.

8 Literaturverzeichnis

- Ada 08 Adam, J.; PCB-Design-Tipp: Strombelastbarkeit von Leiterbahnen, Firma Flomerics, 2008
- Bax 50 Baxter, H. W.; Electric Fuses, Verlag E. Arnold, London 1950
- Ehr 98 Ehrhardt, A.; Schaltverhalten von Sicherungen bei kleinen Überlastströmen unter besonderer Berücksichtigung des Wiederzündens, Diss. TU-Ilmenau, VDE-Verlag, Berlin 1998
- Hoc 85 Hochhaus, H.; Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Schaltlichtbögen und Isolierstoffwänden, Diss. TU Braunschweig, 1985
- Hof 86 Hofmann, M.; Experimentelle und rechnerische Untersuchung von Ansprechkennlinien und Alterungsvorgängen bei Sicherungsschmelzleitern, Diss. TU-Braunschweig, 1986
- Hus 88 Huschka, M.; Einführung in die Multilayer-Preßtechnik, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau 1988
- Joh 82 Johann, H.; Elektrische Schmelzsicherungen für Niederspannung, Springer-Verlag, Berlin 1982
- Kle 82 Klepp, G.; Über das Abschmelzverhalten von Sicherungsschmelzleitern im Überlastbereich, Diss. TU-Braunschweig, 1982
- Kra 06 Kramer, Hans-Lukas; Ökologische Bewertung von Elektronik-Komponenten und bestückten Leiterplatten, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Departement Umweltwissenschaften, 2006
- Lin 01 Lindmayer, M.; Die Anwendung der Allgemeinen Transport-Differentialgleichung in Simulationen der Schaltgerätetechnik, TU-Braunschweig, 2001
- Mey 06 Meyer, G. J.; Zur Theorie der Abschmelzsicherungen, Verlag R. Oldenburg, Berlin 1906
- Rei 94 Reichelt, H. J.; Technologie der Geräteschutz-Sicherungseinsätze, Firmenschrift Wickmann, Witten 1994
- Sch 03 Schulz, T.; Grundsatzuntersuchungen zum Temperaturverhalten elektrischer Leitungen und deren Schutzelemente auf Schmelzleiter Basis in Kfz-Bordnetzen, VDI-Verlag Nr. 534, Düsseldorf 2003

Wic 00 Überstromschutz Katalog, Firmenschrift Wickmann, Witten 2000

Patentschriften

- Patent PCT
„WO 99/12178“ *„ An electrical fuse element (1), which comprise a substrate (4) with two contacts.....“*
- Patent PCT
“WO 99/16097” *„ In an electrical fuse element (1), comprising a substrate (2) with contacts (11) arranged on two opposite sides.....“*
- Patent
DE 101 50 027 C1 *„ Ein Dickschicht-Sicherungselement weist ein Schmelzleiterelement,.....“*
- Offenlegungsschrift DE 3044711
A1 *„Schmelzsicherung, bestehend aus einem Substrat und einem aufgedruckten Schmelzleiter mit einer Verengung der Leiterbreite zur Bildung einer Schmelzstelle,....“*

Weitere Veröffentlichungen

Applikationsschrift AP8155 Firma:Polar Instruments Ltd, 2010

PER 99 PERFAG3C – Specification for Multilayer Boards, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau 1999

Studien

RBE 10 RBEEngineering; Abschlußbericht zum Thema „Approbierbarkeit einer Leiterbahnsicherung“, Dortmund 2010

ANNEX

Abschlußbericht zur Untersuchung „Approbierbarkeit einer Leiterbahnsicherung“