

Marc Sauter

**Automatisierungsgraderhöhung im Fertigungs-  
prozess von PV-Wechselrichtern**

Bachelorarbeit zur Erlangung  
des akademischen Grades

**Bachelor of Engineering (B.Eng.)**

vorgelegt am 18.09.2014

Matrikelnummer 26359

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Viehmann  
Fachhochschule Nordhausen  
Zweitgutachter: Dipl.-Ing. Jens Friebe  
SMA Solar Technology AG





## Sperrvermerk

Die vorliegende Bachelorarbeit enthält interne, vertrauliche Informationen der SMA Solar Technology AG, Niestetal.

Die Bachelorarbeit darf, beginnend mit ihrem Abgabedatum, innerhalb der ersten vier Jahre nur dem Erst- und Zweitgutachter und weiteren Gutachtern, soweit es im Rahmen der Prüfungsordnung erforderlich ist, sowie befugten Mitgliedern des Prüfungsausschusses zugänglich gemacht werden. Die Weitergabe und Verwertung des Inhaltes der Arbeit und eventuell beiliegender Zeichnungen und Daten insgesamt oder in Teilen ist grundsätzlich untersagt. Es dürfen keinerlei Kopien oder Abschriften – auch nicht in digitaler Form – gefertigt werden. Ausnahmen bedürfen der schriftlichen Genehmigung durch SMA.

### **SMA Solar Technology AG**

Sonnenallee 1

34266 Niestetal

Tel.: +49 561 9522-0

Fax.: +49 561 9522-100

E-Mail: [info@SMA.de](mailto:info@SMA.de)

Internet: [www.SMA.de](http://www.SMA.de)

# Abstrakt

PV-Wechselrichter sind leistungselektronische Geräte, die mit einer hohen Effizienz Gleichstrom zu Wechselstrom konvertieren. Sie müssen über einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren funktionsfähig bleiben. Trotz der hohen Nachfrage der Geräte auf dem Weltmarkt werden eingesetzte Bauelemente teilweise noch von Hand auf die Leiterplatte bestückt.

In dieser Bachelorarbeit soll geklärt werden, in wie fern der verstärkte Einsatz einer Automatisierungslösung umsetzbar ist.

## *Schlagworte:*

- Solarwechselrichter
- Oberflächenmontage
- Aufbau- und Verbindungstechnik
- Durchsteckmontage
- Fertigungsprozess
- Beschleunigter Lebensdauertest
- Automatisierungsgrad
- Niedrigschmelzende Lotpaste
- Reflow-Löten
- Widerstandsdimensionierung

# Abstract

PV-inverters are power electronic devices which are capable of converting direct current to alternating current with high efficiency. They are required to last more than 20 years of lifetime. In spite of their high demand worldwide, some electronic components are still being placed on printed circuit boards by hand.

Within this bachelor's thesis it will be shown, in what extend it is possible to increase the degree of automation.

## *Keywords:*

- solar inverter
- power electronics packaging
- manufacturing process
- degree of automation
- reflow soldering
- surface-mount technology
- through-hole technology
- accelerated life testing
- low temperature solder paste
- dimensioning of a resistor

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>viii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>x</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 Aufbau und Funktion des Wechselrichters . . . . .	2
2.2 Prozessablauf der Elektronikfertigung . . . . .	4
2.3 Montagekonzepte für elektronische Bauelemente . . . . .	6
2.3.1 Durchsteckmontage . . . . .	8
2.3.2 Oberflächenmontage . . . . .	10
<b>3 Anforderungen an die SMT-Umsetzung</b>	<b>12</b>
3.1 RoHS II-Konformität . . . . .	12
3.2 Gesamtkosten für Bauteil und Montage . . . . .	13
3.3 Prozessfähigkeit mit dem gewählten Reflow-Lötprofil . . . . .	14
3.4 Prozessierbarkeit durch die vorhandenen Bestückungsautomaten . . . . .	15
<b>4 THT-Komponenten und Analyse möglicher SMT-Alternativen</b>	<b>16</b>
4.1 Passive Bauelemente . . . . .	17
4.1.1 Elektrolytkondensatoren . . . . .	17
4.1.2 Folienkondensatoren . . . . .	22
4.1.3 Transformatoren . . . . .	26
4.1.4 Speicherdrosseln . . . . .	27
4.1.5 EMV-Drosseln . . . . .	28
4.1.6 Widerstände . . . . .	28

4.2	Aktive Bauelemente und Sensorik . . . . .	30
4.2.1	Halbleitermodul . . . . .	30
4.2.2	Relais . . . . .	31
4.2.3	Stromsensoren . . . . .	32
4.3	Verbindungstechnik . . . . .	33
4.3.1	Anschlussbuchsen . . . . .	33
4.3.2	RJ45-Buchse . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Dimensionierung und Validierung der Einsatzfähigkeit eines Widerstandes</b>	<b>35</b>
5.1	Theoretische Vorbetrachtung . . . . .	35
5.1.1	Impulsbelastbarkeit . . . . .	35
5.1.2	Begrenzung des maximalen Eingangsstroms . . . . .	36
5.1.3	Ausreichende Wärmeabfuhr bei Dauerlast . . . . .	36
5.2	Dimensionierung des Widerstandes . . . . .	37
5.3	Layouterstellung einer Testleiterplatte . . . . .	39
5.4	Durchführung des Tests und Fazit . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>46</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>48</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>53</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau eines transformatorlosen String-Wechselrichters und dessen Integration in ein Niederspannungsnetz, in Anlehnung an [3]	2
2.2	Prozessschritte der Wechselrichterfertigung	4
2.3	Siebdruck der Lotpaste [7]	5
2.4	Tape & Reel Packaging [8]	5
2.5	Bestückungskopf SpeedStar [8]	6
2.6	Wellenlötvorgang [10]	6
2.7	Eigenschaften einer Automatisierungslösung [2]	7
2.8	Betriebswirtschaftliches Einsparpotenzial durch Outsourcing [2]	7
2.9	THT-Leiterplatte [14]	9
2.10	THR-Prozess [15]	9
2.11	Weltmarkt Halbleiter nach [16]	10
2.12	SMT-Leiterplatte [17]	10
3.1	Lötprofil nach IPC/JEDEC J-STD-020D.1 [22]	14
4.1	Kapazitätswerte der Elkos EEVEB2G330M	19
4.2	ESR-Werte der Elkos EEVEB2G330M	20
4.3	Spulenkörper [27]	26
4.4	Miniaturisierung induktiver Bauelemente [2]	26
4.5	Schutzwiderstände vor dem Brückengleichrichter	29
4.6	Vergleich ausgewählter Halbleitereigenschaften von Si, SiC und GaN [28]	31
4.7	AVX 70-9296-001-113-006 [19]	33
4.8	Zierick 1280 [19]	33
5.1	Layout der unbestückten Testleiterplatte	40
5.2	Thermografie der Leiterplatte bei $P_{V,RZI2} = 2202,23 \text{ mW}$	42
5.3	Thermografie der Leiterplatte bei $P_{V,RZI1} = 3046,505 \text{ mW}$	43
5.4	Temperaturvergleich RZI2 mit Vergussmasse (oben) und RZI7 (unten)	45



# Tabellenverzeichnis

4.1	Spektrum umzusetzender THT-Komponenten . . . . .	16
4.2	Elektrolytkondensatoren . . . . .	21
4.3	SMT-Alternativen für Folienkondensatoren auf DC-Seite . . . . .	25
4.4	SMT-Alternativen für Folienkondensatoren auf AC-Seite . . . . .	25
4.5	Transformatoren . . . . .	27
4.6	Speicherdrosseln . . . . .	27
4.7	EMV-Drosseln . . . . .	28
4.8	Schutzwiderstände . . . . .	29
4.9	Halbleitermodul . . . . .	30
4.10	Relais . . . . .	32
4.11	Stromsensoren 25A . . . . .	32
4.12	DI-Stromsensor 50A . . . . .	33
4.13	Anschlussbuchsen . . . . .	34
4.14	RJ45-Buchse . . . . .	34
5.1	Konzepte zur Abführung der Verlustleistung . . . . .	40
5.2	Widerstände . . . . .	45
6.1	Ergebnisse der Analyse . . . . .	46
A.1	Kapazitätsmessungen des Elko-Lebensdauertests aus Kapitel 4.1.1 . . . . .	49
A.2	ESR-Messungen des Elko-Lebensdauertests aus Kapitel 4.1.1 . . . . .	50
A.3	Messreihe 1 des Praxistests aus Kapitel 5.4 . . . . .	51
A.4	Messreihe 2 des Praxistests aus Kapitel 5.4 . . . . .	52

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AC	Alternating current
AOI	Automatische optische Inspektion
DC	Direct current
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ESL	Equivalent series inductance
ESR	Equivalent series resistance
FR	Flame retardant
GaN	Galliumnitrid
MLCC	Multi layer ceramic capacitor
MPP	Maximum power point
PCB	Printed circuit board
PV	Photovoltaik
RoHS	Restriction of (the use of certain) Hazardous Substances
Si	Silizium
SiC	Siliziumcarbid
SMD	Surface-mounted device
SMT	Surface-mount technology
THD	Through-hole device
THR	Through-hole reflow
THT	Through-hole technology
UL	Underwriters Laboratories Inc.
VIA	Vertical interconnect access
WBG	Wide band-gap
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

# Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
$A_{\text{Cu}}$	Kupferfläche	$\text{mm}^2$
$A_{\text{Lot}}$	Lotdepotfläche	$\text{mm}^2$
$C$	Kapazität	F
$h_{\text{max}}$	Maximal erlaubte Höhe eines SMT-Bauelementes	mm
$I_{\text{N}}$	Nennstrom	A
$I_{\Delta\text{N}}$	Differenz-Nennstrom, effektiv	A
$I_{\text{PN}}$	Primärnennstrom, effektiv	A
$L$	Induktivität	mH
$m_{\text{max}}$	Maximal erlaubtes Gewicht eines SMT-Bauelementes	g
$P_{70}$	Nennleistung bei 70 °C Umgebungstemperatur	W
$R$	Ohmscher Widerstand	$\Omega$
$R_{\text{FSM}}$	Widerstand zur Begrenzung einer 6 kV Spannung	$\Omega$
$R_{\text{th}}$	Thermischer Widerstand eines Körpers	K/W
$U_{\text{AC}}$	AC-Spannungsfestigkeit	V
$U_{\text{DC}}$	DC-Spannungsfestigkeit	V
$X_{\Delta}$	Messgenauigkeit bei $T_{\text{A}}=25\text{ °C}$ , bezogen auf $I_{\Delta\text{N}}$	%
$X_{\text{PN}}$	Messgenauigkeit bei $T_{\text{A}}=25\text{ °C}$ , bezogen auf $I_{\text{PN}}$	%
$\Sigma_{\text{ist}}$	Bestehende THT-Komponenten eines Bauelementtyps	1

# 1 Einleitung

Als Teil einer dezentralen Energiewandlungsanlage werden an Kleinstwechselrichter der Photovoltaik enorme Anforderungen gestellt. Die leistungselektronischen Geräte müssen den klimatischen und rechtlichen Bedingungen des jeweiligen Einsatzortes angepasst sein, anwendungsgerechte Informations- und Kommunikationsschnittstellen bereitstellen sowie eine hohe Zuverlässigkeit in ihrer Funktion über mehr als zwei Jahrzehnte aufweisen. Die nachhaltige Steigerung der Effizienz dieser photovoltaischen Systeme erfordert laufende technische Innovationen. Demgegenüber sind Unternehmen mit Produktionsstandorten in Hochlohnländern der Herausforderung ausgesetzt, die Wettbewerbsfähigkeit ihrer Produkte durch eine stetige Reduktion des Ressourceneinsatzes entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu sichern [1][2].

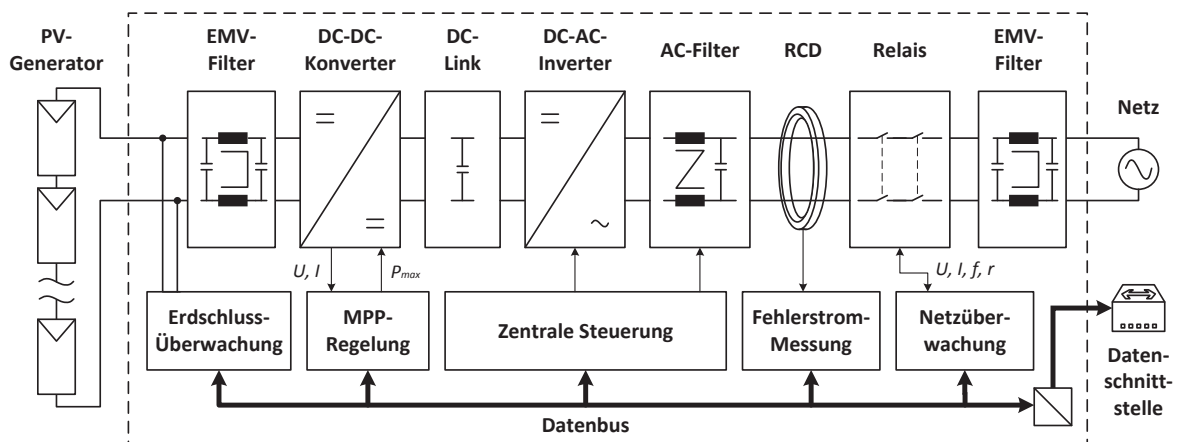
Eine Chance der langfristigen Kostensenkung bietet eine Erhöhung des Automatisierungsgrades in der Fertigung der leistungselektronischen Baugruppen [2]. Innerhalb dieser Arbeit soll für einen String-Wechselrichter der Leistungsklasse von 2,25 kVA die Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik weiterentwickelt werden, wobei ein maximal möglicher Anteil an oberflächenmontierbaren SMT-Bauelementen und weitgehender Verzicht auf manuell zu bestückende THT-Bauelemente angestrebt werden. Die Applikation gilt als schwierig, da einige Komponenten einer hohen elektrischen und thermischen Belastung ausgesetzt sind und eine Umsetzung in kompakte Bauformen ohne ausreichende Validierung die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems gefährden kann [2].

Nach der Definition der Anforderungen an die SMT-Umsetzung und einer Analyse des Referenzgerätes wird unter Einbezug der Freigabekriterien des Lötprozesses von SMA ein Konzept erarbeitet, mithilfe dessen sich die Prozesskosten der Serienfertigung senken lassen. Potenziell einsetzbare Bauelemente werden nach technisch-wirtschaftlichen Kriterien bestimmt sowie dem Aufwand und Risiko ihrer Umsetzung gegenübergestellt. Anschließend wird die Dimensionierung und praktische Validierung der Einsatzfähigkeit eines Schutzwiderstandes vorgenommen. An einigen Stellen wird ein Ausblick auf weitere Optimierungspotenziale der Aufbau- und Verbindungstechnik gegeben.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Aufbau und Funktion des Wechselrichters

Wechselrichter kleiner Leistungsklassen ermöglichen in Kombination mit einem Photovoltaikgenerator eine lokale Bereitstellung von elektrischer Energie sowie eine netzkonforme Einspeisung von Leistung in ein öffentliches Versorgungsnetz auf Niederspannungsebene. Anhand Abbildung 2.1 soll der prinzipielle Aufbau dieser Anordnung erklärt werden.



**Abb. 2.1:** Aufbau eines transformatorlosen String-Wechselrichters und dessen Integration in ein Niederspannungsnetz, in Anlehnung an [3]

Photovoltaikgeneratoren bestehen aus zusammengeschalteten Solarmodulen und wandeln unter Nutzung des inneren photovoltaischen Effektes einfallendes Sonnenlicht in elektrischen Gleichstrom um. Durch Oberschwingungen hervorgerufene Ströme am Eingang des Wechselrichters müssen anschließend mithilfe einer EMV-Filterung beseitigt werden. Eine Anhebung des Gleichspannungsniveaus im DC-DC-Konverter und eine MPP-Regelung stellen sicher, dass der PV-Generator für unterschiedliche Lastfälle stets im Punkt maximaler Leistung betrieben werden kann und einen hohen elektrischen Wirkungsgrad bietet. Der Vorgang bedingt eine kontinuierliche Messung des Eingangsstroms und der Eingangsspannung sowie eine Zwischenspeicherung von Energie in einem Kondensator. Um auf das schwankende Einstrahlungsangebot der Sonne und Teilverschattungen reagieren

zu können, sind üblicherweise Eingangsspannungen im Bereich zwischen 120 V und 600 V zulässig. Mithilfe eines DC-AC-Inverters wird nach einer erneuten Filterung eine Wechselspannung ausgegeben. Leistungshalbleiter invertieren jede zweite Halbwelle dieses Signals und erzeugen eine sinusförmige Wechselspannung der Frequenz von 50 Hz bzw. 60 Hz, die anschließend von ihren Oberschwingungsanteilen befreit wird. Die elektrische Energie gilt nun als netzkonform und kann dem Niederspannungsnetz mit bis zu 2,25 kW reiner Wirkleistung zugeführt werden. Zur Blindleistungskompensation ist sowohl ein kapazitiver als auch induktiver Blindleistungsbetrieb bis  $\cos \varphi = 0,8$  möglich. Mithilfe des Datenbusses sind nicht nur Fernwartungen, sondern auch Aussagen über den Ertrag der Anlage durch statistische Auswertungen möglich.

Verzichtet man bei dem Design eines Kleinstwechselrichters auf einen Transformator, ergeben sich einige bedeutende Vorteile. Prinzipiell erübrigt sich eine elektronische Baugruppe im Leistungspfad, was sich positiv auf den elektrischen Wirkungsgrad des Gerätes auswirkt. Weiterhin sinken die Materialkosten, das Gesamtgewicht und die Abmessungen erheblich, da die hohen Volumenanteile des gewickelten Kupferdrahtes und des Eisenkernes entfallen. Allerdings bedingt das Konzept des transformatorlosen Wechselrichters besondere Anforderungen an die Systemtechnik, von denen die wichtigsten exemplarisch für die gegebene Leistungsklasse am Anlagenstandort Deutschland erläutert werden sollen.

Die Geräte müssen eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung nach DIN EN 62109-2 zum Schutz von Personen durch Ableitströme aufweisen [4], da wegen des Verzichts auf einen Transformator keine galvanische Trennung der Ein- und Ausgangsseite gegeben ist. Weiterhin schreiben die Bestimmungen der VDE-AR-N 4105 die Möglichkeit der Blindleistungsbereitstellung und stufenlosen Trennung der Last vor, um die Netzstabilität und langfristig sichere Integration von dezentralen Energiewandlungsanlagen sicherzustellen [5]. Von einigen Schaltungsteilen des transformatorlosen Wechselrichters geht aufgrund des Taktverhaltens eine hohe elektromagnetische Störung aus, weswegen eine weitere besondere Anforderung in der Begrenzung der Oberschwingungsströme nach DIN EN 61000-3-2 [6] liegt. Weitere normative Bestimmungen sind durch Querverweise in den genannten Dokumenten auffindbar.

## 2.2 Prozessablauf der Elektronikfertigung

Die Serienfertigung der elektronischen Baugruppe eines Wechselrichters gliedert sich in grundsätzlich drei Phasen. Zuerst erfolgt eine vollautomatisierte Verarbeitung von SMT-Bauteilen, die beidseitig auf einer Leiterplatte angebracht werden. In der zweiten Phase werden THT-Bauteile in die Schaltungen integriert, indem ihre Anschlussdrähte in Durchkontaktierungen der Leiterplatte fixiert werden. Abschließend wird die Baugruppe einem Funktionstest unterzogen und es wird eine Beschichtung mit einem Schutzlack vorgenommen. Der Prozessablauf ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

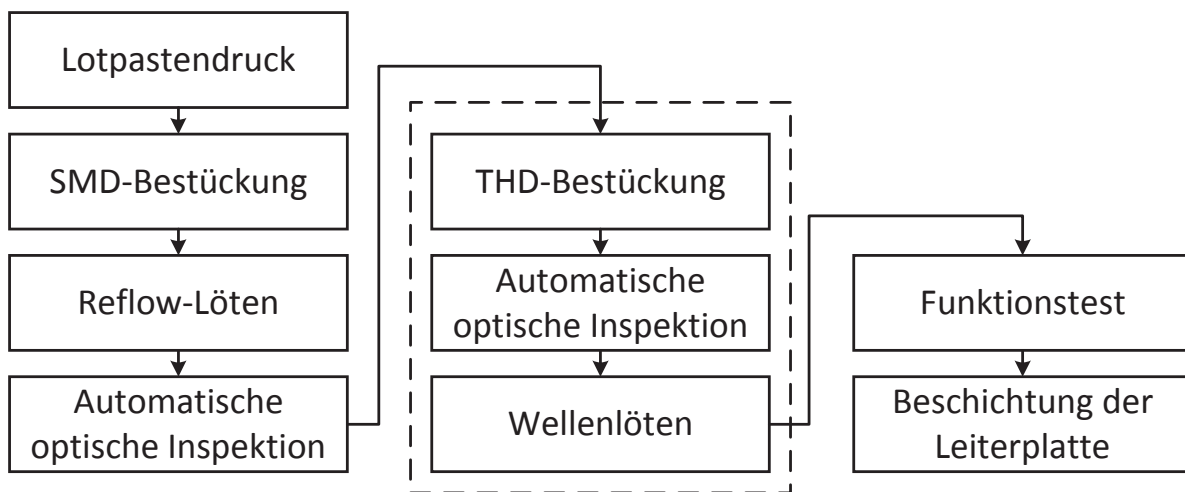
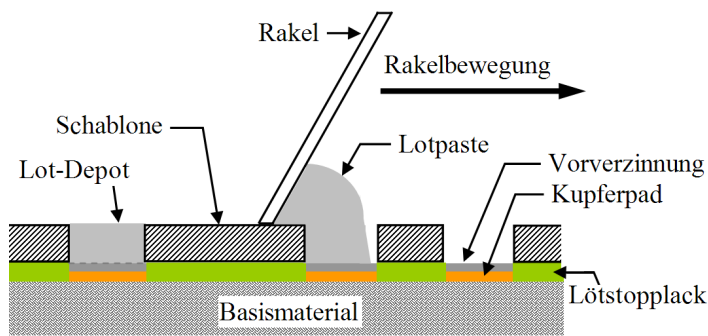


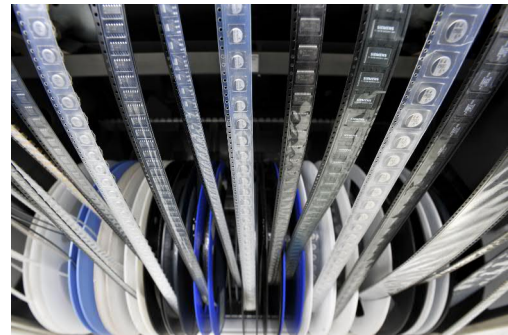
Abb. 2.2: Prozessschritte der Wechselrichterfertigung

Zur Vorbereitung auf die SMD-Bestückung werden auf die Leiterplatte Lotpastendepots gedruckt. Diese dienen einerseits der Fixierung der Bauteile an der gewünschten Stelle und ermöglichen andererseits durch den im Anschluss folgenden Lötvorgang eine mechanisch und elektrisch sichere Verbindung des Bauteils [7]. Auf die Leiterplatte wird eine vorgefertigte Schablone gesetzt. Anschließend wird die aus kleinen Kügelchen bestehende, pastöse Masse mit einem Raket in die Aussparungen der Schablone eingebracht. Das so genannte Siebdruckverfahren bzw. stencil printing ist in Abbildung 2.3 illustriert.

Die Platzierung der oberflächenmontierbaren Bauteile auf die Lotdepots erfolgt vollautomatisiert in einer Linie von SMD-Bestückungsautomaten. Übliche Auslieferungsformen von SMT-Bauteilen sind Paletten (Tray), Kunststoff-Stangen (Tube), Bänder (Tape) oder Schüttgut (Bulk) [2], wobei sich wegen ihrer hohen Flexibilität sowohl Paletten als auch Blistergurte durchgesetzt haben. Letztgenannte werden auch als Tape & Reel bezeichnet und sind in Abbildung 2.4 dargestellt.



**Abb. 2.3:** Siebdruck der Lotpaste [7]



**Abb. 2.4:** Tape & Reel Packaging [8]

Zur Ermöglichung von schnellen Rüstwechseln werden mehrere Blistergurte in Feederwechselwagen zusammengefasst. Das modulare System kann mit dem Bestückungsautomaten eine kontaktlose Strom- und Datenverbindung aufbauen, sodass der Produktionsprozess nicht unterbrochen werden muss. Die Bauteilzuführung zum Bestückungskopf erfolgt über separat einsetzbare Magazine.

Es kommen verschiedene Bestückungsköpfe zur Positionierung der SMT-Bauteile zum Einsatz. Darunter ist ein SIPLACE SpeedStar, der nach dem Collect&Place-Prinzip arbeitet und eine Bestückungsleistung von bis zu 30.000 Bauelementen pro Stunde aufweist [9]. Der Bestückungskopf nimmt pro Durchgang 20 SMT-Bauteile auf, ehe er sie auf die vorgesehenen Lotdepots setzt. Die dazu verwendeten Sauggreifer sind modular auswechselbar und ermöglichen eine Verarbeitung eines großen Bauteilspektrums. Auch zunehmend kleinere Packungsgrößen können damit durch den Gerätehersteller unterstützt werden. Eine Momentaufnahme eines Bestückungsvorgangs zeigt Abbildung 2.5.

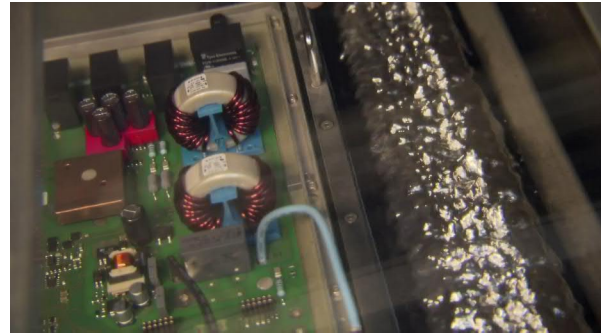
Der nächste Schritt im Fertigungsprozess der elektronischen Baugruppe ist das Reflow-Löten, bei dem die zuvor aufgetragenen Lötspots aufgeschmolzen werden. Dazu ist es notwendig, den Schmelzpunkt der derzeit eingesetzten Lotpaste von 217 °C durch gezielten Energieeintrag zu übersteigen, ohne die Bauelemente zu beschädigen. Die bei der SMA Solar Technology AG verwendeten Lötverfahren sind das Konvektions- und das Kondensationslöten, denen unterschiedliche Prinzipien und Temperaturprofile zu Grunde liegen. Auf die Spezifikation der Lötprofile wird in Kapitel 3.3 genauer Bezug genommen.

Nach dem ersten Lötvorgang erfolgt eine automatische optische Inspektion der Baugruppe. Durch einen Abgleich der Baugruppe mit zuvor angefertigten Referenzbildern ermöglicht die AOI eine kostengünstige Reduktion der Fehlerquote von Serienfertigungen. Auf die Qualitätskontrolle folgt die manuelle Montage bedrahteter Bauelemente an bis zu zehn Montageplätzen.





**Abb. 2.5:** Bestückungskopf SpeedStar [8]



**Abb. 2.6:** Wellenlötvorgang [10]

Bei der Handbestückung kann es vorkommen, dass Bauelemente fehlerhaft platziert werden. Daher ist eine zweite AOI erforderlich, sodass Fehler aufgedeckt und manuell korrigiert werden können. Anschließend wird die Unterseite der Baugruppe mit Flussmittel besprüht, ehe sie nach dem Durchlaufen einer Heizzone die in Abbildung 2.6 gezeigte Lötwellen erreicht. Die Kontaktstellen an der Unterseite der Leiterplatte werden durch das flüssige Lot benetzt und erstarren nach dem Durchlaufen einer Kühlzone zu einer festen Verbindung [11].

In der letzten Phase erfolgt ein elektrischer Test der Baugruppe. Im Vorfeld wird für jedes Wechselrichtermodell ein Prüfadapter mit mehreren hundert Kontaktnadeln angefertigt, sodass die Funktionsfähigkeit mit einem sehr geringen Aufwand überprüft werden kann. Ein abschließend auf die Leiterplatte aufgebrachtener Schutzlack erhöht die Langzeitzuverlässigkeit des Wechselrichters, indem die Legierungen der Kontaktstellen und kleinere Bauelemente versiegelt werden.

Auf dem beigelegtem Datenträger dieser Arbeit ist weiteres Bild- und Videomaterial zu dem Fertigungsprozess der SMA Solar Technology AG enthalten.

### 2.3 Montagekonzepte für elektronische Bauelemente

Die Montage von elektronischen Bauelementen erstreckt sich von einer ausschließlich manuellen Handhabung durch geschulte Mitarbeiter bis hin zu vollautomatisierten Fertigungslinien. Die hybride Montage beschreibt ein Spektrum der sehr häufig verwendeten Mischform und wird auch bei der SMA Solar Technology AG eingesetzt. Als Hilfsmittel zur Identifizierung der wichtigsten Parameter bei der Bestimmung einer wirtschaftlich optimalen Automatisierungslösung dient Abbildung 2.7.

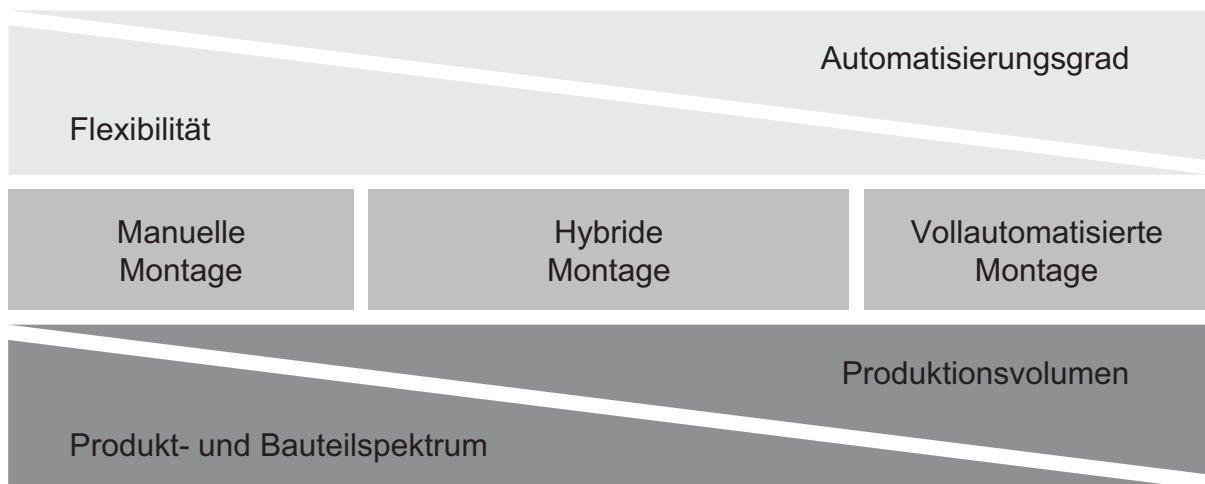


Abb. 2.7: Eigenschaften einer Automatisierungslösung [2]

Eine manuelle Montage zeichnet sich hauptsächlich durch die Möglichkeit aus, Bauelemente flexibel verarbeiten zu können. In Ländern mit einem hohen Lohnniveau eignet sich diese Montageart seit einigen Jahren allerdings nur für die Fertigung von Geräten mit kleinen Stückzahlen. Mit einem steigenden Produktionsvolumen wird sie unwirtschaftlich, da der notwendige Personaleinsatz zunehmend höhere Kosten verursacht.

Zur Senkung der Lohnkosten bietet es sich grundsätzlich an, die gesamte Produktion oder Teile davon in ein Land mit niedrigeren Lohnkosten zu verlagern. Wie vereinfacht in Abbildung 2.8 dargestellt ist, kann dies eine Reihe von positiven Effekten für die temporäre Gewinnerzielung von Unternehmen haben.

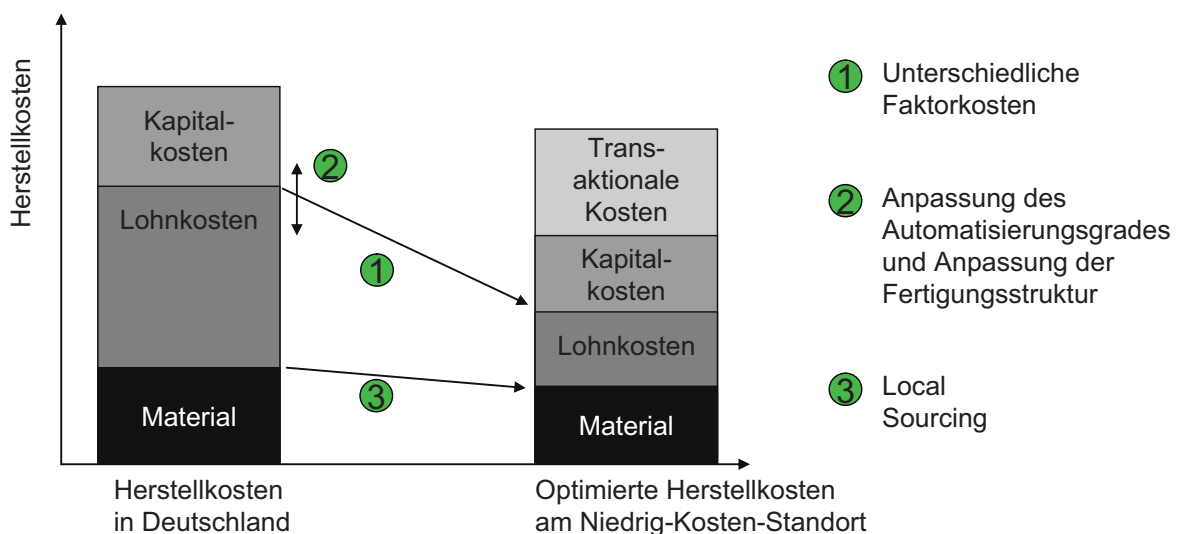


Abb. 2.8: Betriebswirtschaftliches Einsparpotenzial durch Outsourcing [2]

Neben einer erheblichen Senkung der Lohnkosten können sich auch Einsparungen bei dem Bezug von notwendigem Material und Kapital ergeben. Allerdings werden Teile dieser Einsparungen durch sogenannte Transaktionskosten aufgebraucht. Beispiele dafür sind Kosten, die für das Finden eines Transaktionspartners und der Ausgestaltung und Überprüfung der Einhaltung von Verträgen aufkommen [12].

Das Problem dieser Rechnung ist, dass die tatsächliche Höhe von Transaktionskosten aufgrund von Informationsdefiziten bis heute gar nicht genau beziffert werden kann. Mitunter aufgrund von Entscheidungen, die auf Basis dieser sehr statisch geprägten Rechnung gefällt wurden, hat die europäische Wirtschaft ein Drittel ihrer industriellen Wertschöpfung in den vergangenen 40 Jahren verloren [13].

Im Sinne einer nachhaltigen Wertschöpfung erscheint es alternativlos, die vollautomatisierte Montage anzustreben und den Aufwand der manuellen Verarbeitungsschritte auf ein Minimum zu reduzieren. Konkret bedeutet dies eine Entschlankung des Produktionsprozesses, sodass die in Abbildung 2.2 mittig gekennzeichneten Teilschritte entfallen.

Um bewerten zu können, in wie weit sich ein höherer Automatisierungsgrad erreichen lässt, müssen nun die wichtigsten Montagekonzepte von Bauelementen erläutert werden.

### 2.3.1 Durchsteckmontage

Die ersten elektronischen Schaltungen bestanden aus wenigen, frei verdrahteten elektronischen Bauelementen, die auf einer Trägerplatte angeordnet waren. Aus der sehr einfachen Verbindungstechnik gingen Lochrasterplatinen und später die Leiterplatte hervor, durch die es nun möglich war, komplexer werdende elektronische Schaltungen kompakter aufzubauen. Die synonym verwendete Abkürzung PCB geht aus der englischen Bezeichnung printed circuit board hervor. Um elektronische Bauelemente effektiv einzusetzen war es fortan notwendig, diese mit Anschlusspins auszustatten [7]. In Abbildung 2.9 ist ein Ausschnitt einer fertiggestellten Leiterplatte dargestellt.

Je nach Anwendung kommen bei der SMA Solar Technology AG unterschiedliche Leiterplatten zum Einsatz. Sie bestehen in der Regel aus zwei bis sechs Lagen und sind bei vergleichsweise geringem Gewicht sehr robust, da als Basismaterial in Epoxidharz getränktes Glasfasergewebe verwendet wird. Bezeichnet nach ihrem Grad der Flammenhemmung hat sich die FR4-Leiterplatte als Industriestandard für viele Anwendungen der Leistungselektronik durchgesetzt [7].

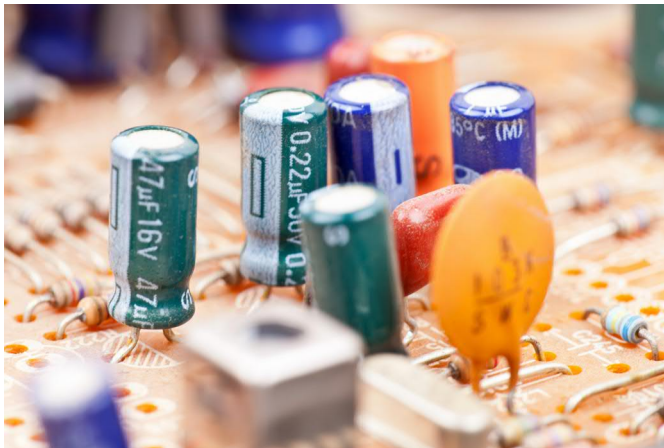


Abb. 2.9: THT-Leiterplatte [14]

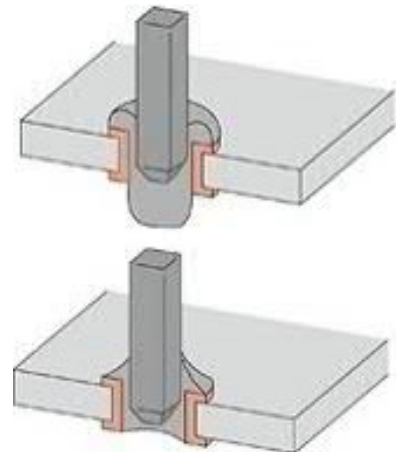


Abb. 2.10: THR-Prozess [15]

Nach einem Zuschnitt auf die gewünschte Größe wird die Leiterplatte mit Bohrlöchern versehen. Durch eine anschließende chemische Verkupferung der Bohrlöcher kann eine Kontaktierung zwischen den Leiterplattenebenen erreicht werden. Eine hohe Kontaktqualität wird durch zusätzliche Ätz- und Reinigungsprozesse erreicht [11]. Der englische Begriff für die Durchkontaktierungen lautet Vertical interconnect access (VIA). Die Integration von bedrahteten Bauelementen in die elektronische Schaltung auf einer Leiterplatte wird als Durchsteckmontage oder through-hole technology (THT) bezeichnet, während die auf diese Weise montierbaren Bauelemente als through-hole devices (THD) bekannt sind.

Trotz der stetigen Miniaturisierung elektronischer Baugruppen und der Verdrängung von Gehäuseformen mit Anschlussdrähten finden THT-Bauelemente heute dennoch für viele Anwendungen der Leistungselektronik Verwendung. Ein Grund dafür ist, dass eine Zwischenspeicherung von Energie in elektrischen und magnetischen Feldern notwendig ist und diese Fähigkeit bei gleichem Taktverhalten und sinkender Baugröße physikalisch schwerer zu erreichen ist [2]. Auch weitere Anforderungen an die Bauelemente wie die Impulsfestigkeit und die Stromtragfähigkeit können durch großvolumige Ausführungen einfacher erfüllt werden. Einerseits können die Kontaktabstände im Innern der Bauelemente größer gewählt werden, andererseits begünstigt die bedrahtete Bauform die Wärmeübertragung, da eine größere Wirkfläche für freie Konvektion und Wärmestrahlung vorhanden ist.

Als ein Mittelweg zwischen guten elektrischen und thermischen Eigenschaften bestehender Bauelemente und wirtschaftlichen Material- und Bestückungskosten hat sich eine Montageart mit der Bezeichnung through-hole reflow (THR) etabliert, mithilfe dessen bedrahtete Bauelemente direkt im Reflow-Prozess verarbeitet werden können. Dazu werden auch Durchkontaktierungen beim Lotpastendruck mit der viskosen Zinn-Legierung gefüllt, um später die Pins der Bauelemente fixieren zu können. Die Bestückungsart wird daher auch

Pin-in-Paste genannt. Abbildung 2.10 zeigt eine schematische Darstellung. Allerdings sind THR-Bauelemente durch die Verarbeitung im Reflowofen einer deutlich erhöhten Temperaturbelastung ausgesetzt, als im Wellenlötprozess verarbeitete THT-Bauelemente. Dies kann zu einer irreversiblen Beschädigung der Bauelemente und damit zu einem Ausfall des Wechselrichters führen. Deshalb muss, basierend auf einer nachgewiesenen erhöhten Temperaturbeständigkeit durch einen Hersteller, die Anwendung eines Bauteils in jedem Fall durch Lebensdauertests verifiziert werden.

### 2.3.2 Oberflächenmontage

Als Folge der wachsenden Anforderungen an die Elektronik und der Einführung von Mikroprozessoren in den 1970er Jahren gewann die Entwicklung von Bauelementen kompakterer Baugrößen zunehmend an Bedeutung [11]. Einen Beleg für die stetige Miniatürisierung in der Elektronik liefert eine vom ZVEI publizierte Trendanalyse [16]. Wie Abbildung 2.11 zeigt, kann der Weltmarkt für Halbleiter seit mehr als zwei Jahrzehnten hohe Zuwächse verzeichnen. In der Grafik sind die gleitenden Dreimonatsdurchschnitte der weltweiten Umsätze zwischen 1990 und 2013 dargestellt. Seit etwa zehn Jahren kann von einer reifen Industrie gesprochen werden, für die weiterhin mit einer jährlichen Wachstumsrate von ca. 4 % gerechnet wird [16].

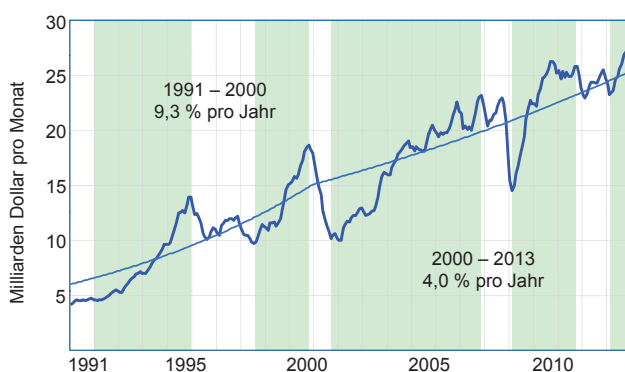


Abb. 2.11: Weltmarkt Halbleiter nach [16]

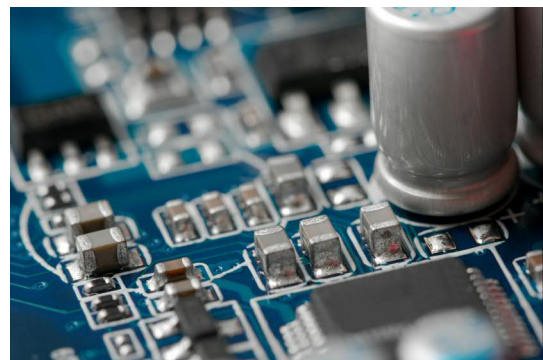


Abb. 2.12: SMT-Leiterplatte [17]

Da Elektronik seit Jahren zunehmend in mobilen Anwendungen verschiedener Branchen Verwendung findet, lässt sich aus dem positiven Trend der Umsatzzahlen von Halbleitern indirekt auf eine seit Jahren vermehrte Verwendung von SMT-Bauelementen schließen. Einer der bedeutendsten Vorteile der auch als surface mount technology (SMT) bezeichneten Montageart ist die hohe Packungsdichte der Bauelemente. Dadurch kann ein kompakter und niederinduktiver Aufbau von elektronischen Schaltungen realisiert werden.

Durch den Verzicht auf Anschlusspins der Bauelemente werden parasitäre Effekte minimiert [18]. Ebenso sinkt auch die Anzahl der notwendigen Bohrungen der Leiterplatte [2]. SMT-Bauelemente weisen in vielen Fällen sogar eine höhere mechanische Belastbarkeit auf, wenn sie keiner direkten Krafteinwirkung ausgesetzt sind. Dies wird bei Vibrations-tests im Vergleich zu großvolumigen THT-Bauelementen deutlich. In Abbildung 2.12 ist ein Ausschnitt einer SMT-Leiterplatte dargestellt.

Aus fertigungstechnischer Sicht eröffnete die Einführung von surface-mounted devices (SMD) die Möglichkeit der vollautomatisierten Bestückung, durch die Baugruppen insbesondere in Industrieländern kostengünstiger und schneller gefertigt werden können. Da die Koordinaten von Lotdepots bereits in dem Layout einer Leiterplatte exakt festgelegt werden, kann die zurückzulegende Strecke des Feeders eines SMT-Bestückungsautomaten durch mathematische Verfahren auf ein Minimum reduziert werden. Aus diesem Grund wird eine Automatisierungslösung in Präzision und Geschwindigkeit jeder manuellen Bestückung überlegen sein.

Eine bedeutende Tatsache für die Applikation in Wechselrichtern der SMA Solar Technology AG ist, dass die für die Verarbeitung von SMT-Bauteilen notwendigen Automatisierungssysteme bereits in den Produktionsstandorten vorhanden sind. Dadurch sind mit einer Umsetzung verbleibender bedrahteter Bauelemente in kompakte Bauformen keine hohen Investitionen zu erwarten.

Das Einsparpotenzial durch den Wegfall der Teilschritte der manuellen Verarbeitung wurde in einer Voruntersuchung auf bis zu 10 % der Gesamtwechselrichterkosten geschätzt [19]. Die Verifizierung dieser Aussage ist das Ziel der vorliegenden Abschlussarbeit.

# 3 Anforderungen an die SMT-Umsetzung

Um geeignete Alternativen für THT-Bauteile finden zu können, müssen zuvor einige Anforderungen an die Umsetzung definiert und priorisiert werden. Zunächst findet die Auswahl nur anhand der in folgender Liste dargestellten Kriterien statt. Dadurch ist es möglich, die Anzahl der zur Auswahl stehenden Bauelemente einzugrenzen und einen praktischen Vergleich durchzuführen. Die vier Kriterien lauten:

- RoHS II-Konformität
- Gesamtkosten für Bauteil und Montage
- Prozessfähigkeit mit dem gewählten Reflow-Lötprofil
- Prozessierbarkeit durch die vorhandenen Bestückungsautomaten

## 3.1 RoHS II-Konformität

Alle Bauelemente müssen mit der europäischen Richtlinie 2011/65/EU harmonisieren, die eine Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffen vorschreibt [20]. Die auch als RoHS II bekannte Richtlinie nennt unter den in Anhang II genannten sechs Stoffen unter anderem Blei, das aufgrund seiner niedrigen Liquidustemperatur sehr oft in Lotpasten der Elektronikindustrie verwendet wurde. Die Richtlinie liegt bereits in der zweiten Fassung vor und regelt unter anderem in Art. 4 Abs. 1, dass elektronische Geräte, zu denen auch Wechselrichter zählen, nicht vertrieben werden dürfen, sofern einer der genannten Stoffe einen Grenzwert überschreitet. Dies gilt auch für Importe in die Europäische Union. Nach Art. 9 lit. b RoHS II heißt es, dass „nur mit dieser Richtlinie konforme Elektro- oder Elektronikgeräte in der Union in Verkehr“ gelangen dürfen [20].

Auch in Asien, Nord- und Südamerika und Australien gibt es ähnliche Bestimmungen oder zumindest Bestrebungen, die Schadstoffbelastung durch Elektronikprodukte weiter zu verringern sowie die Recyclbarkeit ihrer Bestandteile zu erhöhen [21].

Deshalb werden Bauelemente ohne entsprechende Zertifizierung bei der Auswahl von Alternativkomponenten nicht berücksichtigt. Auch wenn viele Hersteller auf die Richtlinie mit einer Anpassung ihres Produktportfolios reagiert haben, sind nicht alle auf dem Markt verfügbaren Bauelemente mit der RoHS II konform.

## 3.2 Gesamtkosten für Bauteil und Montage

Um die Wirtschaftlichkeit bei der Auswahl von Alternativkomponenten sicherzustellen, werden die Gesamtkosten für Bauteil und Montage als zweites Kriterium eingeführt.

Die Materialpreise werden aus öffentlich einsehbaren Datenbanken verschiedener Distributoren entnommen und auf eine Stückzahl von 100.000 normiert. Dies geschieht durch eine einfache lineare Extrapolation, wobei Stückpreise für 500 bis 2000 Bauelemente pauschal mit dem Faktor 0,5 multipliziert werden.

Die Angabe der durchschnittlichen Kosten der automatisierten Montage liegt einem Literaturwert zugrunde. Vereinfachend werden die Bestückungskosten der manuellen Montage auf den zehnfachen Wert angenommen.

- Durchschnittlich 0,055 € pro Bauelement für die automatisierte Montage [2]
- Durchschnittlich 0,55 € pro Bauelement für die manuelle Montage

Insgesamt wird diese vereinfachte Kostenbetrachtung für eine erste Potenzialanalyse als hinreichend genau bewertet. Es sollte allerdings bedacht werden, dass es sich um durchschnittliche Werte handelt, die nur bei einer Serienfertigung von Baugruppen gültig sind. Verbleiben beispielsweise zehn THT-Komponenten, kann nicht auf den Wellenlötprozess verzichtet werden und die Aussagekraft der Angaben verliert an Wert.

Aus Geheimhaltungsgründen muss in dieser Arbeit auf die Angabe von Absolutpreisen verzichtet werden. Stattdessen wird jeweils das relative Einsparpotenzial angegeben.



### 3.3 Prozessfähigkeit mit dem gewählten Reflow-Lötprofil

Das Kriterium der RoHS II-Konformität wirkt sich direkt auf die Anforderungen an das Reflow-Lötprofil aus. Hier ist es zunächst wichtig, auf die verwendete Lotpaste mit der Kurzbezeichnung SAC305 einzugehen. Die vollständige Zusammensetzung der aus Zinn, Silber und Kupfer bestehenden Paste lautet  $\text{Sn}96,5\text{Ag}3,0\text{Cu}0,5$ . Sie wird seit Bekanntgabe der ersten RoHS-Richtlinie in vielen Prozessen der Elektronikfertigung eingesetzt und gilt als Industriestandard für das sogenannte bleifreie Löten. Für die weitere Betrachtung der Aufbau- und Verbindungstechnik ist dies ein sehr wichtiger Aspekt, da der Schmelzpunkt eines bleihaltigen Lotes bei etwa  $183^\circ\text{C}$  liegt, während im Lötoven nun mindestens  $217^\circ\text{C}$  herrschen müssen, ehe sich die pastöse Lotlegierung verflüssigen kann. Die Freigabekriterien der SMA Solar Technology AG fordern sogar eine Spitzentemperatur von mindestens  $240^\circ\text{C}$ . Aus der erhöhten Prozesstemperatur resultiert eine erhöhte Belastung von Bauteilen, die insbesondere kleinvolumige Bauteile mit einer geringen Wärmekapazität betrifft. Die Lotpaste muss an allen Verbindungspunkten aufschmelzen, ohne dass die elektronischen Bauteile beschädigt werden. Ferner ist gefordert, dass eine Baugruppe nach einem natürlichen Abkühlvorgang diesen Prozess ein weiteres Mal durchlaufen kann. Das in Abbildung 3.1 dargestellte Lötprofil aus der Norm IPC/JEDEC J-STD-020D.1 bildet die Grundlage für die Einstellung des Reflow-Ofens.

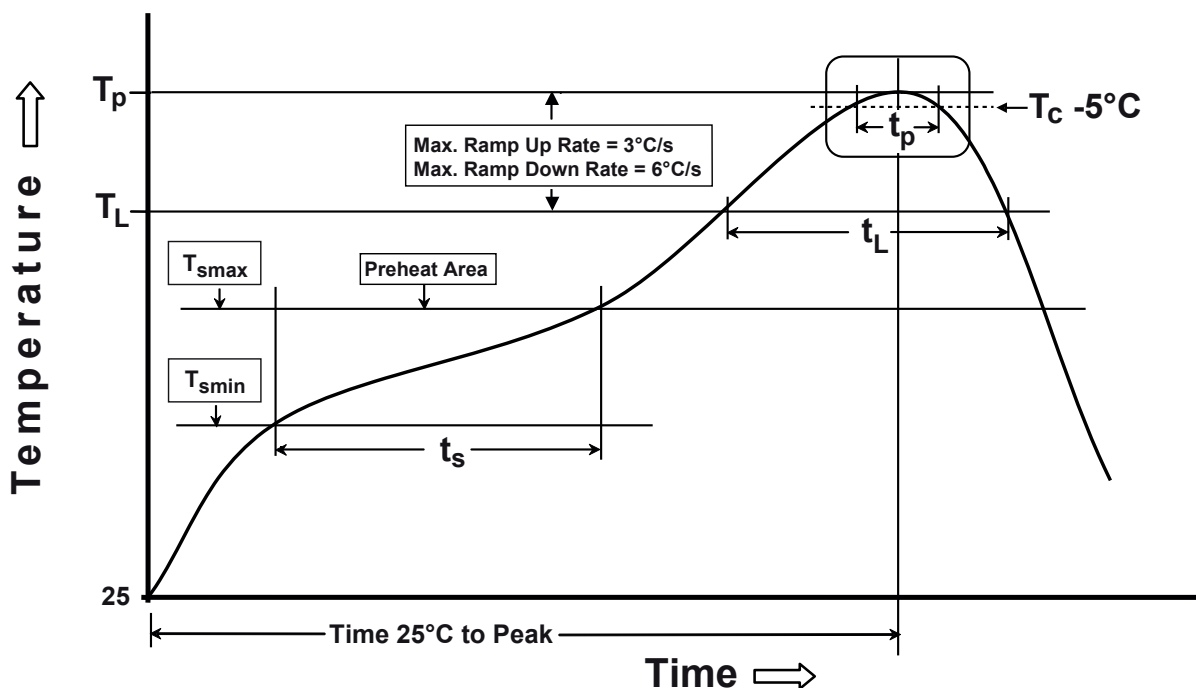


Abb. 3.1: Lötprofil nach IPC/JEDEC J-STD-020D.1 [22]

Neben der Maximaltemperatur sind die Temperaturgradienten des Reflow-Prozess weitere wichtige Kenngrößen. Um die thermischen Spannungen der Bauelemente zu minimieren, müssen die Parameter für die Erwärmungs- und Abkühlphase sehr aufwändig eingestellt werden. Die Temperaturgradienten haben wiederum Auswirkung auf die Dauer des Prozesses und den Zeitpunkt, an dem kein Energieeintrag mehr auf die Baugruppe einwirkt.

Prinzipiell ist eine Anpassung dieses Lötprofils möglich, wenn dadurch ein höherer Automatisierungsgrad und damit eine Verarbeitung weiterer Bauelemente im SMT-Prozess zu erwarten ist. Aufgrund der Komplexität der Einstellung wird allerdings zunächst von einer Anpassung des Lötprofils abgesehen. Eine Chance auf Senkung der notwendigen Maximaltemperatur im Lötprozess bieten insbesondere auf Indium und Bismuth basierende niedrigschmelzende Pasten.

## 3.4 Prozessierbarkeit durch die vorhandenen Bestückungsautomaten

Die Fertigungslinie der SMA Solar Technology AG ist bereits nach dem Stand der Technik optimiert und sollte nur in gut begründeten Fällen verändert werden. Eine Anschaffung eines alternativen Bestückkopfes, der ein größeres Bauteilspektrum verarbeiten kann, ist aufgrund seiner hohen Investitionskosten und geringeren Bestückungsleistung für diese Anwendung nicht wirtschaftlich. Im Vorfeld wird davon ausgegangen, dass nur ein Bauelement aufgrund seiner Größe manuell verarbeitet werden muss. Deshalb werden die Vorgaben der Fertigungsabteilung als viertes primäres Kriterium zur Auswahl von SMT-Komponenten ausgewählt.

- Maximal erlaubte Höhe:  $h_{\max} = 25 \text{ mm}$
- Maximales erlaubtes Gewicht:  $m_{\max} = 100 \text{ g}$

## 4 THT-Komponenten und Analyse möglicher SMT-Alternativen

Mithilfe der in Kapitel 3 aufgeführten Kriterien soll nun überprüft werden, ob eine vollständige SMT-Umsetzung der elektrischen Bauelemente des Wechselrichters möglich ist. Dazu werden alle verbleibenden THT-Komponenten in die drei Kategorien „Passive Bauelemente“, „Aktive Bauelemente und Sensorik“ und „Verbindungstechnik“ aufgeteilt und anschließend in chronologischer Reihenfolge bearbeitet. Die Bauelemente sind mit Angabe der Anzahl ihrer Varianten und ihrer Gesamtanzahl in Tabelle 4.1 dargestellt.

**Tab. 4.1:** Spektrum umzusetzender THT-Komponenten

Bauelement	Varianten	$\sum_{\text{ist}}$
Elektrolytkondensatoren	2	5
Folienkondensatoren	16	25
Transformatoren	3	3
Speicherdrosseln	2	2
EMV-Drosseln	1	3
Widerstände	1	2
Halbleitermodul	1	1
Relais	2	3
Stromsensoren	2	2
Anschlussbuchsen	1	8
RJ45-Buchse	1	1
	32	55

## 4.1 Passive Bauelemente

### 4.1.1 Elektrolytkondensatoren

Nach der Art des Dielektrikums und des Elektrolyts unterscheidet man zwischen verschiedenen Typen von Elektrolytkondensatoren. Aus physikalischen Gründen können für höhere Spannungen allerdings nur Aluminium-Elkos mit flüssigen Elektrolyten verwendet werden [2]. Eine Anpassung dieser Komponenten in kompakte Bauformen wurde für den vorliegenden Wechselrichter bisher nicht realisiert, da der Siedepunkt derzeit verfügbarer Elektrolyte während des Reflow-Prozesses durch die notwendige Spitzentemperatur des Lötprofils deutlich überschritten werden müsste [2]. Der daraus resultierende thermische Stress kann zu einem Verdampfen des Elektrolyts und damit zu einem frühzeitigen Ausfall des Bauelements führen [2]. Zudem können durch das Degradationsverhalten verzögerte Ausfälle auftreten, wenn durch den Lötvorgang irreversible Schäden im Inneren des Bauteils verursacht wurden.

Elektrolytkondensatoren werden als elektrischer Energiespeicher im Spannungszwischenkreis eingesetzt, da sie neben einer hohen Spannungsbelastbarkeit zudem hohe Kapazitätswerte bieten können. Zur Umsetzung der bestehenden vier 320  $\mu\text{F}$  Elkos wurden zuvor die genauen Anforderungen an die Strom- und Spannungsbelastbarkeit definiert. In einer Abschlussarbeit konnte eine mittlere Zwischenkreisspannung von 350 V ermittelt werden, die mit einem Spannungsrippel von 50 V überlagert ist [23]. Somit müssen einzusetzende Bauelemente eine Spannungsbelastbarkeit von mindestens 400 V aufweisen. Der notwendige Kapazitätswert für den Zwischenkreis wurde weiterhin auf 900  $\mu\text{F}$  bestimmt [23]. Anhand dieser Spezifikationen wurde bereits ein Vergleich prinzipiell einsetzbarer SMT-Komponenten vorgenommen, wobei das Modell EEVEB2G330M mit einer Nennkapazität von 33  $\mu\text{F}$  auch experimentell auf seine Einsatzfähigkeit hin untersucht wurde.

Ein Elektrolytkondensator dieses Typs wurde mithilfe eines Vektor-Netzwerkanalysators vermessen. Aus dem ermittelten Phasengang konnte man schließen, dass der Kondensator erst ab einer Frequenz von etwa 1,2 MHz induktives Verhalten zeigt [19]. Da für die Wandlerstufen derzeit eine Schaltfrequenz von 50 kHz angestrebt ist, kann die äquivalente Serieninduktivität (ESL) für diese Betrachtung vernachlässigt werden. Das Ersatzschaltbild des Kondensators vereinfacht sich damit zu einer Reihenschaltung aus der Kapazität und dem äquivalenten Serienwiderstand (ESR).

Um eine Aussagekraft über die Prozessfähigkeit treffen zu können, wurden insgesamt vier Testleiterplatten angefertigt und die Komponenten mithilfe des Konvektionsverfahrens

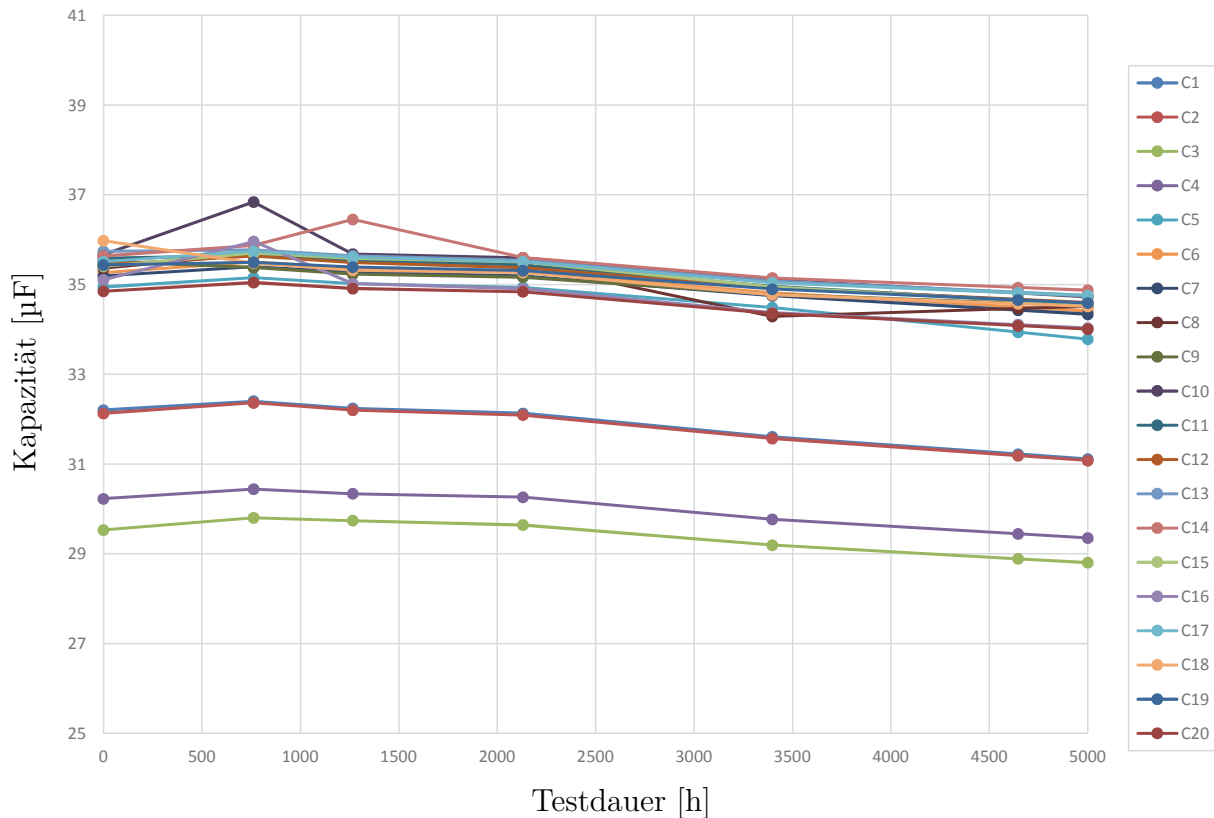
außerhalb der Spezifikation verlötet. Nach dem Lötvorgang konnte im Allgemeinen eine leichte Senkung der Kapazität gemessen werden [19]. Diese Feststellung deckt sich mit den Testergebnissen, die seitens des Herstellers an einer innerhalb der Spezifikation gelöteten Baugruppe gemessen wurden. Damit wurde zunächst von einer generellen Einsatzfähigkeit dieses Bauelementes ausgegangen.

Durch einen beschleunigten Lebensdauertest sollte für das Bauelement EEVEB2G330M nun überprüft werden, innerhalb welchem Zeitraum eine Funktionsfähigkeit für den realen Anwendungsfall gegeben ist. Dazu wurden der Kapazitätswert und der ESR von zwanzig Elektrolytkondensatoren, aufgeteilt auf zwei Testleiterplatten, zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen. Die Werte wurden mithilfe der LCR-Messbrücke Hameg HM8118 bei einer Messfrequenz von 120 Hz unter folgenden Bedingungen ermittelt.

- Temperaturbelastung: 102 °C
- Spannungsbelastung: 400 V
- Stromrippelbelastung: 0,24 A (Effektivwert)
- Netzfrequenz: 50 Hz
- Testdauer: 5000 h

Es konnte bis zum Ende dieser Abschlussarbeit die angestrebte Testdauer nicht erreicht werden. Um dennoch eine quantitative Aussage über den Kapazitätsverlust und den Anstieg des äquivalenten Serienwiderstandes treffen zu können, wurde daher der jeweils letzte Messpunkt durch eine einfache lineare Extrapolation auf Basis der zwei zuvor aufgenommenen Werte bestimmt. In späteren Betrachtungen sollte bedacht werden, dass nicht zwingend ein fortlaufend linearer Verlauf dieser Werte vorliegen muss. Angesichts des betreffenden Zeitintervalls von etwa 7 % der Gesamttestdauer wird der Einsatz dieser Maßnahme für eine erste Potenzialanalyse allerdings als hinreichend genau eingeschätzt.

Laut Datenblatt ist der Einsatz des Elektrolytkondensators mit einem um bis zu 20 % abweichenden Wert der Nennkapazität einsetzbar. Dies entspricht einem Intervall von 26,40  $\mu\text{F}$  bis 39,60  $\mu\text{F}$ . Wie Abbildung 4.1 zeigt, liegen alle Kapazitätswerte der Versuchsreihe innerhalb dieser Spezifikation. Für die zwanzig Elektrolytkondensatoren wurden Werte zwischen 28,80  $\mu\text{F}$  und 36,84  $\mu\text{F}$  ermittelt. Von diesem linearen negativen Trend abweichende Messpunkte werden als Messungenauigkeiten gewertet, die keinen bedeutenden Einfluss auf das Gesamtbild haben. Im Allgemeinen konnte hinsichtlich des Kapazitätswertes ein normales Degradationsverhalten nachgewiesen werden.



**Abb. 4.1:** Kapazitätswerte der Elkos EEVEB2G330M

Weiterhin gibt der Hersteller im Datenblatt an, dass der Verlustwinkel  $\tan \delta$  des Elektrolytkondensators mithilfe der Nennkapazität zu berechnen ist und nicht mehr als den zweifachen Ursprungswert annehmen darf. Unter Berücksichtigung des vereinfachten Ersatzschaltbildes ist damit eine Verdopplung des äquivalenten Serienwiderstandes zulässig.

Der Verlauf der gemessenen Werte des ESR ist in Abbildung 4.2 grafisch dargestellt. Für 19 Elektrolytkondensatoren konnte eine Erhöhung des äquivalenten Serienwiderstandes um Faktor 1,73 bis 1,9 errechnet werden, hingegen weist Kondensator C18 eine Erhöhung des ESR um Faktor 2,4 auf. Bei diesem Prüfling kam es zum Testbeginn vermutlich zu einem Messfehler, da bis zum zweiten Messpunkt ein großer Kapazitätssprung vorliegt und danach ein normales Degradationsverhalten aufgezeichnet wurde. Die Annahme kann allerdings nicht eindeutig belegt werden. Auch vom linearen Trend abweichende Werte zwischen dem zweiten und dem vierten Testzeitpunkt werden als Messfehler gewertet, die beispielsweise aufgrund einer schwankenden Umgebungstemperatur im Prüflabor aufgetreten sein können. Auf die hohe Temperaturempfindlichkeit bei der Messung des ESR wurde bereits in der vorangehenden Masterarbeit hingewiesen [19].

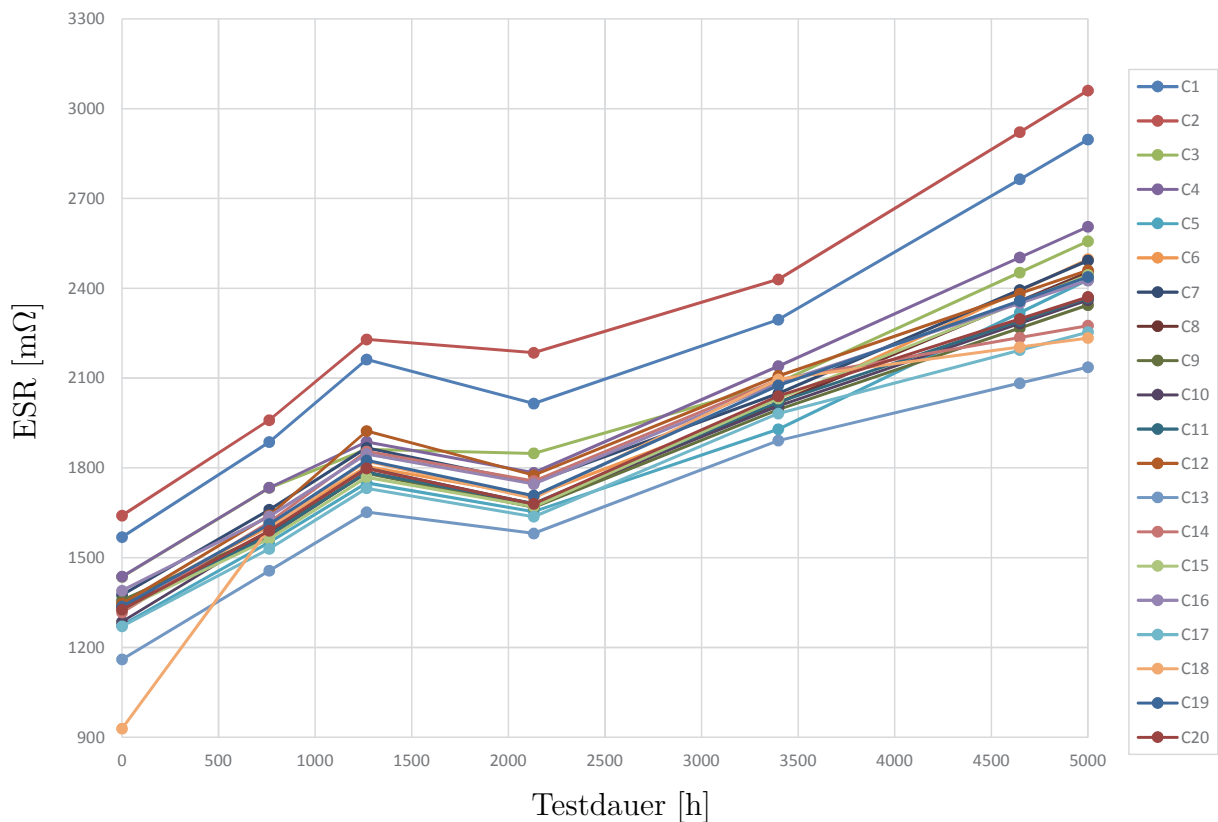


Abb. 4.2: ESR-Werte der Elkos EEVEB2G330M

Im Allgemeinen kann festgehalten werden, dass die getesteten Elektrolytkondensatoren einer hohen Belastung ausgesetzt waren aber der Anstieg der äquivalenten Serienwiderstände für die meisten Prüflinge innerhalb der Spezifikation liegt.

Unter Berücksichtigung beider Parameteränderungen kann für den Elektrolytkondensator EEVEB2G330M eine prinzipielle Einsatzfähigkeit ausgesprochen werden. Allerdings sollte der Energieeintrag auf die Baugruppe während des Lötprozesses weiterhin gesenkt werden. Ideal wäre eine Lötung der Bauelemente innerhalb der Herstellerspezifikation. Darüber hinaus bedarf es einer Begrenzung der Eingangsspannung auf 400 V, sodass der thermische Stress nicht infolge einer erhöhten Dauerleistung weiter ansteigt. Konkret gibt der Hersteller eine maximale Betriebstemperatur von 105 °C an. Denen in Tabelle 4.2 aufgelisteten vier Elektrolytkondensatoren mit einem Kapazitätswert von 320  $\mu\text{F}$  werden somit 30 SMT-Elkos des Typs EEVEB2G330M gegenübergestellt.

Auch für das Beispiel eines im Bordnetz eingesetzten Elektrolytkondensators mit einer Kapazität von 10  $\mu\text{F}$  konnte im Vorfeld eine SMT-Komponente desselben Herstellers ermittelt werden. Gegenüber der Anforderung kann dieses Bauelement eine um 50 V erhöhte Spannungsbelastbarkeit aufweisen, was sich positiv auf das Degradationsverhalten

auswirken kann. Aufgrund der geringen thermischen Masse ist der Elektrolytkondensator allerdings einem sehr hohen thermischen Stress während des Reflow-Prozesses ausgesetzt. In einem ersten Lötvorgang führte dies zu einem Aufblähen des Bechers, sodass der Elko eine konvexe Wölbung ausbildete [19]. Es muss daher noch geprüft werden, ob das Bauteil geeignet ist. Dieser Elektrolytkondensator wird ebenfalls in Tabelle 4.2 aufgenommen.

**Tab. 4.2:** Elektrolytkondensatoren

Typ	Bezeichnung	$C$ [ $\mu\text{F}$ ]	$U_{\text{AC}}$ [V]	Anzahl	Kostenfaktor
	500VXG320MCOLSN35X45	320	500	4	1,00
SMT	EEVEB2G330M	33	400	30	0,90
	EEUED2W100	10	450	1	1,00
SMT	EEVEB2W100SM	10	450	1	0,95

Unter Berücksichtigung der Serienfertigung wird von einer Umsetzung der Elektrolytkondensatoren des Zwischenkreises und des Bordnetzes in SMT-Bauformen zu etwa gleichen Kosten gegenüber der derzeitigen Lösung ausgegangen.

In einem angepassten Lötvorgang wurde mit einer Anordnung der Zwischenkreis-Elkos am Rand der Leiterplatte bereits ein deutlich schnelleres Aufschmelzen der kritischen Lötstellen erzielt. Infolge einer optimierten Konvektion konnte die Verweildauer der Baugruppe oberhalb einer Temperatur von  $200^\circ\text{C}$  um Faktor 1,4 gesenkt werden. Die in der Spezifikation geforderte Verweildauer wurde trotzdem um Faktor fünf überschritten [19]. Eine verstärkte Konvektion an der Unterseite der Leiterplatte birgt ein weiteres Potenzial, die Temperaturbelastung kleinvolumiger Bauelemente weiter zu reduzieren [2][19].

Eine darüber hinaus vielversprechende Methode zur Senkung des Energieeintrags auf die gesamte Baugruppe ist die bereits erwähnte Verwendung einer niedrigschmelzenden Lotpaste [24]. Speziell zur Verbindung der Zwischenkreis-Elkos ist auch der Einsatz von reaktiver Lotpaste denkbar. Durch eine exotherme Reaktion in Nähe der Lötstelle kann zusätzlich thermische Energie selektiv bereitgestellt werden [25]. Diese Verfahren wurden aus Zeitgründen nicht mehr im Rahmen dieser Arbeit näher untersucht.



### 4.1.2 Folienkondensatoren

Folienkondensatoren zeichnen sich durch eine hohe Impuls- und Strombelastbarkeit aus und können in Schaltungen mit einer hohen Taktfrequenz sowohl zur Spannungsstützung als auch zur Dämpfung von hochfrequenten Störsignalen verwendet werden [19]. Die bestehenden Folkos in der Schaltung des Wechselrichters sind einer Spannungsbelastbarkeit von mindestens 250 V ausgesetzt und können aus physikalischen Gründen derzeit nicht durch SMT-Varianten ausgetauscht werden. Stattdessen bieten sich in den meisten Fällen Keramikvielschichtkondensatoren in Chipbauform (MLCC) als Alternative an, die eine ähnliche Bauelementcharakteristik aufweisen. Zwei Typen von Folkos können darüber hinaus durch Keramikscheiben-Kondensatoren ersetzt werden. Eingebettet in einem SMT-Package eignen sie sich ebenfalls zur automatisierten Bestückung.

Die Impulsbelastbarkeit kann als Fähigkeit beschrieben werden, einer schnell auftretenden Spannungsänderung  $dU/dt$  zu widerstehen, ohne dass dies zu einem Ausfall des Kondensators führt. Entsprechend der internationalen Norm werden in der DIN EN 60384-1 eine X-Klasse für Kondensatoren zum Einsatz zwischen zwei Phasen bzw. einer Phase und einem Neutralleiter definiert. Weiterhin werden Kondensatoren, die zwischen einer Phase bzw. dem Neutralleiter und dem Schutzgehäuse verwendet werden, unter der Y-Klasse zusammengefasst [26]. Aufgrund des bereits vorliegenden Schaltplans sind für die Prüfung der SMT-Umsetzung allerdings nur die Unterklassen von Relevanz. Für Kondensatoren der X1- und X2-Klasse wird eine Impulsfestigkeit von bis zu 4 kV bzw. 2,5 kV gefordert, während für Y1- und Y2-Klassen doppelt so hohe zulässige Impulsspitzenspannungen bis 8 kV bzw. 5 kV definiert sind [26].

Durch eine geeignete Reihen- und Parallelschaltung von MLCCs können prinzipiell alle Folienkondensatoren ersetzt werden. Eine erhöhte Bauelementanzahl ist insbesondere aber auch mit einem Anstieg der Materialkosten, einem erhöhten Flächenbedarf auf der Leiterplatte und einer insgesamt erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit verbunden. Daher muss die SMT-Umsetzung im Einzelfall abgewogen werden. Vereinfachend gelten bei der Kombination von zwei idealen Kondensatoren folgende Regeln:

- Reihenschaltung: Aufwertung der X- oder Y-Klasse  
Verdopplung der Spannungsfestigkeit  
Halbierung der Gesamtkapazität
- Parallelschaltung: Verdopplung der Gesamtkapazität

Auf der DC-Seite der Schaltung befinden sich insgesamt sieben verschiedene Folienkondensatoren. Im Rahmen dieser Arbeit konnte lediglich für einen  $8\ \mu\text{F}$  Folko mit einer Spannungsbelastbarkeit von  $800\ \text{V}$  keine Alternative ermittelt werden. Die Kapazitätswerte von MLCCs mit einer solch hohen Anforderung an die Spannungsfestigkeit reichen derzeit nur knapp bis in den einstelligen Nanobereich.

Ein  $150\ \text{nF}$  Folko mit einer Spannungsfestigkeit von  $630\ \text{V}$  kann durch einen muRata Keramikkondensator mit der Bezeichnung GRM55DR72J154KW01L# ausgetauscht werden. Auch ein  $330\ \text{nF}$  sowie ein  $680\ \text{nF}$  Folienkondensator benötigen diese Anforderung an das Spannungsniveau. Beide können durch Verwendung eines MLCCs in Stackbauweise ersetzt werden, bei der zwei übereinander angeordnete Widerstände durch Metallstützen miteinander verbunden sind. Diese Bauform hat sich etabliert, um bei hohen Anforderungen an die Spannungsfestigkeit eine mechanische Entlastung des Bauelementes sowie eine Kapazitätserhöhung bieten zu können. Sowohl ein Kemet MLCC stack mit der Bezeichnung C2220C334MBR2C7289 als auch ein muRata MLCC stack mit der Bezeichnung KRM55TR72H334MH01# können für diese Umsetzung verwendet werden, wobei zur annähernden Erreichung des Kapazitätswertes von  $680\ \text{nF}$  eine Parallelschaltung von je zwei stacks notwendig ist. Die Komponentenpreise für die MLCCs in Stackbauweise werden aufgrund fehlender öffentlich einsehbarer Preise auf  $0,50\ \text{€}$  geschätzt.

Weiterhin kann ein  $22\ \text{nF}$  Folienkondensator mit einer Spannungsfestigkeit von  $1500\ \text{V}$  mit einem einzelnen Kemet C1210C223KFRACU Keramikkondensator umgesetzt werden. Auch ein  $2,2\ \text{nF}$  Folko kann mittels MLCCs umgesetzt werden. Hier ist zur Erreichung der Y1-Klasse eine Reihenschaltung aus je zwei  $4,7\ \text{nF}$  Bauelementen des Typs GA355DR7GF472KW01L# von muRata notwendig. Auf den hohen Wert der Spannungsfestigkeit von  $3000\ \text{V}$  des derzeit verwendeten Folko kann mit Erreichen der Y1-Klasse hingegen verzichtet werden. Weiterhin kann ein  $22\ \text{nF}$  Folko mit einer Spannungsbelastbarkeit von  $1000\ \text{V}$  durch einen im SMT-Package eingebetteten Keramikscheiben-Kondensator von Vishay mit der Bezeichnung 565R30GASS20 ersetzt werden. Die Kosten für ein SMT-Package werden pauschal auf  $0,10\ \text{€}$  geschätzt.

Auf der AC-Seite der Schaltung werden derzeit insgesamt acht verschiedene Typen von Folienkondensatoren verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit konnte für einen  $4,7\ \mu\text{F}$  Folko mit einer AC-Spannungsbelastbarkeit von  $440\ \text{V}$  keine Alternative gefunden werden. Auch für drei Typen von Folienkondensatoren mit einer Spannungsfestigkeit von  $440\ \text{V}$  und Kapazitätswerten von  $220\ \text{nF}$ ,  $330\ \text{nF}$  und  $470\ \text{nF}$  sind derzeit keine geeigneten SMT-Alternativen auf dem Markt verfügbar.

Durch eine Simulation wurde nachgewiesen, dass ein 4,7 nF Folienkondensator hinsichtlich seiner Spannungsfestigkeit von 300 V überdimensioniert ist [19]. Daher kann der muRata MLCC GA355DR7GF472KW01L# mit einem Kapazitätswert von 4,7 nF und einer Spannungsbelastbarkeit von 250 V eingesetzt werden. Weiterhin ist durch Parallelschaltung eine Umsetzung eines 2,2 nF Folkos möglich. Auch ein Vishay Keramikscheiben-Kondensator mit der Bezeichnung VY2682M59Y5US63V7 eignet sich als Ersatz eines Folienkondensators. Ebenso kann eine SMT-Umsetzung für einen 33 nF Folko mit einer Spannungsfestigkeit von 300 V durch den Einsatz des Vishay Keramikscheiben-Kondensators 565R30GASS33 erreicht werden. Allerdings ist hier durch eine Herstelleranfrage zu prüfen, ob dieser Kondensator auch für den AC-seitigen Einsatz geeignet ist. Für die beiden letztgenannten Alternativen werden die Kosten für ein SMT-Package erneut auf 0,10 € geschätzt.

Alle ermittelten SMT-Alternativen für Folienkondensatoren der DC- und AC-Seite der Schaltung des Wechselrichters sind in den Tabellen 4.3 und 4.4 dargestellt.

Es konnten für eine Vielzahl von Folienkondensatoren SMT-Alternativen gefunden werden, bei deren Umsetzung im Allgemeinen ein leichter Kostenvorteil zu erwarten ist. Ähnlich wie bei den Elektrolytkondensatoren sollte hier der Fokus der Umsetzung auf die technische Zuverlässigkeit gerichtet sein. Die bewährte Selbstheilfähigkeit von Folkos kann bei einem Ersatz durch Keramikkondensatoren nicht mehr genutzt werden. MLCCs sind auf der Leiterplatte ernstzunehmenden Biegekräften ausgesetzt und werden auch beim Bestückungsvorgang mechanisch beansprucht [2]. Aufgrund ihrer geringen thermischen Masse müssen sie weiterhin im Reflow-Prozess einer hohen thermischen Beanspruchung widerstehen. Im Betriebszustand sind sie schließlich einem hohen elektrischen Stress ausgesetzt und können insbesondere infolge einer Belastung aufgrund einer schnellen Spannungsänderung Risse ausbilden und zerstört werden [2]. Die Gefahr der Rissbildung des spröden Keramikmaterials kann allerdings durch eine stressreduzierende Anbindung und bauteilinterne Maßnahmen gesenkt werden [2].

Ist die Einsatzfähigkeit einzelner Bauelemente bedenklich, kann auf eine automatisierte Montage verbleibender Folienkondensatoren zurückgegriffen werden. Hier gilt die Anzahl verschiedener Bauelementtypen als ein entscheidender Faktor für die Wirtschaftlichkeit. Daher sollte auch geprüft werden, ob die drei Typen von Folkos auf der AC-Seite mit einer Spannungsfestigkeit von 440 V und Kapazitätswerten von 220 nF bis 470 nF möglicherweise auf ein Bauelementtyp mit einer Kapazität von 330 nF oder 220 nF reduziert werden können. Bei dieser Maßnahme besteht aber das Risiko einer abnehmenden Filterwirkung.

Tab. 4.3: SMT-Alternativen für Folienkondensatoren auf DC-Seite

Typ	Bezeichnung	$C$ [nF]	$U_{DC}$ [V]	Klasse	Anzahl	Kostenfaktor
MLCC	GRM55DR72J154KW01L#	150	630	–	1	0,46
MLCC stack	C2220C334MBR2C7289	330	630	–	1	0,76
	KRM55TR72J334MH01#	330	630	–	1	0,76
MLCC stack	C2220C334MBR2C7289	330	630	–	2	1,67
	KRM55TR72J334MH01#	330	630	–	2	1,67
MLCC	C1210C223KFRACU	22	1500	–	1	0,22
MLCC	GA355DR7GF472KW01L#	4,7	250	Y2	8	1,00
Ceramic Disk	565R30GASS20	20	3000	–	2	1,19

Tab. 4.4: SMT-Alternativen für Folienkondensatoren auf AC-Seite

Typ	Bezeichnung	$C$ [nF]	$U_{AC}$ [V]	Klasse	Anzahl	Kostenfaktor
MLCC	GA355DR7GF472KW01L#	4,7	250	Y2	4	1,00
MLCC	GA355DR7GF472KW01L#	4,7	250	Y2	1	0,50
Ceramic Disk	VY2682M59Y5US63V7	6,8	440	Y2	2	0,34
Ceramic Disk	565R30GASS33	33	–	–	2	0,98

### 4.1.3 Transformatoren

Im Wechselrichter werden insgesamt drei Transformatoren in THT-Bauformen eingesetzt. Sie bestehen aus einem Spulenkörper, auf dem zwei Kupferdrähte aufgewickelt werden. Meist finden weichmagnetische Ferritkerne Verwendung, die modular eingesetzt und durch Metallclips fixiert werden. Der Aufbau ist schematisch in Abbildung 4.3 dargestellt.

Induktive Bauelemente sind ähnlich wie Elektrolytkondensatoren an gewisse Mindestvolumina gebunden [2]. Wie bereits in Kapitel 3.4 beschrieben, fordert die automatisierte Montage allerdings eine Höchstgrenze an Gewicht und Baugröße der Komponenten. Dies kann entweder durch Verbesserung des Energiespeichervermögens eines Bauelementes oder durch Reduktion der zwischenzuspeichernden Energie durch Anpassung der Schaltung erreicht werden [2]. Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht kann insbesondere die Erhöhung der Schaltfrequenz zu einer signifikanten Reduktion der Baugröße induktiver Bauelemente beitragen. Dies wird exemplarisch anhand einer Drossel in Abbildung 4.4 gezeigt.

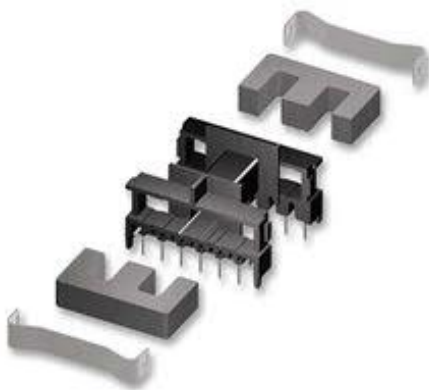


Abb. 4.3: Spulenkörper [27]

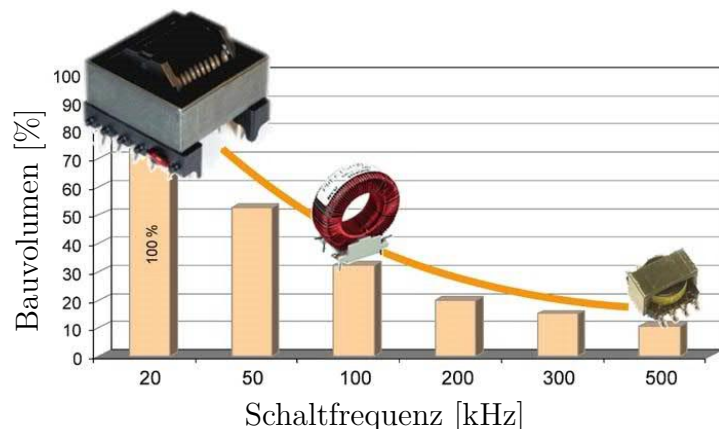


Abb. 4.4: Miniaturisierung induktiver Bauelemente [2]

Viele Voraussetzungen zur Reduktion der Baugröße wurden bereits im Vorfeld dieser Arbeit geschaffen. Um eine automatisierte Verarbeitung der Transformatoren zu ermöglichen, bedarf es lediglich einer Anpassung der Packages und der Validierung der Reflow-Prozessfähigkeit. Basierend auf dem Spulenkörper Epcos B66208B1110T001 können sowohl der Sperrwandler auf DC-Seite als auch der Bordnetz Trafo für die Oberflächenmontage umgesetzt werden. In einer ersten Kostenbetrachtung werden nur die Spulenkörper ohne Ferrit und ohne Wicklung betrachtet. In Hinblick auf ein vollständiges SMT-Bauelement ist insgesamt mit einer Kostenerhöhung gegenüber der derzeitigen Lösung zu rechnen. Durch eine Anpassentwicklung des Herstellers kann auch der Sperrwandler auf AC-Seite als SMT-Bauelement umgesetzt werden. Dazu sollten die Anschlusspins des

Packages um 90° gebogen werden, sodass sie auf den Lotdepots aufliegen können. Für diese Anpassung wird eine Kostenerhöhung von etwa 10 % erwartet. Die SMT-Alternativen sind in Tabelle 4.5 den ursprünglichen THT-Transformatoren gegenübergestellt.

**Tab. 4.5:** Transformatoren

Typ	Bezeichnung	Anzahl	Kostenfaktor
	Sperrwandler DC	1	1,00
SMT	B66208B1110T001	1	0,66
	Sperrwandler AC	1	1,00
SMT	Anpassentwicklung	1	0,66
	Bordnetz Trafo	1	1,00
SMT	B66208B1110T001	1	0,62

In allen drei Fällen besteht das Risiko, dass die Kupferwicklungen durch den Reflow-Prozess Schaden nehmen. Die Einsatzfähigkeit sollte praktisch nachgewiesen werden.

#### 4.1.4 Speicherdrosseln

Die in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Maßnahmen zur Erhöhung der Schaltfrequenz haben insbesondere auf die Speicherdrosseln einen großen Einfluss. Ursprünglich nahmen die AC- und DC-Drosseln sehr viel Platz in Anspruch und haben auch zu einer beachtlichen Erhöhung des Gesamtgewichts des Wechselrichters geführt. Durch eine langfristige Produktentwicklung und Anpassungen an der Schaltung konnte die AC-Drossel durch zwei und die DC-Drossel durch eine oberflächenmontierbare Speicherdrossel mit einem PTS34/19 Ferritkern ersetzt werden. Insgesamt wurde dadurch ein sehr hoher Kostenvorteil in Bezug auf die Gesamtwechselrichterkosten erzielt. Ein erster relativer Vergleich der Konzepte ist mithilfe der in Tabelle 4.6 dargestellten Werte möglich.

**Tab. 4.6:** Speicherdrosseln

Typ	Bezeichnung	Platzbedarf	Anzahl	Kostenfaktor
	AC-Drossel	sehr hoch	1	0,65
	DC-Drossel	sehr hoch	1	0,35
SMT	Drossel mit PTS34/19 Ferritkern	gering	3	0,56

### 4.1.5 EMV-Drosseln

Derzeit werden im Wechselrichter drei Ringkerndrosseln zur EMV-Filterung eingesetzt. Durch eine vorangehende Diplomarbeit konnte die stromkompensierte Drossel P0429NL des Herstellers Pulse Electronics bereits als mögliche SMT-Alternative ermittelt werden. Diese kann aufgrund ihrer Wicklungsanordnung zur Filterung von Gleichtakt-Störungen eingesetzt werden und weist auch bei einer Eingangsspannung des Wechselrichters von 600 V eine ausreichend hohe Isolationsfestigkeit auf [19]. Gegenüber der Ringkerndrossel ist für die SMT-Drossel allerdings ein um 300 mA geringerer Nennstrom angegeben, was im Betrieb zu einer geringfügigen Erwärmung des Bauelementes führen kann.

Als Alternative wird in Tabelle 4.7 daher auch die Drossel P0469NL derselben Serie aufgenommen. Diese bietet einen ausreichenden zulässigen Nennstrom, hingegen ist die Filterwirkung dieser Drossel geringer. Sollten beide Lösungen nicht direkt einsetzbar sein, empfiehlt sich die Verwendung der Drossel P0429NL und die Abführung von thermischer Energie durch ein passives Kühlkonzept. Weiterhin sollten die Auswirkungen aus Sicht der elektromagnetischen Verträglichkeit überprüft werden, die mit der horizontalen Ausrichtung der Wicklung einhergehen.

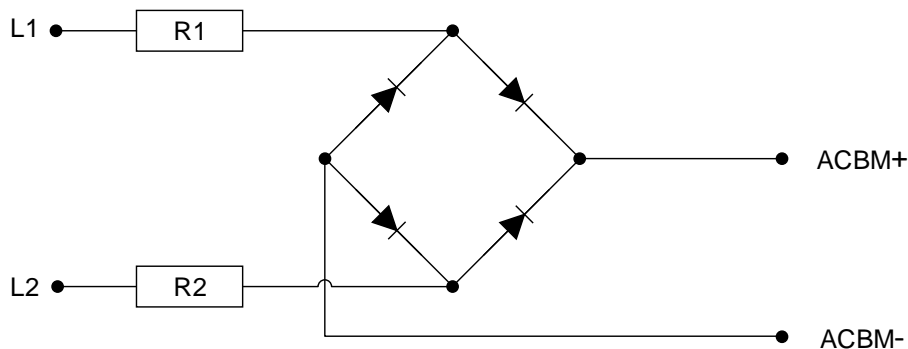
Im Allgemeinen kann durch die Umsetzung der Komponenten in eine oberflächenmontierbare Bauform voraussichtlich ein leichter Kostenvorteil erzielt werden.

**Tab. 4.7:** EMV-Drosseln

Typ	Bezeichnung	$L$ [mH]	$I_N$ [A]	Anzahl	Kostenfaktor
	Ringkerndrossel	2x1,00	10,0	3	1,00
SMT	P0429NL	0,81	9,7	3	0,81
SMT	P0469NL	0,63	11,6	3	0,43

### 4.1.6 Widerstände

In Fällen kurzzeitig erhöhter Last können Bauelemente ohne ausreichende Schutzfunktion Schaden nehmen. Um eine eventuell auftretende Überspannung durch einen Blitzschlag auf die PV-Anlage abzufangen, wird am Beispiel des Brückengleichrichters daher die Vorschaltung eines Widerstandes für jeden Eingang als Sicherheitskonzept genutzt. Die beschriebene Anordnung ist schematisch in Abbildung 4.5 dargestellt.



**Abb. 4.5:** Schutzwiderstände vor dem Brückengleichrichter

In Hinblick auf die Erhöhung des Automatisierungsgrades sollen die derzeit eingesetzten Bauelemente CRF254-4 der Vitrohm Portuguesa Unipessoal Lda. mit einem Widerstandswert von  $100\ \Omega$  kostengünstig durch SMT-Bauelemente ersetzt werden. Es wird zunächst angestrebt, die Anzahl der verwendeten Bauelemente nicht zu erhöhen.

Über die Internetpräsenz des Herstellers konnte der SMT-Widerstand RZI6720 Pulse Version gefunden werden, der für Anwendungen mit hohen Sicherheitsanforderungen prinzipiell geeignet erscheint. In Tabelle 4.8 werden relevante Werte der Datenblätter beider Widerstände gegenübergestellt. Darin enthalten ist eine weitere Information, die zur Berechnung der Impulsbelastbarkeit notwendig ist.

**Tab. 4.8:** Schutzwiderstände

Widerstand	$P_{70}$ [W]	$R_{th}$ [K/W]	Betriebsbereich in °C	K
CRF254-4	2,5	65	-55 ... 350	35
RZI6720 Pulse Version	1,6	112	-55 ... 200	90

An den Einsatz des Widerstandes werden drei Anforderungen gestellt, die im Folgenden aufgelistet sind. Die Dimensionierung des Widerstandswertes erfolgt in Kapitel 5.

I Impulsbelastbarkeit

II Begrenzung des maximalen Eingangsstroms

III Ausreichende Wärmeabfuhr bei Dauerlast



## 4.2 Aktive Bauelemente und Sensorik

### 4.2.1 Halbleitermodul

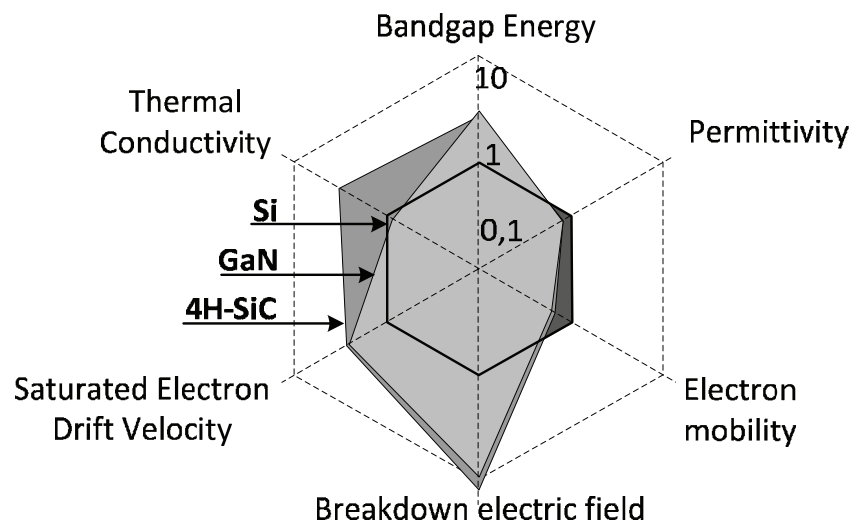
Es wird ein IGBT-Modul mit einer Leistung von 2,5 kW verwendet, welches über einen externen Hersteller bezogen wird. Das Zukaufteil ist nicht für die automatisierte Montage geeignet. Zur Senkung der Material- und Montagekosten bietet es sich grundsätzlich an, die Schaltung durch diskrete Bauelemente auf der Leiterplatte zu realisieren. Dazu könnten voraussichtlich sieben Leistungshalbleiter als D<sup>2</sup>Pak verwendet werden. Problematisch ist diese Umsetzung vor allem aus thermischer Sicht. Da keine aktive Kühlung im Wechselrichter vorgesehen ist, müssen zur Abführung von Verlustwärme ausreichend große Kupferflächen zur Verfügung gestellt werden. Neben Kupferflächen auf der Leiterplatte bieten sich hier passive Kühlkörper an, wie sie beispielsweise von Fischer Elektronik GmbH & Co. KG angeboten werden. Weiterhin eröffnet die Verwendung von einem Vergussmaterial mit einem geringen thermischen Widerstand die Möglichkeit, einen Großteil der auftretenden Verlustleistung zu spreizen.

Die Umsetzung des Halbleitermoduls ist eine sehr aufwendige Aufgabe, für die zusätzliche Entwicklungsarbeit und damit auch Entwicklungskosten anfallen. Insbesondere in Bezug auf die Serienfertigung ist allerdings mit einem Kostenvorteil zu rechnen, wenn auch bei diesem Bauelement auf die manuelle Montage verzichtet werden kann. Hier sollte der Dialog mit dem Zulieferer des derzeit verwendeten Halbleitermoduls gesucht und an einer Anpassentwicklung gearbeitet werden. Eine erste relative Gegenüberstellung der Material- und Montagekosten ist in Tabelle 4.9 dargestellt.

**Tab. 4.9:** Halbleitermodul

Typ	Bezeichnung	Anzahl	Kostenfaktor
	Halbleitermodul 2,5 kW	1	1,00
SMT	D <sup>2</sup> Pak (TO263)	7	0,65

Ein sehr großes Potenzial zur Reduktion der Verlustleistung in Stromrichtern bieten Halbleiterbauelemente auf Basis von Siliziumcarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) [28]. Im Vergleich zu Silizium (Si) zeichnen sich diese Verbindungen insbesondere durch einen erhöhten Bandabstand aus. Sie sind deshalb auch unter dem Stichwort Wide band-gap (WBG) bekannt [28]. Ausgewählte Werte der Materialeigenschaften dieser Verbindungen sind auf einer logarithmischen Skala in Abbildung 4.6 dargestellt.



**Abb. 4.6:** Vergleich ausgewählter Halbleitereigenschaften von Si, SiC und GaN [28]

Durch den Einsatz von Halbleiterbauelementen auf Basis von SiC und GaN ist es einerseits möglich, die Schaltverluste bei hohen Sperrspannungen zu reduzieren. Andererseits können diese Leistungshalbleiter im Vergleich zu siliziumbasierten Lösungen auch bei einer höheren Temperatur betrieben werden [28]. Beide Eigenschaften tragen zu einer erhöhten Effizienz von Stromrichtern bei [28]. Auf Anwendungsebene sinkt der Aufwand der notwendigen passiven Kühlung bei gleichbleibender Nennleistung und Baugröße.

## 4.2.2 Relais

Für zwei Typen von THT-Relais mit einem zulässigen Nennstrom von 8 A und 10 A konnte bereits durch eine vorangehende Masterarbeit nachgewiesen werden, dass keine geeigneten SMT-Alternativen für diese Bauelemente existieren. Denn nach VDE V 0126-1-1 ist ein Kontaktabstand von  $\geq 1,5$  mm vorgeschrieben, den derzeit kein SMT- oder THR-Relais bieten kann [19].

Hier sollte in Absprache mit dem Hersteller der bereits verwendeten Komponenten eine Anpassentwicklung angestrebt werden, sodass sowohl der Kontaktabstand eingehalten wird als auch eine THR-Prozessfähigkeit spezifiziert ist. Für diese Entwicklung wird mit einer Kostenerhöhung um 25 % gerechnet. Die Einsatzfähigkeit des Bauelementes muss anschließend praktisch nachgewiesen werden. In Tabelle 4.10 erfolgt eine erste Kostenbetrachtung bei der Umsetzung der THT-Relais.

**Tab. 4.10:** Relais

Typ	Bezeichnung	$U_{AC}$ [V]	$I_N$ [A]	Anzahl	Kostenfaktor
	Relais monostabil	250	8	1	1,00
THR	Anpassentwicklung	250	8	1	0,85
	Relais	250	10	2	1,00
THR	Anpassentwicklung	250	10	2	0,75

### 4.2.3 Stromsensoren

Im Wechselrichter kommen zwei Stromsensoren der Vacuumschmelze GmbH & Co. KG zum Einsatz, die derzeit beide von Hand auf der Leiterplatte angebracht und mit dem Wellenlötprozess verarbeitet werden müssen. Aufgrund ihrer Abmessungen und des hohen Gewichts ist eine Verarbeitung durch einen gängigen Bestückkopf nicht möglich. Hingegen sind auf dem Markt Modelle erhältlich, für die eine THR-Prozessfähigkeit nachgewiesen wurde. Diese Bauelemente bieten den Vorteil, dass sie direkt im Reflow-Prozess verarbeitet werden können und zumindest der Wellenlötprozess eingespart werden kann.

Für den 25 A Stromsensor konnte ein alternatives Bauelement gefunden werden, welches diese Anforderung erfüllt. Der Stromsensor gehört der selben Serie an und wird deshalb als bevorzugte Variante mit in Tabelle 4.11 aufgenommen. Allerdings wurde dieses Modell bisher nicht durch die nordamerikanische Organisation Underwriters Laboratories Inc. zertifiziert. Die Zertifizierung nach UL 508 ist Pflicht, um den fertigen Wechselrichter auch auf dem US-Markt anbieten zu können. Es wird aber davon ausgegangen, dass die Zertifizierung auf Anfrage des Herstellers ausgestellt werden kann. Darüber hinaus konnte ein zweiter 25 A Stromsensor gefunden werden, der für den THR-Prozess geeignet und bereits UL-zertifiziert ist. Dieser wird als Rückfalloption in Tabelle 4.11 aufgenommen.

**Tab. 4.11:** Stromsensoren 25A

Typ	Bezeichnung	$I_{PN}$ [A]	$X_{PN}$ [%]	Anzahl	Kostenfaktor
	T60404-N4646-X661	25	0,7	1	1,00
THR	T60404-N4646-X681	25	0,7	1	1,63
THT	CASR 25-NP	25	0,8	1	1,24

Für den in Tabelle 4.12 dargestellten 50 A DI-Stromsensor konnte keine Alternative ermittelt werden, die mit dem Reflow-Prozess verarbeitet werden kann. Eine Anpassung dieses Bauelementes wird daher innerhalb einer nachfolgenden Diplomarbeit angestrebt.

**Tab. 4.12:** DI-Stromsensor 50A

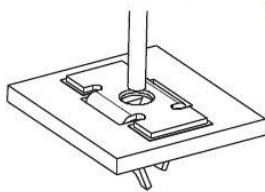
Typ	Bezeichnung	$I_{PN}$ [A]	$I_{\Delta N}$ [A]	$X_{\Delta}$ [%]	Anzahl	Kostenfaktor
THT	T60404-N4646-X920	50	0,15	1,5	1	1,00

Die Umsetzung der Stromsensoren ist mit einer merklichen Kostenerhöhung verbunden. Die THR-Prozessfähigkeit muss durch einen praktischen Test nachgewiesen werden, damit eine Beschädigung des Bauelementes durch den Lötvorgang ausgeschlossen werden kann.

## 4.3 Verbindungstechnik

### 4.3.1 Anschlussbuchsen

Da auf die Verwendung der bestehenden AC- und DC-Drossel in THT-Bauform verzichtet werden kann, entfallen sechs der gegenwärtig acht eingesetzten Anschlussbuchsen der Würth Elektronik GmbH & Co. KG. Zwei weitere Kontaktkörbe können durch zwei Steckkontakte ersetzt werden, die eine automatisierte Bestückung erlauben. Sie dienen zur Anbindung des DC-Trennschalters. Es bieten sich dazu zwei Typen von Steckkontakten an. Diese sind in Abbildung 4.7 und 4.8 dargestellt.

**Abb. 4.7:** AVX 70-9296-001-113-006 [19]**Abb. 4.8:** Zierick 1280 [19]

Für beide Steckkontakte wurde die vertikale Zugkraft ermittelt, bei der sich repräsentativ ein 320  $\mu$ F THT-Elektrolytkondensator mit einem Drahtdurchmesser von 1 mm aus der Verbindung löst [19]. In Tabelle 4.13 ist die minimale Haltefestigkeit der Steckverbindungen aus zwei Testversuchen dargestellt.

Die SMT-Lösungen sind zu etwa gleichen Kosten erhältlich. Normiert auf eine Stückzahl von zwei Bauelementen sind diese günstiger als die derzeit eingesetzten Kontaktkörbe. Unter Berücksichtigung der Haltefestigkeit wird zur Anbindung des DC-Trennschalters

**Tab. 4.13:** Anschlussbuchsen

Typ	Bezeichnung	Haltefestigkeit [N]	Anzahl	Kostenfaktor
	Kontaktkorb	–	8	1,00
SMT	AVX 70-9296-001-113-006	42,66	2	0,10
SMT	Zierick 1280	23,54	2	0,08

tendenziell der Steckkontakt der Firma AVX Corporation empfohlen. Für diesen ist allerdings eine Anpassung notwendig, damit er für die automatisierte Montage verwendet werden kann. Dafür wurden Kosten von 50 % des Materialpreises beaufschlagt.

### 4.3.2 RJ45-Buchse

Als Schnittstelle für die Datenübertragung des Wechselrichters wird eine RJ45-Buchse verwendet. Es konnten sowohl THR- als auch SMT-Alternative gefunden werden, wobei in Bezug auf die Gesamtkosten alle auf einem preislich ähnlichen Niveau liegen. Aufgrund der verminderten Haltefestigkeit der oberflächenmontierbaren Buchse wird zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur die Verwendung der THR-fähigen Buchse empfohlen. Diese bietet gegenüber der SMT-Variante zusätzliche Haltepins. Bei Inbetriebnahme oder Wartung des Wechselrichters kann damit eine ausreichende mechanische Belastbarkeit gewährleistet werden. In der Auswahltabelle 4.14 sind die Kosten einer THR-Buchse der Weidmüller Interface GmbH & Co. KG der derzeitigen Lösung gegenübergestellt.

**Tab. 4.14:** RJ45-Buchse

Typ	Bezeichnung	Ausrichtung	Pins	Anzahl	Kostenfaktor
	1-406541-5	90° inverted	8+4	1	1,00
THR	IEPCBRJ45THRC5AI	90° inverted	8+4	1	0,92

Die THR-Umsetzung ist nachweislich zu annähernd gleichen Kosten möglich.

# 5 Dimensionierung und Validierung der Einsatzfähigkeit eines Widerstandes

## 5.1 Theoretische Vorbetrachtung

### 5.1.1 Impulsbelastbarkeit

Bei der Dimensionierung des SMT-Widerstandes soll zunächst eine ausreichende Impulsbelastbarkeit sichergestellt werden, damit das Bauelement seine in Kapitel 4.1.6 beschriebene Schutzfunktion erfüllen kann. Dem Datenblatt des Herstellers kann hierzu folgende Gleichung entnommen werden.

$$P_{\text{imp}} = \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (5.1)$$

Mit gegebenen Werten für den Faktor  $K$  aus Tabelle 4.8 kann durch Gleichsetzen der Variable  $t$  ein Verhältnis ermittelt werden, um wie viel höher die Leistungsspitze beim Einsatz des neuen Widerstandes sein darf.

$$\frac{K_1^2}{P_{\text{imp},1}^2} = \frac{K_2^2}{P_{\text{imp},2}^2} \quad (5.2)$$

$$P_{\text{imp},2} = \frac{90}{35} \cdot P_{\text{imp},1} \quad (5.3)$$

Mithilfe einer Gleichung für die elektrische Leistung eines Widerstandes lässt sich das Verhältnis aus (5.3) abhängig von  $U$  und  $R$  ausdrücken.

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (5.4)$$

$$\frac{U^2}{R_{\text{imp},2}} = \frac{90}{35} \cdot \frac{U^2}{R_{\text{imp},1}} \quad (5.5)$$

Setzt man für  $R_{\text{imp},1}$  den Wert des THT-Widerstandes ein, kann der minimal nötige Widerstandswert des RZI6720 Pulse Version ermittelt werden, mit der eine ausreichende Impulsbelastbarkeit sichergestellt ist.

$$R_{\text{imp},2} = \frac{35}{90} \cdot 100 \Omega \approx 38,89 \Omega \quad (5.6)$$

### 5.1.2 Begrenzung des maximalen Eingangsstroms

Der maximal zulässige Eingangsstrom des Brückengleichrichters ist im Datenblatt mit  $I_{\text{FSM}} = 50 \text{ A}$  angegeben. Bei der Stoßspannungsprüfung nach UL 60384-14, die für die Zulassung von Geräten in den USA notwendig ist, wird eine Normstoßspannung von  $U_{\text{P}} = 6000 \text{ V}$  angelegt. Über das ohmsche Gesetz lässt sich der minimal nötige Wert eines einzelnen Widerstandes  $R_{\text{FSM}}$  ermitteln, mit dem der Eingangsstrom zum Schutz des Brückengleichrichters ausreichend begrenzt ist.

$$R_{\text{FSM}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{6000 \text{ V}}{50 \text{ A}} = 60 \Omega \quad (5.7)$$

### 5.1.3 Ausreichende Wärmeabfuhr bei Dauerlast

Während der derzeit verwendete Vitrohm Widerstand einen erlaubten Temperaturbereich von 280 K vorweisen kann, bietet der SMT-Widerstand – wie aus Tabelle 4.8 zu entnehmen ist – einen zulässigen Betriebsbereich von nur 130 K. Auch der im Vergleich erhöhte thermische Widerstand wirkt sich negativ auf die maximal zulässige Dauerleistung aus.

Innerhalb einer vorangehenden Masterarbeit konnte ein Wert für die Dauerlast des derzeit verwendeten Widerstandes von  $P_{\text{konst},1} = 5 \text{ W}$  ermittelt werden [19]. Mithilfe dieses Wertes lässt sich nun die nötige Leistung des neuen Widerstandes ermitteln, die einen aus thermischer Sicht unbedenklichen Betrieb bei konstantem Lastfluss erlaubt.

$$P_{\text{konst},2} = \frac{\Delta\vartheta_2}{\Delta\vartheta_1} \cdot \frac{R_{\text{th1}}}{R_{\text{th2}}} \cdot P_{\text{konst},1} \quad (5.8)$$

$$P_{\text{konst},2} = \frac{130}{280} \cdot \frac{65}{112} \cdot 5 \text{ W} \approx 1,365 \text{ W} \quad (5.9)$$

Weiterhin hat der Autor der Abschlussarbeit einen AC-seitigen Stromeffektivwert von  $I_{\text{AC}} = 225 \text{ mA}$  ermittelt [19]. Der Maximalwert eines Einzelwiderstandes kann damit über eine Leistungsgleichung berechnet werden.

$$R_{\text{konst}} = \frac{P_{\text{konst},2}}{I_{\text{AC}}^2} \quad (5.10)$$

$$R_{\text{konst}} = \frac{1,365 \text{ W}}{(0,225 \text{ A})^2} \approx 26,96 \Omega \quad (5.11)$$

## 5.2 Dimensionierung des Widerstandes

Aus der theoretischen Vorbetrachtung können zusammenfassend folgende Anforderungen an die Auslegung des Einzelwiderstandes beschrieben werden:

I Impulsbelastbarkeit:  $R_{\text{imp}} \geq 38,89 \Omega$

II Begrenzung des maximalen Eingangsstroms:  $R_{\text{FSM}} \geq 60 \Omega$

III Ausreichende Wärmeabfuhr bei Dauerlast:  $R_{\text{konst}} \leq 26,96 \Omega$

Die Begrenzung des maximalen Eingangsstroms und eine ausreichende Impulsbelastbarkeit können gewährleistet werden, wenn ein Widerstandswert von  $R_{\text{RZI}} = 60 \Omega$  gewählt wird. Hingegen ist es nicht möglich, auch gleichzeitig die dritte Bedingung zu erfüllen.

Es gilt weiter zu klären, welche der drei theoretischen Anforderungen angepasst werden können. Dabei ist die Impulsbelastbarkeit durch das Verhalten des Bauelementes vorgegeben und erlaubt keine aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht sinnvolle Anpassung.

Eine erste Idee ist ein Austausch des Brückengleichrichters durch ein Modell, das einen höheren Eingangsstrom als  $I_{\text{FSM}} = 50 \text{ A}$  erlaubt. Es konnte allerdings kein alternatives Bauelement gefunden werden, welches die nötige Anforderung an die Spannungsfestigkeit erfüllt.



Weiterhin könnte durch eine Parallelschaltung von zwei Brückengleichrichtern der zulässige Eingangsstrom auf  $I_{\text{FSM}} = 100 \text{ A}$  erhöht werden. Dadurch könnten zwei  $40 \Omega$  Widerstände verwendet werden. Aufgrund des unterschiedlichen Ansprechverhaltens der in dem Brückengleichrichter verwendeten Dioden durch Bauteiltoleranzen wird diese Maßnahme allerdings zu untragbaren negativen Effekten im Signalverhalten auf der AC-Seite des Wechselrichters führen und ebenfalls verworfen.

Denkbar ist auch eine Reduktion des Eingangsstromes. Passieren bei gleicher Zeiteinheit weniger Elektronen den Drahtwiderstand, sinkt auch die auftretende Verlustleistung. In wie weit der Eingangsstrom sinken müsste, damit der Widerstand mit  $R_{\text{RZI}} = 60 \Omega$  gewählt werden kann, lässt sich wie folgt berechnen.

$$I_{\text{max}} = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (5.12)$$

$$I_{\text{max}} = \sqrt{\frac{1,365 \text{ W}}{60 \Omega}} \approx 0,150 \text{ A} \quad (5.13)$$

Die Anwendung ist aus thermischer Sicht erlaubt, wenn der Eingangsstroms von 225 mA auf 150 mA gesenkt werden könnte. Da diese Lösung zusätzliche Entwicklungskosten durch die Anpassung der Schaltung verursachen würde, wird sie zunächst zurückgestellt.

Stattdessen soll die Abführung der Verlustwärme durch eine passive Kühlung als weitere Möglichkeit untersucht werden. Dabei ist die Frage zu klären, auf welchen Wert der thermische Widerstand gesenkt werden muss, sodass die maximale Betriebstemperatur von  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  eingehalten werden kann.

$$P = I^2 R \quad (5.14)$$

$$P_2 = (0,225 \text{ A})^2 \cdot 60 \Omega = 3,0375 \text{ W} \quad (5.15)$$

$$P_2 = \frac{130}{280} \cdot \frac{65 \text{ K/W}}{R_{\text{th}}} \cdot 5 \text{ W} \quad (5.16)$$

$$R_{\text{th,soll}} = \frac{130}{280} \cdot \frac{5}{3,0375} \cdot 65 \text{ K/W} \approx 49,68 \text{ K/W} \quad (5.17)$$

Nach Tabelle 4.8 müsste damit der thermische Widerstand des Bauelementes um etwa 65 % sinken, sodass die Anforderung an die Dauerlast erfüllt werden kann. Zur Ermittlung einer Lösung wird im Folgenden ein Laborversuch durchgeführt und ausgewertet. Dieser verspricht – im Gegensatz zu einer naturgemäß fehlerbehafteten Modellbildung einer Simulation – direkt anwendbare sowie schnell verfügbare Ergebnisse.

Für den Praxistest hat der Hersteller Vitrohm auf Anfrage eine Probe von SMT-Widerständen des Typs RZI6720 Pulse Version mit einem Widerstandswert von je  $60\ \Omega$  kostenfrei zur Verfügung gestellt.

### 5.3 Layouterstellung einer Testleiterplatte

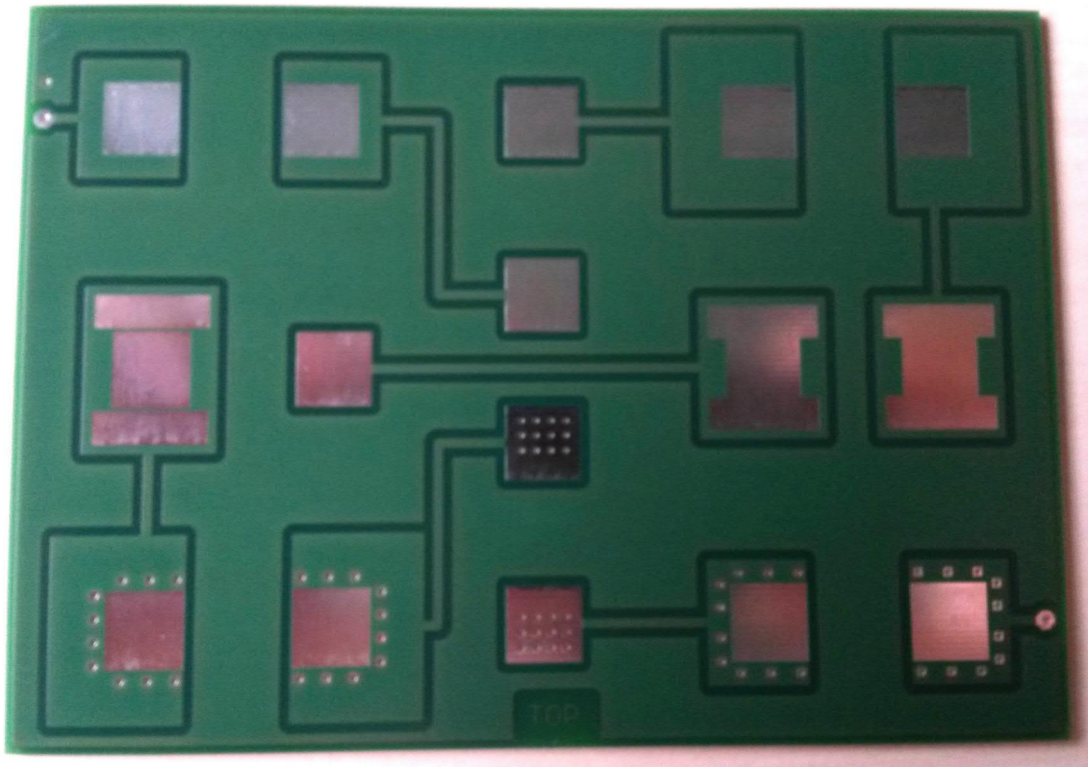
Um das thermische Verhalten von verschiedenen Kühlkonzepten bei Dauerlast messtechnisch erfassen zu können, ist die Anfertigung einer Testleiterplatte notwendig. Das Layout und der Schaltplan werden mithilfe der Software EAGLE 7.0 von CadSoft erstellt. Für den Prototyp wird eine Leiterplattengröße von  $140\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$  gewählt, auf der insgesamt acht Widerstände in Reihenschaltung angeordnet werden.

In dem Layout wird ein Referenzwiderstand RZI2 eingeplant, damit über die Angabe des Wärmewiderstandes im Datenblatt ein quantitativer Vergleich der Konzepte möglich ist. Sieben Widerstände sollen durch eine vergrößerte Kupferfläche gekühlt werden, wobei an drei Widerständen zusätzlich Kupferflächen der Leiterplattenrückseite über Vias verbunden sind. Für zwei weitere Widerstände sind Kupferkühlkörper von Fischer Elektronik GmbH & Co. KG als Abwärmekonzept vorgesehen, an deren Verbindungsstellen sich kein Lötstopplack befinden darf. Die genannten Konzepte zur Abführung der Verlustleistung sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Zu beachten ist hierbei, dass die Lotdepotfläche  $A_{\text{Lot}}$  jeweils von der Kupferfläche  $A_{\text{Cu}}$  eingeschlossen wird. Abbildung 5.1 zeigt die unbestückte Leiterplatte.

**Tab. 5.1:** Konzepte zur Abführung der Verlustleistung

Bezeichnung	$A_{Cu}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{Lot}$ [mm <sup>2</sup> ]	Bemerkung
RZI1	416	100	–
RZI2	200	100	–
RZI3	816	100	–
RZI4	474	215	Zwei verbundene Lotdepotflächen
RZI5	646	235	Vier getrennte Lotdepotflächen
RZI6	1632	100	20 Vias verbinden die Kupferflächen
RZI7	400	100	24 Vias verbinden die Lotdepotflächen
RZI8	832	100	20 Vias verbinden die Kupferflächen



**Abb. 5.1:** Layout der unbestückten Testleiterplatte

In allen Fällen muss ein wesentlicher Teil der thermischen Energie durch Wärmeleitung abgeführt werden. Um eine Aussage über die generelle Machbarkeit der Konzepte treffen zu können, soll deshalb zuerst der Gesamtwärmeleiterwiderstand der Kupferbeine des Widerstandes berechnet werden. Dies geschieht mithilfe des Drahtdurchmessers  $d = 0,8$  mm, der gemessenen Länge eines Pins bis zum Lotdepot von ca.  $l = 7$  mm und unter Berücksichtigung einer minimalen Wärmeleitfähigkeit des Kupfers von  $\lambda = 240$  W/mK.

$$R_{\text{th,Pin}} = \frac{l}{\lambda \cdot A} \quad (5.18)$$

$$R_{\text{th,2Pins}} = \left( \frac{1}{55,7 \text{ K/W}} + \frac{1}{55,7 \text{ K/W}} \right)^{-1} \approx 27,85 \text{ K/W} \quad (5.19)$$

Mithilfe des Wertes der maximal auftretenden Verlustleistung aus (5.15) und der Annahme, dass im Wechselrichter eine Temperatur von ca. 60 °C herrscht, kann der Wärmewiderstand der Kupferbeine als ausreichend niedrig bewertet werden, um die Wärme aus dem Kern des Drahtwiderstandes abzuleiten.

Nun soll auch ein erster Überschlag der Gesamtwärmewiderstände  $R_{\text{th,RZI4}}$  und  $R_{\text{th,RZI5}}$  erfolgen. Den Kupferkühlkörpern mit Wärmewiderständen von 25 K/W und 22,8 K/W wird zur Vereinfachung eine ideale Anbindung an die thermisch kritischen Stellen der Widerstände RZI4 und RZI5 unterstellt. Effekte der Konvektion und der Wärmestrahlung sowie das Vorhandensein der Kupfer- und Lotdepotflächen werden dabei vernachlässigt.

$$R_{\text{th,RZI4}} = \left( \frac{1}{112 \text{ K/W}} + \frac{1}{25 \text{ K/W}} + \frac{1}{25 \text{ K/W}} \right)^{-1} \approx 11,25 \text{ K/W} \quad (5.20)$$

$$R_{\text{th,RZI5}} = \left( \frac{1}{112 \text{ K/W}} + \frac{1}{22,8 \text{ K/W}} \right)^{-1} \approx 18,94 \text{ K/W} \quad (5.21)$$

Auf Basis dieser vereinfachten Abschätzung wird erwartet, dass die Gesamtwärmewiderstände  $R_{\text{th,RZI4}}$  und  $R_{\text{th,RZI5}}$  im Realfall den Schwellwert von  $R_{\text{th,soll}} \approx 49,68 \text{ K/W}$  unterschreiten und die Betriebstemperaturen der Widerstände eingehalten werden können. Zu beachten ist allerdings, dass wesentliche Effekte des Wärmeübertragungsverhaltens nicht berücksichtigt wurden.

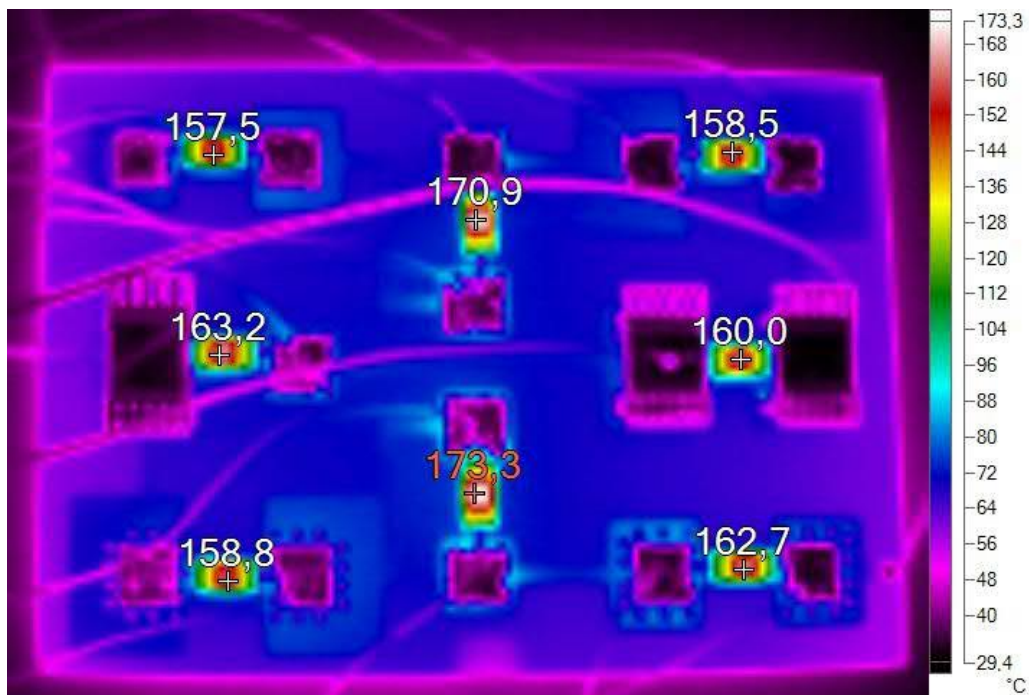
## 5.4 Durchführung des Tests und Fazit

Zur Vorbereitung des praktischen Tests werden die SMT-Komponenten von Hand bestückt und verlötet. Die Messungen werden aus Sicherheitsgründen unter einer Abdeckung aus Kunststoff durchgeführt. Um eine Spannungsmessung und das Kurzschließen einzelner Widerstände zu ermöglichen, werden alle 16 Lotdepotflächen verkabelt. Die Kabel werden am äußeren Ende mit Laborbuchsen ausgestattet. Der Ein- und Ausgang der Schaltung

wird mit der DC-Laborstromversorgung SM 300-10D von Delta Elektronik verbunden, wobei auf der Eingangsseite ein Multimeter zur Strommessung zwischengeschaltet wird. Zur Erfassung des thermischen Verhaltens der Widerstände wird die Wärmebildkamera Fluke Ti25 verwendet.

In der ersten Messreihe wird die Spannung über dem Referenzwiderstand RZI2 abgegriffen und der Prüfstrom stufenweise über 150,5 mA bis auf 191 mA erhöht. Die Messergebnisse sind dem Anhang A.3 beigefügt.

Wie auch in einem vorangehenden Testlauf ermittelt wurde, stellt sich nach jeweils etwa 20 Minuten des Temperaturanstiegs die Oberflächentemperatur der Widerstände auf einen festen Wert ein. Die Aufnahme der Wärmebildkamera für den stationären Fall bei einem Prüfstrom von 191 mA wird in Abbildung 5.2 gezeigt.



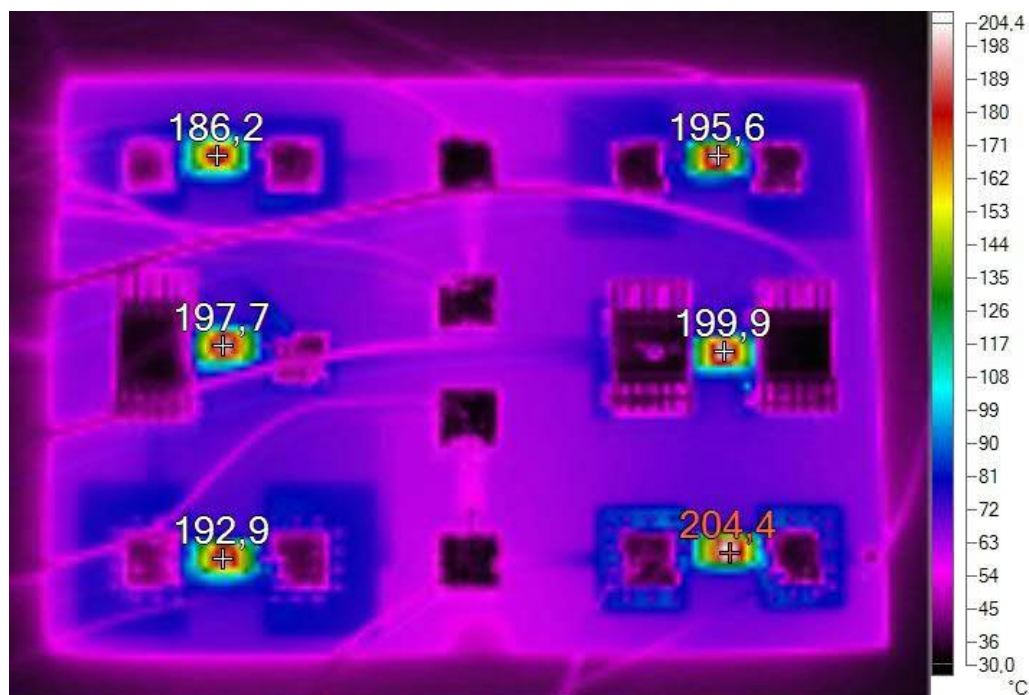
**Abb. 5.2:** Thermografie der Leiterplatte bei  $P_{V,RZI2} = 2202,23 \text{ mW}$

Auffällig ist zunächst, dass zwischen dem Kern und der äußeren Stelle der Keramik eines Drahtwiderstandes eine Temperaturdifferenz von etwa 70 K herrscht. Vor Beginn der Testreihe wurde eine annähernd homogene Verteilung der Wärme in diesem Körper erwartet. Deutlich unter der Erwartung liegt damit auch der Effekt der Kühlkörper. Deren Oberflächentemperatur beträgt nur ca. 30 °C und offenbart eine insgesamt schlechte Wärmeübertragung zwischen dem Kern eines Widerstandes und den Lötstellen. Eine zu niedrige Wärmeleitung durch die Kupferpins des Widerstandes konnte bereits durch Gleichung (5.19) widerlegt werden. Aus thermischer Sicht kann die geringe Wärmeleitung zwischen

dem Kern des Widerstandes und den beiden Kupferpins zu einem Problem führen, wenn der angelegte Stromwert weiter erhöht wird.

Zu dem Zeitpunkt der Messreihe, als das Bild aufgenommen wurde, weisen Widerstand RZI7 und RZI2 eine maximale Oberflächentemperatur von  $173,3^{\circ}\text{C}$  respektive  $170,9^{\circ}\text{C}$  auf, während bisher ein Prüfstrom von etwa 72 % des angestrebten Wertes eingesetzt wurde. In Hinblick auf den realen Anwendungsfall im Wechselrichter mit einer etwa um 40 K erhöhten Betriebstemperatur im Gehäuse werden deshalb die beiden Bauelemente kurzgeschlossen und die Messung mit den verbleibenden sechs Widerständen fortgeführt.

In der zweiten Messreihe wird die Spannung über RZI1 abgegriffen. Der Prüfstrom beträgt zu Beginn  $199,7\text{ mA}$  und wird stufenweise auf den Maximalwert von  $225,5\text{ mA}$  erhöht. Die Messungen dieser Testreihe sind in Anhang A.4 dokumentiert. Die in Abbildung 5.3 dargestellte Aufnahme der Wärmebildkamera zeigt den Zeitpunkt, an dem der thermisch stationäre Zustand bei Verwendung des maximalen Prüfstroms erreicht wurde.



**Abb. 5.3:** Thermografie der Leiterplatte bei  $P_{V,RZI1} = 3046,505\text{ mW}$

Erneut ist eine wesentliche Beobachtung, dass die Wärmeleitung von dem Kern eines Widerstandes zu den Kupferbeinen sehr gering ist. Nach dem Kurzschluss von RZI2 und RZI7 ist nun auch die Wärmespreizung durch die Kupferflächen deutlicher erkennbar. Sie leisten einen wesentlichen Beitrag zur Spreizung der auftretenden Verlustleistung. Hingegen sind die Kupferkühlkörper nahezu wirkungslos und nehmen keinen nennenswerten Anteil der in den Widerständen umgesetzten Energie auf.

Die laut Datenblatt maximal zulässige Betriebstemperatur des Widerstandes von 200 °C wird nur von Widerstand RZI8 um 4,4 K überschritten. Die gemessenen Werte der fünf übrigen Widerstände liegen um 0,1 K bis 13,8 K unterhalb des genannten Maximalwertes. Obwohl der Widerstand RZI1 (unter Vernachlässigung der Flächen der Vias) eine halb so große Kupferfläche  $A_{Cu}$  wie RZI8 aufweist, kann dieser die niedrigste maximale Oberflächentemperatur dieser Messreihe vorweisen.

Ein Teil dieser Differenz ist auf die mögliche Toleranz beider Widerstandswerte von jeweils 5 % zurückzuführen. Auch der inhomogene Auftrag des Lötzinns auf die verhältnismäßig großen Lotdepotflächen kann dazu beigetragen haben, dass eine größere Temperaturdifferenz zwischen den Kernen der Bauelemente aufgetreten ist. Darüber hinaus unterscheiden sich die beiden Kühlkonzepte dadurch, dass bei RZI8 Vias verwendet wurden.

Aufgrund fehlender Referenzwerte kann hier keine quantitative Schlussfolgerung gezogen werden. Zum Zeitpunkt der Dokumentation dieser Arbeit war auch eine nachträgliche Messung der Einzelwiderstände nicht mehr möglich. Eine noch detaillierte Auswertung dieses Messreihe wird daher verworfen.

In einer dritten Messreihe wurden alle Widerstände bis auf RZI2 und RZI7 kurzgeschlossen. Der Messfühler eines Greisinger GMH 3250 Digitalthermometers wurde um die Mitte des Widerstandes RZI2 gewickelt, um somit direkt die maximale Oberflächentemperatur erfassen zu können. Auf den Keramikwiderstand wurde ein Teil Epoxid-Vergussmasse geträufelt, mit der auch der Messfühler fixiert werden konnte. Für diese Messreihe wurde direkt der Maximalstrom von 225,5 mA an die Laborbuchsen angelegt. Aus Zeitgründen erfolgte die Messwertaufnahme nur für den Zeitpunkt nach 25 Minuten. Aufgrund der vorhergehenden Messreihen wird davon ausgegangen, dass nach dieser Zeit ein annähernd stationärer Fall vorlag. In Abbildung 5.4 ist das Bild der Thermografie dargestellt.

Das Digitalthermometer hat zum Zeitpunkt der Aufnahme einen Wert von 150,2 °C angezeigt, für den Widerstand RZI7 wurde hingegen eine Maximaltemperatur von 197,3 °C durch die Thermografie ermittelt. Durch das Vergussmaterial konnte die Maximaltemperatur auf der Oberfläche des Widerstandes erheblich gesenkt werden. Für die abschließende Betrachtung wird der SMT-Widerstand RZI6720 Pulse Version dem derzeit verwendeten THT-Bauelement in Tabelle 5.2 kostentechnisch gegenübergestellt.

Auf der Oberfläche der Vergussmasse konnte eine Maximaltemperatur von 130,6 °C festgestellt werden. Die Wärmespreizung spricht dafür, dass die Verwendung von Epoxid zur passiven Kühlung von leistungselektronischen Komponenten sehr gut geeignet ist. Unter Berücksichtigung der erhöhten Umgebungstemperatur des Widerstandes in einem



Abb. 5.4: Temperaturvergleich RZI2 mit Vergussmasse (oben) und RZI7 (unten)

Tab. 5.2: Widerstände

Typ	Bezeichnung	$R$ [ $\Omega$ ]	$P_{70}$ [W]	$R_{th}$ [K/W]	Anzahl	Kostenfaktor
	CRF 254-4	100	2,5	65,0	2	1,00
SMT	RZI 6720 Pulse	60	1,6	112,0	2	0,50

Wechselrichter unter Last und der möglichen Toleranz des Widerstandswertes müsste das eingesetzte Vergussmaterial mindestens eine Temperaturbeständigkeit von etwa 200 °C aufweisen.

Unter der Bedingung, dass eine Abfuhr der auftretenden Verlustleistung gewährleistet ist, kann der Widerstand RZI6720 Pulse Version mit einem Widerstandswert von 60  $\Omega$  anstelle des derzeit verwendeten THT-Bauelementes eingesetzt werden.

In Hinblick auf die Material- und Montagepreise ist mit der SMT-Umsetzung von einem leichten Kostenvorteil auszugehen. Bei der dritten Messreihe sollte der inhomogene Auftrag der Vergussmasse und die geringen Messtoleranzen des Digitalthermometers zusätzlich berücksichtigt werden.



## 6 Zusammenfassung

Innerhalb dieser Arbeit konnte nachgewiesen werden, wie sich der Automatisierungsgrad im Fertigungsprozess eines Kleinstwechselrichters erhöhen lässt. Es wurden dabei viele Erkenntnisse aus vorherigen Abschlussarbeiten und Forschungsprojekten zusammengefasst, sodass ein Großteil der derzeit verbleibenden THT-Bauelemente in naher Zukunft automatisiert verarbeitet werden kann.

In einem Praxistest wurde darüber hinaus für den Widerstand RZI6720 Pulse Version eine Einsetzbarkeit für den Schutz eines Brückengleichrichters nachgewiesen.

Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Tabelle 6.1 dargestellt.

**Tab. 6.1:** Ergebnisse der Analyse

Abschnitt	Bauelementtyp	$\Sigma_{\text{ist}}$	SMT	THR	THT
4.1.1	Elektrolytkondensatoren	5	4	–	1
4.1.2	Folienkondensatoren	25	10+7	–	8
4.1.3	Transformatoren	3	3	–	–
4.1.4	Speicherdrosseln	2	3	–	–
4.1.5	EMV-Drosseln	3	3	–	–
4.1.6	Widerstände	2	2	–	–
4.2.1	Halbleitermodul	1	–	–	1
4.2.2	Relais	3	–	3	–
4.2.3	Stromsensoren	2	–	1	1
4.3.1	Anschlussbuchsen	8	2	–	–
4.3.2	RJ45-Buchse	1	–	1	–

Für einige Bauelemente konnte hingegen keine direkte Umsetzungsempfehlung ausgesprochen werden. Diese wurden in der rechten Spalte der Tabelle aufgenommen.

Darunter ist ein SMT-Elektrolytkondensator des Bordnetzes, der im Vergleich zu seiner Baugröße einem sehr hohen Energieeintrag während des Lötprozesses ausgesetzt ist.

Insgesamt acht Folienkondensatoren können aufgrund fehlender Angebote auf dem Markt nicht wirtschaftlich in SMT-Bauform umgesetzt werden.

---

Zur Umsetzung des Halbleitermoduls erscheint die Verwendung diskreter Bauelemente prinzipiell möglich, wobei keine konkreten Handlungsschritte definiert wurden, wie die auftretenden Verlustleistungen der Bauelemente abgeführt werden können.

Der DI-Stromsensor ist als einziges Bauelement hinsichtlich seiner Größe und seines Gewichts nicht für eine automatisierte Montage geeignet. Hier sollte eine THR-Zertifizierung durch eine Anpassentwicklung angestrebt werden.

Grundsätzlich bietet es sich an, einige verbleibende THT-Bauelemente automatisiert zu bestücken. Dies betrifft insbesondere beide Typen von Elektrolytkondensatoren sowie alle Folienkondensatoren, für die keine SMT-Alternative gefunden wurde. Hier muss allerdings die Wirtschaftlichkeit genau abgewogen werden. Die Wirtschaftlichkeit der Anschaffung eines speziellen Bestückungsautomaten wird durch die Anzahl der zu bestückenden THT-Bauelemente bestimmt.

# A Anhang

**Tab. A.1:** Kapazitätsmessungen des Elko-Lebensdauertests aus Kapitel 4.1.1

Kondensator	Kapazität [ $\mu\text{F}$ ] zu verschiedenen Messzeitpunkten [h]									
	$C_{i,0h}$	$C_{i,762,5h}$	$C_{i,1266,5h}$	$C_{i,2131,5h}$	$C_{i,3397,5h}$	$C_{i,4646,5h}$	$C_{i,5000h}$			
C1	32,205	32,401	32,240	32,131	31,609	31,222	31,112			
C2	32,131	32,364	32,200	32,092	31,571	31,188	31,080			
C3	29,531	29,803	29,740	29,643	29,196	28,891	28,805			
C4	30,228	30,444	30,340	30,262	29,769	29,446	29,355			
C5	34,947	35,153	35,020	34,937	34,489	33,939	33,783			
C6	35,266	35,501	35,370	35,286	34,814	34,501	34,412			
C7	35,190	35,396	35,280	35,192	34,752	34,431	34,340			
C8	35,362	35,681	35,570	35,455	34,292	34,469	34,519			
C9	35,520	35,380	35,230	35,164	34,788	34,588	34,531			
C10	35,667	36,840	35,680	35,595	35,105	34,811	34,728			
C11	35,588	35,647	35,530	35,440	34,962	34,647	34,558			
C12	35,446	35,634	35,490	35,375	34,922	34,671	34,600			
C13	35,743	35,771	35,640	35,543	35,076	34,828	34,758			
C14	35,638	35,869	36,450	35,602	35,148	34,934	34,873			
C15	35,404	35,704	35,580	35,505	34,947	34,640	34,553			
C16	35,104	35,960	35,020	34,908	34,373	34,108	34,033			
C17	35,511	35,746	35,610	35,511	35,043	34,818	34,754			
C18	35,980	35,480	35,320	35,269	34,774	34,573	34,516			
C19	35,438	35,498	35,390	35,311	34,901	34,658	34,589			
C20	34,850	35,045	34,910	34,841	34,358	34,084	34,006			

**Tab. A.2:** ESR-Messungen des Elko-Lebensdauertests aus Kapitel 4.1.1

Kondensator	ESR [mΩ] zu verschiedenen Messzeitpunkten [h]									
	$ESR_{i,0h}$	$ESR_{i,762,5h}$	$ESR_{i,1266,5h}$	$ESR_{i,2131,5h}$	$ESR_{i,3397,5h}$	$ESR_{i,4646,5h}$	$ESR_{i,5000h}$			
C1	1569,00	1886,30	2162,30	2015,00	2295,00	2764,00	2896,74			
C2	1641,00	1959,60	2229,00	2184,50	2429,30	2921,40	3060,68			
C3	1436,00	1733,10	1862,00	1848,70	2084,80	2452,80	2556,95			
C4	1437,00	1733,70	1887,00	1783,70	2139,60	2502,80	2605,60			
C5	1275,00	1551,50	1750,00	1653,90	1929,20	2318,10	2428,17			
C6	1346,00	1603,50	1805,00	1706,90	2016,00	2390,80	2496,88			
C7	1375,00	1660,30	1867,00	1750,80	2048,40	2394,40	2492,33			
C8	1335,00	1572,20	1786,00	1670,40	2017,30	2356,90	2453,02			
C9	1357,00	1579,90	1782,00	1668,40	1995,10	2267,10	2344,08			
C10	1286,00	1586,20	1799,00	1678,50	2006,50	2282,50	2360,62			
C11	1329,00	1575,10	1785,00	1681,00	2019,50	2290,80	2367,59			
C12	1346,00	1641,10	1923,00	1775,40	2107,00	2382,20	2460,09			
C13	1160,00	1456,30	1652,00	1581,10	1891,10	2082,60	2136,80			
C14	1317,00	1619,20	1855,00	1755,80	2093,70	2235,20	2275,25			
C15	1327,00	1563,60	1769,00	1670,30	2031,60	2353,30	2444,35			
C16	1390,00	1637,80	1847,00	1746,00	2082,90	2350,20	2425,85			
C17	1271,00	1529,70	1732,00	1637,00	1981,50	2193,50	2253,50			
C18	929,00	1599,00	1823,00	1698,10	2095,50	2203,30	2233,81			
C19	1337,00	1612,40	1825,00	1707,20	2075,40	2357,70	2437,60			
C20	1326,00	1589,70	1798,00	1679,80	2039,70	2297,70	2370,72			

**Tab. A.3:** Messreihe 1 des Praxistests aus Kapitel 5.4

Zeit	$U_2$ [V]	$I_{DC}$ [mA]	$P_{V,RZ12}$ [mW]	°C
14:15:00	6,14	101,5	623,21	–
14:31:00	9,09	150,4	1367,14	113
14:36:10	9,09	150,4	1367,14	119
14:41:34	9,09	150,5	1368,05	120
14:46:00	9,10	150,5	1369,55	120
14:48:00	10,32	170,9	1763,69	139
14:53:00	10,33	170,9	1765,40	144
14:58:00	10,33	170,9	1765,40	145
15:03:00	10,33	170,9	1765,40	146
15:08:00	10,33	170,9	1765,40	146
15:09:00	10,88	180,1	1959,49	154
15:10:00	10,88	180,1	1959,49	156
15:15:00	10,88	180,1	1959,49	158
15:20:00	10,88	180,1	1959,49	158
15:25:00	11,16	185,0	2064,60	163
15:30:00	11,16	185,0	2064,60	164
15:40:00	11,17	184,9	2065,33	165
15:50:30	11,17	184,9	2065,33	165
15:55:15	11,53	191,0	2202,23	173
16:00:00	11,53	191,0	2202,23	175
16:10:13	11,53	191,0	2202,23	175
16:20:40	11,53	191,0	2202,23	175

**Tab. A.4:** Messreihe 2 des Praxistests aus Kapitel 5.4

Zeit	$U_1$ [V]	$I_{DC}$ [mA]	$P_{V,RZI1}$ [mW]	$^{\circ}C$
16:28:00	11,96	199,7	2388,41	161
16:30:00	11,96	199,8	2389,61	167
16:40:00	11,96	199,8	2389,61	172
16:50:30	11,96	199,8	2389,61	172
17:00:00	12,51	209,0	2614,59	185
17:05:00	12,51	209,0	2614,59	185
17:10:00	12,51	209,0	2614,59	186
17:15:00	12,91	215,5	2782,11	193
17:20:00	12,91	215,5	2782,11	193
17:30:00	13,91	215,5	2782,11	193
17:35:30	13,18	220,0	2899,60	197
17:40:17	13,18	220,0	2899,60	200
17:50:00	13,18	222,0	2899,60	200
17:55:00	13,51	225,5	3056,51	205
18:00:00	13,51	225,5	3056,51	205
18:11:40	13,51	225,5	3056,51	205

# Literaturverzeichnis

- [1] Ehrlenspiel, K., Kiewert, A. et al. *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 7. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2014 (siehe S. 1).
- [2] Feldmann, K. *Montage in der Leistungselektronik für globale Märkte: Design, Konzepte, Strategien*. Berlin und Heidelberg: Springer, 2009 (siehe S. 1, 4, 7, 9, 11, 13, 17, 21, 24, 26).
- [3] Mertens, K. *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologien und Praxis*. 2., neu bearb. Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2013 (siehe S. 2).
- [4] DIN EN 62109-2:2012-04. *Sicherheit von Leistungsumrichtern zur Anwendung in photovoltaischen Energiesystemen - Teil 2: Besondere Anforderungen an Wechselrichter*. Berlin, 2012 (siehe S. 3).
- [5] VDE-AR-N 4105 Anwendungsregel:2011-08. *Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz - Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz*. Berlin, 2011 (siehe S. 3).
- [6] DIN EN 61000-3-2:2010-03. *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-2: Grenzwerte - Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangstrom  $\leq 16A$  je Leiter)*. Berlin, 2012 (siehe S. 3).
- [7] Stiny, L. *Fertigung und Test elektronischer Baugruppen - Technologie, Fertigungskonzepte, Prüftechnik*. Konstanz: Christiani Verlag, 2010 (siehe S. 4, 5, 8).
- [8] ASM Assembly Systems GmbH & Co.KG. *SIPLACE Bilderdatenbank*. Abgerufen am 09.06.2014. URL: [http://www.siplace.com/picturedatabase/web/index.aspx?i\\_id=10&lang=D&f\\_id=ec763824-80aa-4fc2-a70e-2abeda05131f](http://www.siplace.com/picturedatabase/web/index.aspx?i_id=10&lang=D&f_id=ec763824-80aa-4fc2-a70e-2abeda05131f) (siehe S. 5, 6).
- [9] ASM Assembly Systems GmbH & Co.KG. *SIPLACE SpeedStar Produktseite*. Abgerufen am 09.06.2014. URL: <http://www.siplace.com/de/highlights/placement-heads/speedstar> (siehe S. 5).



- [10] SMA Solar Technology AG. *Elektronikfertigung bei SMA*. 2011 (siehe S. 6).
- [11] Globisch, S. et al. *Lehrbuch Mikrotechnologie*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2011 (siehe S. 6, 9, 10).
- [12] Fritsch, M. *Marktversagen und Wirtschaftspolitik: Mikroökonomische Grundlagen staatlichen Handelns*. München: Vahlen, 2014 (siehe S. 8).
- [13] Westkämper, E. *Towards the Re-Industrialization of Europe*. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2014 (siehe S. 8).
- [14] *THT-Leiterplatte*. Abgerufen am 19.06.2014. URL: <http://de.dreamstime.com/stockfoto-elektronische-leiterplatte-image26576748> (siehe S. 9).
- [15] Weidmüller Interface GmbH & Co. KG. *Unternehmenswebsite*. Abgerufen am 24.06.2014. URL: [http://www.weidmueller.de/docs/cw\\_index\\_v2.aspx?id=99949](http://www.weidmueller.de/docs/cw_index_v2.aspx?id=99949) (siehe S. 9).
- [16] ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. *Mikroelektronik - Trendanalyse bis 2018*. 2014 (siehe S. 10).
- [17] *SMT-Leiterplatte*. Abgerufen am 19.06.2014. URL: <http://de.dreamstime.com/stockfoto-elektronik-image6929205> (siehe S. 10).
- [18] Tietze, U. und Schenk, Ch. *Halbleiter-Schaltungstechnik*. 12. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer, 2002 (siehe S. 11).
- [19] Fuchs, P. „Aufbau- und Verbindungstechnik bei Kleinstwechselrichtern für die Photovoltaik“. Masterarbeit. Universität Kassel, 2014 (siehe S. 11, 17–19, 21, 22, 24, 28, 31, 33, 36, 37).
- [20] Europäische Union. *Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten*. Amtsblatt der Europäischen Union L 174. 2011 (siehe S. 12).
- [21] Homberger, M. „Weltweite Konformitätsanforderungen hinsichtlich Schadstoffen in Produkten“. In: *Umgang mit Stoffverboten und Schadstofflisten*. Stuttgarter Produktionsakademie. 2014 (siehe S. 13).
- [22] IPC J-STD-020D.1. *Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Solid State Surface Mount Devices*. 2008 (siehe S. 14).
- [23] Malinka, M. „Aufbau und Untersuchung eines bidirektionalen Tiefsetzstellers auf Basis verschiedener Leiterplattentechnologien“. Diplomarbeit. Technische Hochschule Mittelhessen, 2013 (siehe S. 17).

- [24] Albrecht, O., Bellmann, B. et al. „Pin-in-Paste für klein- und großvolumige Aluminium-Elektrolytkondensatoren: Technologieentwicklung und Zuverlässigkeitsuntersuchungen“. In: *Elektronische Baugruppen und Leiterplatten*. Hrsg. von DVS Media GmbH. Bd. 301. DVS-Berichte. Düsseldorf, 2014 (siehe S. 21).
- [25] Seehase, D., Huth, H. et al. „Bewertung der Qualität und Zuverlässigkeit von mit exotherm reagierenden Pasten hergestellter Lötverbindungen“. In: *Elektronische Baugruppen und Leiterplatten*. Hrsg. von DVS Media GmbH. Bd. 301. DVS-Berichte. Düsseldorf, 2014 (siehe S. 21).
- [26] DIN EN 60384-1:2010-05. *Festkondensatoren zur Verwendung in Geräten der Elektronik - Teil 1: Fachgrundspezifikation*. Berlin, 2010 (siehe S. 22).
- [27] Farnell UK. *Produktbild eines EPCOS Coilformers*. Abgerufen am 09.09.2014. URL: <http://uk.farnell.com/productimages/farnell/standard/2355071-40.jpg> (siehe S. 26).
- [28] Araújo, S. V. „On the Perspectives of Wide-Band Gap Power Devices in Electronic-Based Power Conversion for Renewable Systems“. Dissertation. Universität Kassel, 2013 (siehe S. 30, 31).

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, *Marc Sauter*, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Gedanklich, inhaltlich oder wörtlich Übernommenes habe ich durch Angabe von Herkunft und Text oder Anmerkung belegt bzw. kenntlich gemacht. Dies gilt in gleicher Weise für Bilder, Tabellen, Zeichnungen und Skizzen, die nicht von mir selbst erstellt wurden.

Nordhausen, 18. September 2014

---

Marc Sauter