



**HOCHSCHULE LANDSHUT**

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE  
WISSENSCHAFTEN LANDSHUT**

FAKULTÄT ELEKTROTECHNIK UND WIRTSCHAFTSINGENIEURWESEN

Bachelorstudiengang

Elektro- und Informationstechnik

**Bachelorarbeit**

zum Thema

**Untersuchungen zum Löten von fine-pitch SMD-Bauteilen auf  
bedruckten Polymersubstraten**

vorgelegt von

Lukas Matthias Auer

aus Landshut

Eingereicht am .....

Betreuer: Prof. Dr. paed. Artem Ivanov

## Erklärung zur Bachelorarbeit

Name, Vorname des

Studenten: **Auer, Lukas Matthias**

Hochschule Landshut

Fakultät Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

.....  
(Datum, Unterschrift des Studenten)

## Freigabeerklärung des Studenten

Name, Vorname des

Studenten: **Auer, Lukas Matthias**

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Bachelorarbeit in den Bestand der Hochschulbibliothek aufgenommen werden kann und ohne Sperrfrist über die Hochschulbibliothek zugänglich gemacht werden darf.

.....  
(Datum, Unterschrift des Studenten)

## Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung meiner Bachelorarbeit begleitet haben.

Insbesondere gilt mein Dank dem Betreuer Herrn Prof. Dr. paed. Artem Ivanov und den Mitarbeitern des Labors für elektronische Hybridschaltungen, die mich während meiner Arbeit umfangreich unterstützt und die Arbeit in diesem Umfang möglich gemacht haben. Vor allem Herr Gerhard Sattelberger, Elektromeister der Hochschule Landshut, und Herr Richard Winkler, Laboringenieur der Hochschule Landshut, haben mir bei dieser Arbeit sehr zur Seite gestanden.

## Kurzfassung

Grundsätzlich besteht die Bachelorarbeit aus zwei Unterteilungen. Den Anfang stellt das Projekt GlucoFlex dar. Hier wurde die Arbeit des ehemaligen Bacheloranden Nicolas Holzheimer aufgegriffen. Das Ziel dieses Projekts ist die Realisierung eines Technologiedemonstrators. Unter Anwendung des Siebdruckverfahrens wurde ein uhrartiges Layout in mehreren Schichten auf ein flexibles PET-Substrat gedruckt. Ein Elektroluminiszenzdisplay dient der Informationsübermittlung an den Anwender. Die Besonderheit dieses Substrats ist dabei, dass auch die gesamte Bestückung auf der flexiblen PET-Folie stattfindet.

Da bisherige Versuche, eine elektrische Verbindung zwischen den Bauteilen und dem Substrat herzustellen, gescheitert sind, wird nun die Verbindungstechnologie Löten untersucht. Dabei wird mithilfe von niederschmelzenden Lötpasten die Bauteile mit den gedruckten Pads der Folie zu verbinden. Die Herausforderungen sind die unbekannte Kompatibilität zwischen den Leit- und Lötpasten auf dem Substrat und die maximale Prozesstemperatur von 150°C, welche nicht überschritten werden darf.

Im Zuge der Arbeit wurden umfangreiche Lötversuche auf dem GlucoFlex-Substrat und einem eigens entworfenen Lötlayout unternommen. Ziel war ein kompatibles Zusammenspiel zwischen Löt- und Leitpasten zu finden, welche die Realisierung einer funktionierenden Schaltung ermöglichen. Es wird auf die Reproduzierbarkeit der Durchführung Wert gelegt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>1 Motivation und bisherige Erkenntnisse</b>	<b>1</b>
<b>2 Das Projekt GlucoFlex</b>	<b>3</b>
2.1 Ziele im Projekt . . . . .	3
2.2 Lötten als Verbindungstechnologie . . . . .	3
2.3 Überdrucken von Pads für Lötversuche . . . . .	6
2.4 Lötversuche an GlucoFlex-Schaltung . . . . .	7
2.4.1 Bezeichnen von Substraten . . . . .	7
2.4.2 Erste Benetzungs- und Bestückungstests . . . . .	8
2.4.3 Komplettbestücken des GlucoFlex-Substrats . . . . .	15
2.5 Optimierungsversuche der Lötvorgänge . . . . .	26
2.5.1 Unterstützen des Lötvorgangs durch den Einsatz zusätzlicher Flussmittel . . . . .	26
2.5.2 Benetzen und Reinigen der QFN-Pins . . . . .	28
2.5.3 Reduzieren von Lötpaste beim GND-Pad zur Minimierung des Abstands zwischen Substrat und Bauteil . . . . .	30
2.6 Belastungsversuche der Substrate durch Aussetzen von Flussmittelreiniger . . . . .	32
2.6.1 Belastungstest nach Auftragen von Leiterplatten Schutzlack . .	33
2.6.2 Belastungstests von gedruckten Displays . . . . .	35
2.7 Fazit des GlucoFlex-Projekts . . . . .	37
<b>3 Weiterführung der Fine-Pitch SMD Lötversuche</b>	<b>38</b>
3.1 Erstellung des Layouts für Fine-Pitch SMD-Lötversuche . . . . .	38
3.2 Siebdruck der Substrate für Fine-Pitch SMD-Lötversuche . . . . .	39
3.3 Löttests der Lötsubstrate . . . . .	43
3.3.1 Benetzungstests der Substrate . . . . .	46
3.3.2 Bestückungsversuche des Lötlayouts . . . . .	55
3.3.3 Benetzungstests nach Trocknungssimulation der Substrate . .	59
3.3.4 Überdruck der Pads beim Lötlayout . . . . .	63
3.3.5 Test der mechanischen Festigkeit der Lötsubstrate . . . . .	67
<b>4 Fazit der Arbeit</b>	<b>71</b>

Inhaltsverzeichnis	IV
<b>Anhang</b>	<b>VI</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>X</b>

## Abkürzungsverzeichnis

**ELD** Elektroluminiszenzdisplay

**IC** Intergrated Circuit (*Integrierter Schaltkreis*)

**MCU** Micro controller unit (*Mikrocontroller*)

**PET** Polyethylenterephthalat

**QFN** Quad Flat No Leads Package

**SMD** Surface-mounted device (*oberflächenmontiertes Bauelement*)

**UV** Ultraviolett



# 1 Motivation und bisherige Erkenntnisse

Die Technologie der flexiblen Leiterplatten befindet sich in stetigem Wachstum [16]. Sowohl bei der Unterhaltungselektronik, in der Automobilindustrie, bei elektromedizinischen Geräten, aber auch in moderner Kleidung findet diese Technologie ihre Anwendung. Die Vorteile liegen dabei auf der Hand. Aufgrund der Flexibilität des Substratfilms, einer Reduzierung des Gewichts, des Platzes und der Kosten im Vergleich zu herkömmlichen Leiterplatten und der Möglichkeit kompakte Bauweisen umzusetzen, ist der Einsatz dieser Substrate immer weiter auf dem Vormarsch. Normalerweise setzt sich ein flexibles Substrat aus folgenden Schichten zusammen. Ein dielektrischer Substratfilm bildet das Basismaterial. Darauf befinden sich die aus Kupfer bestehenden elektrischen Leitungen. Eine Schutzbeschichtung dient der Isolation der Schaltung und ein Haftmaterial wird für den Zusammenbau der verschiedenen Teile verwendet. Die leitende Kupferschicht wird dabei im Ätzverfahren hergestellt.

Im Hybridlabor der Hochschule Landshut wird ebenfalls mit flexiblen Substraten gearbeitet. Hierbei dient meist eine flexible PET-Folie als Basismaterial. Der Unterschied ist dabei, dass die Leiterbahnen im Siebdruckverfahren auf das Substrat gedruckt werden. So konnte man bisher schon an verschiedenen Anwendungszwecken forschen. Hauptprojekte standen dabei oftmals in Verbindung mit gedruckten Elektroluminiszenzdisplays (ELDs). Diese können ebenfalls im Siebdruckverfahren hergestellt werden. Die Displays wurden bisher auf die PET Folie gedruckt und dann über ein dafür konzipiertes, starres Layout angesteuert. Ein neues Konzept zur Weiterentwicklung dieser Substrate ist dabei, nicht nur die Leiterbahnen auf das Display zu drucken, sondern auch das gesamte Layout zur Ansteuerung [1]. Die Bauteile sollen dabei auf der PET-Folie platziert werden, so dass die gesamte Schaltung flexibel bleibt. Diese Idee wurde von Nicolas Holzheimer im Zuge seiner Bachelorarbeit in die Wege geleitet. Dabei hat er ein Layout, welches eine uhrenartige Form hat, entwickelt. Dieses Layout soll als Technologiedemonstrator umgesetzt werden. Die Besonderheit an diesem Konzept ist, dass, wie bereits erwähnt, sowohl das ELD, als auch die Bauteile auf dem Substrat platziert werden. Das ELD besteht aus mehreren Siebensegmentanzeigen und weiteren Leuchtflächen zur Informationsübermittlung an den Anwender. So soll diese Art von Uhr später beispielsweise Informationen zur Blutzuckerüberwachung für Diabetiker liefern. Aufgrund dieser Anwendungsmöglichkeit wurde dem Projekt der Name »GlucoFlex« verliehen.

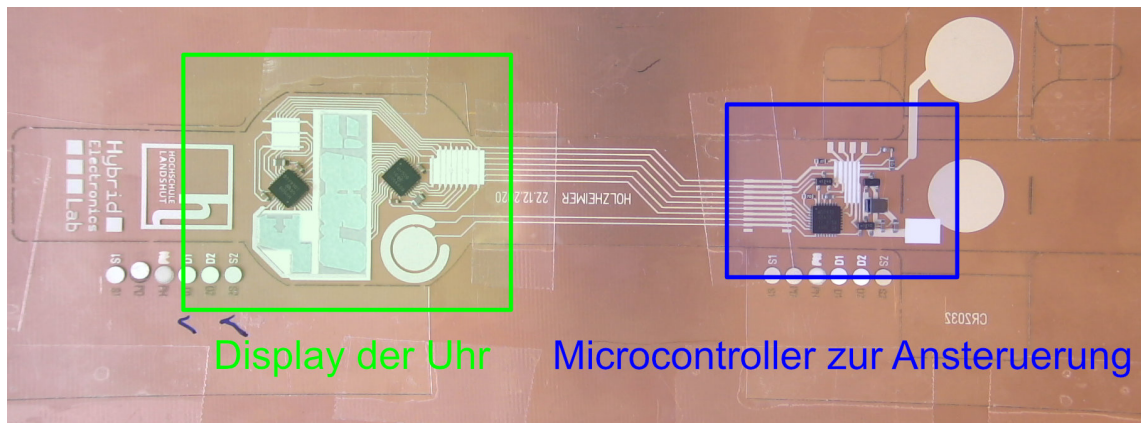


Abbildung 1: Bedrucktes und bestücktes GlucoFlex-Substrat

Die bisherigen Fortschritte sind in Abb. 1 erkennbar. Dabei ist das bedruckte Substrat zur Demonstration mit Bauteilen bestückt worden. Diese Version funktioniert allerdings so noch nicht. Im grün eingerahmten Bereich befindet sich das Display und im blauen der Microcontroller. Die Idee dahinter ist, dass beide Teile des Layouts im Zusammenspiel ein funktionierendes und programmierbares Substrat ergeben.

Aufgrund des hohen Arbeitsumfangs wurde die Arbeit von Herrn Holzheimer ab einem gewissen Punkt eingestellt und wird nun hier weitergeführt. Hauptproblem ist dabei, wie die Bauteile auf dem Substrat befestigt werden sollen. Es wurde bereits getestet, ob sich die Bauelemente kleben lassen. Dieser Versuch ist gescheitert, da die verwendeten Klebstoffe die Leitpaste auf dem Substrat beschädigt haben. Deshalb wird im Folgenden eine weitere Technologie erprobt und eingesetzt.

## 2 Das Projekt GlucoFlex

### 2.1 Ziele im Projekt

Durch die Vorarbeit des ehemaligen Bacheloranden sind die Grundsteine für eine funktionierende Schaltung gelegt. Das bislang größte Problem stellt allerdings die Verbindung zwischen SMD-Bauteilen und der flexiblen Schaltung dar. Mithilfe der Verbindungstechnologie Lötten sollen nun weitere Versuche unternommen werden. Die Verträglichkeit von Lötpasten und Leitpasten spielt dabei eine wichtige Rolle. Also wurde insbesondere untersucht, ob sich die Pasten prinzipiell löten lassen und diese mit dem Testsubstrat kompatibel sind. Auch die maximale Prozesstemperatur von  $T=150^{\circ}\text{C}$  schränkt die Auswahl an Lötpasten stark ein. Nebenbei wurde die mechanische Festigkeit der Verbindungen zwischen den Bauteilen und dem Substrat beurteilt.

Nach den durchgeführten Löttests wurden zukünftige Schritte bedacht, die für die komplette Realisierung einer funktionierenden „Uhr“ notwendig sind. Die Reinigung der Schaltung spielt dabei eine wichtige Rolle. Sie hat den Zweck, Flussmittelreste der Lötpaste zu entfernen, die einen späteren Verguss der Schaltung beeinträchtigen könnten. Der Verguss mit Kunstharzen wird weiterhin als erforderlich angesehen, um die mechanische Festigkeit des Substrats zu verstärken, während es gleichzeitig seine Flexibilität wahrt. Dieser Kompromiss könnte das problemlose Tragen des Substrats am Handgelenk ermöglichen.

### 2.2 Lötten als Verbindungstechnologie

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, war ein Kleben der fine-pitch SMD-Bauteile auf die Schaltung aufgrund der Inkompatibilität von Leitkleber und Leitpaste nicht möglich. Deshalb soll in dieser Arbeit die Verbindungstechnik Lötten in Zusammenhang mit diesem Projekt weiter untersucht werden.

Das Lötten ist die wichtigste Technologie, um elektrische sowie mechanische Verbindungen in Flachbaugruppen zu ermöglichen [2]. Die Vorteile liegen vor allem an den Eigenschaften dieser Verbindungstechnologie, welche sich im elektrischen, thermischen und mechanischen Bereich etabliert haben. Aber auch die hohe Kosteneffizienz ist mit ein Hauptgrund, weshalb andere Technologien diesen Standard noch nicht erreicht haben.

Dabei ist es vor allem wichtig zu verstehen, wie die Verbindung mittels Lötten stattfin-

det. Das Lot wird dabei als metallischer Zusatzwerkstoff angesehen, welches unter thermischem Einfluss in den flüssigen Aggregatzustand übergeht. Der Grundwerkstoff, also das Substrat worauf gelötet wird, bleibt dabei im festen Zustand. Durch Legierungsprozesse werden die beiden Stoffe in der Grenzschicht miteinander verbunden. Die Voraussetzung für eine erfolgreiche Lötverbindung sind metallisch reine Oberflächen der Fügeteile. Flussmittel entfernen eventuelle Oxidschichten auf den Bauteilen bzw. dem Substrat.

Beim Löten werden grundsätzlich drei Varianten unterschieden. Beim *Beschichtungslöten* wird ein Werkstück mit einem anderen Metall beschichtet. Das *Diffusionslöten* bezeichnet das Fügen von zwei Teilen ohne zusätzliches Lot hinzuzufügen. Durch Diffusion an der Grenzschicht werden beide Metalle miteinander verbunden. Die dritte Variante ist das *Verbindungslöten*. Dabei werden zwei metallische Kontaktfläche unter dem Einsatz von Lot miteinander verbunden.

Bei den Versuchen handelt es sich um Verbindungslöten, da hierbei die beiden Fügeteile bestehend aus dem Bauteil, welches metallische Kontaktflächen besitzt, und dem Substrat bzw. der Leitpaste, welche ebenfalls einen metallischen Anteil aufweist, gelötet werden.

Lötvorgänge können auch aufgrund ihrer Benetzungseigenschaften im Bezug auf die Qualität der Lötungen bewertet werden. „Allgemein gilt: Eine Flüssigkeit benetzt einen festen Körper nur dann, wenn ihre Oberflächenenergie gleich oder kleiner der des festen Stoffes ist.“ [3]

In folgender Abbildung ist erkennbar, wie die Benetzung des Substrats durch das Lot unterschieden werden kann:

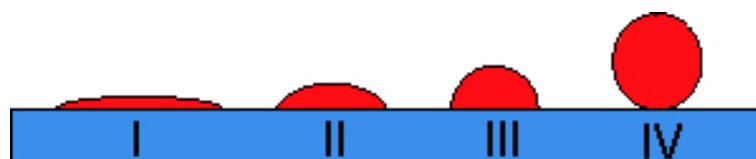


Abbildung 2: Benetzen eines Stoffes: I-sehr gut, II-ausreichend, III-grenzwertig, IV-keine Benetzung [3]

In Abb. 2 ist das Lot rot dargestellt. Das Substrat wird durch die blaue Fläche verdeutlicht. Anhand dieser Abb. lässt sich erkennen, wie gut das Lot einen bestimmten Stoff benetzt. Dafür wurde die römische Nummerierung von I bis IV von links nach rechts gewählt. Deshalb wird auch bei der Bewertung diese Reihenfolge beibehalten.

Bei I erkennt man eine sehr gute Benetzung des Substrates. Das Lot konnte sich im geschmolzenen Zustand sehr gut auf dem Substrat verteilen. Bei Abschnitt II stellt man fest, dass das Substrat etwas schlechter benetzt wurde. Die mechanische Verbindung hat vermutlich dennoch eine sehr hohe Festigkeit und ist somit ausreichend. Beim Lötbeispiel III wird der Lotpunkt immer kreisförmiger. Das Substrat wird noch schlechter benetzt. Dieser Fall lässt sich nicht eindeutig bewerten. Hier muss für die Anwendung individuell entschieden werden, ob die Benetzung ausreichend ist oder ob diese Lötverbindung als mangelhaft eingestuft wird. Bei Lötbeispiel IV liegt keine Benetzung mehr vor. Dadurch ist die mechanische Festigkeit ausgeschlossen. Das Lot schmilzt in sich zusammen und zwischen den Füge­teilen finden keine Legierungsprozesse statt. Das Ergebnis wird somit als unbrauchbar eingestuft.

Als nächstes wird dargestellt, wie die Benetzung der Substrate durch das Lot bewertet werden kann.

Dafür ist der Randwinkel  $\beta$  des Tropfens geeignet. Mithilfe dieses Winkels lässt sich die Qualität der Benetzung verständlich beurteilen.

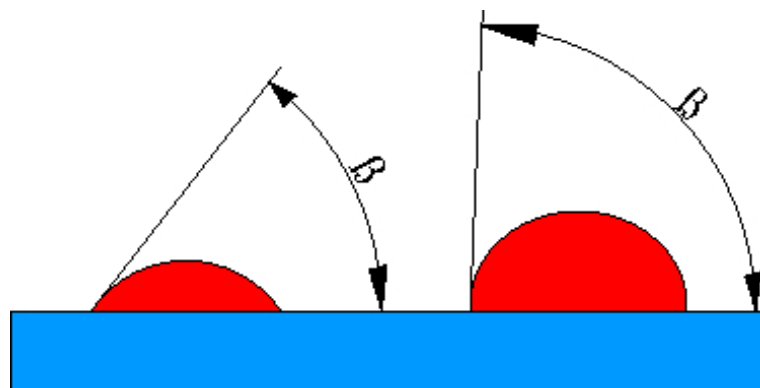


Abbildung 3: Kantenwinkel Beta ( $\beta$ ) [3]

In Abb. 3 wird der Winkel  $\beta$  grafisch dargestellt. Tabelle 1 zeigt in welche Kategorie die unterschiedlichen Winkel bei der Benetzung eingestuft werden können. Je niedriger der Winkel, desto besser ist die Benetzung.

Tabelle 1: Randwinkel  $\beta$  Beurteilung [3]

Randwinkel $\beta$	Beurteilung
0° - 20°	in Ordnung
20° - 80°	nicht optimal; individuelle Abwägung der Qualität
> 80°	unbrauchbar

In dieser Arbeit wird der Randwinkel nicht gradgenau ausgemessen. Die vorhergehende Erklärung dient zur Übersicht und zur besseren Beurteilung bei seitlichen Abbildungen der gelöteten Substrate.

## 2.3 Überdrucken von Pads für Lötversuche

Die bisher gedruckte Schaltung besteht aus sechs übereinander gedruckten Schichten. Diese sorgen im Zusammenspiel für die Funktion des ELDs (Elektroluminiszenzdisplays) und die Ansteuerbarkeit über die ICs (integrierten Schaltkreise) [1]. Die relevanteste Schicht zum Löten ist die erste Schicht S2. Diese Schicht besteht aus der Paste Bectron CP 6660 VP von Altana. Sie besteht aus den meisten Leiterbahnen, einem kapazitiven Taster, den Leuchtfächern des Displays und aus den für die Lötung relevanten Pads.

In früheren Lötversuchen an der Hochschule hat sich herausgestellt, dass die im Siebdruckverfahren gedruckte Paste CP 6660 VP als nicht lötlbar einzustufen ist. Auf dieser Leitpaste ist die Benetzung durch die getesteten Lötpasten sehr schlecht ausgefallen. Für das weitere Vorgehen wird eine lötlbare Leitpaste benötigt, mit der die bisher vorhandenen Pads überdruckt werden können. Durch das Überdrucken soll die oberste Schicht der Schaltung für das Löten präpariert werden, während eine gute Haftung auf dem Substrat weiterhin vorhanden bleibt. Die Altana Bectron CP 6690 Paste wurde bereits im Hybridlabor als lötlbar bzw. benetzungsfähig eingestuft und wird deshalb für diesen Überdruck der Pads verwendet. Die detailliertere Funktion des Siebdrucks und die nötigen Vorbereitungen werden im späteren Abschnitt 3.2 erläutert.

## 2.4 Lötversuche an GlucoFlex-Schaltung

### 2.4.1 Bezeichnen von Substraten

Im Laufe der Arbeit werden die Substrate durch ihre Originalbezeichnung voneinander unterschieden. Verwechslungen zwischen den Substraten werden so vermieden.

Die Bezeichnung besteht zum einen aus der Substratnummer. Diese Nummer wurde chronologisch beim Siebdruck der Schichten vergeben und legt somit die Basis der Namensgebung fest. Zum anderen gibt die Segmentnummer an, ob das eigentliche Substrat zugeschnitten wurde. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn zu Testzwecken kein vollständiges Substrat benötigt wird. Dieses Vorgehen spart Ressourcen. Die Zuschnitte werden dann zusätzlich nummeriert. Zudem wird angegeben, welche Lötpaste verwendet wird. Dabei wird das in der Arbeit verwendete Kürzel notiert. Zum Schluss steht in der Bezeichnung, welche Leitpaste bzw. Leitpasten als leitende Schicht auf die Folie gedruckt sind.

Allerdings sind **nicht immer alle** Teile der Bezeichnung relevant. Wird ein Abschnitt in der Substratbezeichnung weggelassen, ist dieser nicht von Bedeutung. Tabelle 2 listet drei Beispiele zur Veranschaulichung für mögliche Zusammensetzungen auf:

Tabelle 2: Zusammensetzung/Bezeichnung der Substrate

<i>Beispiel</i>	<b>Substrat- nummer</b>	<b>Segment- nummer</b>	<b>Lötpaste</b>	<b>Leitpaste(n)</b>
<i>Bsp. 1</i>	34	2	CR11	
<i>Bsp. 2</i>	65	4	CR11	6662/6690
<i>Bsp. 3</i>	17		SC180	6690

*Bsp. 1* ist zusammengesetzt »34/2 CR11«. Hierbei ist die Angabe der Leitpaste für diese Versuchsreihe irrelevant. Das Substrat mit der Nummer 34 wird eingesetzt. Die Segmentnummer gibt dabei an, welcher Teil des Substrats verwendet wird. In diesem Fall ist die Segmentnummer 2. Gelötet wird hier mit der Lötpaste CR11.

*Bsp. 2* lautet zusammengeschieden »65/4 CR11 6662/6690«. Bei Substratnummer 65 ist dieses Segment die Nummer 4. Paste CR11 wurde zum Löten verwendet. Die erste Leitpaste ist Bectron CP 6662. Die Leiterbahnen wurden mit Bectron CP 6690 Paste an den Pads überdruckt.

Bsp. 3 wird als »17 SC180 6690« bezeichnet. Substratnummer 17 wurde nicht zugeschnitten, daher gibt es keine Segmentnummer. Hier wurde mit Paste SC180 gelötet und als Leitpaste ausschließlich Bectron CP 6690 verwendet.

#### 2.4.2 Erste Benetzungs- und Bestückungstests

Nachdem die Pads der Substrate mit Leitpaste Bectron CP 6690 überdruckt und getrocknet worden sind, wurden die ersten Lötversuche durchgeführt.

In den Versuchen wurde festgestellt, dass sich die verwendete PET-Folie bei Überschreitung von Prozesstemperatur  $T=150^{\circ}\text{C}$  wellt. Folglich muss darauf geachtet werden, dass diese Temperatur beim Lötvorgang nicht überschritten wird. Das Wellen der Folie hat negative Auswirkungen auf das Substrat. Neben der Zerstörung des ästhetischen Erscheinungsbilds wird riskiert, dass Lötverbindungen nicht ausgebildet werden können. Durch den welligen Untergrund können die Bauteile nicht mehr plan auf den Substraten aufliegen. Die Schaltung wird somit unbrauchbar.

Bisher wurden im Hybridlabor zwei bereits im Bestand der Hochschule vorhandene Lötpasten bei dieser Maximaltemperatur erfolgreich getestet. Die erste Paste ist die SC180 von Solder Chemistry, die zweite ist die Paste CR11 von Edsyn.

Tabelle 3: Lötpasten-Übersicht [13]

Lötpaste	Lotlegierung	Schmelztemperatur	Empfohlene Verarbeitungstemperatur
Solder Chemistry SC180	Sn18/Pb32/Bi50	96 °C	- k. A. -
Edsyn CR11	Sn42/Bi58	138 °C	215-260 °C

In Tabelle 3 werden kurz die für das Projekt relevantesten Punkte beider verwendeter Lötpasten verglichen. Die Paste SC180 ist bleihaltig und somit für eine industrielle Anwendung im Gebiet der Konsumentenelektronik nicht geeignet. Eine funktionierende Schaltung zu erstellen, ist in diesem Teil der Arbeit das primäre Ziel. Deshalb wird diese Paste trotzdem verwendet. Ebenso sind die Schmelztemperaturen unterschiedlich. Da zum Löten ein Reflow-Ofen verwendet wird, werden für die unterschiedlichen Pasten verschiedene Programme verwendet, um so den Lötpro-



zess zu optimieren.

Um Ressourcen einzusparen, wurde anfänglich nicht die gesamte Schaltung bestückt. Stattdessen wurden nur einzelne Bauteile an unterschiedlichen Pads verwendet. Es wurden ausschließlich Widerstände der Baugröße 0603 verwendet, welche an der Hochschule in ausreichender Stückzahl verfügbar sind. Die Bauteilgrößen von Widerständen und Kondensatoren beziehen sich in der gesamten Arbeit auf den imperialen Maßstab. Der vorherrschende Mangel an geeigneten Chips schloss eine vollständige Bestückung der Schaltung zunächst aus. Vor allem ICs der Bauform QFN-32 waren zum Zeitpunkt der Arbeit schwer auf dem Markt erhältlich. Die Lötpasten wurden somit vorab getestet. Die besser geeignete Paste wurde nachfolgend für die komplette Bestückung der Schaltung in Abschnitt 2.4.3 verwendet. Das Auftragen der Lötpaste erfolgt zunächst mithilfe von Dispensern. Da beide verwendeten Pasten in spritzenartigen Behältern aufbewahrt werden, reicht das Anbringen einer Dosiernadel, um punktuell Lötpaste auftragen zu können.



Abbildung 4: CR11 Paste in Spritze

In Abb. 4 ist zur Veranschaulichung die Spritze der Lötpaste CR11 gezeigt. Durch das punktuelle Auftragen der Lötpaste auf den Pads ist eine gleichmäßige Verteilung der Paste erschwert. Es kann vorkommen, dass einzelne Pads mehr oder auch weniger Lötpaste haben als andere, was die Reproduzierbarkeit der anfänglichen Versuche einschränkt. Dennoch sollte die Aussagekraft dieser Tests ausreichen, um erste Kriterien der Lötpasten zu bewerten.

Der verwendete Reflow-Ofen trägt die Bezeichnung »RO 250 BF«. Dieses Modell verfügt über eine motorisierte Schublade, mit der das Lötgut in die Ofenkammer gefahren wird. Der Anwender kann dann Vorheiztemperatur/-dauer und Löttemperatur/-dauer einstellen und diese unter nummerierten Profilen abspeichern. Das Vorheizen ist erforderlich, um für alle Lötvorgänge die gleiche Ausgangssituation zu schaffen. In der Regel wird die Vorheiztemperatur möglichst hoch gewählt, so dass die Tem-

peraturdifferenz zur Löttemperatur gering ist, aber auch niedrig genug, um das vorfrühe Aufschmelzen des Lotes und die Verfälschung der Ergebnisse zu verhindern.

Tabelle 4: Temperaturprofile Reflowofen

Lötpaste	Vorheiz- temperatur	Vorheizzeit	Löt- temperatur	Lötzeit
<i>Edsyn CR11</i>	120 °C	180s	150 °C	150s
<i>Solder Chemistry SC180</i>	80 °C	120s	150 °C	60s

Mit den in Tabelle 4 aufgelisteten Temperaturwerten und der dazugehörigen Vorgangsdauer wurden zuvor gute Erfahrungen gesammelt. Die Vorheiztemperatur wurde hoch genug gewählt, so dass sich die Temperatur im Innenraum des Reflow-Ofens gleichmäßig verteilen kann. Die Löttemperatur wurde so angesetzt, dass sich das Lot mindestens 30s bis ca. 90s im aufgeschmolzenen Zustand befindet. Das gewährleistet, dass das Lot bei allen Bauteilen komplett aufschmelzen kann. Auch die QFN-Bauteile, welche eine größerer Masse als die verwendeten Widerstände und Kondensatoren haben, konnten so problemlos gelötet werden.

Ebenfalls ist anzumerken, dass in den ersten zwei Lötversuchen nur das teilbestückte Substrat ohne zusätzliche Unterlage in den Ofen gelegt worden ist. In späteren Versuchen und vor allem bei vollständiger Bestückung der Schaltung wurde eine kupferkaschierte FR-4 Platte verwendet. Das Substrat wurde am Rand mit Klebestreifen fixiert. Das dient der Stabilisierung während des Lötvorgangs und verhindert ein Flattern des Substrats ausgelöst durch den internen Lüfter des Ofens. Das Gewicht der Folie ist so gering, dass der Lüfter einen negativen Einfluss auf das Lötresultat haben kann. Außerdem wird so sichergestellt, dass das Substrat plan im Ofen liegt und die Bauteile optimal festgelötet werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Kupferkaschierung der Platte die Wärme ausgeglichener unter dem Substrat verteilt. Dadurch wird ein gleichmäßigeres Ergebnis erzielt.

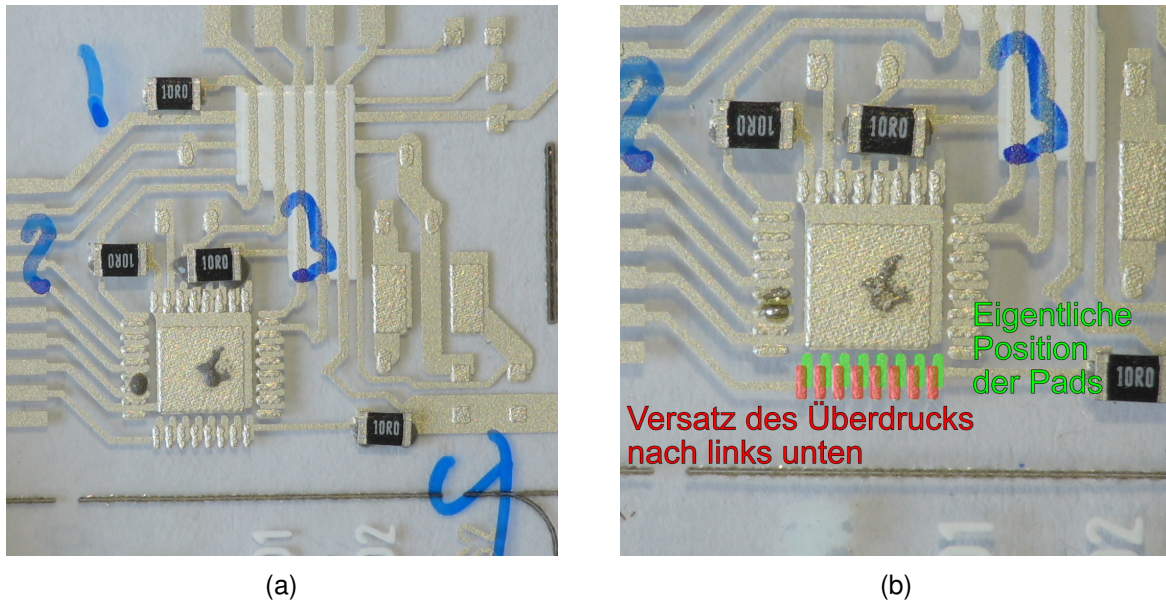


Abbildung 5: CR11 vor (a) und nach dem Lötvorgang (b)

Die in Abb. 5 gezeigten Aufnahmen stellen einen Lötversuch mit der Paste CR11 des Herstellers Edsyn dar. Die Aufnahme (a) zeigt dabei den Testabschnitt vor dem Lötvorgang, die Seite (b) den gelöteten Zustand. Hierfür wurden einige Pads ausgewählt und mit Widerständen bestückt. Auf das GND-Pad des ICs, sowie auf zwei andere Pads, wurde punktuell Lötpaste aufgetragen, ohne diese zu bestücken. Dadurch kann das Benetzungsverhalten beurteilt werden.

Indessen ist zu erwähnen, dass das Überdrucken der Pads nicht immer erfolgreich war. Wie in Abb. 5 (b) an den unteren Pins farblich hervorgehoben wird, ist die oberste Schicht der Bectron CP 6690 Paste nach links unten versetzt. Das schließt eine Funktionalität der Schaltung aus, da so zwischen den Pads Kurzschlüsse erzeugt werden. Nichtsdestotrotz ist das Substrat für diesen Versuch geeignet, da für diesen nur die oberste Schicht benötigt wird. Der Versatz beeinflusste die Lötbarkeitstests nicht.

**Beobachtung:** Zwischen den beiden Aufnahmen sind bei genauerer Betrachtung deutliche Unterschiede zu erkennen. Während bei Aufnahme (a) die Lötpaste teilweise auf das unbedruckte PET-Substrat verflossen ist, konnte bei Aufnahme (b) ein Zusammenschmelzen erzielt werden. Die Pads wurden benetzt und werden durch die Auswertung der Rückseite genauer beurteilt. Die Lötpaste bildet einen leichten Meniskus an der Seite der Widerstände, wobei dessen Ausprägung durch die Lotmenge eingeschränkt ist. Diese Form bildet sich im flüssigen Zustand des Lots.

Lötstellen können als gut bezeichnet werden, wenn ein Meniskus gebildet worden ist [4]. Er ist am Benetzungswinkel zu erkennen. Der Meniskus bildet sich durch das Aufschmelzen des Lots in eine tangentielle Kurve zwischen Bauteil und Substrat. Bei der unbestückten Stelle der QFN-Pads ist erkennbar, dass sich die Lötpaste ebenfalls nur auf den überdruckten Pads verteilt. Beim späteren Auftragen mit der Schablone wäre hier ein niedriger Randwinkel möglich, was auf eine gute Benetzung hindeutet.

Als nächstes werden die Ergebnisse mit der Paste SC180 gezeigt.

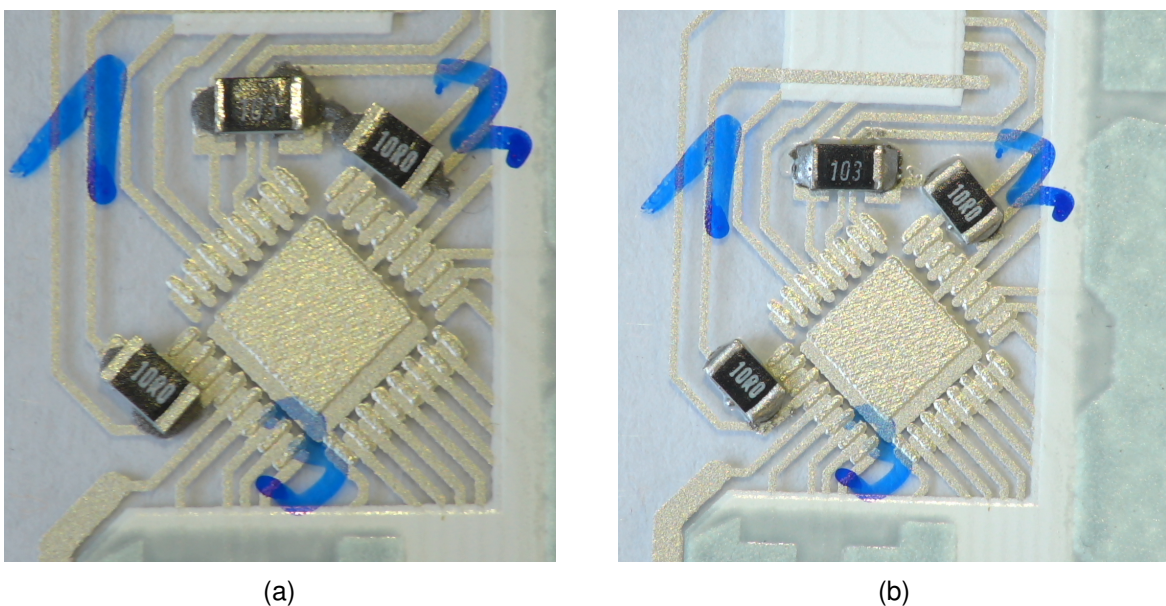


Abbildung 6: SC180 vor (a) und nach (b) Lötvorgang

In Abb. 6 zeigt Aufnahme (a) ebenfalls die Bestückung vor und Aufnahme (b) nach dem Lötvorgang. Bei diesem Versuch wurde aber auf ein Auftragen der Lötpaste bei den QFN-32-Pads verzichtet.

**Beobachtung:** In Aufnahme (a) lässt sich erkennen, dass die Lötpaste beim Auftragen teilweise leicht neben die Pads geflossen ist. Beim Lötvorgang konnte die Paste jedoch sehr gut zusammenschmelzen und sowohl das Pad, als auch den Baustein benetzen. Die Ausbildung von Menisken ist gut zu erkennen und die Widerstände sind leicht auf die Pads verrutscht, was eine Deplatziierung ausgleicht und dem Anwender einen Vorteil verschafft. Zur besseren Bewertung soll ebenfalls die Rückseite in Augenschein gezogen werden.

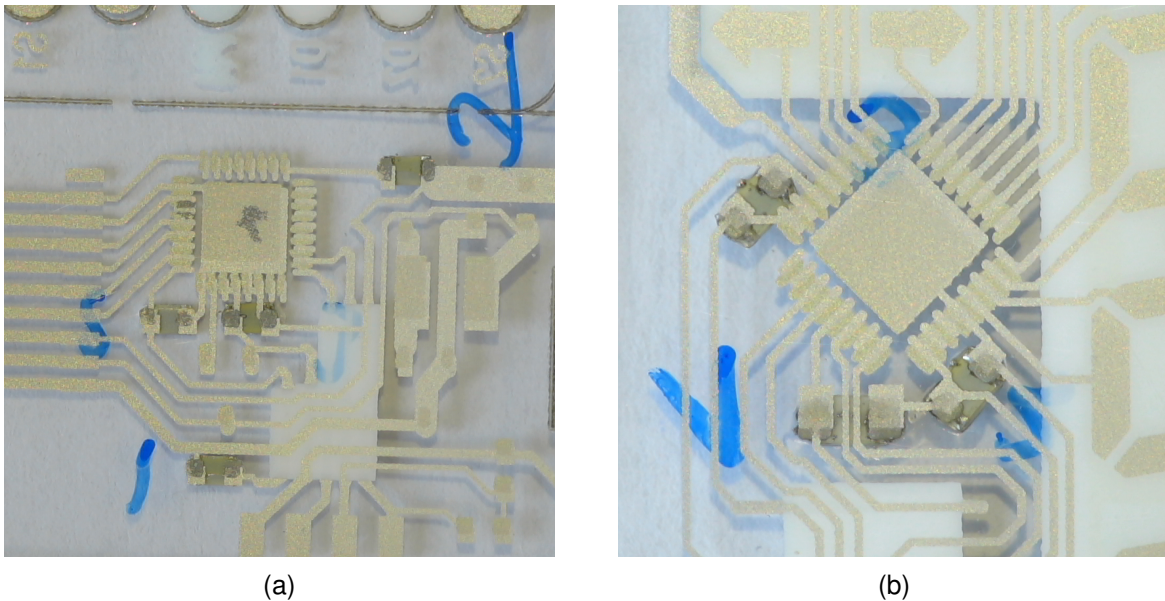


Abbildung 7: CR11 (a) und SC180 (b) Rückansicht

Da das PET-Substrat durchsichtig ist, lassen sich auf der Rückseite die Eigenschaften der Lötpaste einfach begutachten. Abb. 7 zeigt die Rückseite beider benetzter Folien, wobei sich auf der Aufnahme (a) das Substrat mit Paste Edsyn CR11 befindet und auf der Aufnahme (b) das Substrat mit Paste SC180.

Es lassen sich deutliche Unterschiede feststellen. Die Pads, an denen mit der CR11 Paste gelötet wurde, sind wesentlich dunkler als die Pads der SC180 Paste. Anscheinend durchdringt ein Bestandteil der CR11 Paste die Leitpasten bis an die PET-Folie. Die Leitpasten Bectron CP 6690 und 6660 saugen sich augenscheinlich voll. Der Grund für dieses Verhalten ist mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht eindeutig feststellbar. Es könnte einerseits an der Zusammensetzung der Lötpaste liegen, andererseits könnte auch die chemische Zusammensetzung des Flussmittels ausschlaggebend für diese Verfärbung sein.

Bei der Paste SC180 hingegen ist so eine deutliche Veränderung nicht zu erkennen. Man erkennt zwar ebenfalls eine Verdunklung der Pads, allerdings scheint kein Bestandteil der Lötpaste komplett durch die Leitpasten. Da diese Paste eine andere Zusammensetzung hat, bleiben die Pads immer noch unverändert. Im Anschluss werden die Auswirkungen der Verfärbung untersucht.

Um die mechanische Festigkeit der Lötverbindungen zu testen, wurde versucht,

mithilfe einer Pinzette das Bauteil seitlich mittig vom Substrat zu entfernen. Bei beiden Pasten war dies durch geringe Krafteinwirkung möglich. Es wurden allerdings nicht die Lötverbindungen zerstört, sondern das gesamte Pad der Leitpaste CP 6660 vom Substrat entfernt. Hieraus wird geschlossen, dass die Lötverbindungen in beiden Fällen stabil sind. Die Haftung zwischen Leitpaste und Substrat muss jedoch verbessert werden. Nach mehreren Tests wurde zusätzlich festgestellt, dass die Bauteile, die mit SC180 gelötet wurden, wesentlich stabiler sind. Daraus wird geschlussfolgert, dass sich die Verfärbung der CR11 Paste auf der Unterseite negativ auf die Festigkeit der Leitpaste auf dem Substrat auswirkt.

Zusammenfassend wird in Tabelle 5 verglichen, welche Paste besser geeignet ist.

Tabelle 5: Entscheidung Lötpasten

Kriterium	Edsyn CR11	Solder Chemistry SC180
<i>Aufschmelzverhalten</i>	0	+
<i>Fließigenschaften</i>	+	0
<i>Lagerung</i>	Kühlschrank	Kühlschrank
<i>Bleihaltig</i>	bleifrei (+)	bleihaltig (-)
<i>Stabilität auf Substrat</i>	-	0

Zur Bewertung der Eigenschaften wurde eine Skala mit drei Abstufungen eingeführt. Die Unterteilung ist dabei »+« für eine positive Bewertung, »0« für eine neutrale Bewertung und »-« für eine negative Bewertung. Dabei ist anzumerken, dass die Unterschiede bei den Pasten teilweise sehr marginal ausfallen. Die Bewertungspunkte beziehen sich lediglich auf den hier durchgeführten Vergleich in diesem speziellen Fall und sollen keinesfalls die Pasten im Allgemeinen kritisieren. Somit steht beispielsweise ein »+« Punkt in der Skala dafür, dass diese Eigenschaft bei der Paste besser ist als bei der anderen.

Das Aufschmelzverhalten wurde bei der Paste SC180 als besser eingestuft, da der Schmelzpunkt bei dieser Paste geringer ist und die Löttemperatur von 150°C ausreichend hoch über der Schmelztemperatur liegt. Obwohl empfohlen wird die Paste CR11 zwischen 215°C und 260°C zu löten, war der Lötvorgang bei diesem Versuch mit T=150°C erfolgreich. Die Fließigenschaften der Paste von Edsyn ist in den Tests etwas besser. Das lässt sich in Abb. 5 sehr gut erkennen, da die Paste nur auf den relevanten, überdruckten Pads mit CP 6690 Paste zusammengeflossen ist. Die Leitpaste CP 6660, aus der die Leiterbahnen und ursprünglichen Pads des Sub-

strats bestehen, stellt sich deshalb weiterhin als nicht lötlbar heraus. Ein ungleichmäßiges Auftragen aufgrund des Dispensers lässt sich später durch Verwendung einer Schablone und Rakel minimieren. In diesem Fall sollte auf allen gleichen Pads gleich viel Paste aufgetragen werden. Die Lagerung beider Pasten findet im Kühlschrank statt. Hier gibt es also keinen Vorteil. Über die Bleihaltigkeit kann zunächst hinweggesehen werden, da das Ziel den Erhalt einer funktionierenden Schaltung darstellt. Der entscheidende Punkt ist somit die mechanische Festigkeit auf dem Substrat, wobei hierbei die Paste von Solder Chemistry besser abgeschnitten hat. Somit wird für die komplette Bestückung der Schaltung die Paste SC180 verwendet.

### 2.4.3 Komplettbestücken des GlucoFlex-Substrats

Nachdem erste Lötversuche positiv ausgefallen sind, wurde anschließend getestet, ob sich Substrate komplett bestücken und löten lassen. Die Benetzbarkeit der Leitpaste CP 6690 ist möglich und die Festigkeit ausreichend, um mit diesen Tests fortzufahren. Wie bereits erwähnt, wurden alle gelöteten Substrate einzeln auf einer kupferkaschierten FR4 Platte befestigt. Diese hat eine größere Fläche als das Substrat. Länge und Breite der Platte sind jeweils mindestens 2cm größer, damit ein Sicherheitsrand um das Substrat entsteht. Durch diesen Rand kann das Substrat dort ohne Probleme berührt bzw. transportiert werden. Außerdem dient er als Fixierfläche für Klebestreifen, welche ein Verrutschen des Substrats verhindern. Im Folgenden wird erläutert, welche Vorbereitungen für den Lötvorgang abliefen und welche Schritte zur Komplettbestückung des Substrats notwendig waren. Zunächst wurde ein passendes Substrat ausgewählt. Im Gegensatz zu den Benetzungstests ist dabei wichtig, dass das Überdücken der Pads optimal verlaufen ist. Unsauberkeiten im Druck, aber auch ein Versatz zu den Originalpads der Leiterbahnen, wie beispielsweise in Abb. 5 zu erkennen ist, waren deshalb unbedingt auszuschließen. Kurzschlüsse durch die Leitpasten werden so vorab vermieden.

Nachdem das Substrat ausgewählt und auf der FR4 Platte befestigt worden ist, muss die Lötpaste aufgetragen werden. Die Schablone, welche für das gleichmäßige Auftragen relevant ist, hat dafür nur Aussparungen an den Pads, an denen Lötpaste notwendig ist. Die Fläche der Aussparungen wurde dabei um 20% im Vergleich zu den Pads reduziert. So wird selbst bei leichtem Verrutschen der Schablone gewährleistet, dass die gesamte Lötpaste auf das Pad gelangt und nicht daneben auf die Folie. Ein unsauberes Auftragen kann dazu führen, dass die Lötpaste an

den falschen Stellen aufschmilzt und so beispielsweise zwischen den Leiterbahnen Kurzschlüsse erzeugt. Die Löt­schablone wird dann auf das Substrat aufgelegt und kann mithilfe eines Kamera-Setups genau ausgerichtet werden. Es wird dabei bewusst darauf verzichtet, die Schablone im Rahmen eines Schablonendruckers einzuspannen. Der Grund dafür ist, dass in diesen Kleinversuchen das manuelle Ausrichten per Hand schneller und leichter funktioniert hat. Das Einspannen in einen Rahmen bringt in diesem Fall keinen Vorteil beim Auftragen der Löt­paste. Die Ausrichtung des Substrats funktioniert im Spannrahmen schlechter, da dort beide horizontalen Achsen durch Schrauben jedes mal neu eingestellt werden müssen. Durch manuelles Verschieben der uneingespannten Schablone funktioniert der Prozess schneller. Nebeneffekt dieser Variante ist, dass der Absprung zwischen Substrat und Schablone  $a=0\text{mm}$  ist. Bei den durchgeführten Tests hatte das großteils keine negativen Auswirkungen.

Nachdem die Schablone perfekt über den Pads ausgerichtet worden ist, wurde diese ebenfalls mit einem Klebestreifen an der Oberkante befestigt. Die Löt­paste, welche vor Verwendung auf Raumtemperatur erwärmt sein muss, wurde dann aus der Spritze auf die Schablone gegeben. Das erfolgte auf der gesamten Breite der Schaltung. Anschließend wurde die Löt­paste mit einer Metallraker nach unten abgezogen. Dabei wurde ein Rakerwinkel von ca.  $30^\circ\text{-}45^\circ$  gewählt und ein moderater Druck ausgeübt. Nachdem die Raker langsam über alle Öffnungen hinweg abgezogen wurde, konnte man sehen, dass diese gleichmäßig mit Löt­paste gefüllt sind. Falls dies nicht der Fall war, musste durch Variation des Drucks oder Winkels der Vorgang wiederholt werden. Die überschüssige Löt­paste wurde nach dem Auftragen in einem steileren Winkel von ca.  $70^\circ\text{-}80^\circ$  mit der Raker entfernt. Die Paste kann nun erneut verwendet oder fachgemäß entsorgt werden.

Durch das Entfernen der Schablone erhält man das Substrat mit Löt­paste. Eine Kontrolle der Auftragung war ebenfalls notwendig. Falls diese fehlerhaft war, konnte die Löt­paste vorsichtig mit Stofftüchern weggewischt und erneut Löt­paste aufgetragen werden.



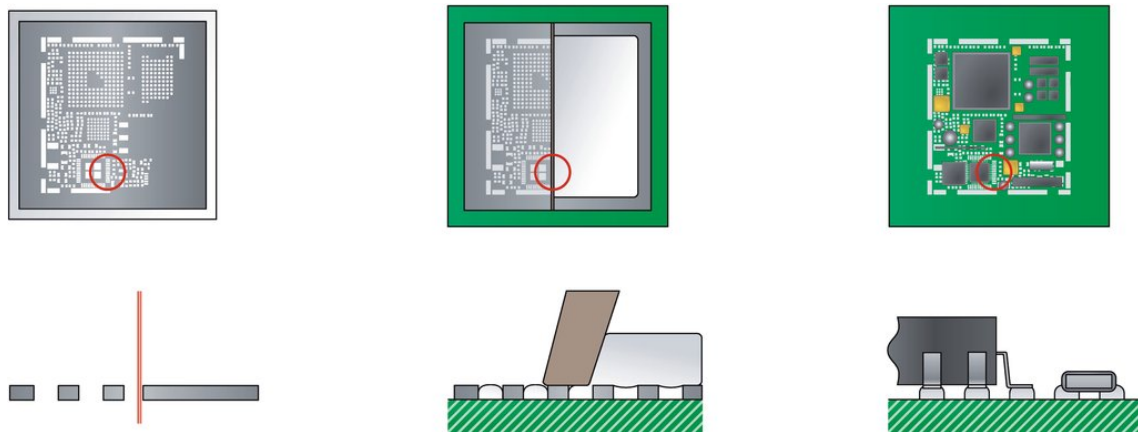


Abbildung 8: Auftragen der Lötpaste mit Schablone; Vorgehensweise [5]

Abb. 8 stellt zusammengefasst noch einmal den Ablauf der Herstellung einer Schablone und Bestückung eines Substrats dar. Die obere Reihe der Bilder zeigt die Draufsicht, die untere Reihe zeigt einen Querschnitt dieses Beispielsubstrats. Zuerst wird die Schablone hergestellt, wie im linken Teil der Abb. 8 zu erkennen ist. Das Ausschneiden erfolgt mithilfe eines Laser. Die Schablone wurde allerdings extern bestellt. Im mittleren Teil der Darstellung ist das Auftragen der Lötpaste mit der Rakel dargestellt. In grün wird dabei immer das Substrat dargestellt. Die dunkelgraue Fläche ist die Schablone und die Lötpaste ist silbern. Wichtig ist auch, dass die Dicke der Schablone bestimmt, wie viel Lötpaste später auf das Substrat gelangt. Die Dicke liegt typischerweise zwischen 100 und 250  $\mu\text{m}$ .

Ganz rechts in Abb. 8 ist das bestückte und gelötete Substrat dargestellt. An der Hochschule wird bei diesen Versuchen das Substrat manuell bestückt. Eine automatische und halbautomatische Bestückung haben sich beim Demonstratorenbau mit dieser Folie nicht bewährt [1].

Stattdessen können mit einem manuellen Bestücker der Dr. Tresky AG die Bauteile platziert werden. Dabei werden die Bauteile über einen kleinen Vakuumsauger aufgenommen und entsprechend gesetzt. Als Unterstützung dienen dem Anwender dabei ein binokulares Mikroskop und zwei im Winkel frei einstellbare Leuchten. Durch die seitliche Ansicht des Mikroskops hat der Nutzer eine dreidimensionale Ansicht und kann so selbst kleinste Bauteile genau auf den Pads des Substrats platzieren. Der Schatten, der durch die Leuchten entsteht, hat ebenfalls einen positiven Einfluss auf die dreidimensionale Wahrnehmung.

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen, wurden meist mehrere Schaltungen bestückt. Durch die beschränkte Anzahl an Bauteilen, mussten

allerdings schnelle lösungsorientierte Entscheidungen gefunden werden. Allgemein wurde festgestellt, dass die Lötergebnisse bei allen Schaltungen sehr ähnlich waren. Deshalb wurden beispielhaft Aufnahmen zur Schilderung der Ergebnisse ausgewählt. Nachfolgend werden alle beschriebenen Schritte anhand der durchgeführten Versuche gezeigt und erklärt.

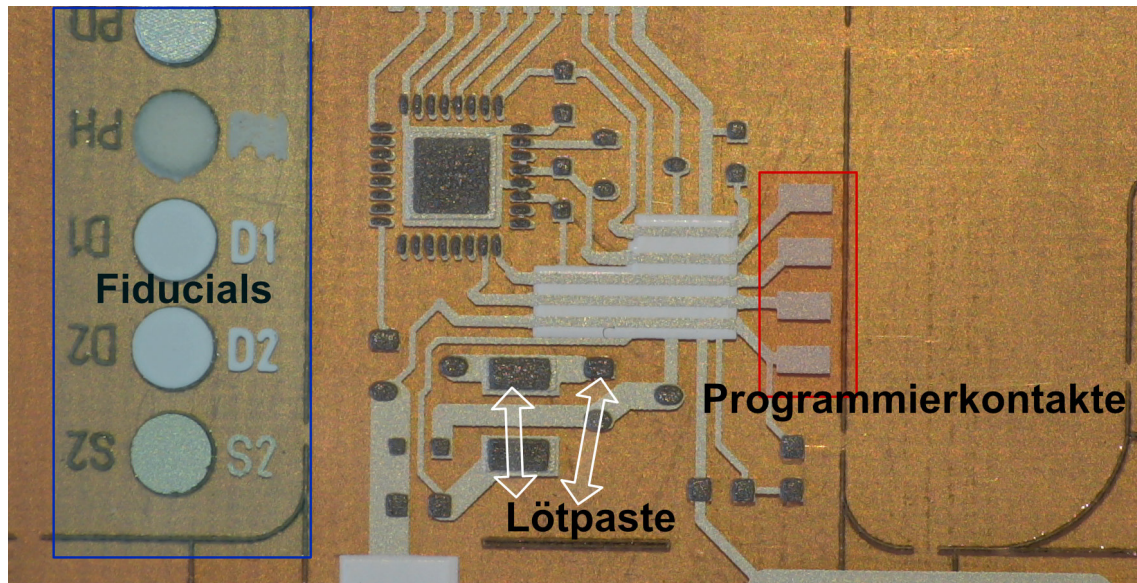


Abbildung 9: Substrat nach Pastenauftragung mit Schablone

Nach dem Schema von Tabelle 2 wurde diese Schaltung in Abb. 9 »29/2 SC180« benannt. Eine Beschriftung nach den Leitpasten wurde absichtlich weggelassen, da diese bei den Versuchen immer vorab bekannt waren und nie geändert worden sind. Dabei wurde bei als Leitpasten der Leiterbahnen immer CP 6660 und auf den Pads CP 6690 verwendet. Man erkennt hier den vergrößerten Abschnitt des programmierbaren Teils des Substrats. Der blau hinterlegte Teil der Aufnahme zeigt dabei die Fiducials oder auch Passermarken. Sie dienen dem Siebdrucker zur optischen Ausrichtung. Dabei erkennt die Kamera diese Punkte und der Computer berechnet die nötige Feinjustierung für einen optimalen Druck. Für jede Schicht gibt es einen einzelnen Punkt [1]. Die Erklärung des Siebdrucks wird in Abschnitt 3.2 behandelt. Die rote Fläche stellt die Programmierkontakte dar. An diese Kontakte kann mithilfe eines Flash Tools von Texas Instruments ein Programm auf die MCU (Microcontroller) geladen werden. Die weißen Pfeile zeigen beispielhaft auf zwei Pads, auf die Lötpaste aufgetragen wurde. Alle dunkelgrau glänzenden Flächen sind dabei Lötpaste. Man erkennt den deutlich besseren Auftrag im Vergleich zur Auftragung durch den

Dispenser. Die Lötchablone mit der Rakel sorgte dafür, dass alle Pads gleichmäßig mit Lötpaste bedeckt wurden. Als nächster Schritt erfolgte die Bestückung.

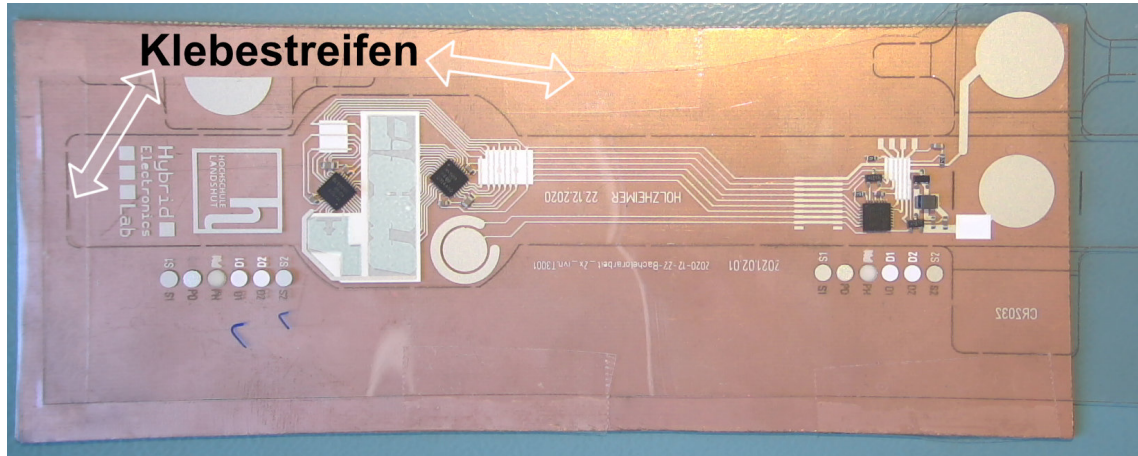


Abbildung 10: Erstes komplettbestücktes Substrat »29/2 SC180«

Das erste komplettbestückte Substrat wird in Abb. 10 gezeigt. Die Klebestreifen zur Befestigung des Substrats auf der kupferkaschierten FR4-Platte lassen sich ebenfalls in dieser Aufnahme erkennen. Zudem ist auffallend, dass die Unterlage in diesem Fall zu klein ist. Normalerweise wurde eine ausreichend große Platte verwendet. In diesem Fall führte die kleine Platte dennoch zu keinen Problemen.

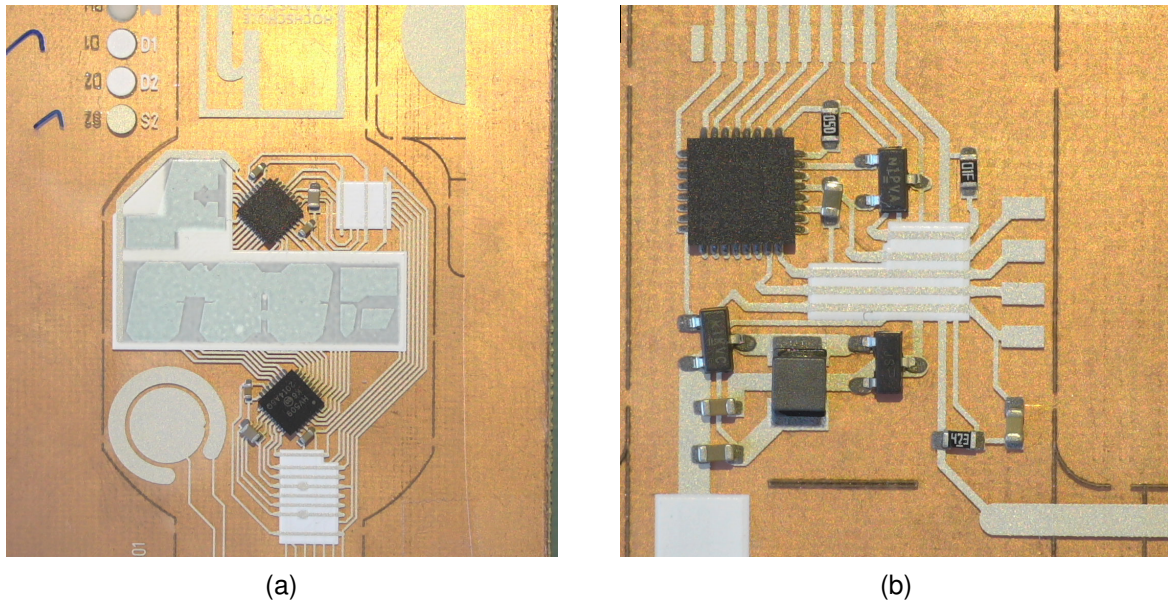


Abbildung 11: Komplettestückung »29/2SC180« Display (a) und MCU (b)

Abb. 11 zeigt die beiden relevanten und bestückten Teile vergrößert. Die Aufnahme (a) zeigt den bestückten und ungelöteten Displayteil des Substrats. Die Aufnahme (b) zeigt den Mikrocontrollerteil des Substrats. Es ist zu erkennen, dass vor allem die QFN-Bauteile sehr genau platziert werden müssen, da dort durch die Fine-Pitch Abstände der Pads leicht Fehler entstehen können. Allerdings lässt sich das mit dem manuellen Bestücker durch das Mikroskop gut realisieren. Trotzdem ist die Ausrichtung einiger Bauteile leicht verdreht. Das ist in diesem Fall jedoch unproblematisch, da keine Kurzschlüsse entstanden sind. Die Pads der restlichen Bauteile sind dafür groß genug. Nun wird das Substrat im Reflowofen gelötet. Dafür wurde das in Tabelle 4 aufgelistete Profil der Paste SC180 verwendet. Es wurde also bei 80°C für 120s vorgeheizt und bei 150°C für 60s gelötet.

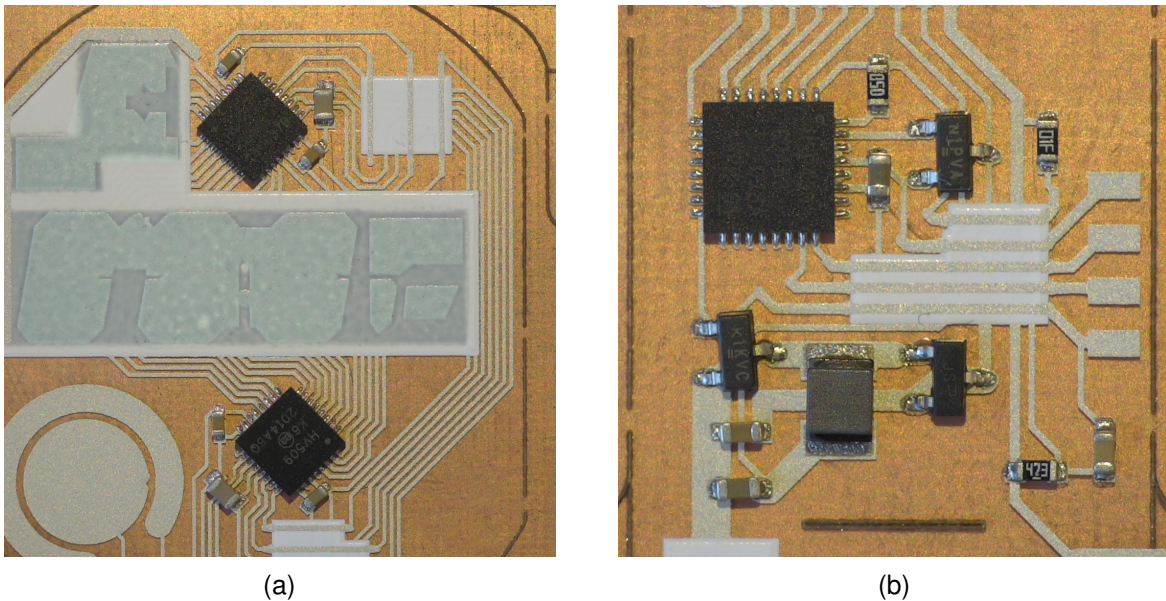


Abbildung 12: Komplettbestückung nach Lötvorgang »29/2SC180« Display (a) und MCU (b)

In Abb. 12 werden die Ergebnisse nach dem Lötvorgang gezeigt. Dabei ist die Anordnung der Aufnahmen wie bei Abb. 11, sodass sich Veränderungen vor und nach dem Löten direkt vergleichen lassen. Die Aufnahme, die das ELD zeigt, befindet sich im Teil (a) und der MCU-Bereich in Teil (b) der Anordnung. Alle sichtbaren Teile der Lötpaste sind aufgeschmolzen und haben sich auf den relevanten Pads verteilt. Kleinere Bauteile, wie Widerstände und Kondensatoren, welche schief platziert wurden, konnten durch das Aufschmelzen des Lotes an die korrekte Stelle bewegt werden.

Nach der ersten optischen Inspektion von oben kann gesagt werden, dass die Lötverbindungen in Ordnung erscheinen. Um dies noch besser einzuschätzen, wurde das Substrat noch seitlich und von unten begutachtet. Danach wurde die für das Projekt konzipierte Testsoftware auf den MCU geflasht, um die Funktionalität zu überprüfen.

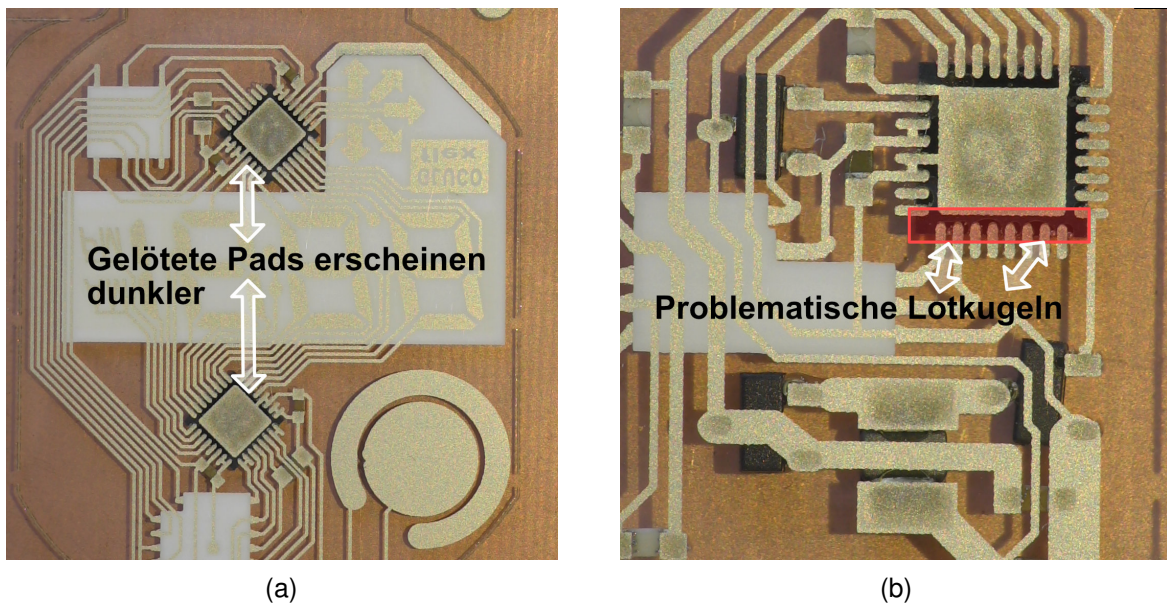


Abbildung 13: Komplettbestückung Rückseite »29/2SC180« Display (a) und MCU (b)

Erwartungsgemäß haben sich die gelöteten Stellen der Pads etwas dunkler verfärbt als die restlichen Leiterbahnen oder das Display, auf denen sich keine Lötpaste befindet. In der Aufnahme (a) der Abb. 13 wird der Displaybereich gezeigt. Die weißen Pfeile zeigen jeweils auf die GND-Pads des QFN-32 Chips. Im Bereich (b) der Abb. 13 ist dies ebenfalls sehr deutlich zu erkennen. Bei genauerer Betrachtung fällt jedoch auf, dass sich teilweise aufgeschmolzene Lotkugeln zwischen den Pads befinden. Der Bereich ist schwer zu erkennen und wurde deshalb durch die rote Fläche hervorgehoben. Nachdem das Programm später auf den MCU geflasht wurde, bestätigte sich die Problematik dieser Lotkugeln. In Abb. 14 kann der vergrößerte Abschnitt des QFN-32-MCUs detaillierter betrachtet werden.

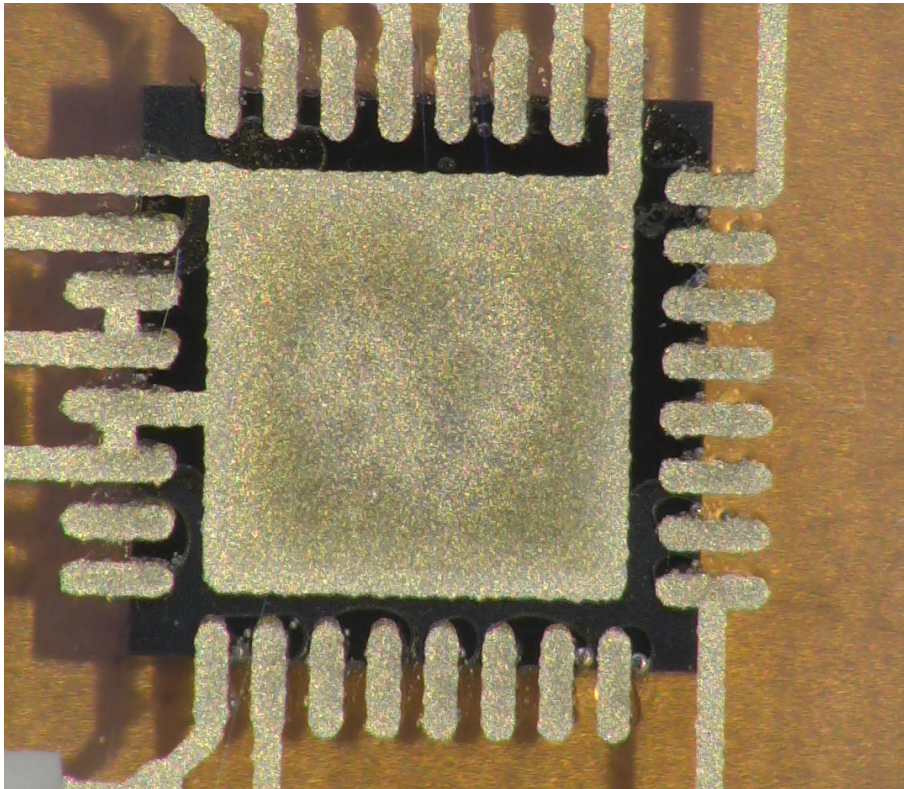


Abbildung 14: Rückseite Lotkügelchen bei QFN-32 »29/2 SC180«

Das Problem beim Auftreten dieser Lötfehler ist, dass sich unerwartet Kurzschlüsse bilden können. Lotkügelchen lassen vermuten, dass sich auf der Folie keine Benetzung bildet. Weshalb die Paste von den Pads auf die Folie selbst gelangt, ist nicht bekannt. Wie in Abb. 2 gezeigt, entsteht hier keine mechanische Verbindung zwischen Substrat und Bauteil. Die Kügelchen klemmen deshalb nur leicht dazwischen und können auch, je nach Festigkeit des Bauteils, von alleine verrutschen. Auch wenn anfänglich kein Kurzschluss vorhanden ist, könnte er im Laufe der Zeit entstehen. Für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb des Displays und des MCUs ist das nicht optimal. Im Falle der Lötung des »29/2 SC180« Substrats spielen die Kügelchen beim MCU eine unwichtige Rolle, da sich die Fehler bei den Pads befinden, welche nicht benötigt werden und somit nicht durch Leiterbahnen angebunden sind. Dies kann sehr gut der Abb. 13 und Abb. 14 entnommen werden.

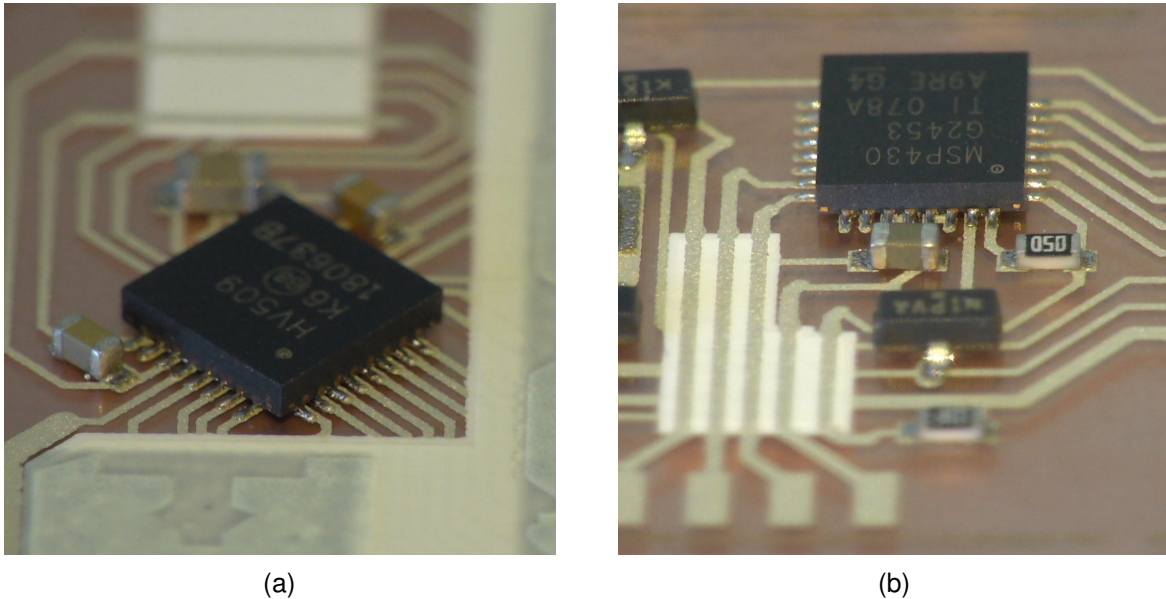


Abbildung 15: Seitliche Ansicht QFNs »29/2SC180« Display (a) und MCU (b)

Bei der seitlichen Ansicht der Bauteile in Abb. 15 sind ebenfalls Unregelmäßigkeiten zu erkennen. Lötmenisken sind bei den meisten Bauteilen zwar vorhanden, bei den QFN-Bauteilen allerdings nicht überall, sondern eher selten. Während die Lötpaste in Aufnahme (a) beim IC gar keine Menisken ausbildet, lässt sich bei Aufnahme (b) nur minimale Meniskusbildung erkennen. Dies kann auf eine mangelhafte Lötung hindeuten. Im nachfolgenden Kapitel werden mögliche Ursachen für das Problem gesucht und mit Versuchen Ideen umgesetzt, um diese Ungleichmäßigkeit zu verstehen oder zu beheben.

Doch zunächst wird die bereits vorhandene Testsoftware auf den Mikrocontroller geflasht, um zu testen, ob die Substrate funktional sind. Das Ergebnis soll ein blinkendes Display sein, das seinen Zustand einmal pro Sekunde ändert. Da es sich um einen MSP430 MCU handelt wurde das von Texas Instruments produzierte Flash-Tool verwendet [1]. Die Kontakte werden über die Dauer des Flashvorgangs an den entsprechenden Flächen des Substrats fixiert. Nachdem der Vorgang abgeschlossen ist, muss eine Spannung von  $U=3,0V$  an den Kontaktflächen der Batterie anliegen. Dafür wird ein Labornetzteil verwendet. Um eine mögliche Beschädigung der Schaltung auszuschließen, wird der Strom auf 30mA begrenzt. Nach Anlegen der Spannung leuchten Teile der Schaltung auf. Allerdings funktioniert nicht das komplette ELD. Ein Teil einer Sieben-Segment Anzeige, das P.M. Zeichen, der Doppel-



punkt in der Mitte und der schräg nach unten zeigende Pfeil funktionieren nicht.

Die Vermutung war, dass die Lotkugeln Kurzschlüsse erzeugen und so Teile der Schaltung funktionsunfähig machen. Daher wurde die Lötpaste der QFN-Pads mit einer Hot Air Rework Station erneut zum Aufschmelzen gebracht. Dabei ist zu beachten, dass die maximale Prozesstemperatur der Folie von  $T=150^{\circ}\text{C}$  nicht überschritten werden darf. Nach dem Aufschmelzen der Paste, wurde das Bauteil mit einer Pinzette vorsichtig nach unten in Richtung der Folie gedrückt. Das hatte zur Folge, dass kleine Lotkugeln herausgepresst wurden. Dieser Vorgang wurde bei allen QFN-Pads wiederholt. Durch das Entfernen der Lotkugeln wurde die Kurzschlussgefahr beseitigt.

Nachdem das Substrat so repariert wurde, konnte erneut die Spannung angelegt werden. Die Schaltung hat nun funktioniert, was durch das Blinken des gesamten Displays ersichtlich war.

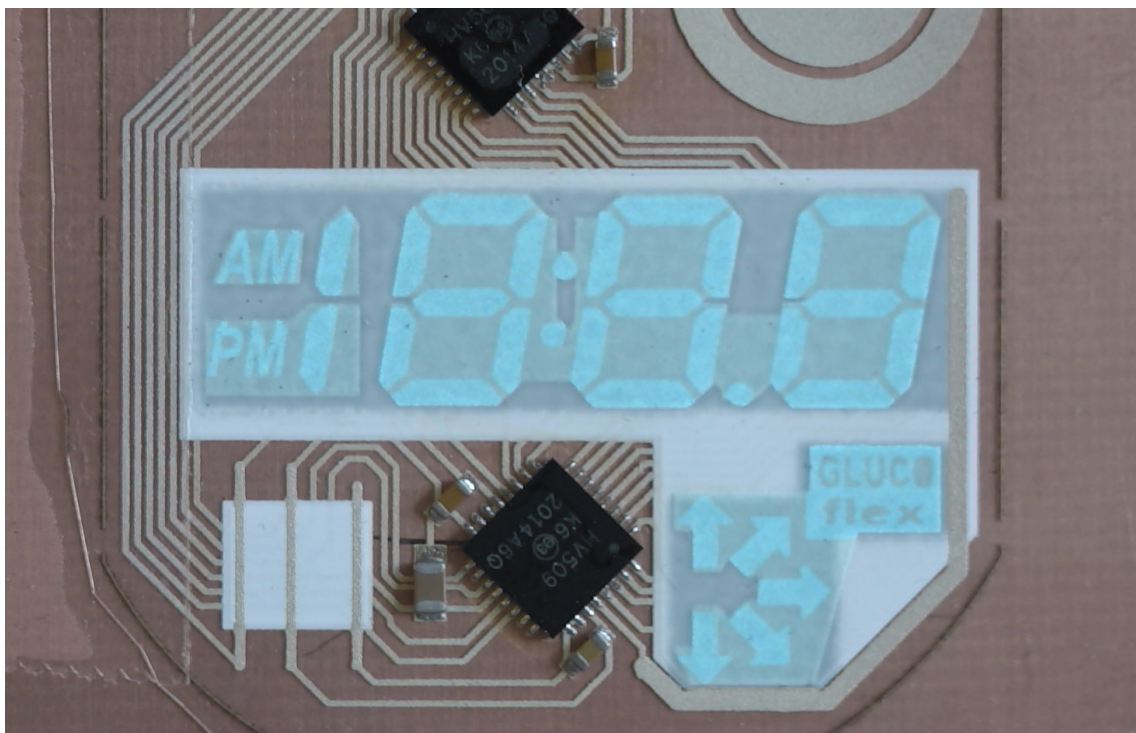


Abbildung 16: Angeschaltetes Display

Abb. 16 zeigt ein angeschaltetes Display. Die Ablesbarkeit der blauen Flächen des Displays ist bei Tageslicht und bei Raumlicht gegeben, bei direkter Sonneneinstrahlung jedoch nicht mehr.

## 2.5 Optimierungsversuche der Lötvorgänge

Nach Fertigstellung und Tests des ersten komplettbestückten Substrats, wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben, wurden noch weitere Substrate wie oben bestückt, um die Reproduzierbarkeit des Versuches zu überprüfen. Dabei hat sich herausgestellt, dass Fehler im Display, aber auch totale Ausfälle, keine Seltenheit waren. Kein Display hat auf Anrieb funktioniert, sondern musste unter erneutem Aufwand repariert werden. Die Reparatur war jedoch nicht immer erfolgreich. Somit wurde diese Testreihe als nicht prozessreif eingestuft. Aus diesem Grund wurden Ideen gesammelt, um die Ursachen der Ausfälle zu ermitteln. In den nächsten Abschnitten werden die Herangehensweisen und Lösungsversuche geschildert und getestet.

### 2.5.1 Unterstützen des Lötvorgangs durch den Einsatz zusätzlicher Flussmittel

In den meisten Bestückungsversuchen war die Meniskusbildung an den QFN Bauteilen unterdurchschnittlich. Es wurde vermutet, dass die seitlichen Flächen des QFNs nicht mit dem Flussmittel der Lötpaste SC180 verträglich sind. Die Idee war, zusätzliche Flussmittel nach dem ersten Lötvorgang aufzubringen, um zu sehen, wie bzw. ob sich das Aufschmelzen des Lotes nachträglich verändern lässt. Wenn das der Fall wäre, könnte man eine bessere Benetzung des QFN-Chips erzielen und somit auch das Problem der Kurzschlüsse der Lotkugeln lösen. In der nachfolgenden Tabelle werden die untersuchten Flussmittel zum Vergleich aufgelistet.

Tabelle 6: Flussmittel zur Unterstützung

Flussmittel	Auftragungsart
<i>AAT-IF6000</i>	Stift
<i>Stannol F-SU23 AK1</i>	Stift
<i>Edsyn FL 112</i>	Pinsel
<i>Edsyn FL 22 R</i>	Dispenser / Spritze

Alle Pasten wurden nacheinander auf das bereits gelötete, unbestückte Substrat »34/3 SC180« gegeben und erneut bei SC180-Einstellungen aus Tabelle 4 gelötet. Zwischen den Lötvorgängen wurde das restliche Flussmittel des Vorgängertests mithilfe von Spiritus entfernt und das nächste Flussmittel aufgetragen. Die

Versuche sollen zeigen, ob unterschiedliche Flussmittel bei der maximalen Temperatur von  $T=150\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf diesem Substrat etwas verändern. Mit Veränderung ist dabei die nachträgliche Benetzungsfähigkeit oder die Fließeigenschaft des Lotes gemeint. Das ursprüngliche Substrat hat dabei nach dem ersten Lötvorgang folgendermaßen ausgesehen:

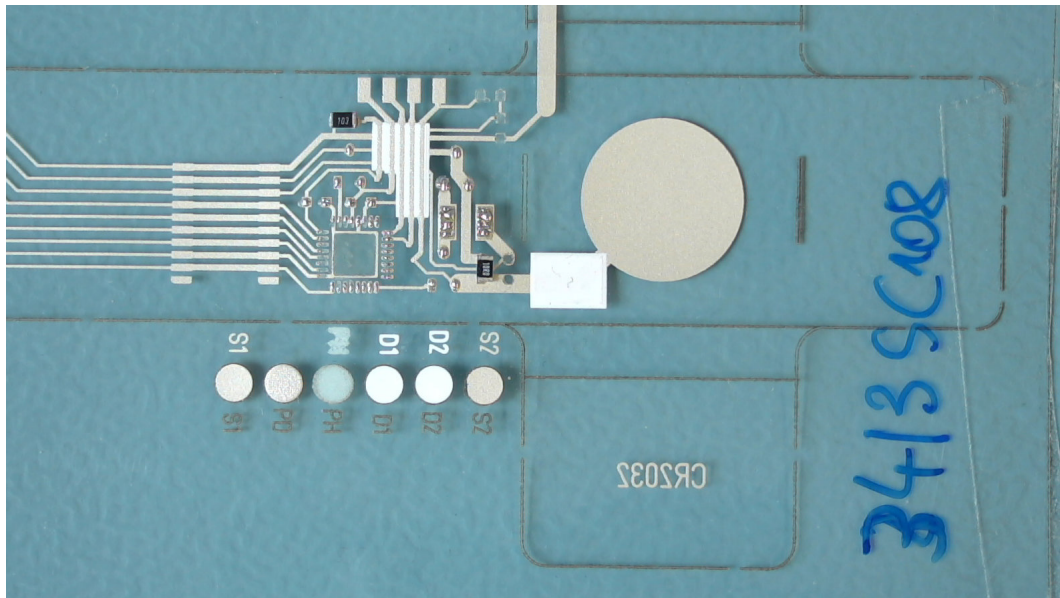


Abbildung 17: Substrat "34/3 SC180" vor Flussmitteltests

Abb. 17 zeigt das Substrat. Das fehlende GND-Pad des QFN-Bauteils des Substrats ist bei diesem Versuch vernachlässigt worden. Zu Beginn schien die Benetzung noch in Ordnung zu sein, allerdings ist der Randwinkel  $\beta$  augenscheinlich über den empfohlenen 20 Grad. Die verschiedenen Flussmittel und die Auswirkung auf das Substrat werden nach der Reihenfolge der Tabelle 6 beschrieben.

**AAT-IF6000:** Das Flussmittel konnte mit leichtem Druck des stiftartigen Behälters auf dem Substrat an den Lötstellen angebracht werden. Die Konsistenz war dabei sehr flüssig und die Farbe gelblich. Nach dem erneuten Lötvorgang war keine wesentliche Veränderung am Substrat erkennbar.

**Stannol F-SU23 AK1:** Die Auftragung dieses Flussmittels erfolgt genau identisch zu Flussmittel *AAT-IF6000*. Nach dem Lötten ist erkennbar, dass kleinere Lotkügelchen zu größeren zusammenschmelzen.

**EDYSN FL 112:** Dieses Flussmittel wird mittels Pinsel aufgetragen, der im Deckel des Behälters angebracht ist. Die Farbe ist klar und die Konsistenz ebenfalls flüssig. Auch bei diesem Versuch lässt sich keine nennenswerte Verformung erkennen. Die

Lötstellen erscheinen allerdings matter als zuvor.

**EDYSN FL 22 R:** Mit einem Dispenser konnte das Flussmittel direkt auf die Pads gegeben werden. Die Färbung ist gelblich und die Konsistenz sehr zäh. Beim Löten erkennt man, dass das Flussmittel sich verflüssigt und leicht verläuft, allerdings verändert sich nichts an der Benetzung der Pads.

Abschließend wurde in dieser Versuchsreihe festgestellt, dass sich die Benetzung der Pads nachträglich mit den getesteten Flussmitteln nicht verbessert hat. Ein erneutes Aufschmelzen des Lotes war zwar immer durch das Kontrollfenster des Reflow-Ofens erkennbar, jedoch waren zielführende Unterschiede vor und nach den einzelnen Vorgängen nicht vorhanden. Deshalb wird auf eine Darstellung der Ergebnisse verzichtet.

### 2.5.2 Benetzen und Reinigen der QFN-Pins

In Abschnitt 2.4.3 trat das Problem auf, dass sich bei den QFN-Bauteilen unregelmäßige Menisken bildeten. An einigen Pins waren keine Menisken vorhanden, bei anderen waren Ansätze zu erkennen (vgl. Abb. 15). Der überwiegende Legierungsprozess des Lötvorgangs fand ausschließlich an der Unterseite der QFN-Bauteile statt und nicht seitlich. Da die Pins der QFN-Bauteile seitlich nicht verzinnt sind, wie dies bei der Unterseite der Fall ist, ist die Idee entstanden, die seitlichen Kontaktflächen ebenfalls zu verzinnen. Weil die Kontaktflächen der SMD Widerstände und Kondensatoren ebenfalls verzinnt sind und sich dort schöne Menisken bilden, wird vermutet, dass das Beschichten der Pins beim QFN-Bauteil zur Meniskusbildung führen kann. Dass sich bisher keine Benetzung an der Kupferfläche bildet, kann am beigemischten Flussmittel der Lötpaste liegen, aber auch an der eingeschränkten Prozesstemperatur von max. 150 °C.

**Versuchsdurchführung:** Ein QFN-32-Chip wurde zur Befestigung seitlich in einen Schraubstock eingespannt. Dann wurde auf die Pins Lötpaste DP 5505 des Herstellers Aston aufgetragen. Diese ist an der Hochschule für SMD Lötanwendungen in Gebrauch. Mit einem LötKolben wurde die Paste zum Schmelzen gebracht und auf den Pins verteilt. Überschüssiges Lot wurde mithilfe von Entlötlitze entfernt. Dieser Prozess wurde bei allen vier Seiten wiederholt. Zum Schluss wurden die Bauteile in einem Ultraschallbad gereinigt und so von Flussmittelresten befreit. Dafür wurde ein beliebiges Flussmittelreinigungsmedium verwendet. Als Ergebnis bleibt ein verzinnter Chip. Die seitlichen Kontaktflächen der Pins erscheinen jetzt silbrig statt

kupferfarben.

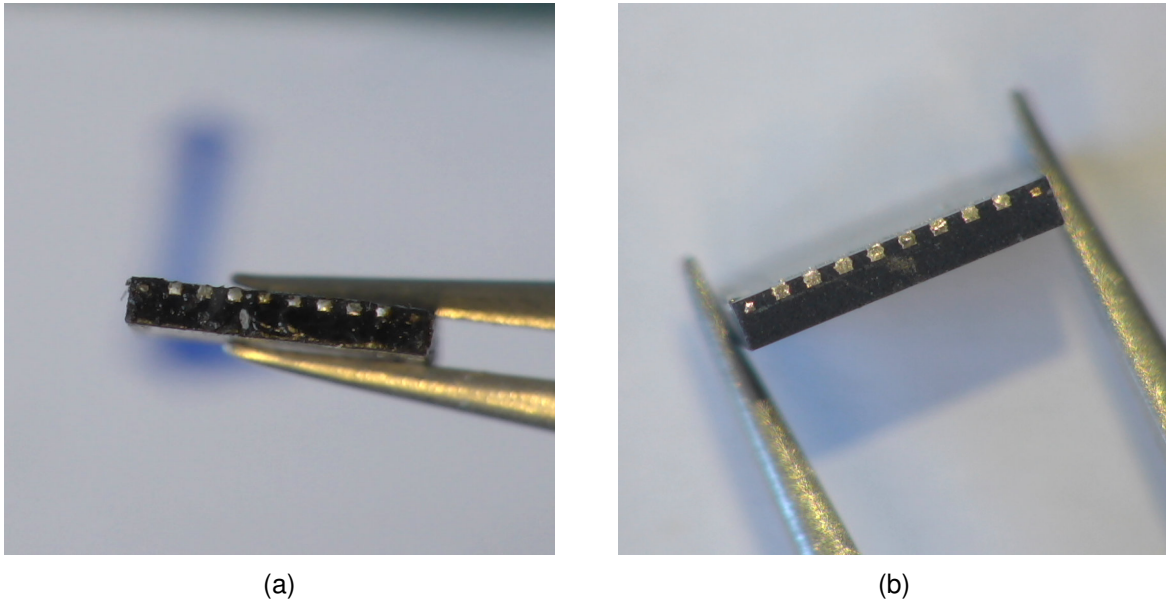


Abbildung 18: Verzinnung eines QFN-Bauteils: Vor der Reinigung (a) und nach der Reinigung (b)

Nach dem Verzinnen sah das Bauteil wie in Abb. 18 aus. Flussmittelreste sind dabei vorhanden. Das Bauteil konnte so nicht verwendet werden. Nach der Reinigung im Ultraschallbad, wie bei (b) erkenntlich ist, wurde der QFN-Chip einsatzbereit für den Lötversuch auf dem Substrat.

Für den Lötversuch wurde die Lötpaste SC180 verwendet. Es wurde dafür nur ein Teil des Substrates verwendet. Die Bezeichnung lautet »31/1«. Die Lötpaste wurde mit einer Rakel durch die Schablone aufgetragen, um die Gleichmäßigkeit der Auftragung zu gewährleisten. Die Einstellungen des Reflow Ofens wurden beibehalten und können der Tabelle 4 bei Paste SC180 entnommen werden.

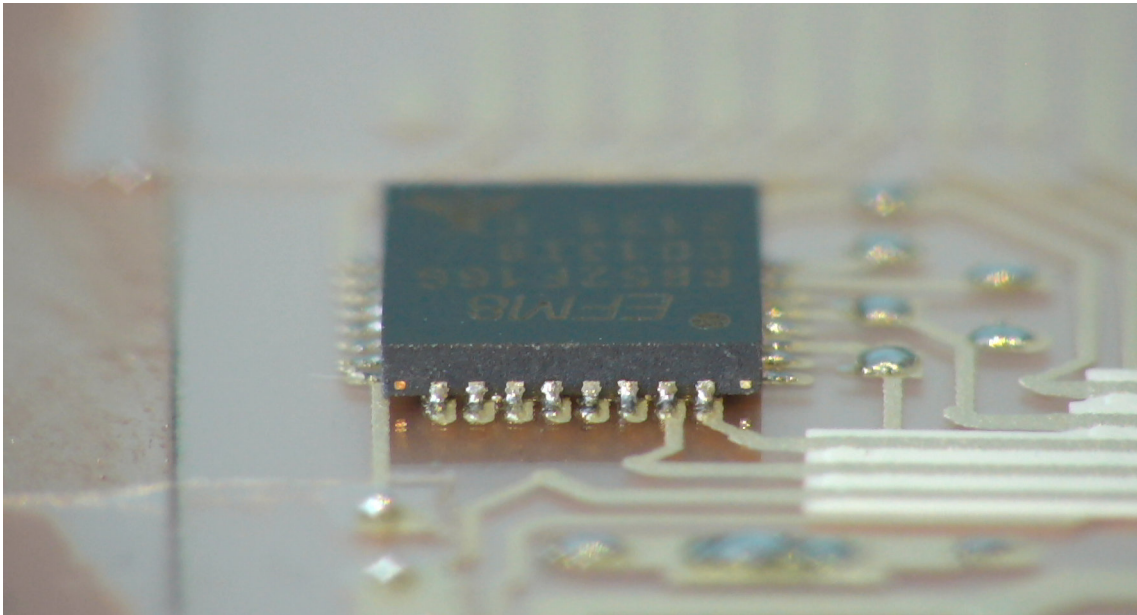


Abbildung 19: Seitliche Ansicht nach Verzinnung eines QFN-Chips auf »31/1«

Abb. 19 zeigt den IC nach dem Lötvorgang auf dem Substrat. Eine Seite wurde beispielhaft zur Darstellung gewählt. Die Meniskusbildung hat sich deutlich verbessert. Es sind keine Lücken zwischen Bauteil und Substrat an den Pins mehr erkennbar. Die Funktionsfähigkeit des ICs konnte nicht überprüft werden, da es sich hierbei um einen ausgesonderten Chip handelte. Diese wurden daher ausschließlich für Lötversuche verwendet.

Bei diesem Versuch wurde gezeigt, dass ein vorheriges Verzinnen des seitlichen Teils der QFN-Bauteile durchaus Vorteile hat. Lötmenisken können sich besser bilden als bei unverzinteten ICs. Ob die prozesssichere Durchführung in der Praxis v.a. bei größeren Stückzahlen gut umsetzbar ist, bleibt allerdings offen.

### 2.5.3 Reduzieren von Lötpaste beim GND-Pad zur Minimierung des Abstands zwischen Substrat und Bauteil

Eine weitere Ursache für mangelhafte Meniskusbildung könnte sein, dass sich auf dem mittleren GND-Pad der QFN-Chips zu viel Lötpaste befindet. Die äußeren Pins müssen unter allen Umständen fehlerfrei gelötet werden, um so die elektrische Verbindung sicherzustellen. Durch das Volumen an Paste auf dem GND-Pad ist der Chip leicht über dem Substrat angehoben und hat keine Verbindung mehr zu den essenziellen Pins. Beim Lötvorgang kann sich so keine Verbindung mehr ausbilden; Lötmenisken können nicht gebildet werden.

Diese Idee lässt sich in der Praxis durch eine Veränderung der Schablone realisieren. Die Öffnung für das GND-Pad der Schablone könnte in der Fläche weiter reduziert werden. Aber auch eine rasterförmige Anordnung bewirkt eine Reduktion der Lötpaste, die durch die Schablone gelangen kann.

Für diesen Versuch stand allerdings nur die bereits bekannte Schablone zur Verfügung. Sie hat bei den gelaserten Öffnungen bereits Flächenreduktion um 20%. Um eine weitere Reduktion bzw. Veränderung der Fläche zu simulieren, wird vom GND-Pad nach dem Auftragen Lötpaste entfernt. Die Gleichmäßigkeit der Auftragung bleibt bei den Pins erhalten, während das mittlere Pad der QFN-Chips zu Testzwecken nahezu von Paste befreit wird. Dementsprechend kann beobachtet werden, ob das Bauteil an den äußeren Pins nun besser gelötet wird. Falls dies der Fall ist, kann bei zukünftigen Schablonen das Layout verkleinert werden.

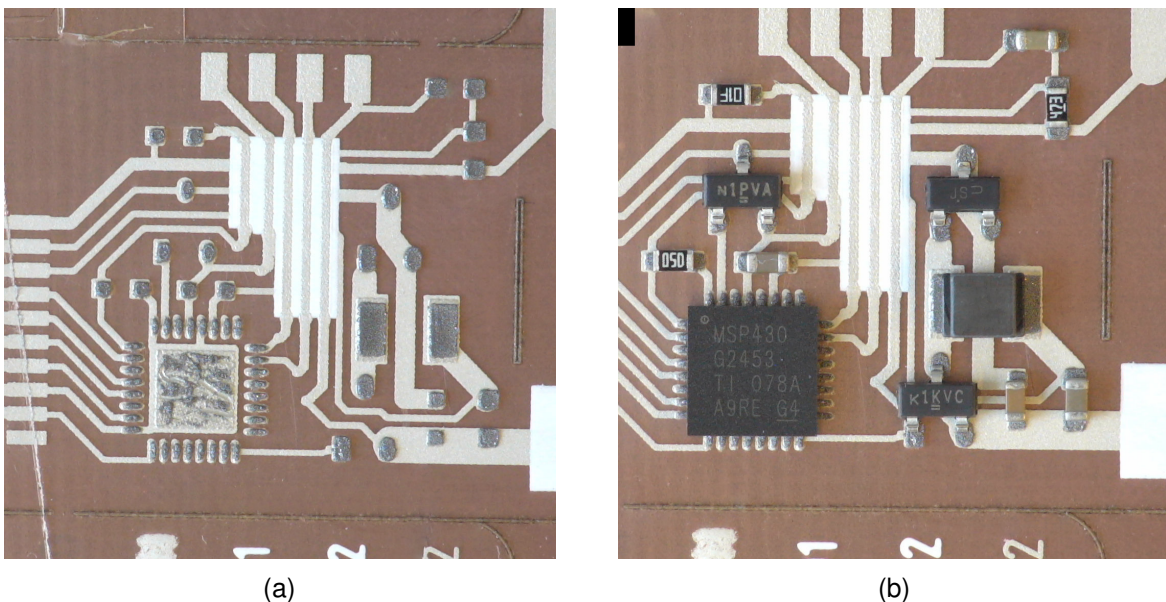


Abbildung 20: GND-Pad ohne Lötpaste »15/1 SC180« nach Auftragung (a) und nach Bestückung (b)

Aufnahme (a) in Abb. 20 zeigt dabei den MCU-Teil des Substrats. Dabei wurde aber, wie bereits beschreiben, beim GND-Pad des Microcontrollers Lötpaste entfernt, um so den Abstand zwischen Substrat und Bauteil zu verringern. In (b) sieht man das bestückte Substrat.

Bei diesem Versuch wurde Substrat komplett mit den Bauteilen bestückt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit, wird hier nur dieser Teil des Substrats vergrößert dargestellt. Es sollen dabei ausschließlich die Lötresultate bewertet werden. Eine wei-

tere wichtige Information ist dabei, dass diese ICs nicht vorher verzinnt wurden wie in Abschnitt 2.5.2.

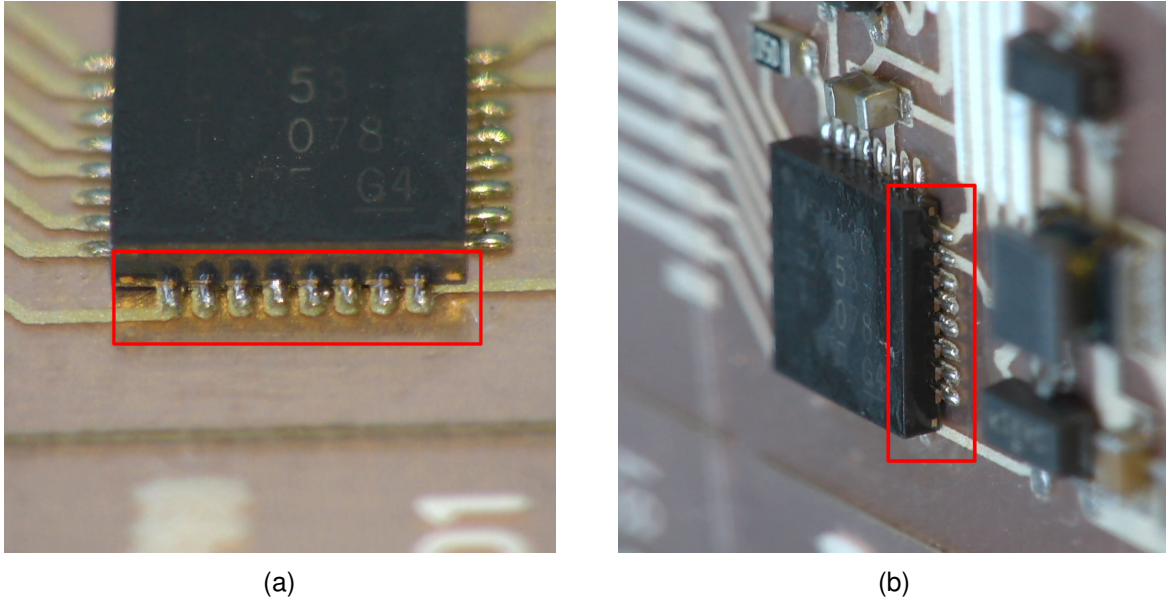


Abbildung 21: GND-Pad ohne Lötpaste »15/1 SC180« seitliche Aufnahmen

Betrachtet man nun den gelöteten Zustand des Microcontrollers in den Aufnahmen der Abb. 21, stellt man fest, dass es keine Verbesserung bei der Meniskusbildung gibt. Die seitlichen Kupferflächen der Pins sind noch erkennbar und die Fließeigenschaften der Lötpaste bleiben ebenfalls unverändert. Das Entfernen der Lötpaste vom GND-Pad ist daher nicht notwendig. Dieser Versuch ist allerdings nicht direkt reproduzierbar. Die Lötpaste wurde vom Pad mit einer Pinzette entfernt. Das heißt, dass bei Versuchswiederholungen geringfügig unterschiedliche Ergebnisse vorliegen könnten. Eine Weiterführung des Versuchs wird nicht angestrebt, da der Abstand zwischen Substrat und Bauteil gleich geblieben ist und keine Verbesserung erzielt wurde.

## 2.6 Belastungsversuche der Substrate durch Aussetzen von Flussmittelreiniger

Nach den Lötversuchen soll untersucht werden, ob die gelöteten und funktionsfähigen Substrate sicher gereinigt werden können. Dafür wurden drei verschiedene Flussmittelreiniger verwendet:



- **Vigon A 201**
- **Vigon FA+**
- **Multicore Prozone**

Durch diese Experimente soll in Erfahrung gebracht werden, wie die nächsten Schritte nach den Lötversuchen ablaufen könnten. Die aufgelisteten Flussmittelreiniger werden an der Hochschule unterschiedlich eingesetzt. Der Reiniger *Vigon A 201* wird in einer umgebauten Ätzanlage verwendet. Diese dient eigentlich der Herstellung von Leiterplatten, konnte aber an den neuen Verwendungszweck angepasst werden. In der Anlage ist statt der ätzenden Flüssigkeit als Medium der Flussmittelreiniger. Das Substrat wurde in die Anlage gegeben und wird nach dem Einstellen einer ausgewählten Zeit mit dem Reiniger gespült. Die beiden anderen Reiniger *Vigon FA+* und *Multicore Prozone* wurden in ein Ultraschallbad gegeben, in das die Substrate eingelegt wurden. Durch Verwendung verschiedener Reiniger soll getestet werden, welcher dieser Reiniger für eine spätere Anwendung bei den flexiblen GlucoFlex-Substraten in Frage kommen könnte.

Es wurden dabei drei verschiedene Versuche durchgeführt. Bei allen handelt es sich um Belastbarkeitstests. Dabei wurde ermittelt, wie gut verschiedene Substanzen dem Schutz der Schaltung dienen.

### **2.6.1 Belastungstest nach Auftragen von Leiterplatten Schutzlack**

Zum Schutz der mehrschichtigen Displays hat sich im Hybridlabor bereits der *Kontakt Chemie PLASTIK 70* Lack bewährt [6]. Es soll getestet werden, ob dieser Lack auch für das ELD des GlucoFlex-Projekts verwendet werden kann, bevor dieses gereinigt wird. Der Acrylharzlack soll gute Isolationseigenschaften besitzen. Außerdem soll er nach der Anwendung die Leiterplatte vor Kriechströmen und Kurzschlüssen schützen. Er wird dabei aus der Spraydose in 20 - 30cm Entfernung auf das Substrat gesprüht und bei Raumtemperatur für 24h im Reinraum getrocknet.

Für den Versuch wurden drei Teile der Folie, welche für das GlucoFlex-Projekt verwendet wurde, gemäß dem technischen Merkblatt vorbereitet. Jede dieser Folien wurde einseitig mit einer Schicht Lack besprüht. Anschließend wurden diese Folien den Flussmittelreinigern ausgesetzt. In Tabelle 7 lassen sich die Ergebnisse ablesen.

Tabelle 7: Belastungstest PLASTIK 70 in Flussmitteln

Reiniger	Reinigungsart	Dauer der Reinigung	Ergebnis
<i>Vigon A 201</i>	Umgebaute Waschanlage	6min	Lack wurde entfernt
<i>Vigon FA+</i>	Ultraschallbad	5min	Lack wurde entfernt
<i>Multicore Prozone</i>	Ultraschallbad	5min	Lack wurde entfernt

Alle drei Flussmittelreiniger haben den Lack über die Dauer der Behandlung vollständig entfernt. Es ist daher ratsam den Lack ausschließlich nach der Reinigung zu verwenden, falls die Substrate geschützt werden sollen.

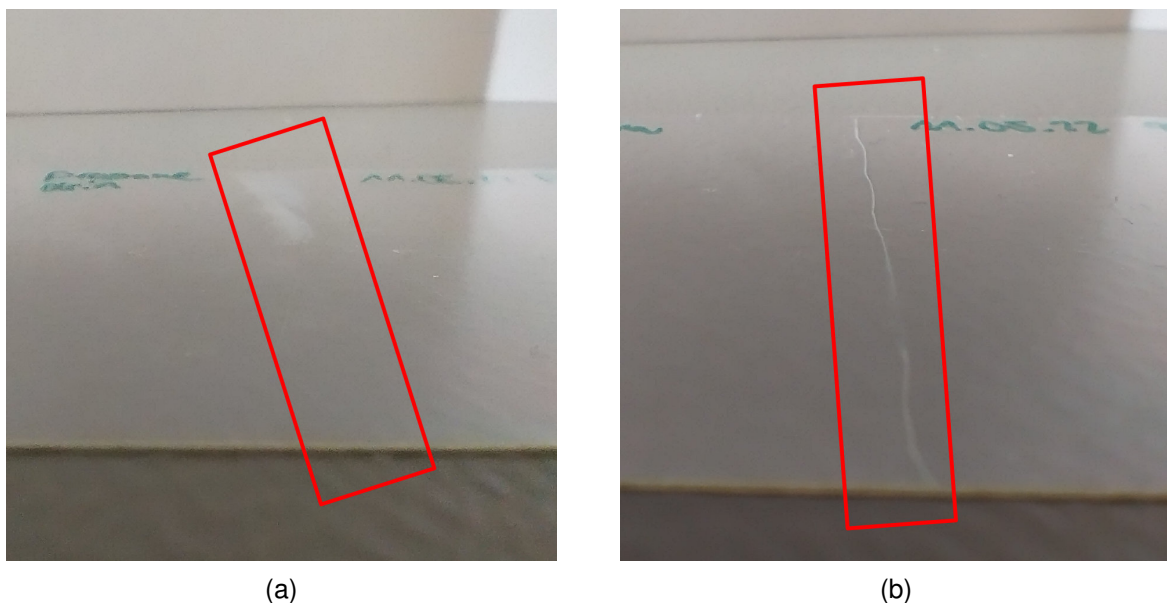


Abbildung 22: Folien nach Flussmittelreinigung mit Prozone (a) und Vigon Fa+ (b)

Das Ergebnis nach dem Reinigen mit Vigon A 201 kann nicht gezeigt werden, da der komplette Lack in der Waschanlage weggewaschen wurde. Die Ergebnisse der anderen Tests zeigt Abb. 22. Im Ultraschallbad konnten die Folien nur auf einer Seite eingetaucht werden. Dabei fällt auf, dass bei der Reinigung mit Prozone in der Aufnahme (a), und mit Vigon Fa+ in der Aufnahme (b) eine Kante zu erkennen ist. Diese fällt bei (b) wesentlich deutlicher aus. Dabei handelt es sich um die Trennlinie

zwischen der Lackschicht, welche außerhalb des Ultraschallbads, und der gereinigten Schicht, die im Ultraschallbad Kontakt mit dem Reinigungsmedium hatte. Alle Reiniger greifen den getesteten Schutzlack zu stark an, weshalb dieser vor der Reinigung nicht verwendet werden sollte.

### 2.6.2 Belastungstests von gedruckten Displays

Als nächstes wurde untersucht, ob bedruckte Substrate einer Reinigung standhalten. Allerdings wurde anstelle des originalen GlucoFlex-Substrats ein anderes Display verwendet. Dieses wurde im gleichen Verfahren hergestellt und basiert ebenfalls auf der Technologie der Elektroluminiszenz. Das verwendete Substrat wird an der Hochschule im Praktikum der Vorlesung »Product Engineering« hergestellt. Das Display ergibt zusammen mit der dazugehörigen Leiterplatte und dem darauf abgestimmten Programm einen Technologiedemonstrator. Die *Nachtuhr* ist das im Praktikum erstellte Produkt, mit der über das Display die aktuelle Uhrzeit angezeigt werden kann.

Die Displays wurden ebenfalls wie in Abschnitt 2.6.1 den drei Flussmittelreinigern ausgesetzt, wobei ebenfalls die Zeitintervalle aus Tabelle 7 gewählt wurden. Es soll ermittelt werden, ob die bedruckten Substrate inklusive Display einen Reinigungsvorgang überstehen. Dieser ist notwendig, um die Schaltung für einen möglichen späteren Verguss mit Kunstharzen vorzubereiten [1]. Diese Vorbereitung könnte notwendig sein, falls die Harze nicht auf dem Substrat haften können. Nachfolgend werden die Ergebnisse über die Flussmittelreinigung jedes Displays geschildert.

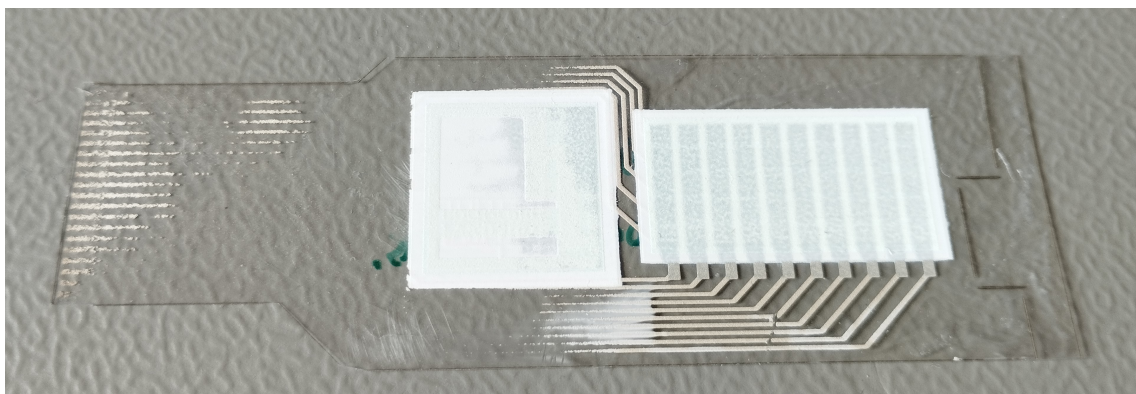


Abbildung 23: Flussmittelreiniger Prozone bei bedrucktem Display

Nach der Reinigung mit Prozone im Ultraschallbad ist das Substrat beschädigt, wie in Abb. 23 zu erkennen ist. Vor allem die Leiterbahnen wurden vom Flussmittel-

reiner angegriffen, so dass kein Strom mehr fließen kann und eine Funktionalität des Displays ausgeschlossen ist.

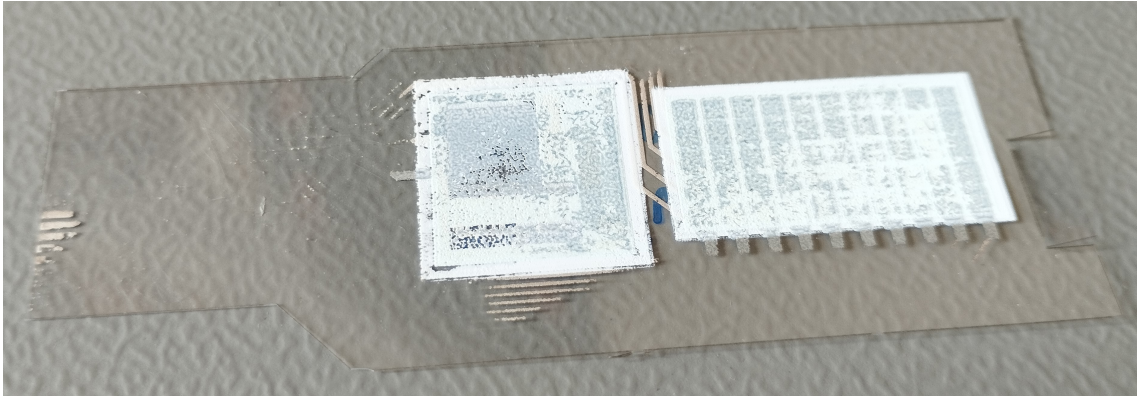


Abbildung 24: Flussmittelreiniger Vigon FA+ bei bedrucktem Display

Der Flussmittelreiniger Vigon FA+ wirkt bei gleicher Zeit im Ultraschallbad noch aggressiver und zerstört somit auch das Substrat in Abb. 24. Neben der ersten Schicht der Leitpaste, also den Leiterbahnen, greift er noch mehrere Schichten des ELDs an. Somit ist eine korrekte Funktion dieses Substrats ebenfalls nicht gegeben.

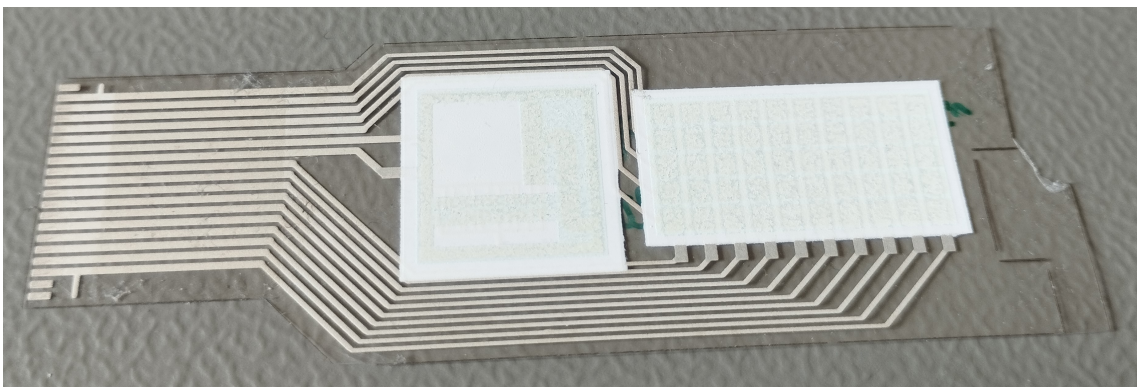


Abbildung 25: Flussmittelreiniger Vigon A 201 bei bedrucktem Display

Abb. 25 zeigt das Substrat, welches mit Vigon A 201 gereinigt wurde. Nach einer ersten optischen Begutachtung fällt kein direkter Schaden auf. Dennoch funktioniert dieses Display ebenfalls nicht. Dies könnte allerdings auch an der langen Reinigungsdauer von ca. 6min liegen. Da diese Anlage das Substrat mit Düsen schnell von allen Seiten reinigen kann, reicht vermutlich eine kürzere Zeit. Dadurch kann das Display geschont und dennoch von Flussmittelresten befreit werden. Eine Reinigung der Substrate ist auch abhängig vom verwendeten Vergussharz.

Dennoch verbessert eine Reinigung der Schaltungen das ästhetische Erscheinungsbild.

## **2.7 Fazit des GlucoFlex-Projekts**

Die Ergebnisse der Löttests sind noch nicht zufriedenstellend. Es wurden funktionierende Schaltungen hergestellt und das verwendete Programm war funktionstüchtig. Das anfänglich angestrebte Ziel wurde demnach erreicht. Allerdings sind die Optimierungsversuche der Lötprozesse noch nicht ausgereift. Deshalb wurde über weitere Schritte der Arbeit mit dem Betreuer diskutiert. Eine Weiterarbeit am GlucoFlex-Projekt soll demnach erst erfolgen, wenn bessere und prozesssichere Wege des Lötvorgangs gefunden wurden. Daher sollen grundlegendere Löttests in die Wege geleitet werden, welche später auf das Hauptprojekt GlucoFlex adaptiert werden können. Erst danach sollte wieder an weiteren Versuchen wie in Abschnitt 2.6 gearbeitet werden.

### 3 Weiterführung der Fine-Pitch SMD Lötversuche

Bevor weitere detailliertere und prozessichere Lötversuche durchgeführt werden konnten, fand ein Besuch auf der SMTconnect Messe Nürnberg 2022 statt. Vor Ort konnten Kontakte mit Lötpastenherstellern geknüpft werden. Dieser Besuch hatte zur Folge, dass weitere Lötpasten erhalten wurden und neue Versuchsreihen begonnen werden konnten. Durch die Lötversuche soll herausgefunden werden, welche der Pasten für das Löten auf dem verwendeten bedruckten Substrat am besten geeignet ist. Die einzelnen Tests sollen also bessere Ergebnisse liefern als die Paste SC180 bei der Komplettbestückung.

Als Testbauteile zum Löten wurden QFN-32- und QFN-20-Bauteile erworben. Diese Versuche handelten ausschließlich von der optischen und mechanischen Bewertung der Lötungen. Somit konnte zur besseren Effizienz ein eigenes Layout entworfen werden, das speziell für Löttests ausgelegt ist. Die Folie kann zu den passenden Substraten gelasert werden und diese werden im Siebdruckverfahren bedruckt. Die Lötprozesse sollen erneut wie bereits bekannt durchgeführt werden. Im Folgenden werden alle Schritte von der Layouterstellung bis zu den mechanischen Belastbarkeitstests chronologisch aufgeführt.

#### 3.1 Erstellung des Layouts für Fine-Pitch SMD-Lötversuche

Zur Layouterstellung wurde das Programm *Target 3001!* verwendet. Das fertige erstellte Layout ist in Abb. 26 dargestellt. Die Anforderungen werden anhand dieser Abb. 26 beschrieben.

Das Layout besteht aus zwei druckbaren Schichten S1 und S2. Diese sind, bis auf die Platzierung der Fiducials, identisch. Nur die blaue S1 Schicht ist deshalb in der Abb. 26 sichtbar. Zwei Schichten sind für den Aufbau notwendig, da Versuche geplant sind, bei denen die erste Schicht mit der zweiten überdruckt werden soll. Das Substrat ist in sechs Segmente unterteilt. Die violetten Linien trennen die Segmente im Layout voneinander und diese können später von einem Laser präzise angeritzt werden, sodass sie sich von Hand voneinander trennen lassen. Beim Siebdruck ist das komplette Substrat für den Druck notwendig. Bei den Lötversuchen können die einzelnen Segmente durch die vorherige Bearbeitung mittels Laser vereinzelt werden. Die rote Umrandung zeigt die komplette Größe des Substrats. Das Substrat kann vollständig aus der Folie gelasert und danach davon getrennt werden. Jedes Segment ist letztendlich ein eigenes Lötsubstrat, auf dem jeweils drei Bau-

teile platziert werden können. Das Layout ist für ein QFN-Bauteil und zwei Bauteile der 0603-Bauform vorgesehen. Somit lassen sich sowohl die Lötresultate der ICs als auch die der restlichen Bauteile beurteilen. Die Pads der QFN-Bauteile wurden durch Leiterbahnen nach außen hin verlängert. Das ermöglicht eine elektrische Überprüfung der Lötkontakte, welche allerdings nicht durchgeführt wurde. Da mehr QFN-20-Bauteile bestellt wurden als QFN-32-Bauteile, wurden vier der sechs Segmente für QFN-20- und zwei für QFN-32-Chips ausgelegt. In den nachfolgenden Lötversuchen wurden dennoch nur QFN-20-Chips verlötet. Die blauen Linien oben, unten, links und rechts an der Kante des Substrats dienen der Siebherstellung für den Siebdruck.

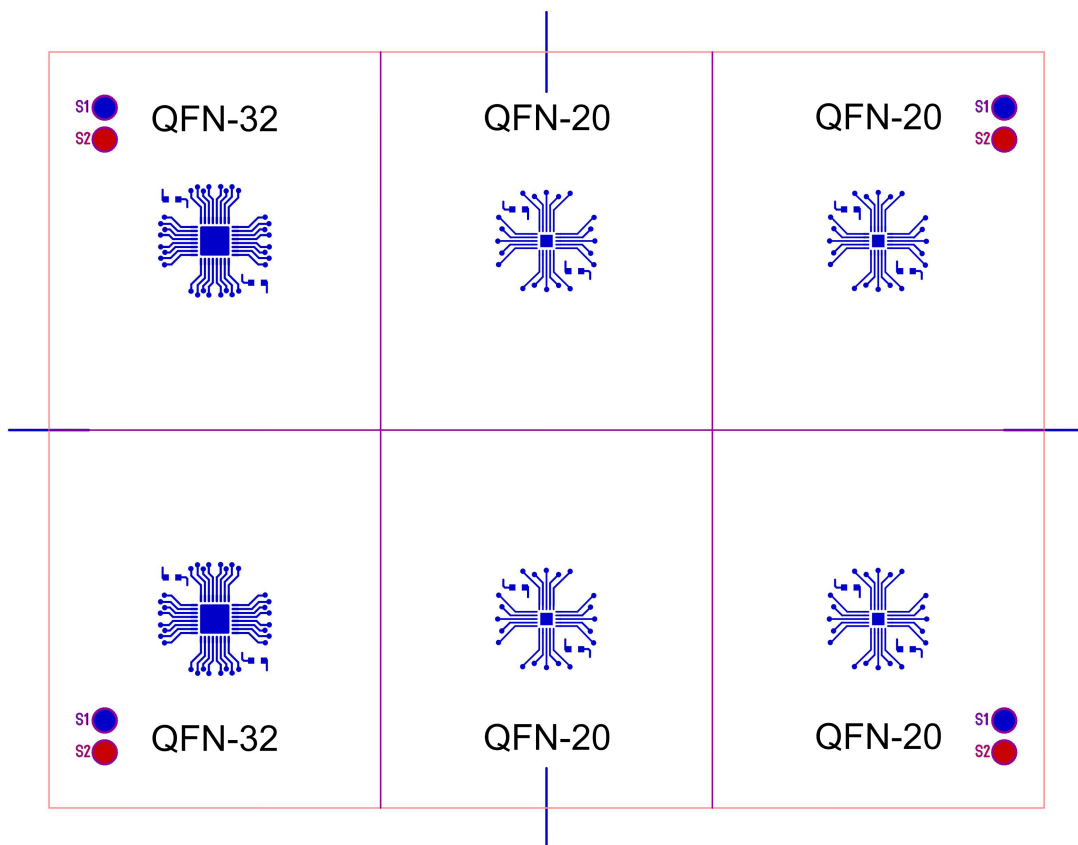


Abbildung 26: Layout der Löttestschaltung

### 3.2 Siebdruck der Substrate für Fine-Pitch SMD-Lötversuche

"Beim Siebdruck werden Farben oder Pasten durch Löcher in einer Druckvorlage auf die Oberfläche von Basismaterialien aufgetragen" [7, S.24]. In dieser Arbeit wird nur auf die grundlegenden Abläufe eingegangen, welche zum Verständnis des Themas

nötig sind. Da das Gebiet des Siebdrucks sehr weitläufig ist, wird für ein genaueres Verständnis auf Fachliteratur verwiesen. Die Erklärungen folgen als nächstes.

Um ein Sieb herzustellen, wird zunächst eine positive Fotomaske im Maßstab 1:1 des zu druckenden Layouts erstellt. Alle Bereiche, die später bedruckt werden sollen, sind auf der Folie der Maske schwarz. Grundsätzlich bestehen Siebe meist aus Kunststoff- oder Stahlgeweben [8]. Die gedruckten Schichtdicken lassen sich eindeutig durch deren Kennwerte wie Maschenzahl, Drahtdurchmesser und Maschenweite bestimmen. Diese Gewebe werden dann in einen Metallrahmen gespannt.

Im Folgenden wird kurz das Herstellungsverfahren eines direkt/indirekten Emulsionssiebs erläutert, welche auch an der Hochschule verwendet werden. Wichtig ist hierbei, dass der gesamte Prozess ausschließlich bei rein gelber Beleuchtung stattfindet. Für das Sieb wird ein passender Kapillarfilm ausgewählt, wobei die Dicke des Films mitbestimmend für die resultierende Druckdicke ist. Diese Folie wird mittig auf dem Sieb befestigt. Danach wird das gereinigte Sieb mit einer photosensiblen, pastenartigen Emulsion bestrichen. Das Sieb wird getrocknet und die Maske des zu druckenden Layouts auf dem Sieb zentral angebracht. Dabei unterstützen die Positionierungsmarkierungen.

Als nächstes folgt eine Belichtung unter UV-Licht (ultraviolettes Licht). Je nach ausgewählter Dicke des Kapillarfilms ändert sich die Belichtungsdauer. Durch die Belichtung trocknet die Emulsion. An den schwarzen Stellen des Layouts kann kein Licht durchdringen und die Emulsion nicht trocknen. Anschließend wird das Sieb ausgewaschen und das Layout bildet sich im Sieb ab. Nach dem Trocknen wird das Sieb versiegelt. Dafür wird die photosensible Paste auf die restlichen offenen Stellen des Siebs gestrichen, welche für den Druck nicht benötigt werden. Nach einem weiteren Belichtungs- und Trocknungsdurchlauf kann das Sieb verwendet werden.

Für die Siebherstellung ist es wichtig zu wissen, welche Siebparameter für den Druck optimal sind. Das hängt unter anderem von der Paste ab, die gedruckt werden soll. Hersteller dieser Druckpasten geben meist empirische Werte an, nach denen sich der Anwender richten kann. Nichtsdestotrotz ist bei diesem Verfahren viel von der eigenen Erfahrung abhängig, da Umwelteinflüsse das Ergebnis beeinträchtigen können. Um das zu vermeiden, findet der Prozess der Siebherstellung, des Drucks und der Trocknung im hochschuleigenen Reinraum bzw. Hybridlabor statt.

Die verwendete Paste wird dann auf das Sieb gegeben und das zu bedruckende Substrat darunter. Durch die kontinuierliche Rakelbewegung über die offenen Stellen des Layouts zeichnet sich der Druck auf dem Substrat ab. Dieser Vorgang kann



manuell durchgeführt werden. An der Hochschule befindet sich ein halbautomatischer Siebdrucker, der die Arbeit zur Prototypenfertigung und die Reproduzierbarkeit des Drucks erleichtert.

Entscheidend für einen erfolgreichen Druck auf den Substraten sind die Druckparameter. Der Rakeldruck  $p$ , die Druckgeschwindigkeit  $v$ , der Siebabsprung  $a$ , der Rakelweg sowie der Anstellwinkel sind dabei alle Parameter, die sich auch am Siebdrucker der Hochschule einstellen lassen und somit eine gute Reproduzierbarkeit der Drucke gewährleisten. Diese Parameter können Abb. 27 entnommen werden.

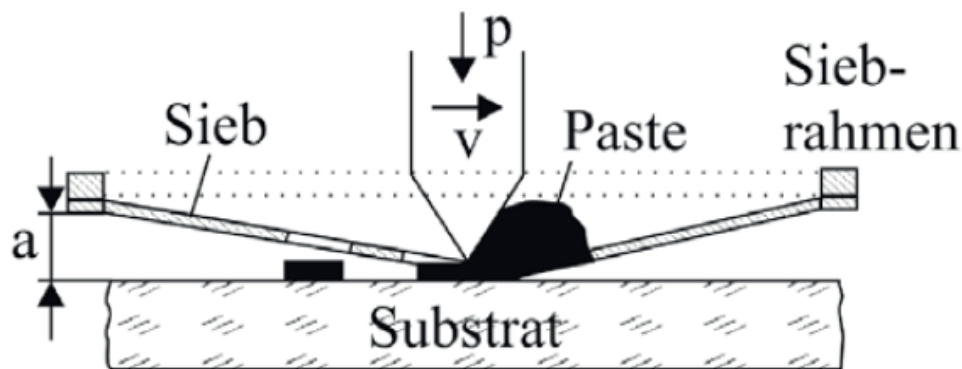


Abbildung 27: Ablauf des Siebdrucks von links nach rechts [8, S.940]

Abb. 27 zeigt ein seitliches Schnittbild während eines Drucks. In dieser Grafik wird die Paste über die Öffnungen des Siebs mithilfe der Rakel bewegt. Dadurch zeichnet sich das Druckbild auf dem Substrat ab. Anfänglich kann sich der Anwender dabei an den empirischen Herstellerangaben oder an der eigenen Erfahrung mit gewissen Druckpasten orientieren. Es empfiehlt sich ein Probedruck auf unwichtige Testfolien. Wenn die Druckergebnisse zufriedenstellend und die nötigen Einstellungen getroffen sind, wird auf die eigentlichen Substrate gewechselt.

In folgender Tabelle wird gezeigt, welche Pasten mit welchem Sieb gedruckt werden. Die Parameter sind dort ebenfalls abgebildet. Auf die technischen Daten der Druckpasten wird später eingegangen.

Tabelle 8: Siebherstellung für Druckpasten

Schicht	Paste(n)	Material	Bezeichnung	Mesh [1/zoll]	Winkel [°]	Beschichtung [ $\mu\text{m}$ ]
S1	CP 6662, CP 6671, CP 6690	Edelstahl	SD55/24/325/22,5	325	22,5	20
S2	CP 6690	Edelstahl	280/25/67/22,5	280	22,5	10
S2	CP 6690 (nur Pads)	Edelstahl	45/18/400/- kal./22.5	400	22,5	10

Tabelle 8 ist eine Übersicht der Siebparameter. Zuerst wird die Bezeichnung der gedruckten Schicht genannt, dann die Pasten. Die Leitpasten sind vom Hersteller *Elantas*. Das Material des Siebs und dessen Bezeichnung zeigen, welches Sieb verwendet wurde. »kal.« in der letzten Zeile bedeutet, dass dieses Sieb kalandriert wurde. Es folgen Meshzahl, Fadenwinkel und Beschichtungsdicke in Mikrometer. Als nächstes werden die Drucke und die daraus resultierenden Substrate beschrieben. Empfehlenswerte Druckparameter, welche für diese Pasten ermittelt und verwendet wurden, können im Anhang in Tabelle 12 eingesehen werden.

**Bectron CP 6662:** Diese Paste wird bei 120°C im Boxofen für 10 Minuten getrocknet [9]. Dabei darf der Ofen nicht zu lange geöffnet bleiben, da dieser sonst zu stark abkühlt. Die Haftung auf PET wird gewährleistet. Laut Hersteller ist diese Paste speziell für die Verwendung in elektronischen Anwendungen ausgelegt. Leiterbahnen, flexible Substrate, Membranschalter, Antennen oder Elektroden in ELDs zählen zum Anwendungsgebiet dieser Paste. Nach einigen Einstellversuchen der Druckparameter konnten sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Zum einen wurde versucht, direkt auf Substraten mit dieser Paste zu löten, zum anderen wurden einige Substrate mit der Paste CP 6690 überdruckt. So wurde untersucht, inwiefern ein Überdruck die Lötbarkeit der Pasten beeinflusst.

**Bectron CP 6671:** Diese Paste soll im UV-Bandrockner bei  $>700\text{mJ}/\text{cm}^2$  und danach im Boxofen 2 Minuten lang bei 100°C getrocknet werden [10]. Diese Paste wird ebenfalls für Leiterbahnen, flexible Substrate oder Membranschalter empfo-

len. Die Druckergebnisse konnten durch Anpassungen der Druckparameter auch schnell verbessert werden. Es soll auch versucht werden, direkt auf Substraten mit dieser Paste zu löten. Außerdem wurde die Paste in einem Teil der Versuche zusätzlich mit der Paste 6690 überdruckt.

**Bectron CP 6690:** Diese Paste soll bei 160°C für 10min im Boxofen getrocknet werden [11]. Das konnte aufgrund der maximalen Prozesstemperatur von 150°C nicht erfüllt werden. Deshalb wurde sie bei 150°C für ca. 15 Minuten getrocknet. Statt einem Boxofen wurde ein Bandofen verwendet, da bei dieser Trocknungsmethode gute Ergebnisse erzielt wurden. Die Paste wird laut Hersteller auch bei Leiterbahnen, flexiblen Substraten, Membranschaltern und Antennen eingesetzt. Die Druckergebnisse waren zunächst schlecht. Deshalb wurde der Drucker umgestellt, so dass das Sieb in Rückwärtsrichtung der Rakel geflutet wird. Zuerst wurde in beide Richtungen gedruckt. Dadurch sind die Druckergebnisse verbessert worden. Auf Substraten, die mit dieser Paste bedruckt wurden, soll gelötet werden. Außerdem wurden einzelne Substrate mit den Pasten CP 6662 und CP 6671 überdruckt. Zunächst wurde dafür ein neues Sieb erstellt. Darauf war ebenfalls wie in Schicht S1 das gesamte Layout abgebildet. Allerdings wurde diese Umsetzung verworfen, weil die Paste zu stark auf dem Substrat verlief und Kurzschlüsse erzeugte. Bei diesen Versuchen wurden darauffolgend nur die Pads der Bauteile in Schicht S2 zum Überdrucken verwendet. Aus diesem Grund wurde ein drittes Sieb erstellt.

Nach der Herstellung aller Substrate konnte mit den Löttests begonnen werden. Diese Tests werden im folgenden Abschnitt erläutert.

### 3.3 Löttests der Lötsubstrate

Bevor die Löttests geschildert werden, sind die erhaltenen Lötpasten tabellarisch dargestellt. Die Schmelzpunkte und die Zusammensetzung der Pasten sind dabei ähnlich zueinander. Allerdings verhalten diese sich in der Praxis unterschiedlich, da andere Faktoren, wie beispielsweise die Flussmittelzusammensetzung ebenfalls eine große Rolle beim Lötergebnis spielen.

Tabelle 9: Lötpastenvergleich für Lötsubstrat [13–15]

Hersteller	Lötpastenbezeichnung	Schmelztemperatur	Lotlegierung	Flussmittelanteil	Aufbewahrung
Edsyn	CR11	138 °C	Sn42 Bi58	- k. A. -	Dispenser
almit	LFM-65W TM-HP-Nc	139 °C	Sn42 Bi58	10,5%	Dispenser
AIM Solder	NC273LT	- k. A. -	Sn42 Bi57 Ag1	10,5%	Dose
Emil Otto	EO-SMD-005	138 °C	Sn42 Bi57,6 Ag0,4	12%	Dose

Alle in Tabelle 9 aufgeführten Pasten sind sogenannte No-Clean Lötpasten. Diese Pasten wurden speziell dazu entwickelt, dass Substrate nach dem Reflowverfahren nicht mehr gereinigt werden müssen und somit sicher für den Benutzer sind [12]. In der Theorie soll es dabei keine Nachteile durch auftretende Flussmittelreste geben. Die Funktion, die Leistung und die Lebensdauer der Leiterplatte ist weiterhin gegeben. Allerdings bereitet die immer weiter voranschreitende Miniaturisierung der Leiterplatten Schwierigkeiten. Problematische Kriechströme und Kurzschlüsse können die Folge der Miniaturisierung sein. Es hängt also auch vom Abstand der Bauteile ab, ob ein Substrat von den Lötresten befreit werden muss. Da die durchgeführten Versuche nur Tests darstellen, bei denen die Lötungen bewertet wurden, musste dementsprechend keine Reinigung vorgenommen werden.

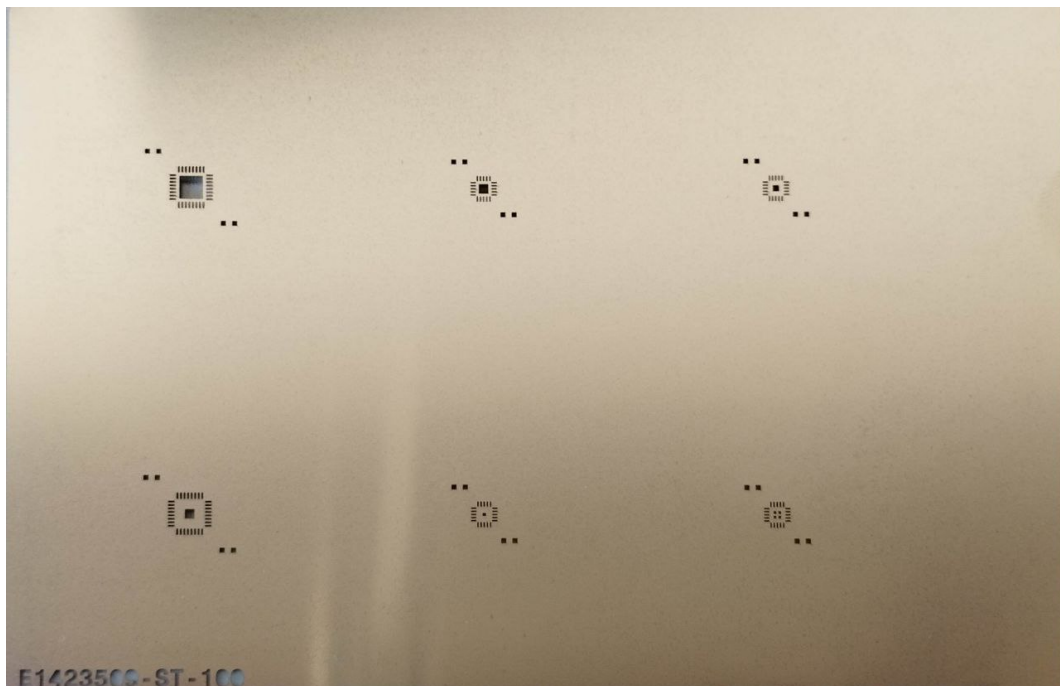


Abbildung 28: Lötchablone des Layouts für Lötversuche

Abb. 28 zeigt die Lötchablone, welche extern bestellt wurde. Dabei fällt auf, dass die Öffnungen der mittigen GND-Pads unterschiedlich groß sind. Das hat den Grund weitere Tests wie in Abschnitt 2.5.3 zu ermöglichen. Aus Zeitgründen werden diese allerdings nicht Teil dieser Arbeit sein. Die Fläche der Öffnungen der Lötchablone sind um 20% reduziert.

Bei allen Löttests werden die Ursprungssubstrate in ihre einzelnen Segmente zerlegt. Nach einer Qualitätskontrolle wird auf vier einzelne Substrate mit QFN-20 Pads je eine Lötpaste aufgetragen. Es kann mithilfe der Lötchablone gewählt werden, wie viel Lötpaste auf das GND-Pad der QFN-Bauteile gelangen soll. Bei den durchgeführten Tests wurde allerdings immer die größte Öffnung für die QFN-20 ICs gewählt. Durch das Zerteilen der Substrate entstehen immer vier Segmente, welche alle nebeneinander auf dem Trägermaterial befestigt werden. Dieses Trägermaterial bleibt weiterhin eine kupferkaschierte FR4-Platte. Dadurch sind alle Substrate mit unterschiedlichen Lötpasten, aber gleichen Leitpasten, zusammen im Ofen. Nach dem Lötvorgang lassen sich die Ergebnisse direkt miteinander vergleichen und auswerten.

### 3.3.1 Benetzungstests der Substrate

Um zu determinieren, inwiefern die einzelnen Lötpasten zu den verschiedenen Leitpasten kompatibel sind, wurden Benetzungstests durchgeführt. Dafür wurden die einfach mit CP 6662, CP 6671 oder CP 6690 Leitpaste bedruckten Substrate mit jeder in Tabelle 9 gelisteten Lötpaste getestet. Zur besseren Übersicht wurde Tabelle 10 erstellt, in der sich alle bewerteten Ergebnisse ablesen lassen. Diese Tabelle wird vorab gezeigt, danach wird detaillierter auf die einzelnen Benetzungsversuche eingegangen.

Tabelle 10: Vergleich der Benetzungstests: Lötpasten in Zeilen und Leitpasten in Spalten

	CP 6662	CP 6671	CP 6690
CR11	+	--	++
LFM-65W	+	--	++
NC273LT	0	--	++
EO-SMD-005	++	--	++

Zur Bewertung der Benetzung wurde eine Skala mit fünf Abstufungen eingeführt. Die Unterteilung ist dabei »++« für eine sehr gut, »+« für eine gute, »0« für eine neutrale, »-« für eine schlechte und »--« für eine sehr schlechte Bewertung. Die Bewertungspunkte beziehen sich lediglich auf den hier durchgeführten Vergleich in diesem speziellen Fall und kritisieren keinesfalls die Pasten im Allgemeinen. Somit steht beispielsweise ein »+«-Punkt in dieser Skala dafür, dass diese Eigenschaft bei der einen Paste besser ist als bei der anderen.

Um die Ergebnisse aus Tabelle 10 leichter einzuordnen, ist es zu empfehlen, die einzelnen Erklärungen und die Tabelle immer wieder miteinander zu vergleichen. Im Folgenden werden die einzelnen Leitpasten und die jeweiligen Lötpasten nacheinander abgearbeitet. Aufgrund einer besseren Übersichtlichkeit werden nur relevante Aufnahmen der Versuche in die Arbeit aufgenommen. In den meisten Fällen wird die Anordnung der Bilder in einer nummerierten 2x2 Matrix dargestellt. Das stellt eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicher. Es wird immer von einer guten Auftragung der Lötpaste ausgegangen, außer es werden Probleme in der Erklärung erläutert.

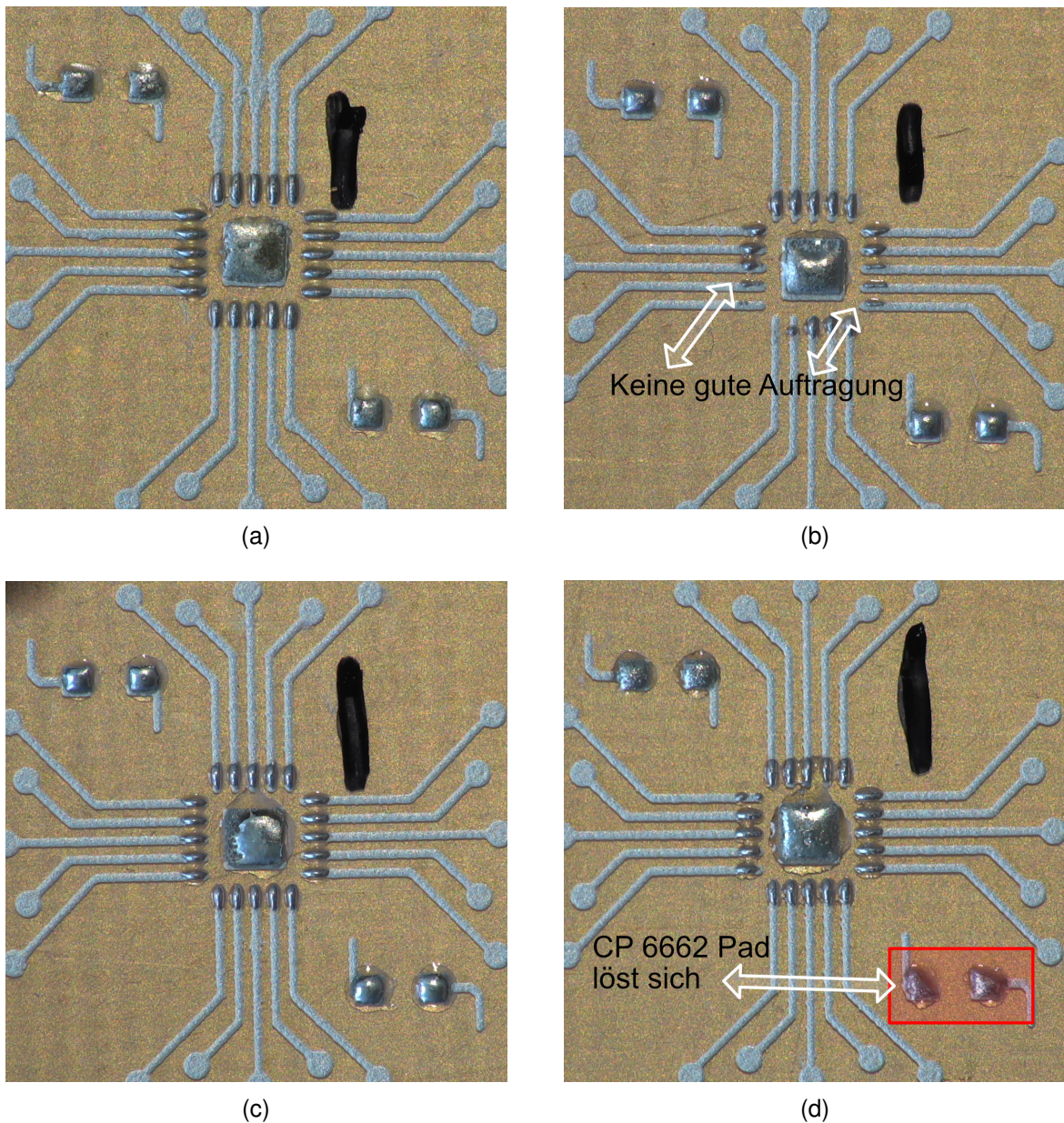
**Bectron CP 6662:**

Abbildung 29: Benetzungstests mit CP 6662 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005

Abb. 29 zeigt alle mit CP 6662 Leitpaste benetzten Substrate.

**(a):** Diese Aufnahme zeigt das benetzte Substrat mit *CR11* Lötpaste. Diese Paste ist bereits bekannt. Sie wurde bei diesen Tests erneut verwendet, da die Lotzusammensetzung ebenfalls aus Zinn und Bismuth besteht. Die Benetzung dieser Paste sieht auf dem CP 6662 Substrat gut aus. Die Lötpaste ist über den meisten Pads

auf der gesamten Fläche verteilt. Auf ein paar Pads wurde die Fläche der Pads nicht komplett benetzt. Die Paste ließ sich sehr gut auftragen.

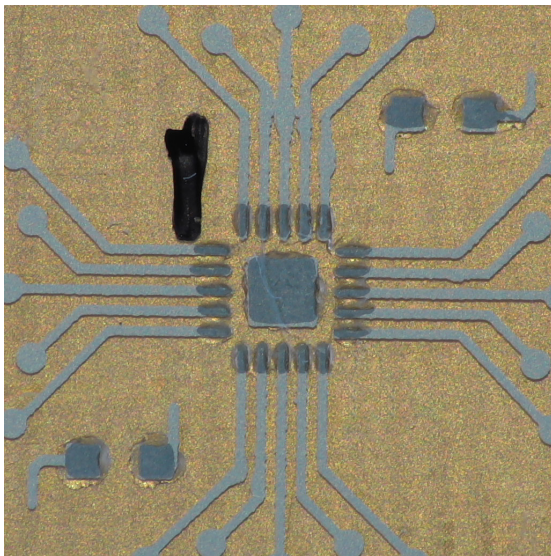
**(b):** Hier lässt sich die Paste *LFM-65W TM-HP-Nc* erkennen. Das Benetzungsverhalten ist zu Aufnahme (a) ähnlich. Die Bewertung wurde deshalb ebenfalls als gut eingestuft. Mangelhaft war allerdings die Auftragung. Die weißen Pfeile zeigen auf Fehler, die bei einer inkorrekten Reinigung der Schablone entstanden sind. Bei den Benetzungstests sind jedoch nicht alle Pins relevant, weshalb die Auftragung in Ordnung geht.

**(c):** Hier wird die Paste *NC273LT* gezeigt. Das Benetzungsverhalten ist schlechter als bei den anderen Pasten. Das erkennt man am GND-Pad des QFN-Bausteins. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Paste in sich zusammengeschmolzen ist und die Fläche, trotz guter Pastenauftragung, weniger gut benetzt wurde. Nichtsdestotrotz wird vermutet, dass das Ergebnis brauchbar ist. Der Randwinkel  $\beta$  ist grenzwertig. Die Bewertung anderer Pasteneigenschaften muss in Betracht gezogen werden.

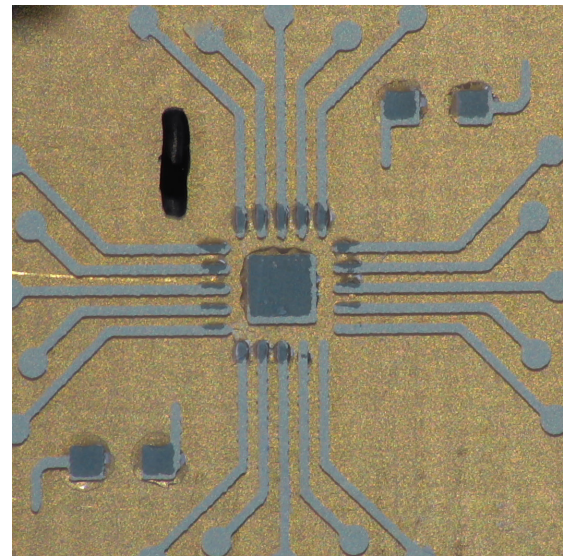
**(d):** Diese Aufnahme zeigt das Substrat mit Lötpaste *EO-SMD-005*. Das Benetzungsverhalten dieser Lötpaste auf dem Substrat mit CP 6662 Leitpaste ist dabei sehr gut. Die gesamte Fläche der Pads wurde benetzt. Allerdings erkennt man im rot umrandeten Bereich der Aufnahme, dass sich die Pads vom Substrat abgelöst haben. Eine stärkere Beeinträchtigung der mechanischen Stabilität ist daher nicht ausgeschlossen. In den Belastungstests in Abschnitt 3.3.5 hat sich das Ausmaß gezeigt. Die Benetzung war allerdings sehr gut.

Für die Bewertung der Benetzungsfähigkeit der einzelnen Pasten wird auf Tabelle 10 verwiesen. Als Nächstes wurde die Rückseite der benetzten Pads zur Beurteilung herangezogen. Abb. 30 zeigt dabei die Rückansicht der Pasten. Aufnahme (a) wurde dabei mit Paste CR11, (b) mit LFM-65W, (c) mit NC273LT und (d) mit EO-SMD-005 gelötet.

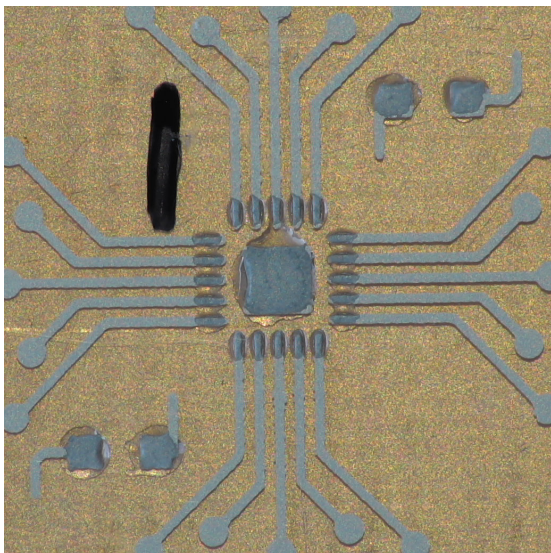




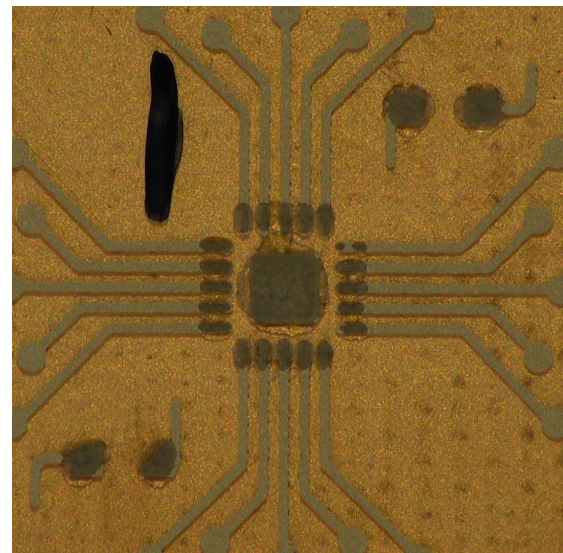
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 30: Benetzungstests mit CP 6662 Leitpaste; Rückansicht; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005

Das Lötresultat von Paste CR11 ist durch das GlucoFlex-Projekt bereits bekannt. Dabei hat sie sich von der Paste SC180 nach Begutachten der Rückseite unterschieden. Allerdings gibt es bei dem Test der Lötsubstrate kaum noch Unterscheidungsmöglichkeiten. Ein möglicher Grund für das Ergebnis könnten die marginalen Unterschiede in der Lotzusammensetzung sein. Die Unterseite der Substrate und insbesondere die Pads mit der Leitpaste werden bei allen getesteten Pasten

dunkler. Es scheint so, als wäre die Paste an dieser Stelle nass, obwohl die Farbe der Leitpaste im frischen und getrockneten Zustand identisch ist. Über die Flussmittelzusammensetzung ist nichts bekannt. Woran die Farbveränderung liegt, konnte mit nicht ermittelt werden.

### **Bectron CP 6671:**

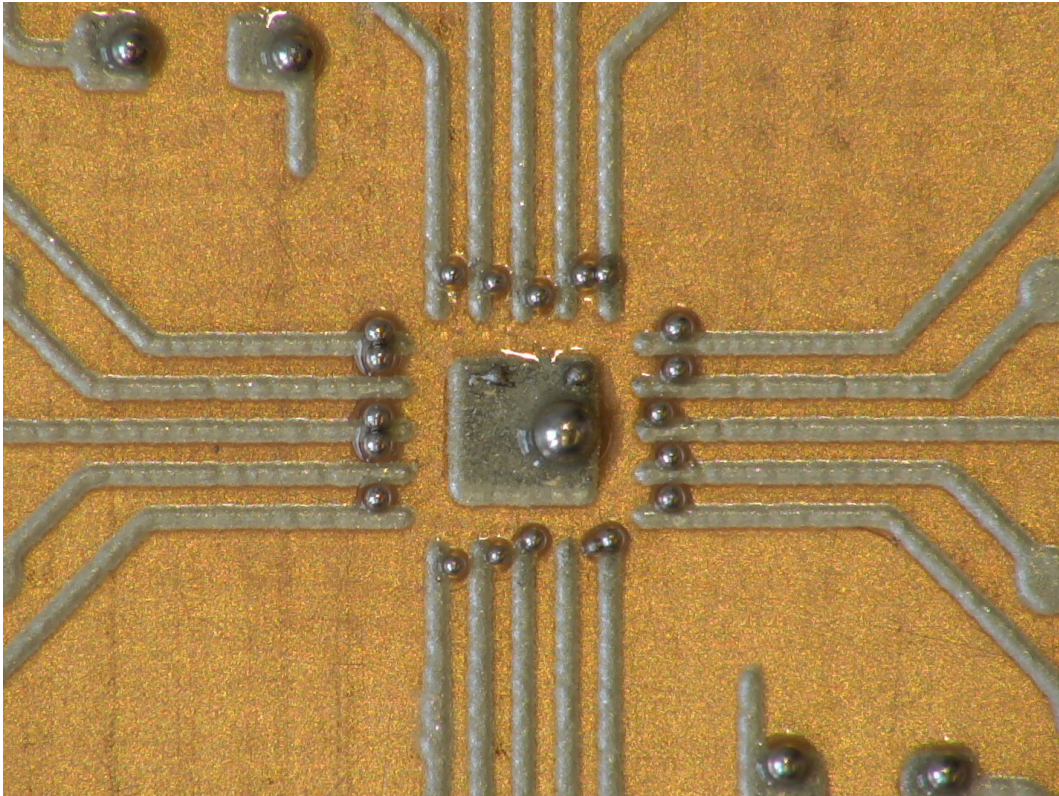


Abbildung 31: Benetzungstests mit CP 6671 Leitpaste; LFM-65W Lötpaste

Als Nächstes werden die Ergebnisse der Löttests mit Leitpaste CP 6671 dargestellt. Dabei fällt in Abb. 31 direkt auf, dass die Pads des Substrats nicht benetzt wurden. Für die Darstellung wurde beispielhaft der Lötversuch mit Paste *LFM-65W TM-HP-Nc* gezeigt. Allerdings ist das Ergebnis bei den anderen Lötpasten kongruent. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf die Darstellung der restlichen Aufnahmen und Ergebnisse verzichtet. Der Kantenwinkel  $\beta$  beträgt über  $80^\circ$ . Eine Benetzung ist deshalb ausgeschlossen. Das Lot verschob sich außerdem neben die Pads auf die PET-Folie und bildet eine kugelartige Form.

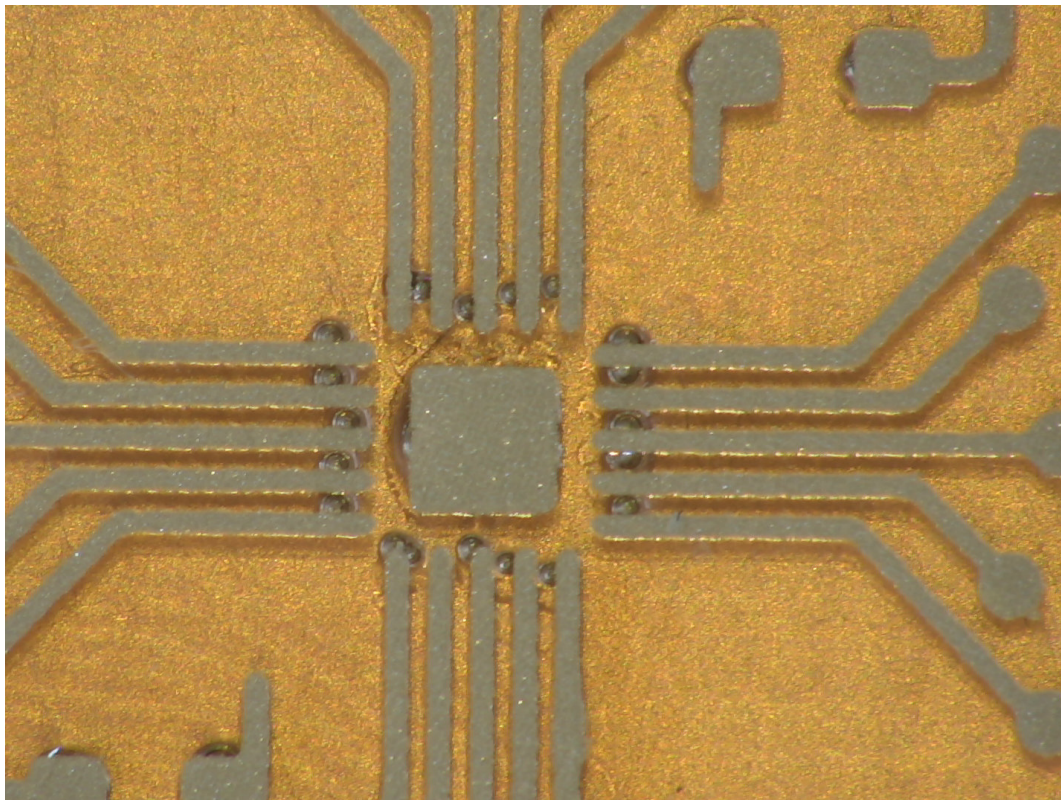


Abbildung 32: Benetzungstests mit CP 6671 Leitpaste; Rückansicht; LFM-65W Löt-paste

Abb. 32 zeigt die Rückseite dieses Substrats. Die Lotkügelchen zwischen den Pads sind dabei deutlich zu erkennen. Im Gegensatz zu Abb. 30 sind keine verdunkelten oder verfärbten Bereiche erkennbar. Aufgrund des nicht vorhandenen Benetzungsverhaltens gilt die Leitpaste Paste CP 6671 als nicht lötbar in diesen Versuchen. Daher wird diese Paste bei allen weiteren Versuchen ausgeschlossen. Einzig beim Überdrucken der Paste CP 6671 mit CP 6690 wird diese Paste erneut eingesetzt. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird erneut auf Tabelle 10 verwiesen.

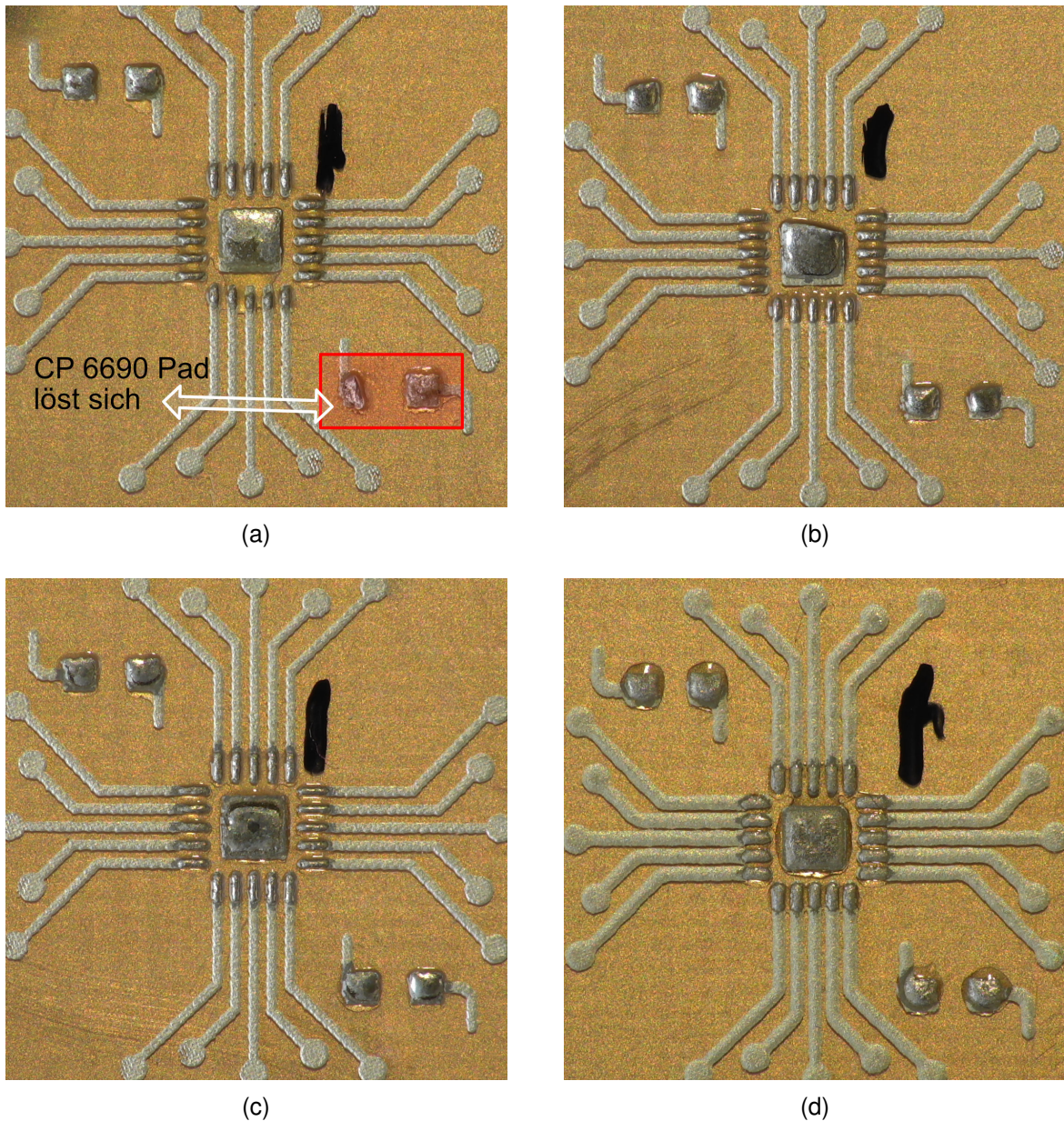
**Bectron CP 6690:**

Abbildung 33: Benetzungstests mit CP 6690 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005

Abb. 33 zeigt alle mit CP 6690 Leitpaste benetzten Substrate.

**(a):** Die erste Aufnahme zeigt das gelötete Substrat mit *CR11* Lötpaste. Die Benetzung dieser Paste auf dem CP 6690 Substrat ist gut. Die Lötpaste konnte die gesamten Pads benetzen. Allerdings fällt auf, dass sich das linke Pad im rot eingekreisten Bereich komplett vom Substrat löst. Der Grund dafür ist nicht bekannt.

Das Ablösen der Pads beim Lötvorgang kann problematisch werden. Dennoch ist die Benetzung des Substrats gut.

**(b):** Die Lötpaste *LFM-65W TM-HP-Nc* ist in (b) dargestellt. Die Auftragung der Lötpaste zuvor verlief nicht optimal, was am mittleren GND-Pad des QFN-Chips erkennbar ist. Beim Benetzungsverhalten ist das Ergebnis zur Aufnahme (a) ähnlich. Die Benetzung wurde deshalb ebenfalls als gut eingestuft. Die Schablone und somit die Auftragung der Lötpaste wurde beim mittleren GND-Pad zu hoch angesetzt. Bei den Benetzungstests sind allerdings nicht alle Pins für eine gute Ergebnisbewertung relevant, weshalb das Ergebnis ausreichend ist.

**(c):** Hier ist der Benetzungstest der Paste *NC273LT* dargestellt. Das Benetzungsverhalten ist dabei besser als bei der Leitpaste CP 6662. Das Ergebnis ist ähnlich zu den anderen Pasten, die das Substrat mit CP 6690 benetzen. Das erkennt man erneut an dem gut und gleichmäßig benetzten GND-Pad des QFN-Bausteins und an den anderen Pads. Auffallend ist, dass die Lötstellen trotz einer Benetzung über die gesamte Padfläche etwas runder und bauchiger erscheinen. Ob das Auswirkungen auf die spätere Bestückung hat, konnte nicht ermittelt werden.

**(d):** Die Lötpaste *EO-SMD-005* wird in dieser Aufnahme gezeigt. Bei Betrachtung des Substrats fällt auf, dass diese Leiterbahnen etwas dicker geraten sind als die Leiterbahnen in den Versuchen (a)-(c). Das lag an einer Veränderung der Siebdruckparameter. In der Regel hat das keine Auswirkung auf die Lötresultate, da eventuell auftretende Probleme, wie Kurzschlüsse, bei diesen Versuchen nicht berücksichtigt werden. Trotzdem lässt sich die Lötung als sehr gut einstufen. Die gesamte Fläche wurde benetzt.

Als Nächstes wurde die Rückseite der benetzten Pads zur Beurteilung herangezogen. Die Abb. 34 zeigt die Rückansicht der Pasten. Aufnahme (a) ist dabei mit Paste CR11, (b) mit LFM-65W, (c) mit NC273LT und (d) mit EO-SMD-005 gelötet.

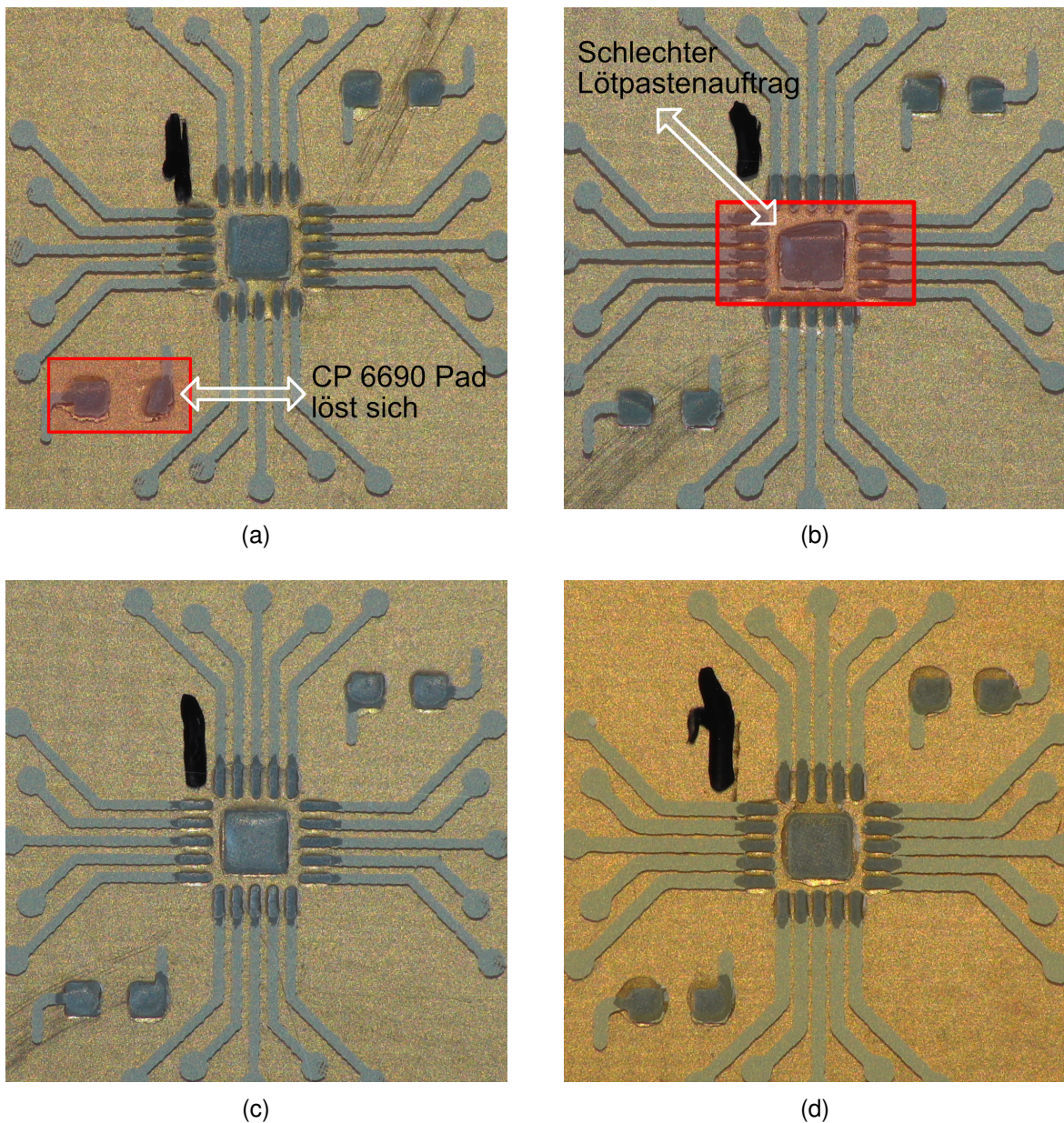


Abbildung 34: Benetzungstests mit CP 6690 Leitpaste; Rückansicht; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005

Dabei ist, wie in der Vorderansicht, in Aufnahme (a) der Abb. 34 erkennbar, dass sich ein Pad im rot umrahmten Bereich gelöst hat. Auch in Darstellung (b) erkennt man die schlechte Auftragung der Lötpaste. Obwohl die Lötpaste beim GND-Pad etwas zu hoch aufgetragen war, verteilte sich das Lot auf dem Pad. Lediglich ein kleiner Streifen des Pads wurde nicht benetzt. Allerdings ist beim GND-Pad des ICs in Aufnahme (b) zu erkennen, dass dort die Lötpaste die Leitpaste auf dem Substrat

verschoben hat. Inwiefern sich das auf die mechanische Belastbarkeit des Substrats auswirkt ist nicht bekannt.

Ähnlich wie bei den Löttests mit Leitpaste *CP 6662* verfärbten sich die mit Lötpaste benetzten Pads. Das bekräftigt weiter die Annahme, dass erfolgreich benetzte Pads eine Verfärbung durch die Lötungen bekommen. Insgesamt waren die Benetzungstests mit der Leitpaste *CP 6690* gut.

### 3.3.2 Bestückungsversuche des Lötlayouts

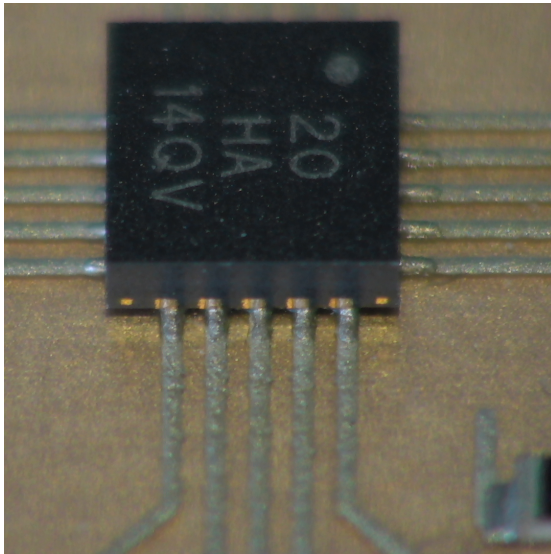
Die Benetzungstests waren bei den Pasten *CP 6662* und *CP 6690* nach der optischen Begutachtung mit den meisten Lötpasten erfolgreich, so dass mit ihnen Bestückungsversuche durchgeführt wurden. Es wurden weiterhin die vier Pasten der Hersteller AIM solder, almit, Edsyn und Emil-Otto verwendet. Dafür wurde die Lötpaste auf das Substrat aufgetragen. Im Anschluss wurden das QFN-20 Gehäuse und jeweils zwei Widerstände je Schaltung zur Bestückung des Layouts verwendet. Ein manueller Bestücker der Dr. Tresky AG diente zur Platzierung der Bauteile.

Hierbei wurde insbesondere auf die Bildung von Menisken durch die Lötpasten geachtet. Außerdem sollen, wie bereits erwähnt, keine überflüssigen Lotkügelchen zwischen den Pins des ICs entstehen, da diese Kurzschlüsse zur Folge haben können. Im Folgenden werden beispielhaft Aufnahmen gezeigt, welche während der Durchführung der Tests wiederkehrend waren. Anhand dieser Aufnahmen werden die Bestückungsversuche beurteilt.

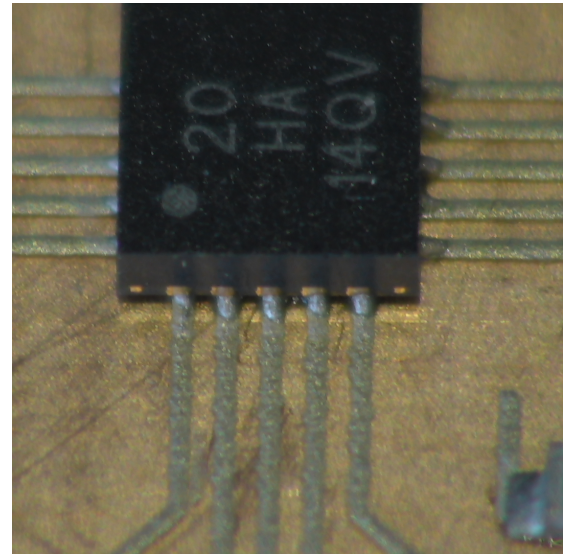
Tabelle 11: Bewertung der Meniskusbildung nach Lötversuchen mit bestückten Substraten

	CP 6662	CP 6690
<b>CR11</b>	0	0
<b>LFM-65W</b>	+	+
<b>NC273LT</b>	+	+
<b>EO-SMD-005</b>	++	+

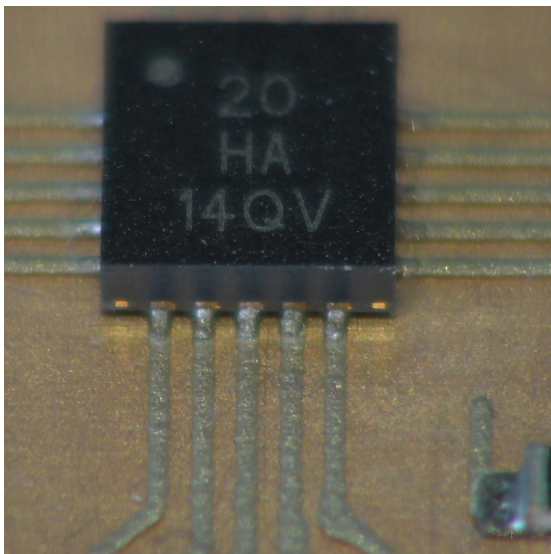
Tabelle 11 stellt vorab die bewerteten Ergebnisse dar. Die Skala wird dabei vom vorherigen Versuch übernommen. Diese Übersicht dient dem leichten Vergleich der Ergebnisse.

**Bectron CP 6662:**

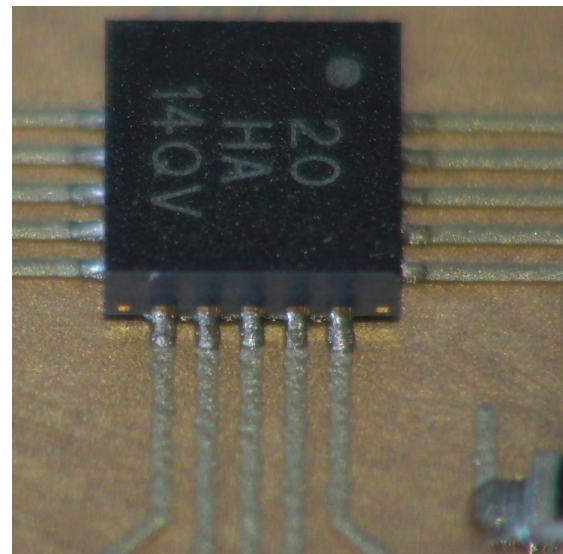
(a)



(b)



(c)



(d)

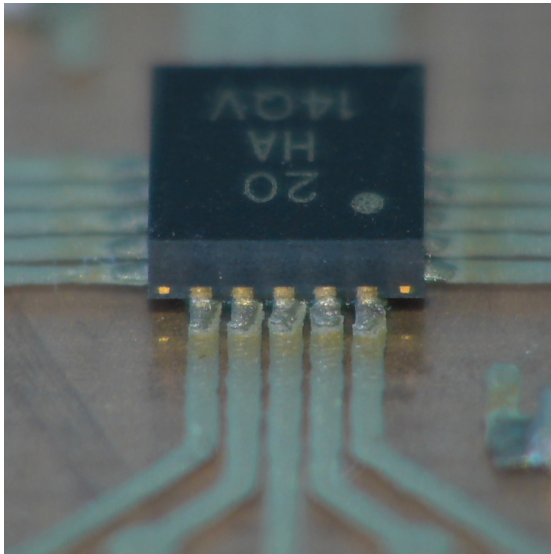
Abbildung 35: Lötlayout bestückt; CP 6662 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005

In Abb. 35 werden die Lötresultate nach der Bestückung verglichen. Die Leitpaste ist dabei CP 6662 und die Lötpasten sind angeordnet wie in Abb. 35 beschrieben. Dabei werden die Seitenansichten der QFN-20 Bauteile herangezogen, um die Meniskusbildung zu bewerten. Tendenziell ist eine bessere Bildung von Menisken zu erkennen. Dabei ist zu sagen, dass alle Bauteile durch die Lötung mechanisch

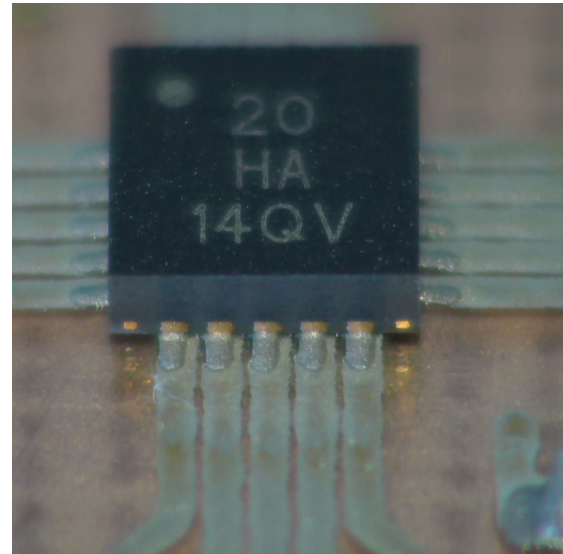


fest mit dem Substrat verbunden wurden.

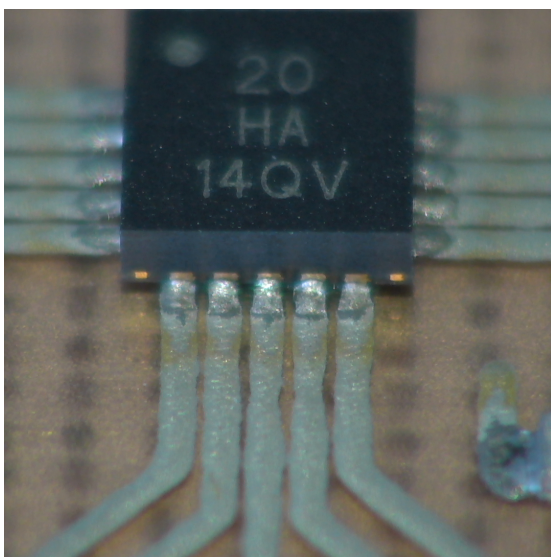
Jedoch schneidet Aufnahme (a) mit Lötpaste *CR11* dabei am schlechtesten ab. Eine Meniskusbildung an den Pins des ICs kann kaum erkannt werden. Bei Aufnahmen (b) mit Paste *LFM-65W* und (c) mit *NC273LT* lassen sich bessere Ergebnisse feststellen. Die aufgetragenen Lötpasten weisen bessere Menisken auf. Die Pins werden dennoch nicht komplett mit Lötpaste bedeckt. Die Ausbildung der Menisken ist nicht perfekt, sollte aber für eine mechanisch und elektrische Funktionalität gegeben sein. Bei Aufnahme (d) sieht man sehr schöne Menisken ersichtlich. Die gesamte seitliche Fläche der Pins ist benetzt. An dieser Paste ist nichts auszusetzen.

**Bectron CP 6690:**

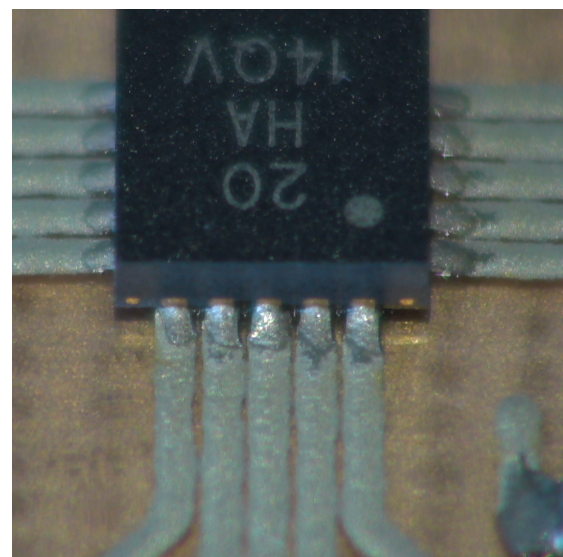
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 36: Lötlayout bestückt; CP 6690 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005

Abb. 36 zeigt Lötversuche mit Leitpaste CP 6690. Dabei fällt auf, dass die Leiterbahnen im Vergleich zu den denen mit CP 6662 Leitpaste in Abb. 35 wesentlich breiter ausfallen. Das liegt daran, dass der Druckprozess für die Paste CP 6690 noch nicht perfekt ist. Bei einer elektrischen Anwendung der ICs könnten Kriechströme auftreten, welche die Schaltung beeinträchtigen bzw. zerstören könnten. Außerdem

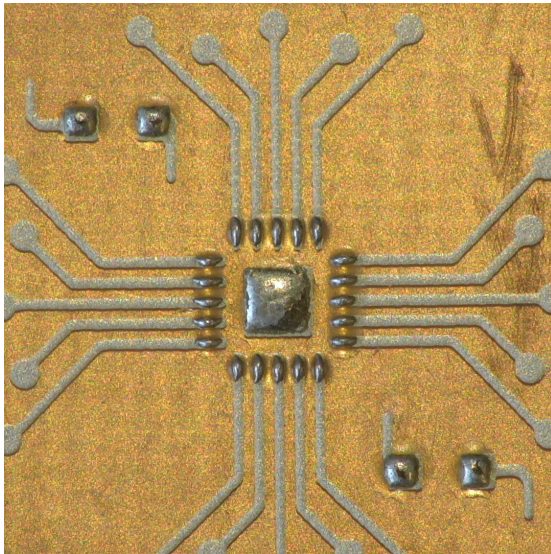
wird dadurch die Fläche, welche die Lötpasten benetzen, unerwünscht vergrößert. Es bleibt folglich weniger Lötpaste übrig, welche zur Bildung von Menisken beiträgt. Dieses Problem lässt sich ebenfalls in den Aufnahmen (a)-(d) in Abb. 36 erkennen. Die Bildung aller Menisken fällt insgesamt schlechter aus als mit Leitpaste CP 6662. Aufnahme (a) mit Paste *CR11* hat dabei die schlechteste Benetzung der Pins vorzuweisen. Die anderen Pasten bilden bessere Menisken, was in den Aufnahmen (b), Paste *LFM-65W*, (c) Paste *NC273LT* und (d), Paste *EO-SMD-005*, zu beobachten ist.

Durch ein besseres Bedrucken der Substrate ließe sich das Gesamtergebnis vermutlich deutlich verbessern.

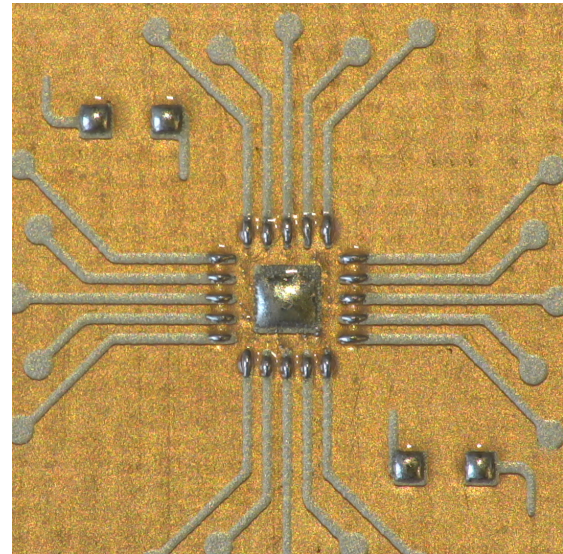
### 3.3.3 Benetzungstests nach Trocknungssimulation der Substrate

Nach einem erfolgreichen Aufdrucken der Leitpaste werden die Substrate nach Anleitung des Herstellers getrocknet. Dieser Vorgang erfolgt je Druckschicht einmal und mit unterschiedlichen Trocknungseinstellungen. Das Gluco-Flex-Substrat besteht mindestens aus sechs Schichten [1]. Die Substrate werden nach jedem Druckvorgang getrocknet. Dabei ist nicht sicher, ob sich die Lötbarkeit der Leitpaste nach mehreren Trocknungsvorgängen verschlechtert. Bisher wurden alle Lötversuche nach nur einem Trocknungsdurchlauf durchgeführt. Deshalb wurde ermittelt, ob mehrere Trocknungsvorgänge Einfluss auf das Lötresultat haben.

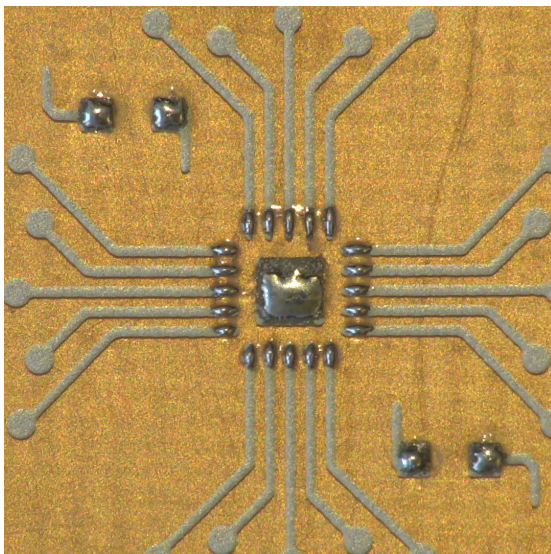
Zur Simulation werden die einfach bedruckten Substrate des Lötlayouts sechs mal durch den Bandofen bewegt. Dabei wurde eine maximale Temperatur 150°C an der heißesten Stelle des Ofens und eine Durchlaufzeit von 10min gewählt. Dabei wurden die mit Leitpaste CP 6690 und CP 6662 bedruckten Substrate verwendet. Nach dem sechsmaligen Durchlaufen des Ofens werden die Substrate erneut Benetzungstests unterzogen und die Ergebnisse bewertet.

**Bectron CP 662:**

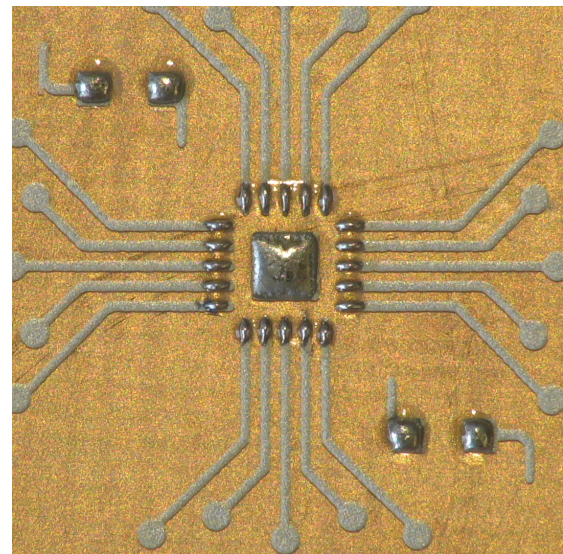
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 37: Lötlayout Benetzungstest nach Trocknungssimulation; CP 662 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005

Zunächst wurden die mehrfach getrockneten Substrate mit CP 662 Leitpaste gelötet. Abb. 37 stellt dabei die Oberseite der gelöteten Substrate dar. Die Ergebnisse werden mithilfe der Benetzungstests aus Abb. 29 verglichen.

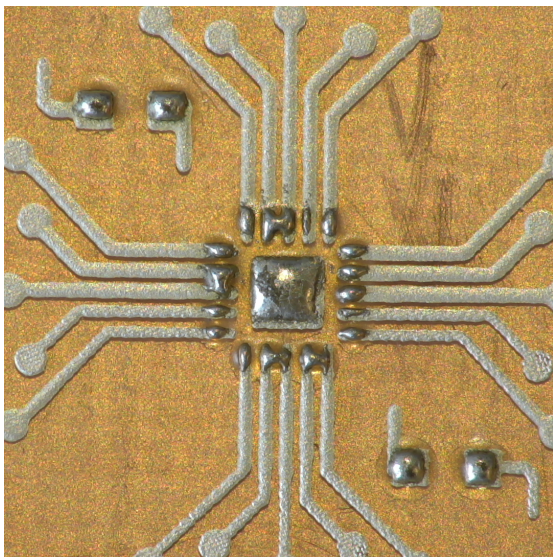
**(a):** Bei dieser Aufnahme wurde mit Paste *CR11* gelötet. Das Ergebnis der Benetzung ist dabei in Ordnung. Bei den Pads des 0603-Bauteils links oben im Bild und

am GND-Pad ist nicht die gesamte Fläche benetzt. Dennoch ist das Ergebnis gut, da der Randwinkel  $\beta$  noch sehr niedrig ist.

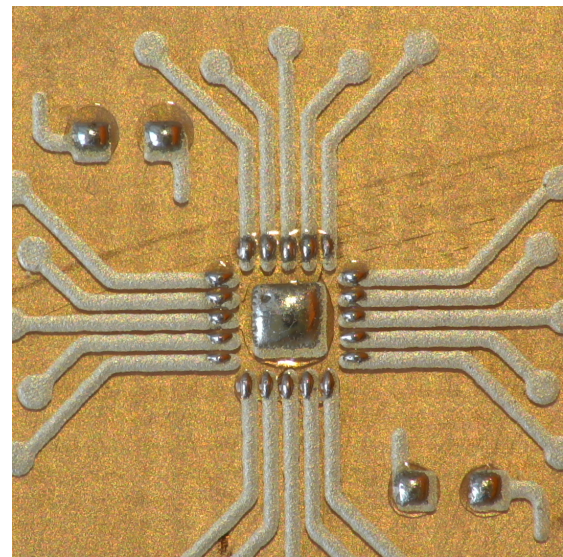
**(b):** Die Benetzung der Pads in dieser Aufnahme ist vergleichbar mit der in Aufnahme (a). Dabei wurde die Lötpaste *LFM-65W* verwendet. Allerdings fällt nach Betrachten der Rückseite ein wesentlicher Unterschied auf. Die Paste ist nicht mehr verfärbt wie bei den ursprünglichen Benetzungstests. Demzufolge ist nicht sicher, ob sich die mechanische Festigkeit der Lötung verändert hat.

**(c):** Nach dem Benetzungsversuch der Paste *NC273LT* ist bekannt, dass diese das mittlere GND-Pad des ICs nicht gut benetzt. Auch nach dem Trocknungsversuch ist das nicht der Fall. Die Benetzung ist sogar noch schlechter geworden. Die mechanische Stabilität des gelöteten Substrats wäre hierbei vermutlich nicht gegeben.

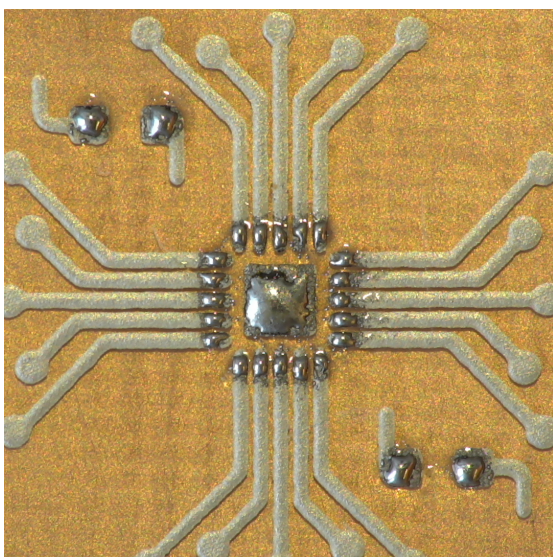
**(d):** Die nach der Trocknungssimulation gelötete Paste *EO-SMD-005* lässt sich sehr gut mit dem ursprünglichen Benetzungstest vergleichen. Das Ergebnis ist sehr gut.

**Bectron CP 6690:**

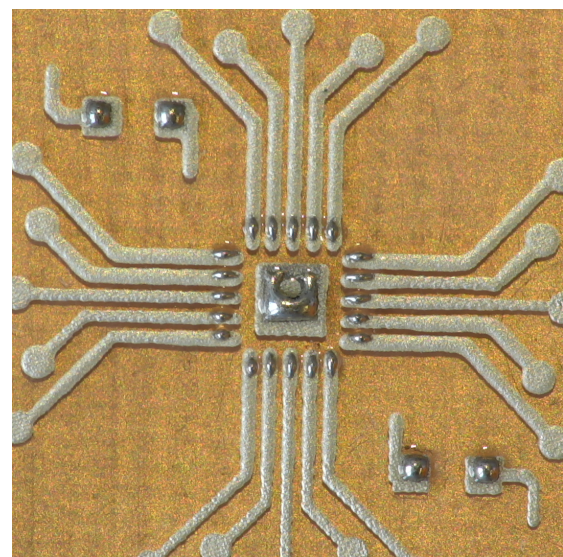
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 38: Lötlayout Benetzungstest nach Trocknungssimulation; CP 6690 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005

Als Nächstes wurden die Substrate, welche mit CP 6690 Leitpaste gedruckt wurden, untersucht. Die in Abb. 33 erzielten Ergebnisse der ursprünglichen Benetzungstests werden als Vergleich herangezogen. Abb. 38 zeigt die benetzten Substrate nach der Trocknungssimulation.

Dabei kann allgemein gesagt werden, dass die Substrate von den Trocknungs-

vorgängen negativ beeinflusst wurden. Die Pasten (a) *CR11*, (b) *LFM-65W*, (c) *NC273LT* und (d) *EO-SMD-005* schneiden bei diesen Tests schlechter ab als bei den einfach getrockneten Lötversuchen. Die Benetzung ist bei allen Pasten wesentlich schlechter, was sich auch auf der Unterseite der Pads widerspiegelt.

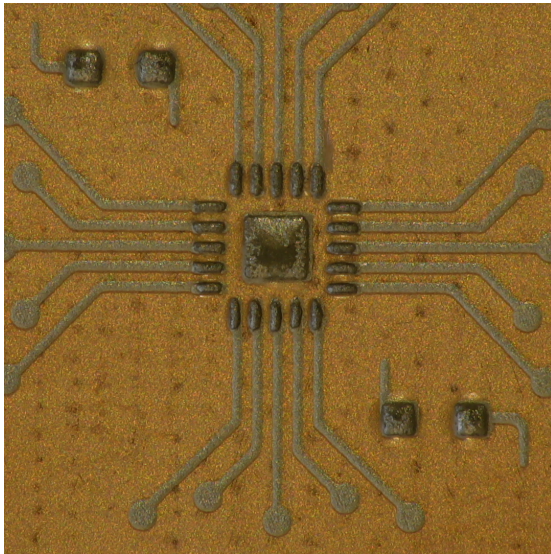
Abschließend kann gesagt werden, dass es nicht zu empfehlen ist, wichtige Substrate mehrfach zu trocknen und dann zu löten. Bei Einzelfällen könnte das Ergebnis zwar in Ordnung sein, aber es wird vermutet, dass sich das Ergebnis trotzdem verschlechtert. Als Lösungsansatz für dieses Problem gibt es zwei Varianten. Einerseits könnten die Pads der Substrate überdruckt werden. So müsste die oberste Pad-Schicht nur einmal getrocknet werden und wäre somit besser lötbar.

Andererseits ist ein Druck der Substrate in umgekehrter Reihenfolge möglich. Schicht 6 des Gluco-Flex-Substrats könnte als Erstes auf die Folie gedruckt werden, Schicht 5 als Zweites, usw. Diese Vorgehensweise hätte zur Folge, dass die Schicht mit den Pads und Leiterbahnen als letzte Schicht gedruckt würde. Somit wäre das prozesssichere Löten in der Theorie sichergestellt. Allerdings wurde noch nicht getestet, ob die veränderte Druckreihenfolge negative Auswirkungen auf die Funktion der Schaltung hat.

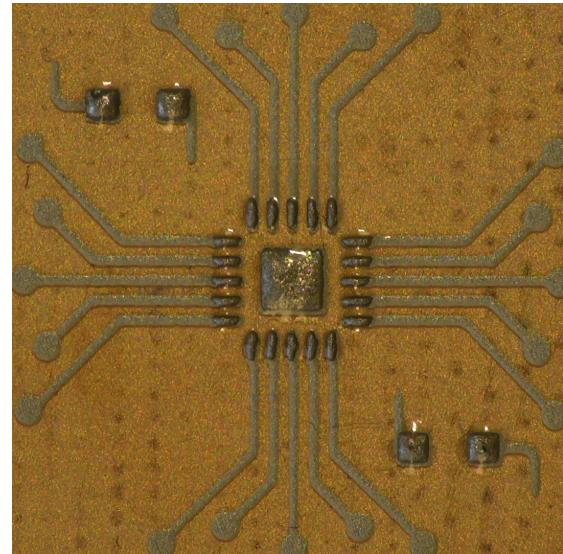
### 3.3.4 Überdruck der Pads beim Lötlayout

In Abschnitt 2.3 wird das Überdrucken der lötbaren Pads im GlucoFlex-Projekt begründet. Diese Versuche sollen ebenfalls beim Lötlayout durchgeführt werden, da es aufgrund der Löttergebnisse der Trocknungssimulation in Abschnitt 3.3.3 erforderlich sein kann.

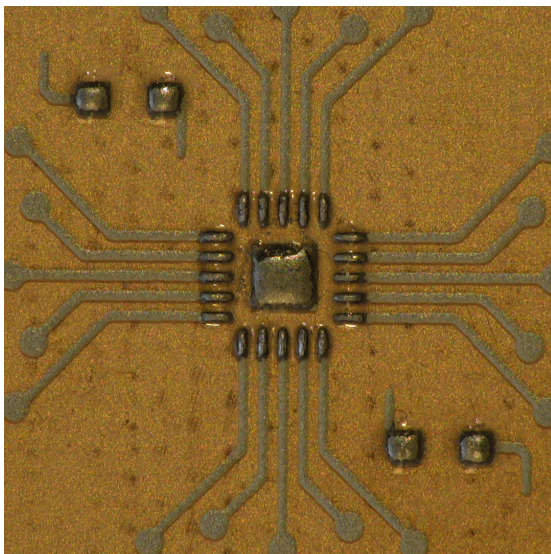
Es wird davon ausgegangen, dass ein Überdrucken gleicher Leitpasten keine Auswirkung auf das Löttergebnis hat. Daher wird für diesen Versuch die Leitpaste CP 6690 zum Überdrucken verwendet. Die Leitpasten CP 6662 und CP 6671 bilden dabei jeweils die ersten Schichten. Es soll herausgefunden werden, ob sich das Löttergebnis durch den Einsatz dieser Pasten übereinander ins Positive verbessert. Es wird dabei nur auf die Benetzung geachtet und kein Substrat bestückt. Nachfolgend werden erneut die Abbildungen der Ergebnisse gezeigt und danach erläutert.

**Überdruck der Paste CP 6662 mit Paste CP 6690:**

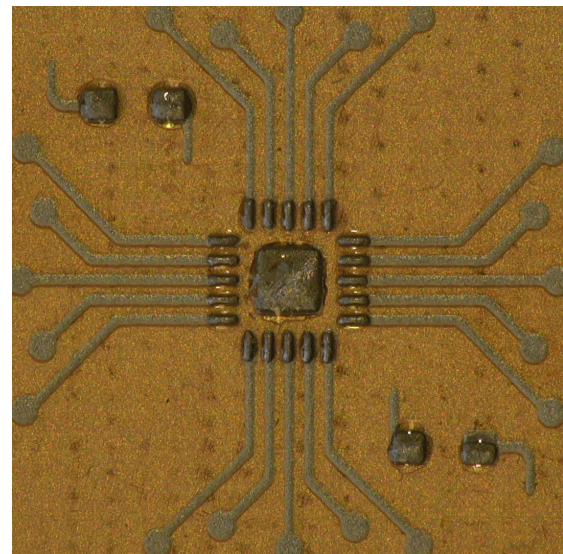
(a)



(b)



(c)



(d)

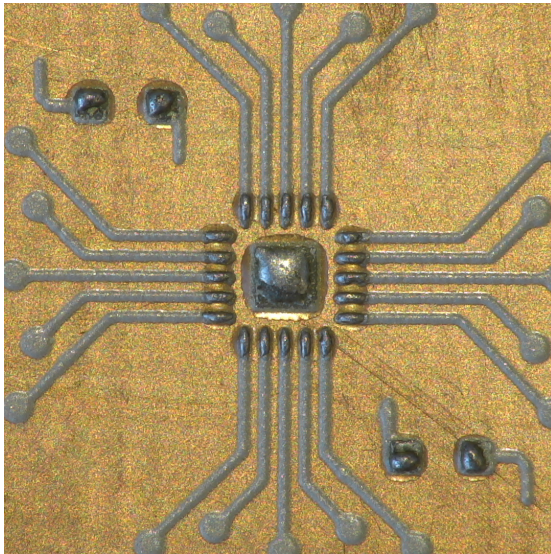
Abbildung 39: Lötlayout Benetzungstest nach Überdrucken; CP 6662 überdruckt mit CP6690 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005

Abb. 39 zeigt die Benetzungsversuche nach Überdrucken von Paste CP 6662 mit der Paste CP 6690 als zweite Schicht. Dabei sind die Ergebnisse der Benetzung gut mit der ursprünglichen Benetzung der Paste CP 6690 zu vergleichen, wie durch die Benetzungstests aus Abb. 33 deutlich wird. Alle Lötpasten (a) CR11, (b) LFM-65W,

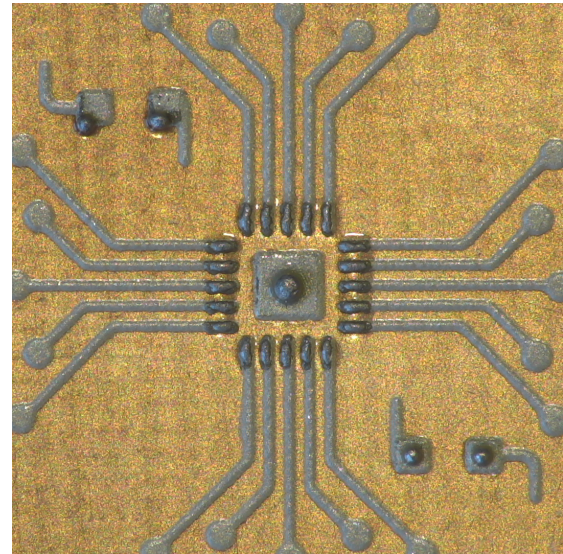


(c) *NC273LT* und (d) *EO-SMD-005* der Abb. 39 benetzen die Pads des Substrats gut, deshalb wird bei den Erläuterungen ebenfalls auf die Erklärungen der Abb. 33 verwiesen.

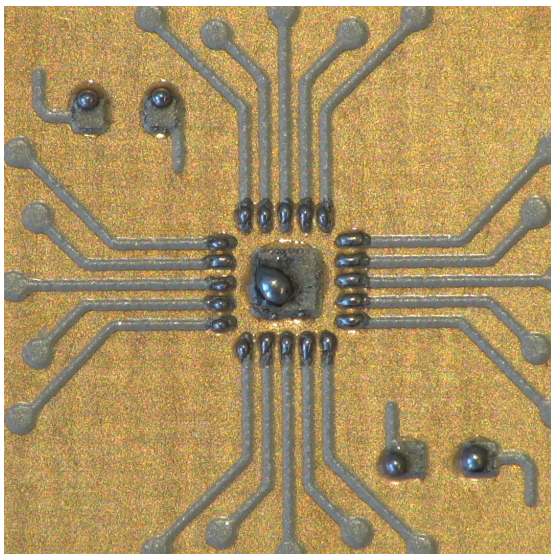
Auffallend ist jedoch, dass bei (d) nicht alle Pads der 0603-Bauteile komplett benetzt wurden. Insgesamt kann aber gesagt werden, dass ein Überdrucken der Paste CP 6662 mit CP 6690 möglich ist.

**Überdruck der Paste CP 6671 mit Paste CP 6690:**

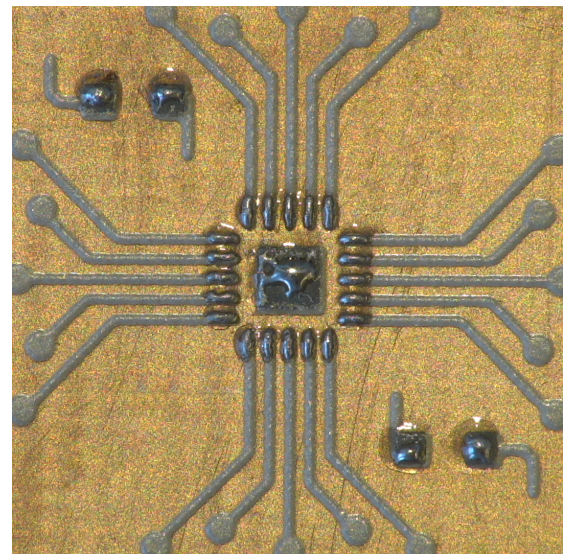
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 40: Lötlayout Benetzungstest nach Überdrucken; CP 6671 überdruckt mit CP6690 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005

In Abb. 40 werden die Benetzungsversuche der überdruckten Paste CP 6671 dargestellt. Dabei wurde festgestellt, dass trotz des Überdruckens mit einer als lötbar eingestuft Paste keine guten Ergebnisse erzielt wurden. Alle Pasten (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT und (d) EO-SMD-005 benetzen die Pads nach dem Löt-

vorgang schlecht. Teilweise ist die Lötpaste extrem in sich zusammengeschmolzen, sodass sich diese unter mechanischer Belastung leicht vom Substrat lösen ließ. Der Test mit Paste CP 6671 als erste Schicht gilt demzufolge als gescheitert.

### 3.3.5 Test der mechanischen Festigkeit der Lötsubstrate

Nach den Erkenntnissen der vorangestellten Versuche wurde abschließend die mechanische Festigkeit der Substrate überprüft. Dabei wurden zwei reproduzierbare Prüfmethoden angewandt. Zum einen werden benetzte Substrate auf ihre mechanische Belastbarkeit geprüft, zum anderen werden auch bestückte Substrate einem Belastungstest unterzogen.

#### **Mechanische Belastung ausschließlich benetzter Substrate:**

Zur Untersuchung der allgemeinen Festigkeit zwischen Lot, Leiterbahnen und Substrat wurde durch einen Biegetest die Belastbarkeit der einzelnen Komponenten getestet. Dabei wird ein Stift mit bekanntem Durchmesser von 9,5mm für alle Substrate verwendet. Die Substrate wurden über die Rundung des Stiftes gebogen. Das simuliert ein Tragen des Substrats am Handgelenk. Mittels einer Auf- und Abbewegung des Substrats über die Rundung des Stiftes wird die Stabilität geprüft. Falls sich die Pasten vom Substrat lösen, gilt der Belastungstest als gescheitert.

Für diese Versuchsreihe wurden mit den Leitpasten CP 6662 und CP 6690 Substrate bedruckt. Diese wurden jeweils mit den vier Lötpasten *CR11*, *LFM-65W*, *NC273LT* und *EO-SMD-005* wie in Abb. 29 und Abb. 33 benetzt. So konnte festgestellt werden, ob sich die Lötpasten unterschiedlich auf die mechanische Festigkeit des Substrats auswirken. Zur besseren Verständlichkeit wird nachfolgend eine Aufnahme aus diesem Versuch gezeigt.

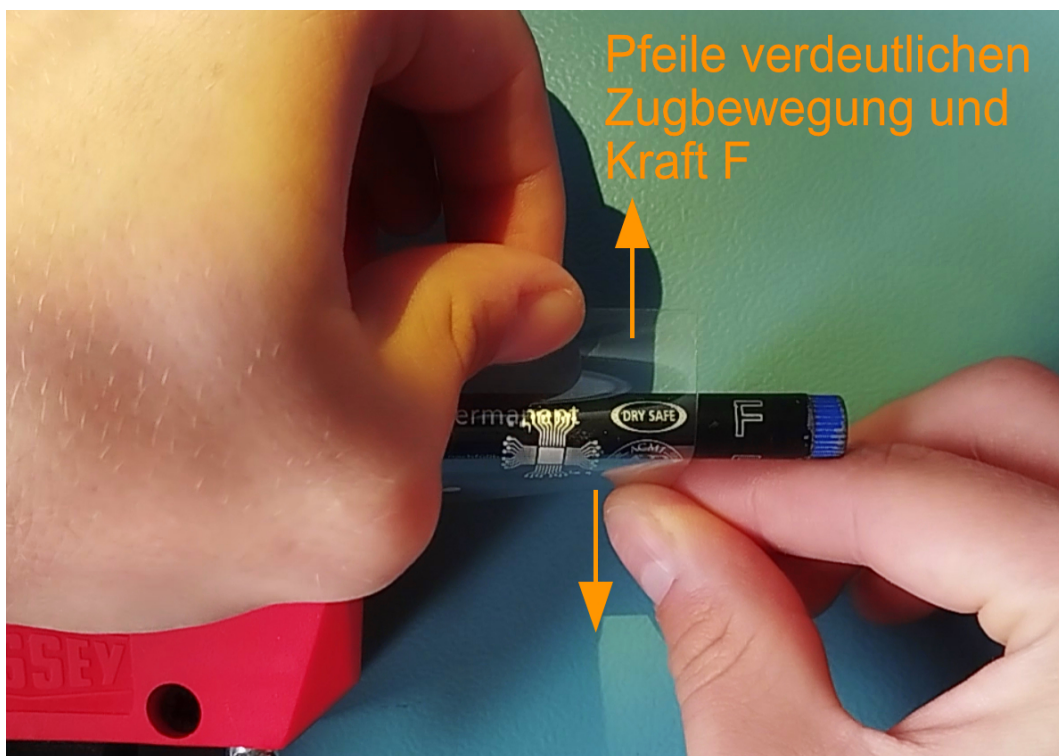


Abbildung 41: Mechanische Festigkeitstests eines unbestückten Substrats

Der Stift wurde in einen Schraubstock eingespannt; die Folie konnte so mit beiden Händen um den Stift gespannt werden. In Abb. 41 erkennt man ein unbenetztes Substrat mit einem QFN-32-Pad in der Mitte zur Demonstration.

Bei den benetzten Substraten trat bei diesem Durchmesser kein Problem auf. Alle Substrate haben den Test unbeschadet überstanden. Danach wurden die Versuchsbedingungen verschärft. Statt einem Stift mit Durchmesser 9,5mm wurde der Durchmesser auf 4mm verkleinert. Nach dem Biegen und Ziehen der Substrate im 90° Winkel um diesen Gegenstand wurde erneut kein Substrat beschädigt. Folglich ist die mechanische Belastbarkeit von rein benetzten Substraten sehr gut.

### **Mechanische Belastung bestückter Substrate:**

Nachdem im vorherigen Versuch die Verbindung der Lötpaste mit Leitpaste und Substrat getestet worden ist, wurde im folgenden Versuch die mechanische Festigkeit von bestückten Substraten getestet. Da die gelöteten Bauteile im Gegensatz zum Substrat nicht flexibel sind, wird das als größter Schwachpunkt angesehen. Durch ein erneutes Biegen der Substrate, soll das Tragen am Handgelenk simuliert werden. Realisiert wurde die Biegung mithilfe eines Schraubstocks. Die Substrate

wurden dabei mittig zwischen den Backen des Schraubstocks eingespannt, sodass sich diese nach oben wölben bzw. biegen konnten. Durch diese Biegung wurde das Substrat mit den Bauteilen unter Spannung gesetzt. Durch kontinuierliches Schließen des Schraubstocks vergrößert sich die Wölbung und die Spannung steigt an. Zunächst wurde ein Objekt mit einem Abstand von 30mm festgelegt, das zwischen den Schraubstock gelegt wird, um eine maximale Stauchung der Substrate festzulegen. Die Substratlänge beträgt hingegen 45mm.

Lösen sich die Bauteile eher, d.h. vor der Stauchung von 30mm, wird der Abstand gemessen und notiert.

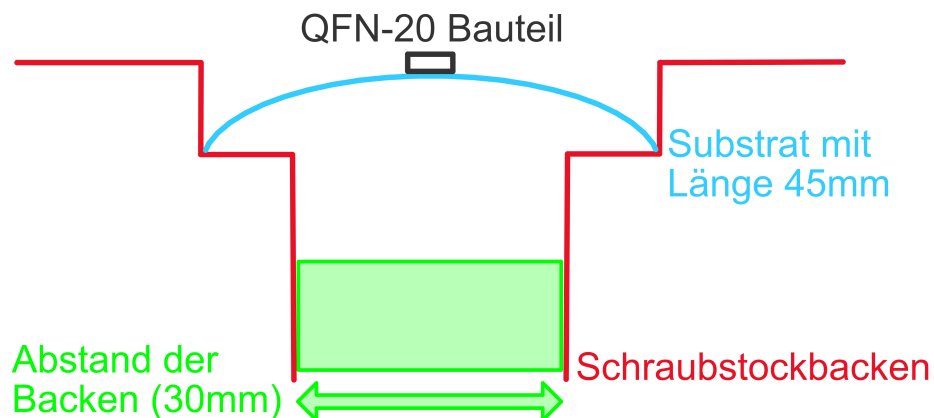


Abbildung 42: Mechanische Festigkeitstests eines bestückten Substrats Schnittbild

Der Querschnitt des Versuchsaufbaus ist in Abb. 42 dargestellt. Die jeweiligen Farben werden in der Zeichnung der jeweiligen Beschreibung zugeordnet. Anfänglich ist der Abstand zwischen den zwei Backen, rot dargestellt, bei 45mm. Durch gleichmäßiges, langsames Schließen des Schraubstocks staucht sich das Substrat, blau dargestellt, auf die bekannten 30mm, grün dargestellt. Sobald dieser Punkt erreicht ist, werden auftretende Schäden am Substrat und der Lötung bewertet. Die Substrate, welche mit CP 6690 Leitpaste gelötet wurden, sind zuerst getestet worden.

Bei den Versuchen ist aufgefallen, dass die Stabilität dabei nicht von den Lötpasten abhing; sie waren nicht der schwächste Punkt. Stattdessen ist die Haftung zwischen Leitpaste und Substrat die schwächste Stelle gewesen.

So haben sich die Bauteile von den Substraten, welche mit CP 6690 Leitpaste be-

druckt waren, bei 30-35mm Backenabstand gelöst. Dabei hat sich das komplette Pad vom Substrat entfernt, da die mechanische Festigkeit zwischen Pad und Bauteil größer war als die zwischen Pad und Substrat.



Abbildung 43: Beispiel: Mechanische Festigkeitstests eines bestückten Substrats

Abb. 43 zeigt im gelben Rahmen das QFN-Bauteil, welches sich auf der rechten Seite vom Substrat löst. Der Backenabstand betrug hierbei ca. 35mm. In der Aufnahme handelt es sich um ein Substrat mit 6690 Leitpaste.

Die Bauteile, welche auf Leitpaste CP 6662 gelötet wurden, haben sich in den meisten Fällen bei einer Stauchung auf 30mm Backenabstand noch nicht gelöst. Für einen weiteren Test wurde der Abstandshalter entfernt und die Backen noch näher zueinander bewegt. Die meisten Bauteile lösten sich erst bei einem Abstand der Backen von 30-22mm. Das ist eine starke Verbesserung im Vergleich zur Festigkeit der Leitpaste CP 6690.

Trotz der guten Ergebnisse bleibt es wohl erforderlich das Substrat für den späteren Gebrauch mit flexiblen Kunstharzen zu vergießen. So wird gewährleistet, dass das Substrat bei versehentlichen Stößen sicher bleibt. Die Bauteile werden durch den Verguss auch zusätzlich geschützt, sodass ein Tragen am Handgelenk möglich sein könnte, ohne die Substrate zu beschädigen.

## 4 Fazit der Arbeit

In dieser Arbeit wurden viele Erkenntnisse und neue Lösungswege zur Realisierung der Lötung der Bauteile auf den bedruckten Polymersubstraten beim GlucoFlex-Projekt gewonnen. Die vielen durchgeführten Tests und Versuche zeigen, dass ein prozesssicherer Aufbau des Substrats möglich sein kann. Aufgrund des Umfangs und der geleisteten Arbeit, wird die Bachelorarbeit zu diesem Zeitpunkt beendet. In Zukunft könnte jedoch an folgenden Themen weitergearbeitet werden, die zum Voranschreiten des Projekts beitragen können.

Aufgaben für die Zukunft:

- Reinigung der Substrate vor Siebdruck zur besseren Haftung zwischen Leitpaste und Substrat (Beispielsweise durch Plasmareinigung)
- Durchführung von Lötversuchen an den GlucoFlex Substraten
- Verguss der Substrate nach erfolgreichen Lötungen
- Programmierung des MCUs zur Ansteuerung des Elektroluminiszenzdisplays

## Anhang

Tabelle 12: Siebdruckparameter je Paste

Leitpaste	Richtung	Druck- geschwindig- keit	Rakel- druck	Rakelwinkel	Siebabsprung
CP 6662	Vorwärts und Rückwärts	75mm/s	40N	25°	1,60mm
CP 6671	Vorwärts und Rückwärts	150mm/s	55N	25°	1,60mm
CP 6690	Vorwärts	150mm/s	75N	70°	1,60mm
CP 6690*	Rückwärts / Fluten des Siebs	75mm/s	75N	90°	-

*\* Zu bemerken ist, dass in Rückwärtsrichtung des Drucks bei Leitpaste CP 6690 das Sieb geflutet wurde. Dabei muss sich immer genug Paste auf dem Sieb befinden.*



## Abbildungsverzeichnis

1	Bedrucktes und bestücktes GlucoFlex-Substrat . . . . .	2
2	Benetzen eines Stoffes: I-sehr gut, II-ausreichend, III-grenzwertig, IV-keine Benetzung [3] . . . . .	4
3	Kantenwinkel Beta ( $\beta$ ) [3] . . . . .	5
4	CR11 Paste in Spritze . . . . .	9
5	CR11 vor (a) und nach dem Lötvorgang (b) . . . . .	11
6	SC180 vor (a) und nach (b) Lötvorgang . . . . .	12
7	CR11 (a) und SC180 (b) Rückansicht . . . . .	13
8	Auftragen der Lötpaste mit Schablone; Vorgehensweise [5] . . . . .	17
9	Substrat nach Pastenauftragung mit Schablone . . . . .	18
10	Erstes komplettbestücktes Substrat »29/2 SC180« . . . . .	19
11	Komplettbestückung »29/2SC180« Display (a) und MCU (b) . . . . .	20
12	Komplettbestückung nach Lötvorgang »29/2SC180« Display (a) und MCU (b) . . . . .	21
13	Komplettbestückung Rückseite »29/2SC180« Display (a) und MCU (b) . . . . .	22
14	Rückseite Lotkügelchen bei QFN-32 »29/2 SC180« . . . . .	23
15	Seitliche Ansicht QFNs »29/2SC180« Display (a) und MCU (b) . . . . .	24
16	Angeschaltetes Display . . . . .	25
17	Substrat "34/3 SC180"vor Flussmitteltests . . . . .	27
18	Verzinnung eines QFN-Bauteils: Vor der Reinigung (a) und nach der Reinigung (b) . . . . .	29
19	Seitliche Ansicht nach Verzinnung eines QFN-Chips auf »31/1« . . . . .	30
20	GND-Pad ohne Lötpaste »15/1 SC180« nach Auftragung (a) und nach Bestückung (b) . . . . .	31
21	GND-Pad ohne Lötpaste »15/1 SC180« seitliche Aufnahmen . . . . .	32
22	Folien nach Flussmittelreinigung mit Prozone (a) und Vigon Fa+ (b) . . . . .	34
23	Flussmittelreiniger Prozone bei bedrucktem Display . . . . .	35
24	Flussmittelreiniger Vigon FA+ bei bedrucktem Display . . . . .	36
25	Flussmittelreiniger Vigon A 201 bei bedrucktem Display . . . . .	36
26	Layout der Löttestschaltung . . . . .	39
27	Ablauf des Siebdrucks von links nach rechts [8, S.940] . . . . .	41
28	Lötschablone des Layouts für Lötversuche . . . . .	45
29	Benetzungstests mit CP 6662 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005 . . . . .	47

30	Benetzungstests mit CP 6662 Leitpaste; Rückansicht; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005 . . . . .	49
31	Benetzungstests mit CP 6671 Leitpaste; LFM-65W Lötpaste . . . . .	50
32	Benetzungstests mit CP 6671 Leitpaste; Rückansicht; LFM-65W Löt- paste . . . . .	51
33	Benetzungstests mit CP 6690 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005 . . . . .	52
34	Benetzungstests mit CP 6690 Leitpaste; Rückansicht; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005 . . . . .	54
35	Lötlayout bestückt; CP 6662 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM- 65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005 . . . . .	56
36	Lötlayout bestückt; CP 6690 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM- 65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005 . . . . .	58
37	Lötlayout Benetzungstest nach Trocknungssimulation; CP 6662 Leit- paste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD- 005 . . . . .	60
38	Lötlayout Benetzungstest nach Trocknungssimulation; CP 6690 Leit- paste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD- 005 . . . . .	62
39	Lötlayout Benetzungstest nach Überdrucken; CP 6662 überdruckt mit CP6690 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005 . . . . .	64
40	Lötlayout Benetzungstest nach Überdrucken; CP 6671 überdruckt mit CP6690 Leitpaste; Lötpasten: (a) CR11, (b) LFM-65W, (c) NC273LT, (d) EO-SMD-005 . . . . .	66
41	Mechanische Festigkeitstests eines unbestückten Substrats . . . . .	68
42	Mechanische Festigkeitstests eines bestückten Substrats Schnittbild .	69
43	Beispiel: Mechanische Festigkeitstests eines bestückten Substrats . .	70

## Tabellenverzeichnis

1	Randwinkel $\beta$ Beurteilung [3] . . . . .	6
2	Zusammensetzung/Bezeichnung der Substrate . . . . .	7
3	Lötpasten-Übersicht [13] . . . . .	8
4	Temperaturprofile Reflowofen . . . . .	10
5	Entscheidung Lötpasten . . . . .	14
6	Flussmittel zur Unterstützung . . . . .	26
7	Belastungstest PLASTIK 70 in Flussmitteln . . . . .	34
8	Siebherstellung für Druckpasten . . . . .	42
9	Lötpastenvergleich für Lötsubstrat [13–15] . . . . .	44
10	Vergleich der Benetzungstests: Lötpasten in Zeilen und Leitpasten in Spalten . . . . .	46
11	Bewertung der Meniskusbildung nach Lötversuchen mit bestückten Substraten . . . . .	55
12	Siebdruckparameter je Paste . . . . .	VI

## Literaturverzeichnis

- [1] N. Holzheimer, Bachelorarbeit. *Demonstrator einer Anzeige auf flexiblem Substrat zur Blutzuckerüberwachung*. 2021.
- [2] Dr. H. Bell, REFLOWLÖTEN. *Grundlagen, Verfahren, Temperaturprofile und Lötfehler*. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag KG. 2005.
- [3] U. Koerbitz. *Löten als Verbindungstechnik*. [Online]. Available: [https://www.konstruktionsatlas.de/verbindungstechnik/loeten/loeten\\_definition.shtml](https://www.konstruktionsatlas.de/verbindungstechnik/loeten/loeten_definition.shtml). Abgerufen am: 29.07.2022
- [4] *Meniskus*. [Online]. Available: <https://ts.kurtzsa.de/electronics-production-equipment/loetlexikon/begriff/meniskus.html>. Abgerufen am: 17.08.2022
- [5] *SMT-Verfahren für das PCB-Prototyping*. [Online]. Available: <https://www.lpkf.com/de/branchen-technologien/forschung-in-house-pcb-prototyping/prozessschritte-der-pcb-prototypenfertigung/smt-finishing>. Abgerufen am: 26.08.2022
- [6] CRC Industries Deutschland GmbH. *Kontakt Chemie PLASTIK 70*. Technisches Merkblatt. Iffezheim. [Online]. Available: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/TKC4PLASTIK70.pdf>. Abgerufen am: 30.08.2022
- [7] M. Borges et al., *Leiterplattenprototyping*. Würzburg: Vogel Business Media GmbH & Co. KG. 2015
- [8] K. Ritz, *Handbuch der Leiterplattentechnik Band 5*. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag KG. 2019
- [9] ELANTAS Europe GmbH, *Bectron CP 6662 TDB*. Hamburg. 2021
- [10] ELANTAS Europe GmbH, *Bectron CP 6671 TDB*. Hamburg. 2021
- [11] ELANTAS Europe GmbH, *Bectron CP 6690 TDB*. Hamburg. 2021
- [12] E. Peck. (2020, August 31). *Warum die Entfernung von No-Clean-Flussmittel von Leiterplatten sinnvoll ist* [Online]. Available: <https://www.lpkf.com/de/branchen-technologien/forschung-in-house-pcb-prototyping/prozessschritte-der-pcb-prototypenfertigung/smt-finishing>. Abgerufen am: 03.09.2022

- 
- [13] Edsyn GmbH Europa, Löten von SMD Bauteilen. *Lötpaste CR 11 TDB*. Kreuzwertheim.
- [14] AIM Solder plus Support, *NC273LT NO CLEAN SOLDER PASTE TDB*.
- [15] EMIL OTTO Flux- und Oberflächentechnik GmbH, *EO-SMD-005 TDB*. Eltville. 2021.
- [16] Proto News, *Flexible-Leiterplatten: Vorteile und Nachteile*. [Online]. Available: <https://www.proto-electronics.com/de/blog/flexible-leiterplatten-vorteile-nachteile>. Abgerufen am: 05.09.2022