



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Abschlussbericht

im Verbundvorhaben „AMPERE“

Strukturintegrierte Elektronik mit neuen Aufbau- und Verbindungstechnologien

Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2021 – 31.07.2024

Zuwendungsempfänger: Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Ansprechpartner: Christian Robert

Förderkennzeichen: 16ME0337



## Abschlussbericht Teil I: Kurzbericht Projekt „AMPERE“

Die Würth Elektronik eiSos als Hersteller von elektronischen und elektromechanischen Bauelementen adressierte in dem Vorhaben, zusammen mit den Projektpartnern das Ziel, durch hybride Fertigung unter Einsatz neuer Technologien, wie z.B. der additiven Fertigung, intelligente und miniaturisierte Produktdemonstratoren herzustellen. Dabei nutzt die hybride Fertigung neue Werkstoffe kombiniert mit der Montage und Integration elektronischer Funktionen.

Die sich dadurch eröffnende Möglichkeit zur hybriden Fertigung miniaturisierter elektrischer Schaltkreise im 3-dimensionalen Raum führt zu einer signifikanten Steigerung der Designfreiheitsgrade bei der künftigen Auslegung elektrischer Systeme.

Der Fokus der Entwicklungen lag auf der Herstellung eines gefilterten, integrierten Single-Pair-Ethernet Steckverbinders (SPE-Steckverbinder). Dieser Bericht gibt einen Überblick über die verschiedensten Arbeiten zur Herstellung dieses Steckverbinders mittels hybrider Fertigungstechnik.

Hierfür wurden die Anforderungen und Spezifikationen zur Fertigung des SPE-Steckverbinders detailliert zusammengestellt, dargelegt und durch aktuelle Normen und Standards untermauert.

Im Weiteren werden die Anforderungen der elektrischen Filterung detailliert aufgezeigt, die Funktionen der verschieden eingesetzten Komponenten und deren Wirkung beschrieben. Der daraus entwickelte Schaltplan simuliert und seine Funktionsfähigkeit dargelegt.

Mit Hilfe der ermittelten Schaltkreise und benötigten Komponenten wurden erste Grundkörper designed, additiv hergestellt und evaluiert. Parallel wurden erste Konzepte zur schrittweisen Fertigung des SPE-Steckverbinders erstellt und getestet. Dieser Bericht zeigt dabei unterschiedliche Herausforderungen und Lösungen bei der Entwicklung und Fertigung auf.

Abschließend wird der finale Fertigungsprozess beschrieben und die hergestellten Probenkörper dargestellt. Unterschiedliche Untersuchungen der hybrid gefertigten Proben werden dargestellt und evaluiert.





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Spezifikationen und Anforderungen</b>	<b>5</b>
2.1	Geometrische Anforderungen	5
2.2	Mechanische Anforderungen	6
2.3	Anforderungen an das Material	6
2.4	Elektrische Eigenschaften und Anforderungen	7
2.5	Nachhaltigkeitsanforderungen	9
2.6	Lötbarkeit	9
2.7	Weiterführende Anforderungen	9
2.8	angewendete Normen und Standards	10
<b>3</b>	<b>Definition des elektrischen Schaltkreises</b>	<b>11</b>
3.1	Elektrische Funktionen des Single Pair Ethernet-Anschlusses	11
3.2	Anforderungen an die elektrische Filterung	12
3.3	Anforderungen an die Isolierung	12
3.4	Galvanische Trennung mit einem Transformator	13
3.5	GND-Anschluss des Transformators	14
3.6	Signalfilterung mit Gleichtaktdrossel	15
3.7	ESD-Unterdrückung	15
3.8	Elektronische Schaltungen	16
3.9	Simulation des SPE-Steckverbinders	16
<b>4</b>	<b>Design und Fertigung des Produktdemonstrators</b>	<b>19</b>
4.1	SPE-Steckerdesign	19
4.2	Evaluation Steckerdesign	24
4.3	Herstellung der SPE-Produktdemonstratoren	27
4.3.1	Positionierung des C2-Kondensators	32
4.3.2	Kontaktierung des Widerstandes R1	34
4.3.3	Wärmebehandlungsuntersuchungen	35
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>37</b>



## Abschlussbericht Teil II: Eingehende Darstellung Projekt „AMPERE“

### **1 Einleitung**

Im Folgenden sollen die Arbeiten der Würth Elektronik eiSos im Verbundvorhaben Strukturintegrierte Elektronik mit neuen Aufbau- und Verbindungstechnologien – AMPERE – dargestellt werden.

Das dargestellte Konzept gibt zu Beginn einen kurzen Überblick über den Single-Pair-Ethernet (SPE) Steckverbinder, der als Produktdemonstrator in diesem Projekt von der Würth Elektronik eiSos ausgewählt wurde. Zu Beginn werden die erarbeiteten Anforderungen und Spezifikationen für einen SPE-Steckverbinders dargestellt und im Folgenden ein elektrischer Schaltkreis definiert und simuliert. Dabei werden die unterschiedlichen Funktionen der ausgewählten Komponenten und deren Notwendigkeit tiefergehend beschrieben.

Im Anschluss richtet sich das Augenmerk auf das ausgearbeitete Design und den hybriden Fertigungsansatz, der durch unterschiedliche Tests im Anschluss evaluiert wird.

Abschließung werden die gesammelten Ergebnisse zusammengefasst und zukünftige Arbeitsansätze dargelegt.



## 2 Spezifikationen und Anforderungen

Dieses Kapitel beschreibt die Spezifikationen und Anforderungen für den im AMPERE-Projekt Single-Pair-Ethernet Steckverbinder (SPE Steckverbinder). Der Produktdemonstrator wird in einem hybriden Produktionsverfahren von den Kooperationspartnern Neotech AMT und Würth Elektronik hergestellt.

Die folgenden Tabellen zeigen die Produktspezifikationen und Anforderungen für den 10BASE-T1 mit und ohne Power over Data Line. Die hier dargestellten Spezifikationen sind unterteilt in die Unterpunkte Geometrie, Kraft, Material, Elektrik, Nachhaltigkeit, Lötbarkeit und weitere Anforderungen, die auf bestimmten Normen und Standards basieren und durch römische Ziffern referenziert sind. Eine Legende am Ende des Dokuments verweist auf die jeweilige Norm und den Standard. Wenn für die jeweilige Anforderung Prüfverfahren erforderlich sind, wird am Ende des jeweiligen Kapitels auf die anwendbare Norm und das Prüfverfahren verwiesen. Die Parameter sind mit dem Prüfverfahren verknüpft, indem die Parameternummer mit einer vorangestellten Raute benannt wird.

### 2.1 Geometrische Anforderungen

Nr.	Parameter	Variable	Zahlenwert			Einheit	Norm	Prio
			min.	nominal	max.			
1	Stecker weiblich						I	1
2	Steckerlänge WE design	L			12	mm		2
3	max. Breite WE design	W			7	mm		2
4	max. Höhe WE design	H			11	mm		2
5	Nutzung so weniger Komponenten wie möglich							1
6	Möglichkeit zur Verbindung von Schaltungsmasse und Kabelabschirmung							1
7	Vier unterschiedliche Steckergrößen: 10BASE-T1 (+ Power over Data Line) 100BASE-T1 (+ Power over Data Line)							2

## 2.2 Mechanische Anforderungen

Nr.	Parameter	Variable	Zahlenwert			Einheit	Norm	Prio
			min.	nominal	max.			
8	Einpresskraft	Fin			10	N	I	1
9	Ziehkraft	Fout			15	N	I	1
10	Schwingungsfestigkeit (sinusförmig)						I	1
11	Stabilität gegenüber mechanischen Schock							1

Weitere Erläuterungen / Anforderungen:

#8	IEC 60512, Test 13b: Atmosphärische Standardbedingungen Max. Geschwindigkeit = 10 mm/s
#9	IEC 60512, Test 13b: Atmosphärische Standardbedingungen Max. Geschwindigkeit = 10 mm/s
#10	IEC 60512, Test 6d: Atmosphärische Standardbedingungen Stecker in fixierter und verriegelter Position. Der feste und der freie Verbinder müssen fest in einer geeigneten Halterung gemäß 6.1.2 installiert sein. Vibration: 10 Hz bis 500 Hz und 0,35 mm oder 50 m/s <sup>2</sup>

## 2.3 Anforderungen an das Material

Nr.	Parameter	Variable	Zahlenwert			Einheit	Norm	Prio
			min.	nominal	max.			
12	Steckzyklen/ Vergoldung Kontakthülsen	n	1000			Zahl		2
13	Kontaktmaterial hart, hohe elektrische Leitfähigkeit, keine Oxidation							1



14	Arbeitstemperaturbereich / Klima Kategorie	Temp.- bereich		-40 – +85		°C	I	1	
15	Standard Lagertemperatur		0 - 5		40	°C		1	
16	Entflammbarkeit			UL-94V0				1	
**	MSL-Level			1			**Test	2	
17	Kunststoffmaterial Widerstandsfähigkeit gegen Reflow-Löthitze		245 (für 10s)		260	°C	II	2	
	Beständigkeit gegen Wellenlöten		250		260	°C	VI	1	
18	RoHS kompatibel								1
19	REACH kompatibel								1
20	Halogenfrei								3
21	Geringe Materialvielfalt								1

Weitere Erläuterungen / Anforderungen:

#13	Test auf Basis von IEC 60068-1
#15	WE Standard Lagertemperatur

## 2.4 Elektrische Eigenschaften und Anforderungen

Nr.	Parameter	Variable	Zahlenwert			Ein- heit	Norm	Prio
			min.	nominal	max.			
22	Durchgangswiderstand			5	10	mΩ	I	1
23	Ummantelung (Metall)							1
25	Induktivität Transformer	L	350			μH	III	2
26	1x CMC (100 BASE-T1)	Sdd21			-3	dB		3
27	Bob-Smith Abbruch	R		100		Ω		1



28	Dielektrische Spannungsfestigkeit zwischen Kontakten	U	1,4			kV	I	1	
29	Dielektrische Spannungsfestigkeit zwischen Leiter und Kapselung	U	1,4			kV	I	1	
30	Impedanz zwischen Leiterbahnen	Zdiff		100		Ω	III	1	
31	Übertragungsrate				10, 100, 1000	Mbit/s		1 - 2	
32	Isolationswiderstand	Riso	100			MΩ		1	
33	2 Signalpins und 2 PoDL-Pins auf der Platinen-Seite								1
34	Leitfähigkeit der Leitungen		0	4	6	Ω		1	
35	Hi-Pot ( Signalkabel an GND)	Hi-Pot	2,25			kV (DC)	IV	1	
36	Hi-Pot (Primär- zu Sekundärwicklung)	Hi-Pot	2,25			kV (DC)	IV	1	
37	Hi-Pot (POE-Pins an Primärwicklung +) für Power over Data line	Hi-Pot	2,25			kV (DC)	IV	1	
38	Hi-Pot (POE-Pins auf Kapselung) für Power over Data line	Hi-Pot	2,25			kV (DC)	IV	1	

Weitere Erläuterungen / Anforderungen:

#22	IEC 60512, Test 2a: Atmosphärische Standardbedingungen Anschlusspunkte siehe 6.1.1
#28	IEC 60512, Test 4a

#29	IEC 60512, Test 4a
#32	IEC 60512, Test 3a, Methode A: Atmosphärische Standardbedingungen Test voltage 500 V ± 15 V d.c.

## 2.5 Nachhaltigkeitsanforderungen

39	Bauteile müssen vom umgebenden Kunststoff trennbar sein, z. B. durch Sprödbbruch, chemische Auflösung, Sollbruchstellen		2
----	---	--	---

## 2.6 Lötbarkeit

Nr.	Parameter	variable	Numerical value			unit	Norm	Prio
			min.	nominal	max.			
40	Stiftlänge passend für THR → ab Unterseite Abstandshalter			2,2		mm	V	2
41	geeignete Kunststoffe für Reflow-Verfahren							2
42	Abstandshalter für Luftzirkulation	Hstand	1	1,4		mm		2
43	Stiftdicke			0,45		mm		2
44	Kunden-Leiterplattenstifte müssen verzinnt werden							2

Weitere Erläuterungen / Anforderungen:

#41	Schmelztemperatur muss höher als 245°C für das Reflow-Lötprofils sein		
-----	---	--	--

## 2.7 Weiterführende Anforderungen

Nr.	Parameter	Variab le	Zahlenwert			Ein- heit	Nor m	Prio
			min.	nominal	max.			
45	(Optional) WE-Schriftzug auf Steckerkopf							2
46	Schutzklasse (IP)	IP		20				1



47	Qualifizierung						V	1
48	Pick & Place							1 – 2

Weitere Erläuterungen / Anforderungen:

#45	WE Anforderungen
#47	IEC 60529 - in gesteckter und verriegelter Position
#48	WE Anforderungen

## 2.8 angewendete Normen und Standards

I	IEC 61076-2-101: Connectors for electronic equipment – Product requirements – Part 2-101: Circular connectors – Detail specification for M12 connectors with screw-locking; 2012-04
II	IPC/JEDEC J-STD-020E: Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Surface Mount Devices; 2014-12
III	IEEE 802.3: IEEE Standard for Ethernet; 2018
IV	IEC 62368-1: Audio/video, information and communication technology equipment – Part 1: Safety requirements; 2018-10
V	ANP078: WE-RJ45 LAN für Through-Hole Reflow, Würth Elektronik eiSos, 2019
VI	EN61760-1:2006 Oberflächenmontagetechnik - Teil 1: Genormtes Verfahren zur Spezifizierung oberflächenmontierbarer Bauelemente (SMDs), (Surface mount technology - Part 1: Standardised method for specifying surface mount devices (SMDs)); 2006

Weitere gelistete anwendbare Normen und Standards:

VII	IEC 60512: Connectors for electrical and electronic equipment - Tests and measurements - Part 1: Generic specification; 2018-10
VIII	IEC 60068-1: Environmental testing - Part 1: General and guidance; 2013
IX	IEC 60529: Degrees of protection provided by enclosures; 1989 (A1) + 1999 (A1) + 2013 (A2)

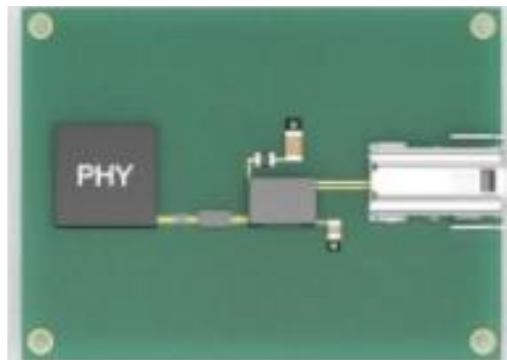
### 3 Definition des elektrischen Schaltkreises

Um ein tiefgreifendes Fertigungskonzept zu erstellen, wurde zuvorderst eine klare Definition des elektrischen Schaltkreises vorgenommen. Hierfür wurden die einzusetzenden Komponenten definiert und genauer beschrieben. Im Anschluss erfolgten verschiedenste Schaltungsaufbauten und Simulationen. Im Folgenden werden diese beschrieben.

#### 3.1 Elektrische Funktionen des Single Pair Ethernet-Anschlusses

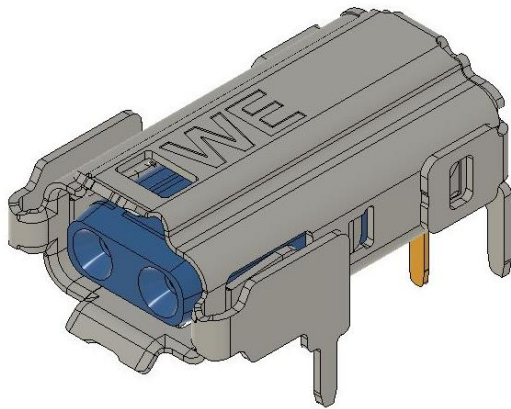
In diesem Kapitel werden die Anforderungen an den zu fertigenden SPE-Stecker aus elektronischer Sicht beschrieben.

Die Ethernet-Übertragung erfolgt heutzutage zu einem großen Teil über die bekannten und standardisierten RJ45-Stecker. Im Gegensatz dazu konnte mit dem standardisierten Steckgesicht des SPE-Steckers eine deutliche Größenreduzierung sowie eine Reduzierung der benötigten elektronischen Bauteile und damit auch eine Minimierung des Platzbedarfs erreicht werden. Heutige Konstruktionen für den industriellen Einsatz von SPE-Steckverbindern basieren auf einer Stift- oder Buchsenleiste, die auf einer Leiterplatte sitzt und auf der die erforderlichen Komponenten montiert sind (Abb. 1). Dabei fungiert der Steckverbinder sowohl als Buchse für das entsprechende Gegenstück als auch als elektrischer Leiter.

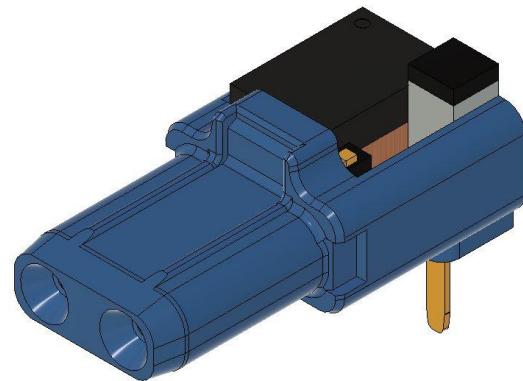


**Abb. 1:** gefilterter Single Pair Ethernet Steckverbinder; (rechts), links: eingesetzte Komponenten für die Signalfilterung

Das im Rahmen des AMPERE-Projekts erstellte Konzept für gedruckte Elektronik hat zum Ziel, alle für die sichere Übertragung erforderlichen Komponenten, direkt in den Steckverbinder zu integrieren und zu einer funktionierenden Schaltung aufzubauen. Somit kann ein kleiner, funktional integrierter Steckverbinder erhalten werden (Abb. 2 und 3).



**Abb. 2:** voll integrierter und ummantelter  
SPE-Steckverbinder



**Abb. 3:** hybrid gefertigter SPE-  
Steckverbinder mit integrierten  
Komponenten und gedruckten Drähten

### 3.2 Anforderungen an die elektrische Filterung

Weitere Filteranforderungen werden an den herzustellenden Steckverbinder und die in ihm enthaltenen elektronischen Bauteile gestellt. Das Medium Dependent Interface (MDI) dient als Verbindung zwischen dem Kabel und dem physikalischen Medium, dem PHY-Chip, der aus Datensignalen Bits erzeugt und zur Weiterverarbeitung weiterleitet.

Die passiven Komponenten des MDI haben verschiedene Aufgaben, wie z.B. die korrekte Weiterleitung von Datensignalen, Signalentstörung, galvanische Trennung oder auch den Transport von elektrischer Energie im Falle von Power over Data Line (PoDL).

Um eine fehlerfreie Datenkommunikation zu gewährleisten, müssen bei der Herstellung mittels additiver Fertigungsverfahren auch die in den verschiedenen IEEE 802.3-Standards definierten Grenzwerte für Rückflusdämpfung und Umwandlungsdämpfung eingehalten werden.

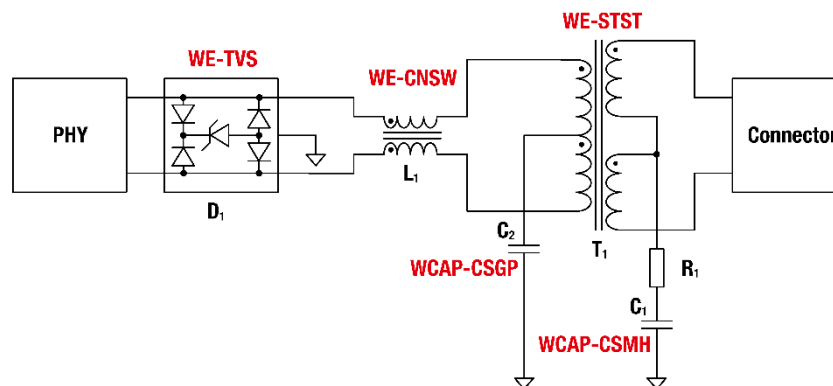
### 3.3 Anforderungen an die Isolierung

Die grundlegenden Anforderungen werden im Folgenden kurz anhand der Schaltung mit einer Bandbreite von 0,1 bis 20 Mhz und einer Reichweite von 1000 m (10Base-T1; ohne Power over Dataline) dargestellt (Abbildung 4).

Abgesehen von der Automobilindustrie gilt in der IEEE 802.3 für Signalisierungssysteme die Isolationsanforderung nach IEC 62368-1, was 1500 V AC für 60 Sekunden entspricht. Auch eine Gleichspannung von 2250 V DC für 60 Sekunden oder bestimmte Prüfspannungsimpulse sind zulässig.

Zentrales Element der Schaltung ist ein Signalübertrager (WE-STST), der für eine galvanische Trennung sorgt und im Idealfall die Datensignale nicht beeinflusst. Der Übertrager ist an

seinen Mittelpins mit Kondensatoren (WCAP-CSGP, WCAP-CSMH) gegen GND abgeschlossen. Zur Unterdrückung von Gleichtaktstörungen wird eine Gleichtaktdrossel (WE-CNSW) eingesetzt. Zum Schutz vor ESD-Impulsen ist eine TVS-Diode (WE-TVS) zwischen der Gleichtaktdrossel und dem PHY-Chip angeordnet. Die ESD-Unterdrückung ist noch besser, wenn sich die TVS-Diode zwischen dem Stecker und dem Transformator befindet. Um jedoch bei Hi-Pot-Tests keinen Kurzschluss zwischen Signalpins und GND zu verursachen, muss die Diode während des Tests von GND getrennt werden.



**Abb. 4:** SPE-Schaltplan mit Transformatorlösung

Die einzelnen Komponenten der Schaltung werden im Folgenden näher beschrieben.

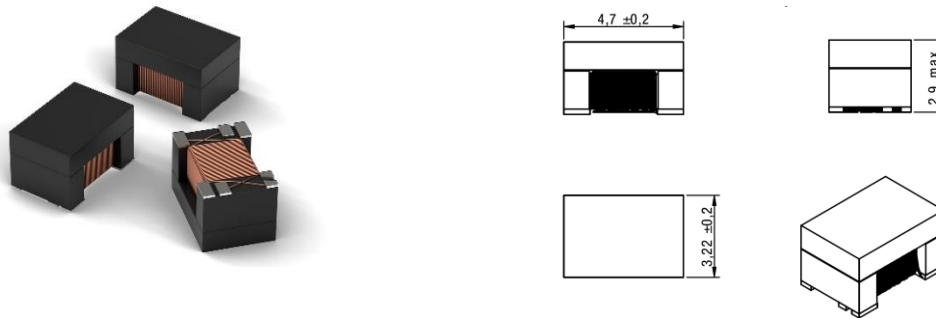
### 3.4 Galvanische Trennung mit einem Transformator

Der Signalübertrager ist für die galvanische Trennung im Single Pair Ethernet ausgewählt. Seine kompakte Bauform im Vergleich zu konventionell gefertigten LAN-Transformatoren bietet zusammen mit einer hohen Induktivität von 350  $\mu\text{H}$  gute Signaleigenschaften auch bei niedrigen Frequenzen.

Der Übertrager besteht aus einem MgZn-Kern, der von zwei Seiten bifilar gewickelt ist, d.h. Wicklungen der Primär- und Sekundärseite liegen zur Signalkopplung übereinander. Die Isolation wird durch die Kunststoffummantelung der Drähte, sowohl auf der Primär- als auch auf der Sekundärseite, gewährleistet. Durch die direkte Kopplung und das Übertragungsverhältnis von 1:1 werden Differenzsignale mit nur sehr geringer Dämpfung übertragen, Gleichstromsignale werden durch die galvanische Trennung blockiert.

Bei Single Pair Ethernet muss der Signalgeber zusätzlich zur galvanischen Trennung Daten im Frequenzbereich zwischen 0,1 MHz bis 20 MHz (10BASE-T1) und 1 MHz - 66 MHz (100BASE-T1) übertragen. Für 10BASE-T1 und 100BASE-T1 ist es möglich, den gleichen Transformator zu verwenden. Der Parameter für die Signalintegrität ist neben der

Rückflussdämpfung (RL) die Einfügedämpfung (IL). Über den gesamten Signalfrequenzbereich sollte die Einfügedämpfung -3 dB nicht unterschreiten.



**Abb. 5:** Abmessungen des Signaltransformators (WE-STST)

### 3.5 GND-Anschluss des Transformators

Das Gleichtaktunterdrückungsverhältnis (CMRR) ist ein Parameter, der angibt, wie gut Gleichtaktsignale gefiltert werden. Ziel ist es hier, einen guten Wert über den gesamten Frequenzbereich zu erreichen, da Gleichtaktsignale die Hauptursache für Datenausfälle sind. Die CMRR-Werte können erheblich verbessert werden, indem die Mittelanzapfung des Transformators mit Masse verbunden wird. Auf diese Weise bietet der GND-Anschluss der Mittelanzapfung einen hervorragenden niederohmigen Pfad für Gleichtaktsignale.

Auf der Kabelseite besteht die GND-Verbindung aus einem Abschlusswiderstand, der mit einem 1 nF-Kondensator verbunden ist. Der Widerstand schließt das SPE-Signal mit 100  $\Omega$  ab, während der Kondensator einen niederohmigen Pfad zu GND bietet und eine galvanische Isolierung von 2 kV aufweist.

Der Kondensator C1 (WCAP-CSGP) am Mittelabgriff des Transformators aus Abbildung 5 hat zwei Aufgaben. Zum einen verhindert er einen Kurzschluss der Offsetspannung gegen GND, die vom PHY ausgegeben wird und der dem Datensignal überlagert ist. Zum anderen stellt er eine HF-Verbindung zur Masse her, so dass Gleichtaktstörungen über ihn gut abgeleitet werden. Der Abgleich der Signale um 0 V erfolgt nach dem Übertrager, da er nur den Wechselanteil im Signal durchlässt und die Offset-Gleichspannung sperrt.

Abgesehen von den Mittelstiften hängt das Gleichtaktverhalten des Transformators auch von parasitären Effekten zwischen seinen Wicklungen ab. Durch die Anordnung der Wicklungen übereinander wird versucht, die so genannte Streuinduktivität so gering wie möglich zu halten, was jedoch die parasitäre Kapazität zwischen den Wicklungen erhöht. Durch die Wahl des Isolationsmaterials, die Anordnung der Wicklungen und andere konstruktive Maßnahmen können die parasitären Effekte auf ein Minimum reduziert werden, so dass der Transformator bis in den Hochfrequenzbereich von über 60 MHz eingesetzt werden kann.

### 3.6 Signalfilterung mit Gleichtaktdrossel

Das Ziel der Gleichtaktdrossel ist es, das Differenzsignal auszugleichen, d. h. die Signalleistung in beiden Leitungen sollte gleich sein, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen. Um dieses Ziel zu erreichen, sollte die Gleichtaktstörung entfernt werden, ohne die Integrität des Differenzsignals zu beeinträchtigen. Daher ist der Einsatz einer Gleichtaktdrossel mit großer Gleichtaktimpedanz und kleiner Gegentaktimpedanz im gewünschten Frequenzbereich erforderlich.

Die Drossel (WE-CNSW) hat eine Impedanz von fast 45  $\Omega$  bei 1 MHz und 2200  $\Omega$  bei 100 MHz. Die Wahl der Gleichtaktdrossel hat auch einen Einfluss auf die Mode Conversion. Eine höhere Mode Conversion bedeutet, dass in einigen Frequenzbereichen ein Teil des Differenzsignals in ein störendes Gleichtaktsignal umgewandelt wird.

Je höher die Windungszahl einer Drossel mit gleicher Wicklungstechnik ist, desto höher (schlechter für die Signalintegrität) ist die Mode Conversion zwischen Differenz- und Gleichtakt.

### 3.7 ESD-Unterdrückung

TVS-Dioden können Überspannungen auf ein Niveau reduzieren, das für ICs unkritisch ist und keine Einkopplung von Störsignalen in andere Spuren verursacht. Neben der Klemmwirkung sollen die TVS-Dioden das Datensignal nicht beeinflussen.

Um sicherzustellen, dass das SPE-Datensignal nicht gestört wird, sollte die parasitäre Kapazität der TVS-Diode 2 pF nicht überschreiten.

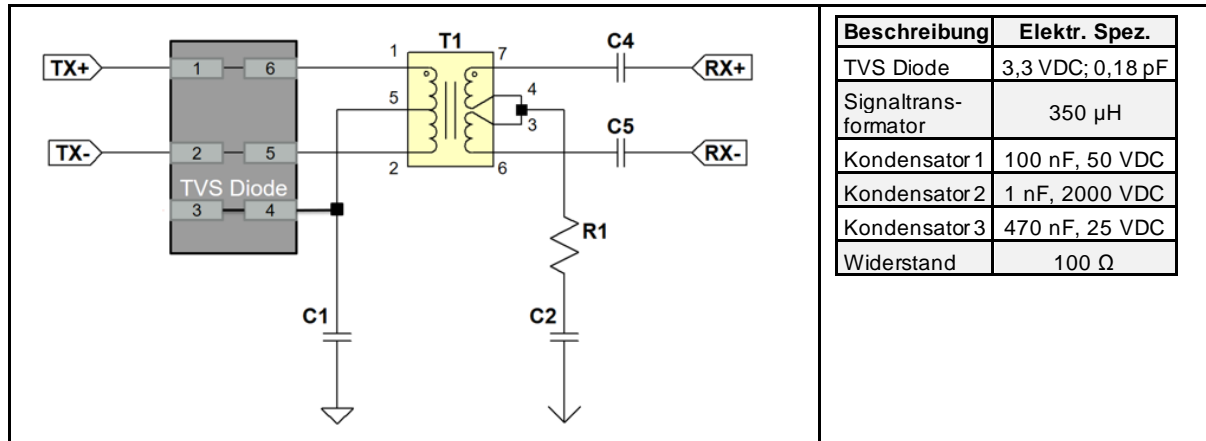
Ausgewählt für SPE-Systeme aus der WE-TVS Super Speed Serie, die an den beiden Pins für den Signaleingang (IO1 und IO2) angeschlossen werden können. Die Diode ist für Datensignale < 3,3 V<sub>Peak</sub> mit einer Eingangskapazität von 0,27 pF geeignet.

Bei 10 GHz (d.h. weit über den geforderten 66 MHz) beträgt der IL-Wert -1,57 dB. Die TVS-Diode ist also für das Datensignal fast unsichtbar.

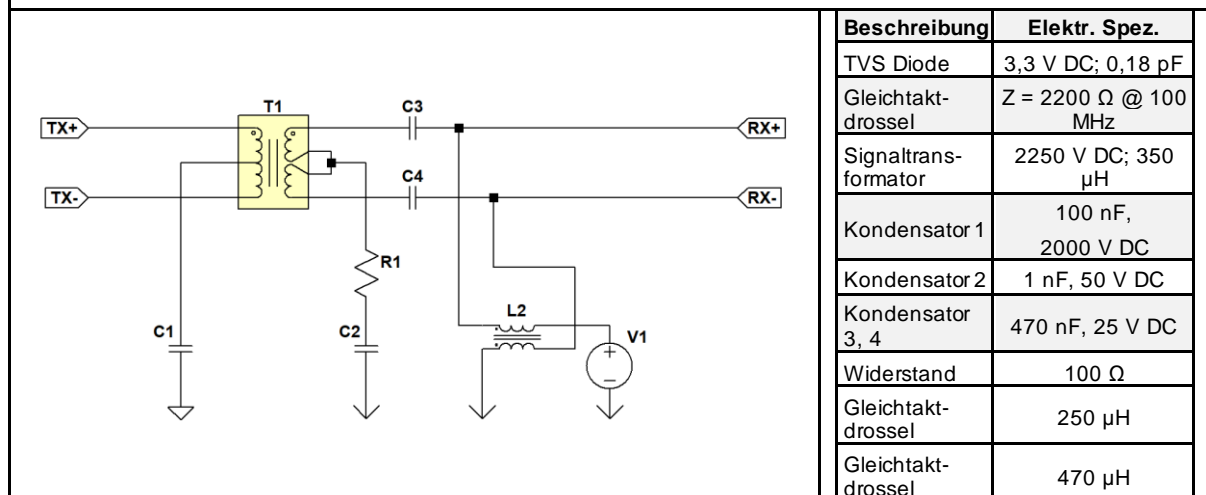
Im Allgemeinen ist es am besten, die TVS-Diode so nah wie möglich am Steckverbinder zu platzieren, da der hochfrequente ESD-Impuls leicht in andere Signalleitungen eingekoppelt werden kann. Während eines Hochspannungstests wird die TVS-Diode jedoch ausgelöst und schaltet in den niederohmigen Modus. Um einen Kurzschluss und die Zerstörung der Diode durch den Stromfluss im Hipot-Test zwischen Signalpins und GND zu vermeiden, wird die Diode daher entweder zwischen Transformator und PHY platziert oder (wenn sie zwischen Buchse und Transformator platziert ist) während des Tests von GND getrennt.

### 3.8 Elektronische Schaltungen

Unter Berücksichtigung der benötigten Anforderungen wurden die vorläufigen Schaltpläne für den Anwendungsdemonstrator erstellt. Der in den Abbildung 6 und 7 dargestellte Schaltplan wurde getestet und simuliert.



**Abb. 6:** Elektronische Schaltung zur Datenübertragung von 0,1 bis 20 MHz und einer Reichweite von bis zu 1000 m (10Base-T1) und Stückliste



**Abb. 7:** Vorläufige elektronische Schaltung für Datenübertragung von 0,1 bis 20 MHz und einer Reichweite von bis zu 1000 m und Power over Data Line (10Base-T1 + PoDL) und Stückliste

### 3.9 Simulation des SPE-Steckverbinders

Eine Übertragungsstrecke für Single Pair Ethernet besteht aus folgenden Elementen: Dem Linksegment (Übertragungsmedium, hier ein verdrehtes Kabel), der Media Dependent Interface (de.: Medien abhängige Schnittstelle; auch MDI genannt), und dem PHY Chip.

Die MDI ist wiederum aufgeteilt in den Steckverbinder und der dahinterliegenden Elektronik zur Signalübertragung und Störfilterung. Überwiegend sind Steckverbinder und

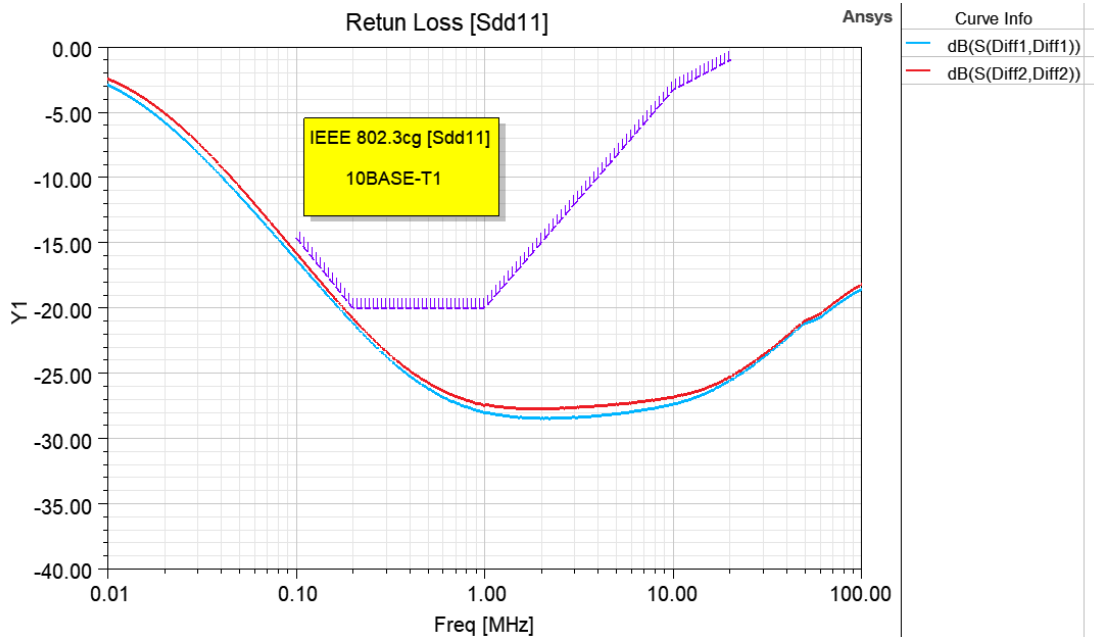


Filterkomponenten getrennt auf der Platine aufgebracht. Will man eine sehr kompakte Schaltung haben, können die Filterkomponenten in den Stecker integriert werden. Jedoch geht die Integration der Filterkomponente in den Steckverbinder mit einigen Herausforderungen einher.

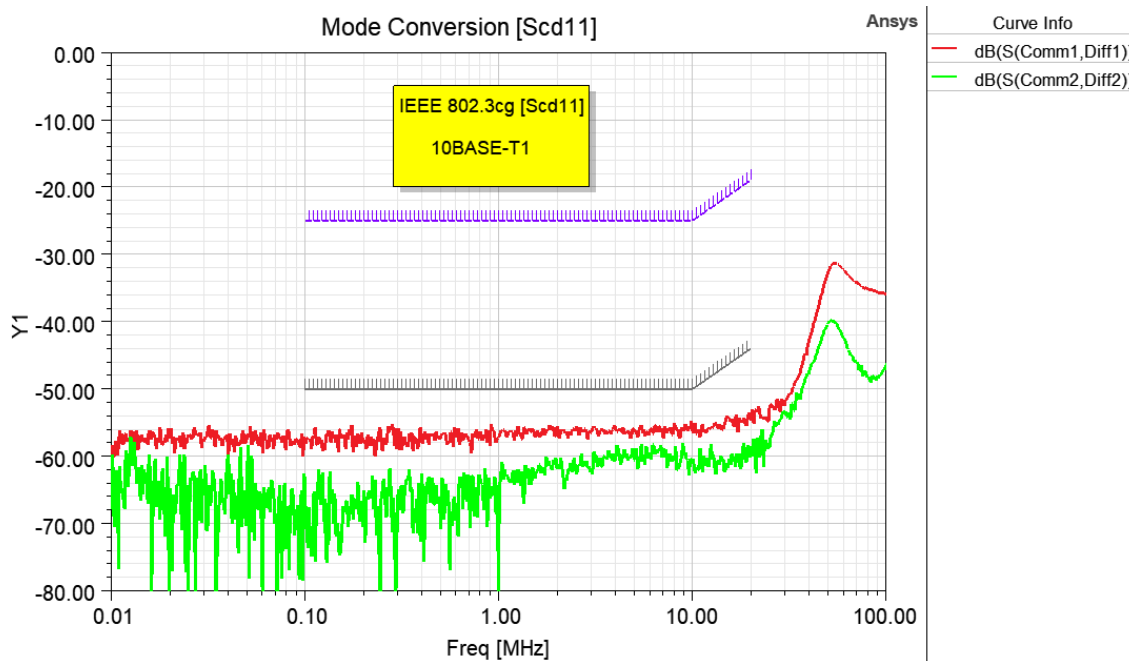
Für die Herstellung kompakter und funktionaler Single pair Ethernet Steckverbinder sind kleine Komponenten als auch geringe Abstände zwischen den einzelnen Komponenten gefordert. Aufgrund der im Industriestandard IEEE802.3cg definierten Rahmenbedingungen für Steckverbinder, stellt sich dies als sehr herausfordernd dar. So ist eine galvanische Isolation von 1,5 kV gefordert, die z.B. durch Einbau eines Transformators, durch Einsatz zweier Kondensatoren und durch größere Abstände zwischen den Leitern / Komponenten hergestellt werden kann.

Um für die angestrebten Single pair Ethernet Steckverbinder den optimalen Kompromiss zwischen eingesetzten Komponenten, Baugröße der Komponenten, Interaktion zwischen den Komponenten und Einhaltung der in der IEEE802.3cg vorgegebenen Standards zu erzielen, wurden verschiedenste Schaltungsaufbauten realisiert und untersucht. Durch Messung der benötigten Kennzahlen, konnte mit Hilfe weiterführender Simulationen ein Kompromiss zwischen den oben beschriebenen Anforderungen für die Schaltung 10BaseT1 gefunden werden. Abbildung 8 zeigt dabei ein sehr gutes Reflektionsverhalten für das in Abbildung 6 aufgezeigte Schaltbild für 10BaseT1, bei Einsatz mit den in der Tabelle aufgelisteten Komponenten. Zu sehen sind die nach der Norm geforderte Grenze, die nicht überschritten werden darf und die Signalreflektionen in rot und blau auf der Stecker- und der PHY Seite. Eine weitere Bedingung der IEEE802.3cg ist die Minimierung der Moden Umwandlung (Mode Conversion). Gemessen wird, wie viel der störenden Gleichtaktsignale in Gegentaktsignale umgewandelt werden, sowie auch anders herum. Beide Fälle stellen eine Störung für das System dar und müssen daher unterdrückt werden. Die in Abbildung 9 aufgeführte Grenze wird anhand der in Abbildung 6 und 7 (Tabelle) verwendeten Komponenten erfolgreich unterschritten.





**Abb. 8:** simuliertes Reflektionsverhalten für 10BaseT1 Schaltung



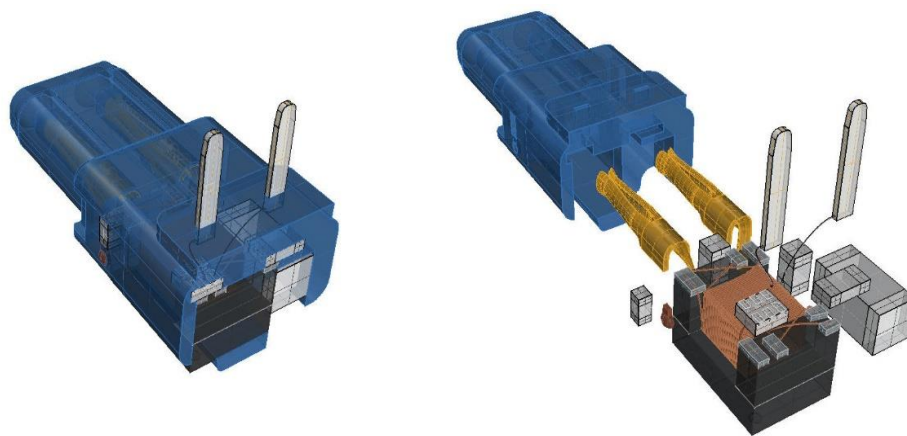
**Abb. 9:** simulierte Moden Umwandlung für 10BaseT1 Schaltung

## 4 Design und Fertigung des Produktdemonstrators

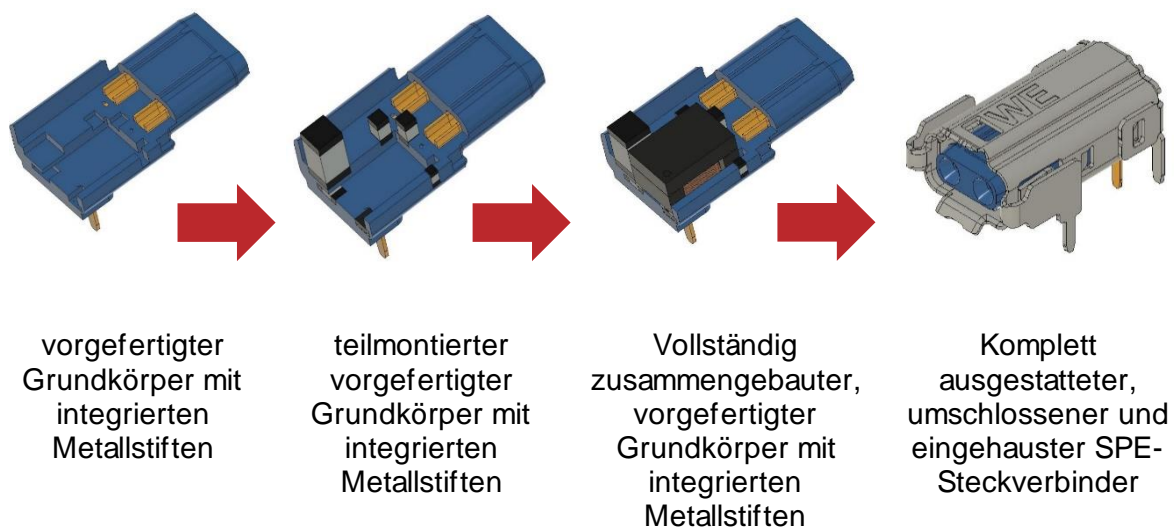
### 4.1 SPE-Steckerdesign

Dieses Kapitels stellt das im Projekt erarbeitete Steckerdesign und deren Evaluierung vor. Dabei soll vor allem auf die im Projekt sich dargelegten Herausforderungen kurz eingegangen und Lösungen aufgezeigt werden.

Die Grundüberlegung für den Fertigungsprozesses war eine herzustellende Aufnahmeform für die unterschiedlichen SMD-Komponenten zu nutzen. In diese Form werden im Anschluss via eines Pick&Place-Prozesses die benötigten SMD Komponenten schrittweise eingelegt und elektrisch verbunden. Um diese gegeneinander zu isolieren, sollten zwischen den Komponenten dünne Wände gedruckt, auf denen wiederum die weiteren Komponenten aufgebracht werden. Abbildung 10 stellt den angedachten Aufbau und Abbildung 11 die anvisierte Vorgehensweise grafisch dar.

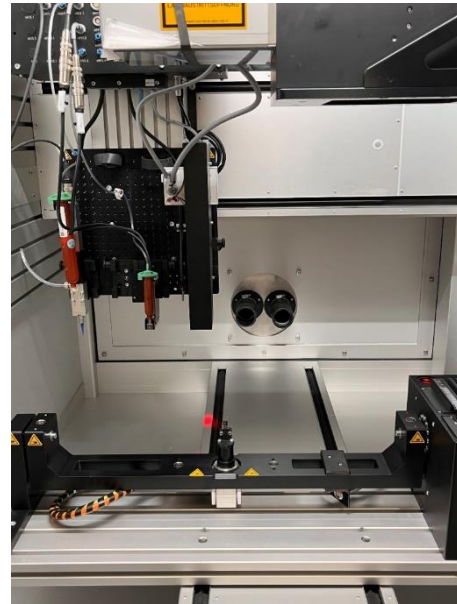


**Abb. 10:** Aufbau des hybrid gefertigten SPE-Steckverbinder mit integrierten Komponenten



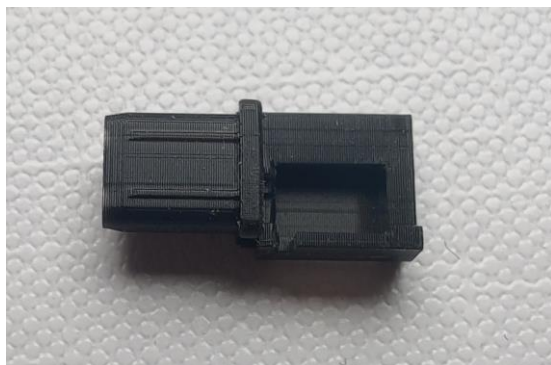
**Abb. 11:** Schrittweise Fertigung des SPE-Steckverbinders

Innerhalb des Projektes wurden unterschiedliche Aufnahmeform getestet, evaluiert und an dem hybriden Forschungssystem 15XSA der Firma Neotech Amt (Abb. 12) getestet.

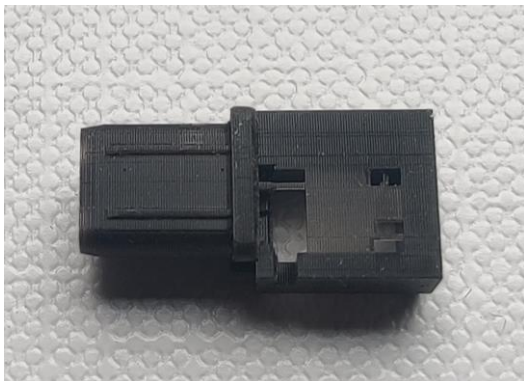


**Abb. 12:** Installiertes Neotech AMT 15XSA Fertigungssystem bei der Würth Elektronik eiSos (links) und Sicht in den Bauraum (rechts)

Abbildung 13 zeigt die Ausgangsvariante des Grundkörpers für die SMD-Aufnahmeform. In weiteren Iterationsschritten wurde eine geänderte Form für die Aufnahme der elektronischen Bauteile genutzt. Innerhalb der unteren Kavität wurden Durchgangslöcher eingebracht, durch die die Kontaktierungs pads des Transformators hindurch ragen. Hierdurch ist es möglich die Form beidseitig zu nutzen und den elektrischen Schaltkreis von verschiedenen Ebenen aus aufzubauen. Abbildung 14 stellt eine weiterentwickelte Grundform für die elektronischen Komponenten.



**Abb. 13:** Ausgangsvariante des Grundkörpers des SPE-Steckverbinders



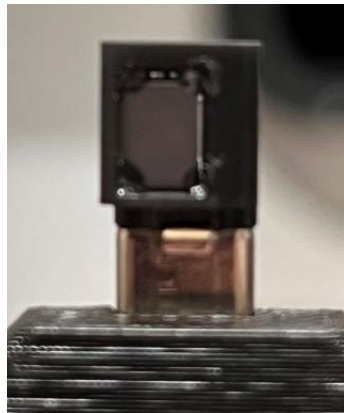
**Abb. 14:** weiterentwickelter Grundkörper des SPE-Steckverbinders

Während ersten Designiterationen des SPE-Steckverbinders zeigte sich, dass eine genaue Positionierung der Komponenten innerhalb der vorgesehenen Kavitäten im Steckverbinderdesign nicht möglich war (Abbildung 15). Um hier den bestmöglichen Beitrag für eine erfolgreiche Positionierung durch das Steckerdesign leisten zu können, wurden kritische Kavitäten mittels einer Abschrägung an der Innenwand für eine erfolgreiche Selbstzentrierung der Komponente angelegt. Des Weiteren wurden für die zu druckenden Leiterbahnen Kanäle direkt mit in das Design aufgenommen. Hierdurch konnte ein Verlaufen und eine Kontaktierung zwischen den Leiterbahnen und somit Kurzschlüsse verhindert werden. Für einen besseren Kontakt der Leiterbahn an die Komponenten, verlaufen Kanäle zu den Komponenten schräg nach oben. Hierdurch konnte gewährleistet werden, dass eine vollständige Kontaktierung der Komponenten sichergestellt wird.



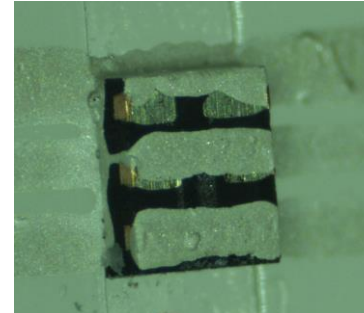
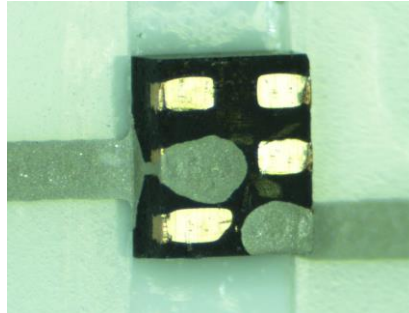
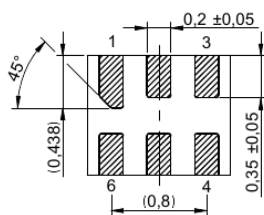
**Abb. 15:** Beispiel für Positionierungsfehler in früheren SPE-Steckverbinderkonstruktionen

Weiterführende Versuche zeigten, dass ein automatisiertes Einsetzen des Transformers in die dafür vorgesehene Kavität und Fixierung mittels Harzmaterial wiederholbar funktioniert. In einem zweiten Schritt konnte des Weiteren gezeigt werden, dass ein kontaktieren des Transformers an den herausstehenden Kontaktpads erfolgreich durchgeführt werden kann (Abbildung 16).



**Abb. 16:** Automatisiert eingesetzter und fixierter Transformator (links) und aufgedruckte Leiterbahnen an den Kontaktpads

Die in der Simulation eingesetzte und am Realaufbau getestete Diode konnte mit den im Neotechsystem eingesetzten Druckwerkzeugen nicht korrekt kontaktiert werden. Der Grund hierfür liegt in den sehr eng zueinanderstehenden Kontaktpads die einen Abstand von 300  $\mu\text{m}$  und eine Breite von 200  $\mu\text{m}$  aufweisen. Die mittels Piezojet aufgebauten Leiterbahnen besitzen eine minimale Breite von 300  $\mu\text{m}$ , wodurch es während der Herstellung zu Kontaktschlüssen kommt, welche im späteren Verlauf einen Kurzschluss verursachen (Abbildung 17).



WE-TVS Diode

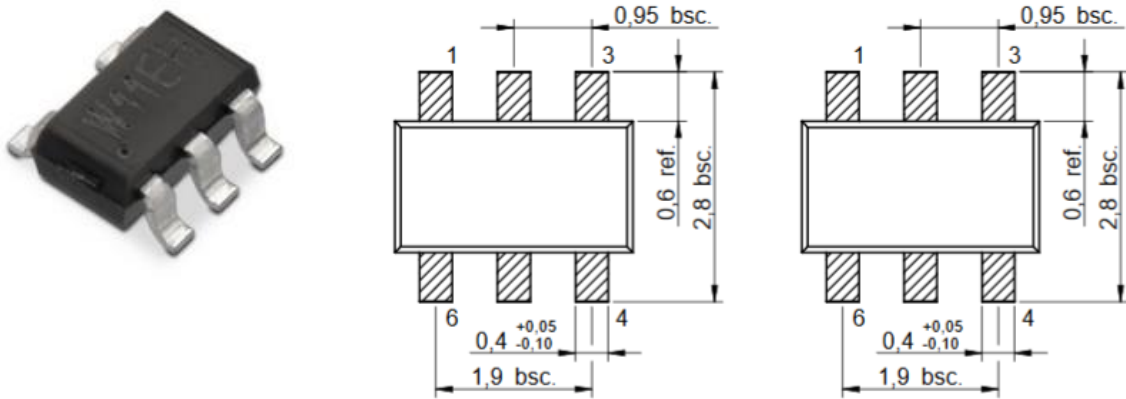
Abmessungen Variante 1

Abmessungen Variante 2

**Abb. 17:** Mit sich berührenden Leiterbahnen kontaktierte Diode (Bild Neotech AMT)

Um diese Herausforderung zu überwinden, wurden unterschiedliche Herangehensweisen eruiert. Hierzu zählt beispielsweise eine Ablation der Silbertinte mittels Laser, um vorhandene Kontaktschlüsse im Nachhinein zu verhindern. Eine andere Möglichkeit diese Kontaktschlüsse zu verhindern war der Einsatz eines Nanojets der eine Bahnbreite von 20  $\mu\text{m}$  erlaubt. Hierdurch können die Leiterbahnen sehr genau und definiert aufgebracht werden. Nachteilig bei diesem Verfahren ist zum einen die erhöhte Bearbeitungszeit, zum anderen der benötigte sehr geringe Abstand zur Bearbeitungsoberfläche. In dem hier beschriebenen Fall führt dies zu einer sehr hohen Bearbeitungszeit, da vorab die Oberfläche gescannt werden und mehrere Leiterbahnen gedruckt werden müssten. Aufgrund dessen wurde ein Austausch

der getesteten Diode priorisiert. Es konnte nach weiteren Untersuchungen zwei weitere Dioden identifiziert werden, mit denen eine Kontaktierung erfolgsversprechend erscheint (Abbildung 18).



WE-TVSDiode

Abmessungen Variante 1

Abmessungen Variante 2

**Abb. 18:** Identifizierte Alternativdioden

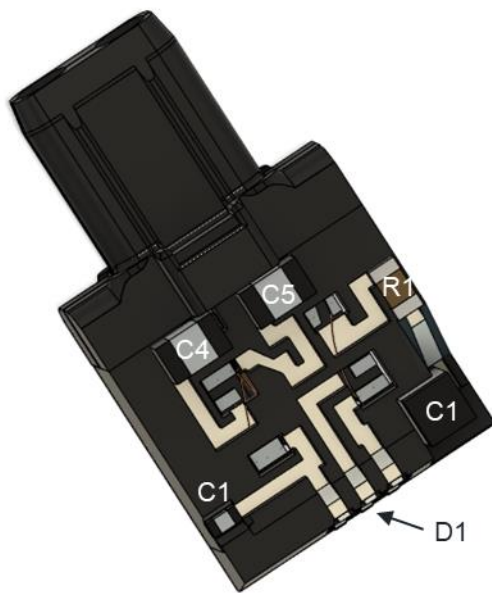
Aufgrund der voran gegangenen Untersuchungen wurde eine finale Form für die Aufnahme der SMD-Komponenten und somit das finale Design des SPE-Steckverbinder erarbeitet. Abbildung 19 – 22 zeigt schematisch das finale innere SPE-Steckverbinderdesign mit und ohne eingesetzte Komponenten dar.



**Abb. 19:** Oberseite des SPE-Steckverbinder-Designs



**Abb. 20:** Unterseite des SPE-Steckverbinder-Designs



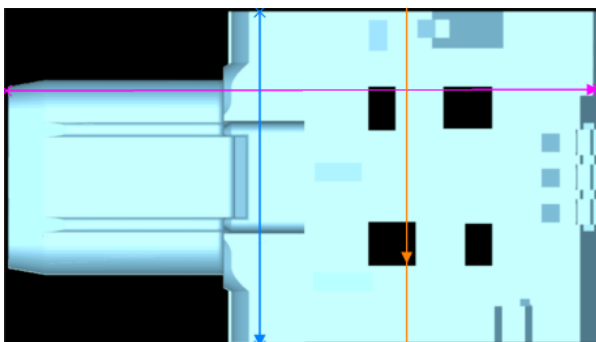
**Abb. 21:** Oberseite des SPE-Steckers mit integrierten Komponenten und elektrischer Verbindung



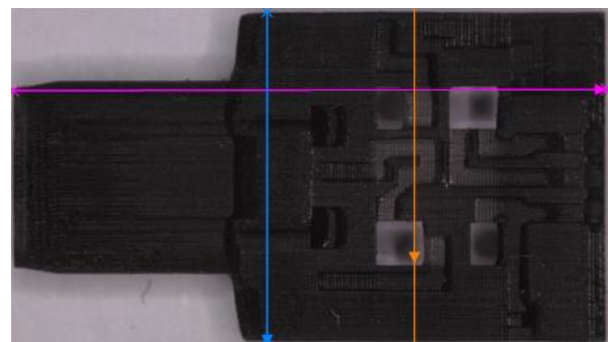
**Abb. 22:** Unterseite des SPE-Steckers mit integrierten Komponenten und elektrischer Verbindung

#### 4.2 Evaluation Steckerdesign

Neben der zielführend angepassten Form des inneren Steckverbinderdesigns, ist die additive Herstellung der Steckverbinders von entscheidender Bedeutung. Hier ist darauf zu achten, dass die während des Druckes entstehenden Abweichungen den Anforderungen an den Steckverbinder entsprechen. Um hier eine Abschätzung und Evaluation des gedruckten Steckverbinders zu erhalten, wurde dieser messtechnisch untersucht. Hierfür wurde der gedruckte Stecker der vorliegenden Druckdatei (STL-Datei) gegenübergestellt und deren Abweichungen erfasst. Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen links die vorhandene STL-Datei und rechts den gedruckten Stecker.



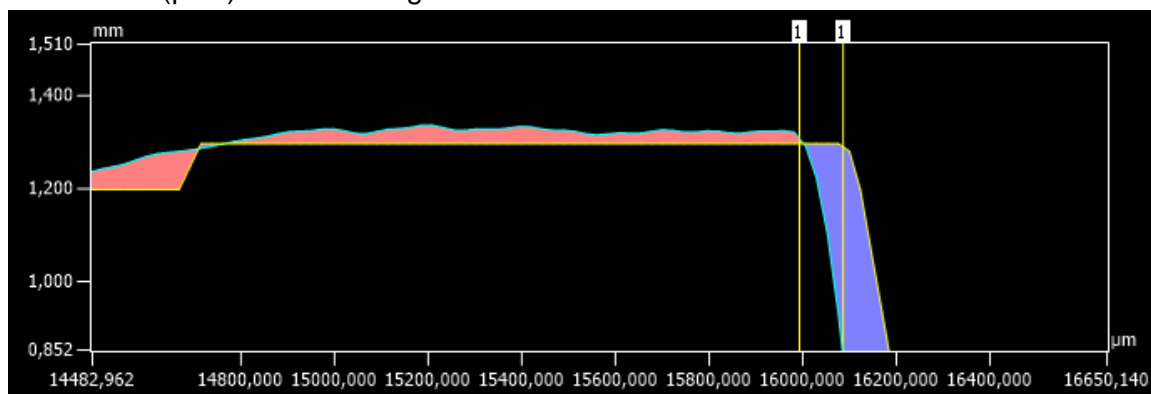
**Abb. 23:** STL-Datei des gedruckten SPE-Steckers mit markierten Konturlinien



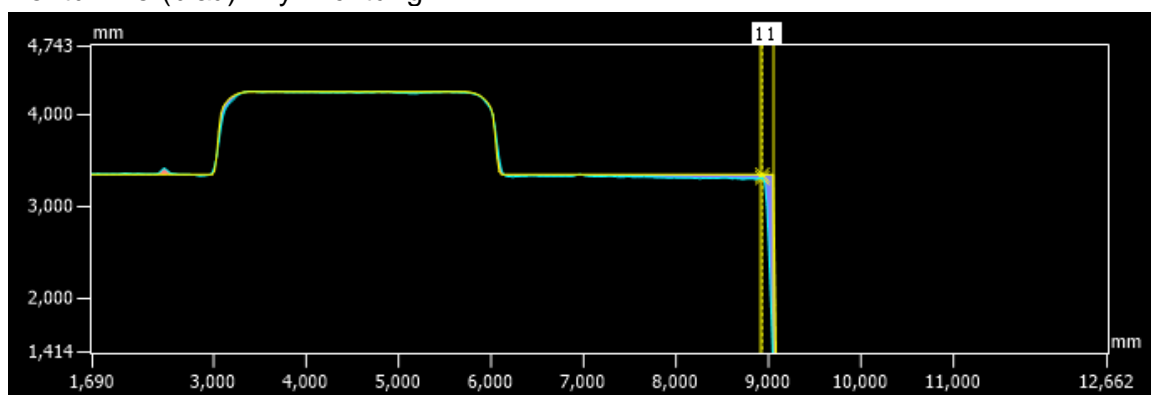
**Abb. 24:** Gedruckter SPE-Stecker mit markierten Konturlinien

Die eingezeichneten Linien zeigen dabei die aufgenommenen Höhenprofile. Die eingezeichneten Linien zeigen dabei die aufgenommenen Höhenprofile. Bei der Untersuchung lag das Augenmerk vor allem auf der Herstellung kleinerer Details, wie der Kanäle für die Silberpaste oder der Kavitäten für die elektronischen Komponenten. Die eingezeichneten Linien zeigen dabei die aufgenommenen Höhenprofile. Bei der Untersuchung lag das Augenmerk vor allem auf der Herstellung kleinerer Details, wie der Kanäle für die Silberpaste oder der Kavitäten für die elektronischen Komponenten. Um eine hinreichend genaue Auswertung der Druckgenauigkeit zu erreichen, wurden 20 gedruckte SPE-Steckverbinder gemessen. Um die Toleranzen des mit einem Asiga MAX Drucker hergestellten 3D-gedruckten Gehäuses im Vergleich zur STL-Datei zu überprüfen und die Präzision sowie Wiederholbarkeit zu bewerten, wurden insgesamt 20 Proben gemessen. Jede Probe wurde dreimal gemessen, um die Abweichungen des Druckergebnisses in x-, y- und z-Richtung zu überprüfen. Nach dem Scannen des Gehäuses wurden die Ergebnisse mit der STL-Datei überlagert, um die Abweichung der tatsächlichen Länge an den Enden des Gehäuses zu bestimmen. Hierfür wurden, wie in Abbildung 25 zu sehen, in die gemessenen SPE-Steckverbinder Höhenlinien eingezeichnet und die Höhendifferenz bestimmt. Die Achsbeschriftung wurde in kompatibel zum Achssystem des Druckers vorgenommen.

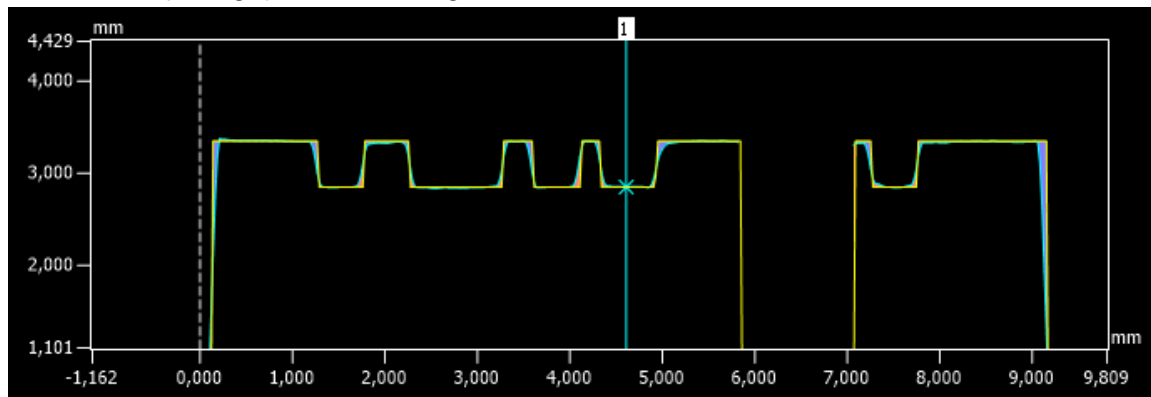
Konturlinie (pink) in z-Richtung



Konturlinie (blau) in y-Richtung



Konturlinie (orange) in x-Richtung



**Abb. 25:** Bestimmung der Höhendifferenz zwischen CAD-Modell und gedruckten Grundkörper

Aus den gemessenen Werten wurde im Anschluss die durchschnittliche, größte, kleinste und prozentuale Abweichung des gedruckten Grundkörpers gegenüber des konstruierten SPE-Design ermittelt (Tabelle 1). Es zeigt sich, dass in z- bzw. y-Richtung ein hinreichend genaues Druckerzeugnis vorliegt. So liegt die durchschnittliche Abweichung in z-Richtung bei 0,1 mm, in y-Richtung bei 0,06 mm. Dennoch zeigt sich, dass maximale Abweichungen von bis zu 0,2 mm in z- und 0,33 mm in y-Richtung möglich sind. Die Bestimmung der Abweichung in x-Richtung wurde anhand der eingebrachten Kanäle in der die Silberpaste gedruckt wird, vorgenommen. Dabei zeigt sich, dass die maximale Abweichung (0,065 mm) des gedruckten Bauteils gegenüber der Konstruktion geringer ausfallen als in z- bzw. y-Richtung. Dies relativiert sich unter der Betrachtung, dass die eingebrachten Kanäle eine Tiefe von nur 0,3 mm besitzen. Aus diesem Grund entsteht eine prozentuale Abweichung von ca. 5 %. Da die Kanaltiefe kein kritisches Design ist, ist eine max. Abweichung von 0,065 mm hinnehmbar. Grundsätzlich zeigten die Messungen, dass die Herstellung des SPE-Grundkörpers mittels des hier angewendeten DLP-Verfahrens eine ausreichend genaue Präzision ermöglicht.

**Tab. 1:** Abweichung des gedruckten SPE-Steckverbinders vs. konstruiertem Design

	z-Richtung	y-Richtung	x-Richtung
durchschnittliche Abweichung in mm	0.109	0.056	0.025
maximale Abweichung in mm	0.043	0.332	0.065
minimale Abweichung in mm	0.195	0.004	0.014
Abweichung in %	0.675	0.625	5.120

### 4.3 Herstellung der SPE-Produktdemonstratoren

Die Herstellung der SPE-Steckverbinder mit eingesetzten und kontaktierten SMD-Komponenten erfolgte in Zusammenarbeit mit der Neotech AMT auf dem Neotech 15XSA Fertigungssystem. Tabelle 2 stellt dabei die einzelnen Schritte für die Herstellung dar. Abbildung 26 zeigt dabei beispielhaft das gefertigte Innenleben des gefertigten SPE-Steckverbinders.

**Tab 2:** Überblick der durchgeführten Prozessschritte

Nr.	Werkzeug	Bearbeitungsschritt
1.	Externer Drucker (Asiga WE Labor)	Herstellung des Gehäuses auf externen Drucker
2.		Einsetzen der Kontaktstifte
3.	Kalibrierung	Kalibrierung aller Module in der Maschine (2 Kameras, Dispenser, PnP-Nadel, PiezoJet, UV, Bauteilschale)
4.		Registrierung und Messung der Position des vorgefertigten Teils beim Einbau in die Maschine (nur X/Y)
5.	Dispenser / PiezoJet	Vorbereiten des Dosierprozesses, um das richtige Punktvolumen zu erreichen
6.	Dispenser	Auftragen von Harzmaterialpunkten zur Fixierung der Bauteile
7.	PiezoJet	Auftragen der Leitpasten (punktuell) zur Verbindung des Transformatorpads mit den Stiften, auf denen sie platziert werden
8.	Pick&Place	PnP des Transformator (T1) in die Kavität mit Abstand X=150µm, Y=250µm
9.	Pick&Place	PnP der zwei Kondensatoren C4 und C5
10.	Pick&Place	PnP des Kondensators C2
11.	UV-Diode	UV-Härtung des Harzmaterials zur Fixierung der Komponenten



12.	PiezoJet	Auftragen von 2 leitenden Punkten zur Verbindung der Kondensatoren C4 und C5 mit den Transformatorpads + Pads für den Widerstand
13.	Pick&Place	PnP des Widerstandes
14.	Pick&Place	Drehen und Ausrichten des Werkstücks, Einsetzen des Kondensators C2
15.	Dispenser	Auftragen eines einzigen Leitpastenpunktes für den Anschluss des Seitenkondensators
16.	Pick&Place	PnP des Seitenkondensators
17.	UV-Diode	UV-Härtung des Harzmaterials zur Fixierung des Bauteils
18.	Pick&Place	Drehen und Ausrichten des Werkstücks
19.	Dispenser	Dosieren von Harzpunkten zur Fixierung der Diode
20.	UV-Diode	UV-Härtung des Harzmaterials zur Fixierung der Diode
21.	Pick&Place	PnP-Diode
22.	PiezoJet	Auftragen der Silberleitpaste zur Kontaktierung der Diode.
23.	Dispenser	Auftragen von Harzmaterial zur Fixierung der Abdeckung
24.	Pick&Place	PnP-Abdeckung mit integrierten Stiften.
25.	UV-Diode	UV-Härtung des Harzmaterials zur Fixierung der Abdeckung





Draufsicht Grundkörper



Draufsicht auf den Grundkörper mit gedruckter elektrischer Schaltung und bestückten Bauteilen



Draufsicht mit nachhaltiger Abdeckung



Seitenansicht Grundkörper



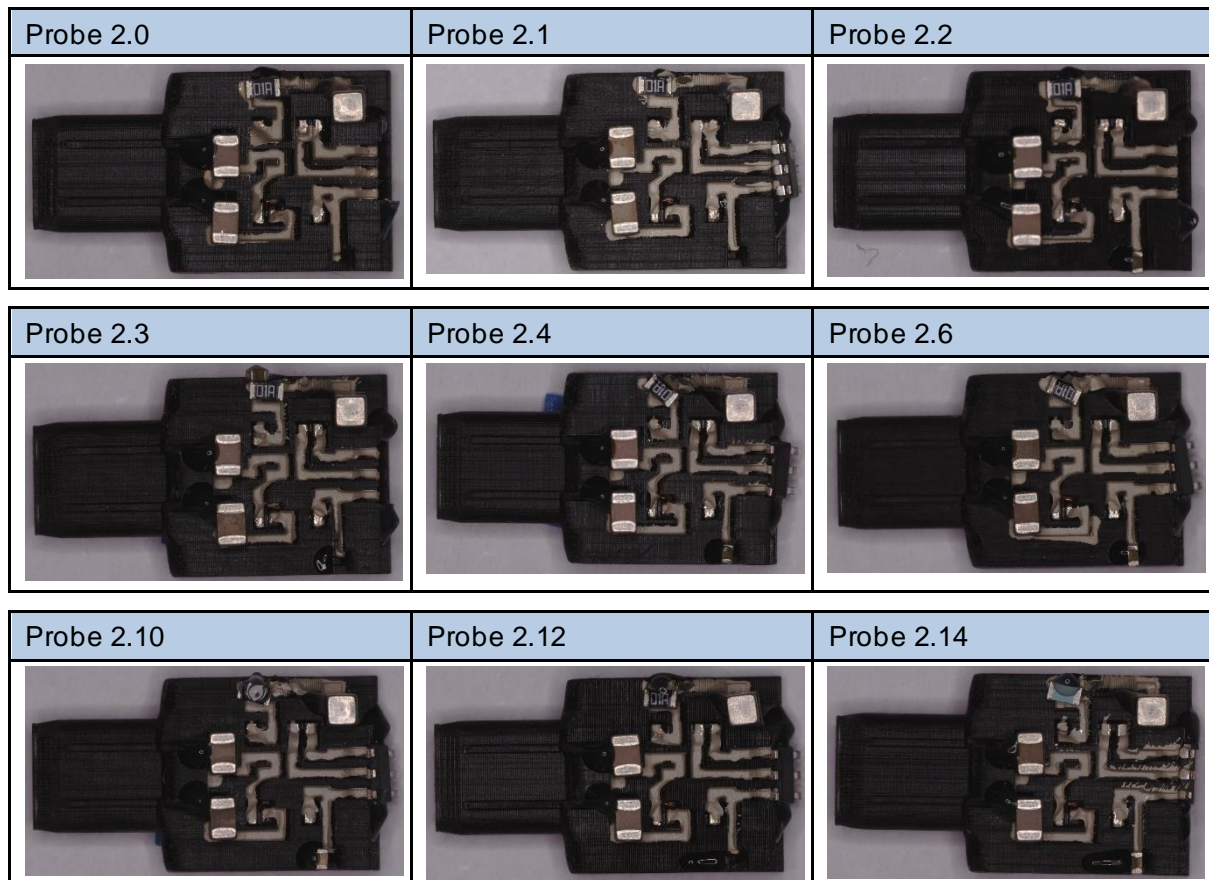
Seitenansicht des Grundkörpers mit gedruckter elektrischer Schaltung und bestückten Bauteilen



Seitenansicht mit nachhaltiger Abdeckung

**Abb. 26:** Innerer Aufbau des SPE-Steckverbinders mit eingesetzten und kontaktierten SMD-Bauteilen (Bilder Neotech AMT)

Die ersten Versuche zur Herstellung des SPE-Steckers mit einem geschlossenen Schaltkreis zeigten die grundsätzliche Möglichkeit mit Hilfe der im AMPERE-Projekt beschriebenen hybriden-Fertigungstechnologie einen SPE-Steckverbinder zu fertigen (Abbildung 27). Dennoch zeigten die Untersuchungen verschiedenste Herausforderungen auf.




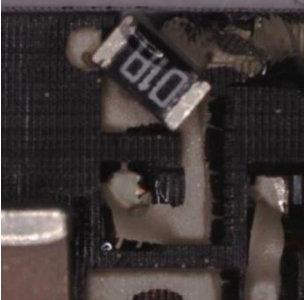

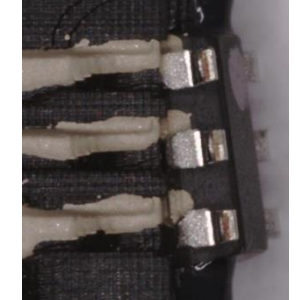


**Abb. 27:** Erste hybridgefertigte SPE-Steckverbinder mit elektronischer Schaltung

Auf Grundlage dieser ersten gefertigten Steckverbinder zeigten sich vor allem Herausforderungen bei der präzisen Positionierung der Komponenten und dem genauen Aufbringen der Silberpaste (Abbildung 27).

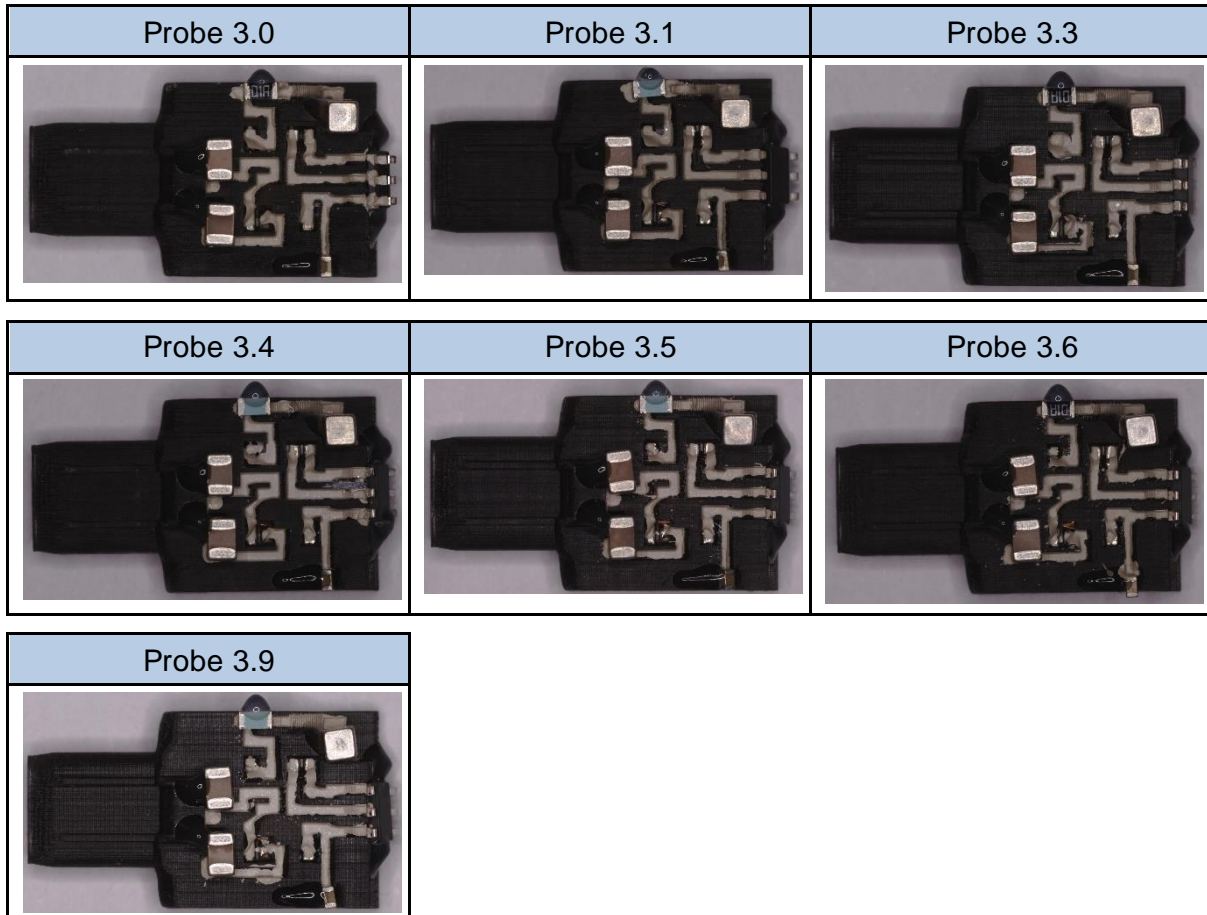
Gerade bei der präzisen Positionierung des R1 Widerstandes, zeigte sich ein Aufschwimmen der Komponente auf der Silbertinte und ein verrutschen der Komponente beim späteren Fixierens. Auch das Einbringen der Diode, in die dafür vorgesehene Kavität, zeigte sich als noch nicht wiederholbar.

Beim Verdrucken der Silbertinte zeigte sich des Weiteren, das durch ein zusammenlaufen der Silberpaste Kurzschlüsse erzeugt oder es zu einer Verringerungen des Querschnitts der Leiterbahn kam (Abbildung 28).

Kurzschluss	Silberpaste über Kavität gedruckt	Deutliche Verringerung des Querschnitts der elektrischen Leiterbahn
		
Positionierfehler des Widerstands (R1)	Positionierfehler des Kondensators (C2)	Positionierfehler der Diode (D1)
		

**Abb. 28:** Herausforderungen bei der Hybridfertigung des SPE-Steckers

Durch Anpassung des SPE-Steckverbinderdesigns als auch der Druckparameter konnten erste, oben beschriebene Herausforderungen teilweise gelöst oder abgeschwächt werden. Dennoch zeigt sich, dass weitere Entwicklungsarbeiten nötig sind, um einen funktionsfähigen SPE-Steckverbinder auf Basis hybrider Fertigungstechnologien herstellen zu können. Abbildung 29 zeigt den bisherigen Stand bei der Fertigung des SPE-Steckverbinders.



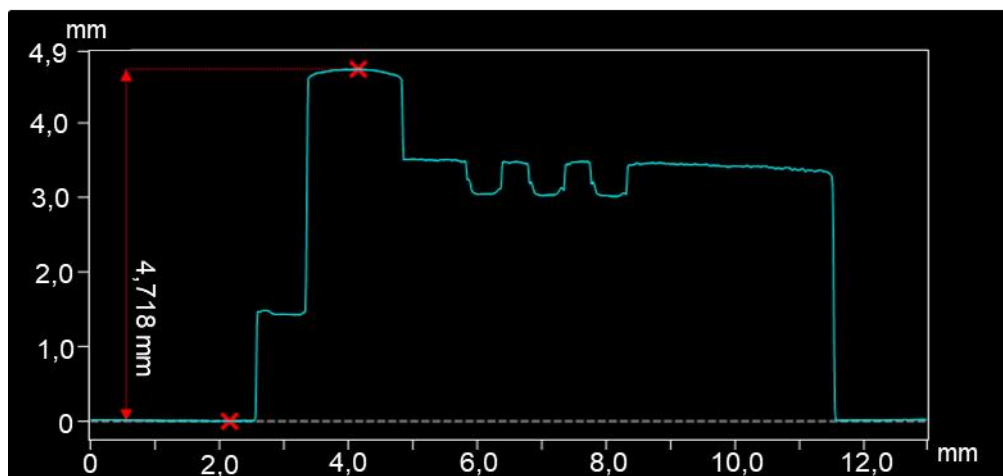
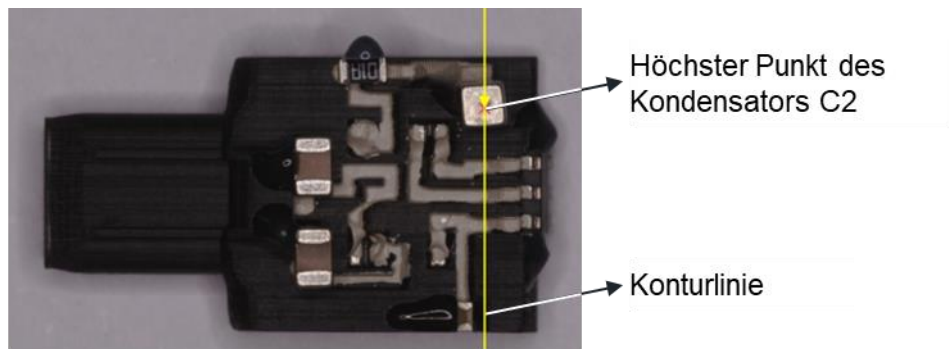
**Abb. 29:** hybrid gefertigte SPE-Steckverbinder

#### 4.3.1 Positionierung des C2-Kondensators

Für die Funktionsweise des elektrischen Schaltkreises ist die Höhe des platzierten C2 Kondensators ein entscheidender Faktor, da dieser direkt mit der metallischen Ummantelung kontaktiert werden muss. Die grundsätzliche Fertigung des SPE-Steckverbinders ist so aufgebaut, dass auf dem Grundkörper des SPE-Steckverbinders die elektronischen Komponenten platziert und mittels der verdruckten Silberpaste ein elektrischer Schaltkreis erzeugt wird. Im Anschluss wird ein Deckel auf den elektrischen Schaltkreis gesetzt, um diesen zu schützen und den eingebrachten Komponenten einen weiteren Halt gegenüber Erschütterungen und Vibrationen gibt. Um diese Kunststoffhülle wird im Anschluss eine metallische Ummantelung gelegt, welche den elektrischen Schaltkreis vor elektrischen und magnetischen Feldern schützt und gleichzeitig als Masse fungiert. Um eine mechanische Beschädigung des elektrischen Schaltkreises beim Einbringen des SPE-Steckverbinders in das Gehäuse zu verhindern, ist eine definierte Höhe des C2 Kondensators entscheidend.

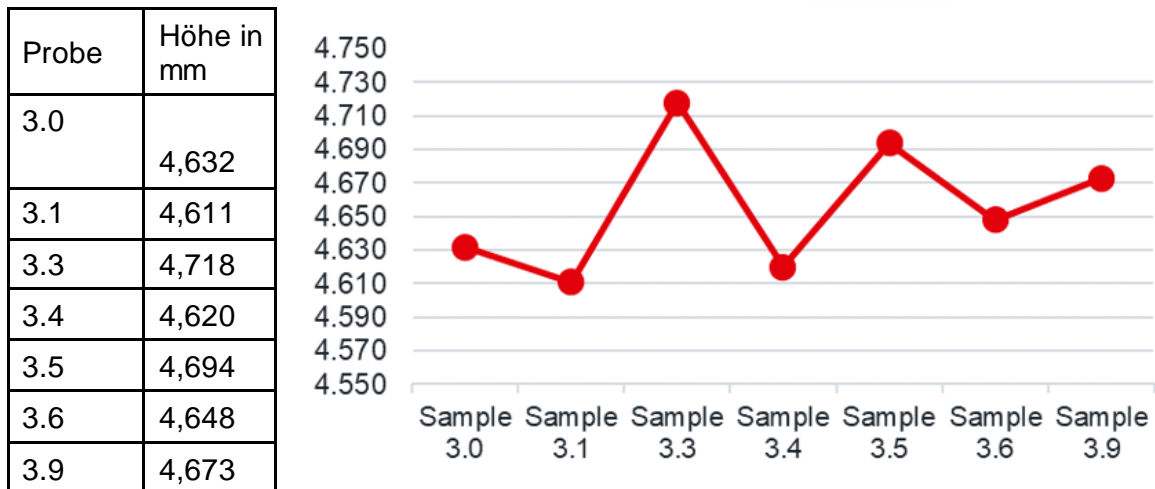
Für die Bestimmung der Kondensatorhöhe im SPE-Steckverbinder, wurde zu Beginn der höchste Punkt des Kondensators bestimmt (Abbildung 30, oben). Im Anschluss wurde eine Contourlinie über diesen Punkt gelegt, und der Abstand zur Messoberfläche gemessen

(Abbildung XX, unten). Da der SPE-Steckverbinder eine plane Oberfläche auf der unteren Seite besitzt, konnte davon ausgegangen werden, eine genaue Messung des höchsten Punktes des Kondensators zu erhalten.



**Abb. 30:** Bestimmung der Höhe des C2 Kondensators

Die Bestimmung der Kondensatorhöhe wurde für die letzten gelieferten Proben durchgeführt. Grundsätzlich zeigt sich, ein Höhenunterschied von zwischen allen Proben von ca. 0,1 mm vorliegt. Dieser Höhenunterschied kann dabei zum einen auf unterschiedliche Schichtdicken bei der Silberpaste zurückgeführt werden, zum anderen auf Toleranzen bei der Herstellung des Kondensators. Um diesen Höhenunterschied auszugleichen, ist das Gehäuse so zu konstruieren, dass eine kleine Federung, z.B. durch herausstehende Kontaktbeine, diesen Längenunterschied überwindet. Hierdurch kann die Kontaktierung des Kondensators mit der Ummantlung dennoch sichergestellt werden. Abbildung 31 zeigt den gemessenen Abstand des höchsten Punktes des C2 Kondensators zur Messoberfläche.



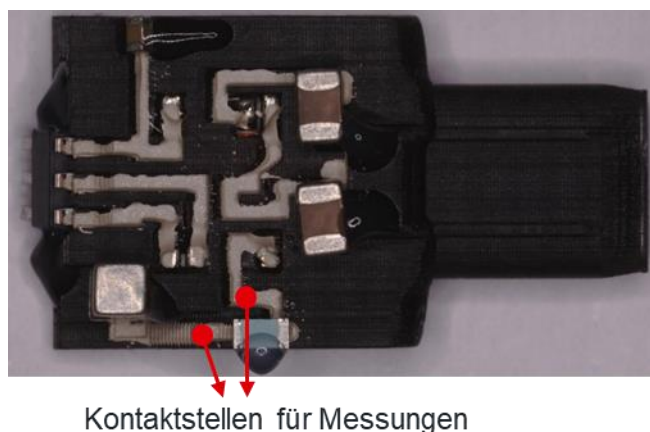
**Abb. 31:** Höhe des C2 Kondensatoren im SPE-Steckverbinder

#### 4.3.2 Kontaktierung des Widerstandes R1

Die Kontaktierung der elektrischen Komponenten erfolgt bei der Herstellung des SPE-Steckverbinders zum Teil durch ein Verdrucken der Silberpaste und einem anschließenden Eindrücken der Komponenten in die Paste. Hierdurch soll gewährleistet werden, dass eine vollständige Kontaktierung der elektrischen Komponenten gegeben ist. Um dies messtechnisch sicher zu stellen und die Leitfähigkeit der aufgetragenen Silberpaste zu untersuchen, wurde der elektrische Widerstand getestet. (Abbildung 32).

Innerhalb der Testreihe konnte gezeigt werden, dass bei allen untersuchten Proben eine vollständige Kontaktierung des eingesetzten Widerstandes gegeben ist. Des Weiteren zeigten die Messungen einen Widerstandsbereich zwischen  $100.2 \Omega$  -  $101.22 \Omega$ . Grundsätzlich kann daher davon ausgegangen werden, dass die verwendete Silberpaste eine ausreichend gute Leitfähigkeit besitzt, um im SPE-Steckverbinder eingesetzt zu werden.

Probe	Widerstand in $\Omega$
3.0	100,67
3.1	100,20
3.3	100,43
3.4	100,87
3.5	100,91
3.6	1001,22
3.9	101,00



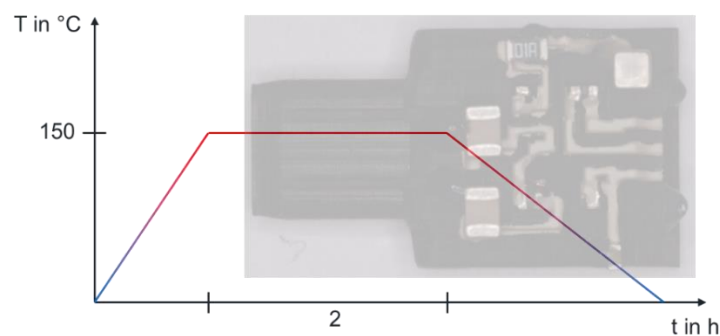
**Abb. 32:** Bestimmung des elektrischen Widerstandes

### 4.3.3 Wärmebehandlungsuntersuchungen

Die Leitfähigkeit der heute auf dem Markt befindlichen Silberpasten hängt stark von der Sintertemperatur nach dem Druck ab. Generell lässt sich sagen, dass eine höhere Sintertemperatur zu einer besseren Leitfähigkeit führt. Für die hier hergestellten Muster wurde eine Sintertemperatur von 60°C gewählt, um eine Verformung des Polymergrundkörpers bei dieser Temperatur zu vermeiden. Außerdem können die verwendeten elektronischen Bauteile diese Temperatur sicher aushalten.

Allerdings gibt es auf dem Markt auch Silberpasten, die aufgrund ihrer Materialzusammensetzung höhere Temperaturen benötigen, um leitfähig zu werden. Der Vorteil dieser Silberpasten ist, dass sie eine höhere Leitfähigkeit aufweisen als die bisher verwendete Silberpaste.

Daher wurden die Proben 2.1, 2.4, 2.10 und 2.14 einer zweistündigen Wärmebehandlung unterzogen, um die Möglichkeit der Verwendung einer höheren Sintertemperatur zu prüfen. Der Temperaturverlauf ist in Abbildung 33 dargestellt.

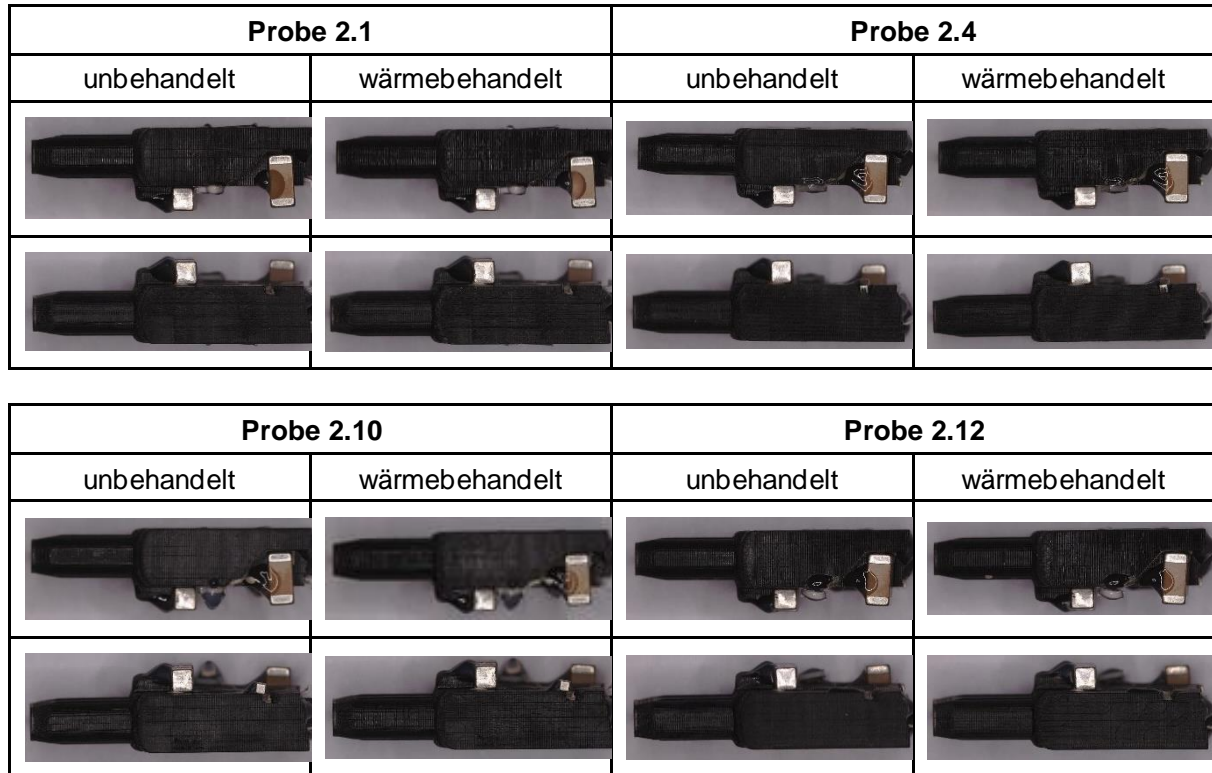


**Abb. 33:** Temperaturregime der Wärmebehandlung

Der Schwerpunkt dieser Untersuchung lag in erster Linie auf der Polymerbasisstruktur des SPE-Steckverbinders und dem Potenzial für Verformungen im Vergleich zum Ausgangszustand. Darüber hinaus sollte festgestellt werden, ob die auf dem SPE-Stecker verwendeten elektronischen Komponenten an ihrem Platz bleiben oder ob Spannungen aufgrund von Verformungen oder Materialausdehnungen dazu führen, dass sich die Komponenten von der Steckeroberfläche lösen.

Zu diesem Zweck wurden beide Seiten der Proben vor und nach der Wärmebehandlung gemessen. Abbildung 34 zeigt die Seitenansicht der wärmebehandelten Proben. Die nach der Wärmebehandlung durchgeführten Messungen ergaben, dass sich die SPE-Steckverbinder nicht oder nur minimal verzogen hatten. Außerdem wurden keine Risse oder Ablösungen der elektrischen Komponenten beobachtet.

Dies zeigt, dass das hier verwendete Druckmaterial generell eine Wärmebehandlung auch bei höheren Temperaturen zulässt. In weiteren Untersuchungen können daher auch Silberpasten eingesetzt werden, die höhere Sintertemperaturen benötigen.



**Abb. 34:** Seitenansicht unbehauelter und wärmebehandelter SPE-Steckverbinder

## 5 Zusammenfassung

Die Demonstratoren zeigen die Fähigkeiten der im Rahmen des Ampere-Projekts entwickelten Technologien, Materialien und Ausrüstungen und belegen, dass diese Technologien in der Lage sind, die grundlegenden Anforderungen an die Fertigung eines gefilterten SPE-Steckverbinders zu erfüllen. Bei den hergestellten Demonstratoren konnten auch mehrere Bereiche für Verbesserungen und Weiterentwicklungen identifiziert werden.

Die Weiterentwicklung der Pick & Place- und Kamerasysteme sowie die Programmierung des Neotech-Systems 15XSA haben sich positiv auf die Produktion des SPE-Steckers ausgewirkt.

In mehreren iterativen Schritten wurde ein Grundkörperdesign entwickelt, das in der Lage ist, alle elektronischen Komponenten auf engstem Raum unterzubringen und den direkten Herstellungsprozess des SPE-Steckers zu unterstützen. Im Steckverbinder wurden Strukturen wie selbstzentrierende Kavitäten entworfen, so dass z. B. der Transformator T1 auch bei weniger als 100 %iger Ausrichtung präzise in die vorgesehene Kavität gleiten kann. Durch die vertikale Positionierung der benötigten Diode konnte Platz gespart und eine gute Kontaktierung erreicht werden.

Die Integration von vordefinierten Leiterbahnkanälen konnte das Verschmelzen von Silberpaste und mögliche Kurzschlüsse verhindern. Dies ermöglicht eine definierte Kontaktierung der elektrischen Komponenten. Die Herstellung der ersten SPE-Steckverbinder hat gezeigt, dass weiteres Potenzial in der präzisen Platzierung der verschiedenen elektrischen Komponenten liegt. Dies ist besonders wichtig, um eine spätere Abdeckung der Komponenten mit einem Deckel zu ermöglichen, der die Komponenten bei Vibration und Schock in Position hält.

Das derzeitige Verfahren, das elektrische Bauteil, in diesem Fall den Widerstand R1 und den Kondensator C1, auf die vorgedruckte Silberbahn zu legen und anschließend das Bauteil durch Auftragen von Harz zu fixieren, führt in diesem Fall zu einer unkontrollierten Verschiebung des Bauteils auf dem SPE-Anschluss. Hier sollten Verbesserungskonzepte für eine präzise Fertigung entwickelt werden. Bemerkenswert an den Untersuchungen ist, dass das verwendete Druckmaterial keine Anzeichen von Verzug oder nennenswerter Ausdehnung zeigt. Es scheint daher möglich zu sein, Silberpasten mit höheren erforderlichen Sintertemperaturen einzusetzen um eine verbesserte Leitfähigkeit zu erreichen. Die Untersuchungen ergaben auch, dass eine gute Kontaktierung der elektrischen Bauteile mit der Silberpaste vorhanden ist.



**WÜRTH  
ELEKTRONIK**  
MORE THAN  
YOU EXPECT

Aufgrund des Zeitbedarfs für die Weiterentwicklung des Neotech-Systems sind genaue Untersuchungen der elektrischen Schaltung des SPE-Steckers noch nicht durchgeführt worden. Die Entwicklung und wissenschaftlich-technische Durchdringung dieses neuen Gebietes der dreidimensionalen Erstellung gedruckter elektronischer Schaltungen wird in zukünftigen Arbeiten eine wichtige Rolle spielen. Bei der Herstellung eines gut funktionierenden SPE-Steckers werden wahrscheinlich weitere Optimierungsschritte notwendig sein, um die Vorteile des angestrebten Systems voll auszuschöpfen.

