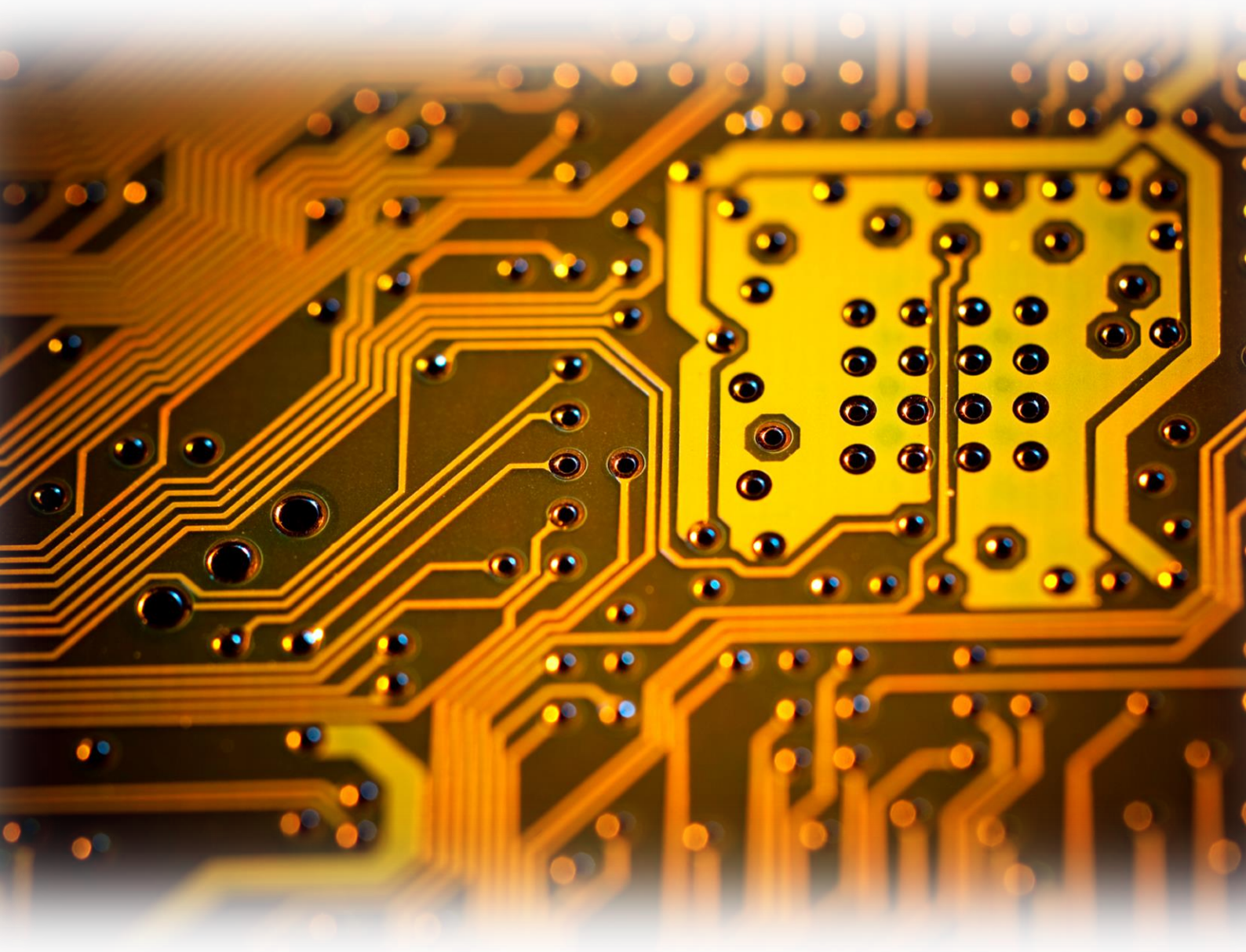


# KUPFERGEWINNUNG AUS LEITERPLATTEN



## Autoren:

KLEIS Maurice, 3CB

TONINO Paolo, 3CB

## Directeur de mémoire :

OBERTIN Pierre

Mémoire collectif

Jahr: 2019 - 2020

<u>Einleitung</u>	<u>4</u>
<u>Das Kupfer – ein besonderes Element</u>	<u>5</u>
Kupferabbau und Wirtschaft	7
<u>Leiterplatten</u>	<u>9</u>
Arten	9
Design	10
Basismaterial	12
Gebräuchliche Substrate	12
Trägermaterialherstellung	15
Kupferbahnen	15
Kupferstärke	15
Kupferstrukturierung	16
Oberflächenbehandlung	17
RoHS-konforme Leiterplatten	17
Montagetechniken	19
Through-hole technology	19
Surface-Mount technology	20
Flexible circuit	22
<u>Unser Recycling-Experiment</u>	<u>23</u>
Leiterplatten entkupfern	23
Aufbau und Funktionsweise	24
Experimententwicklung und Verbesserungen	26
Erster Versuch	26
Zweiter Versuch	27
Dritter Versuch	27
Anschluss der Leiterplatten	29
Weiterer Experimentierverlauf und Auswirkungen der Corona-Pandemie auf die Experimentierreihe	31
<u>Aufbau einer Recyclinganlage im industriellen Maßstab</u>	<u>32</u>
Leiterplattenselektion	32
Scannen	32
Demontage	33
Waschen	33
Schreddern	34

## Kupfergewinnung aus Leiterplatten

Entkupfern	34
3D Grafik der Entkupferungsanlage	35
<u>Schlussfolgerung</u>	<u>39</u>
Zusammenfassung und Botschaft der Arbeit	39
Persönliche Schlussfolgerung und Improvisierung	40
<u>Quellen</u>	<u>42</u>
<u>Bildquellen</u>	<u>45</u>

"Je déclare sur honneur avoir développé et rédigé ce mémoire sans l'aide abusive d'autrui."

– Kleis Maurice et Tonino Paolo

### Einleitung

In den letzten Jahren hat das Thema der Wiederverwertung von Abfällen immer mehr an Bedeutung gewonnen, sei dies in der Politik oder auch im Bewusstsein der Bevölkerung. Häufig geht dabei die Rede vom Recycling von Alltagsgegenständen, wie z.B. Verpackungen aus Kunststoff und deren Auswirkung als Müll auf die Umwelt. Was allerdings viele Menschen dabei nicht in Betracht ziehen ist der Ursprung dieser Materialien. Wir wissen alle, dass unsere Ressourcen auf der Erde begrenzt sind. Trotzdem behandeln wir diese oftmals als wären sie unerschöpflich. Wenn wir einen alten Gegenstand loswerden möchten, bringen wir diesen im Idealfall zu einem Recyclingcenter. Was allerdings danach mit dem Gegenstand passiert, interessiert die wenigsten. Dazu kommt, dass durch den rasanten Fortschritt der Technologien und einem Mangel an Allgemeinwissen, die Mehrheit der Bevölkerung sich bei vielen Geräten nicht bewusst ist, was im Inneren dieser Gerätschaften steckt. So kommt es, dass wir den Elektroschrott mit einem guten Gefühl abgeben, uns aber nicht bewusst sind, dass wir mit Ausnahme von den Sammelstellen, es einen großen Mangel an sekundären Wiederverwertungs-Infrastrukturen gibt. Viele bestehende Infrastrukturen sind nicht darauf ausgelegt, den Elektroschrott möglichst gut zu recyceln, sondern möglichst viel Umsatz zu erzielen. Als Resultat sind die Elektrogeräte nicht nur eine Belastung für unsere Umwelt, sondern auch äußerst rohstoffintensiv.

Wir haben uns als Ziel für diesen Memoire vorgenommen, diese Problematik in den Vordergrund zu setzen. Da das Recycling von Elektroschrott ein sehr umfangreiches Thema darstellt, haben wir beschlossen unsere Arbeit auf das Recycling von elektronischen Leiterplatten, mit Fokus auf das darin enthaltene Kupfer, zu konzentrieren. Dabei möchten wir die Bedeutung der Valorisierung von Kupfer herausheben.

## Das Kupfer – ein besonderes Element

Natürlich ist es fraglich, warum man sich die Mühe machen sollte das wenige Kupfer einer Leiterplatte zu recyceln. Jedoch ist Kupfer eines der wichtigsten Buntmetalle für die Industrie. Dies liegt an den besonderen Eigenschaften des Kupfers.



Abbildung 1: Zahlreiche Drähte des so typisch orangen Metalls

Das Kupfer besitzt eine Reihe physikalischer Eigenschaften, die das Element in zahlreichen Anwendungsbereichen zum bevorzugten Material machen.

Kupfer gehört zu den Schwermetallen und ist ein relativ weiches Metall. Das Material zeichnet sich jedoch durch eine gute Dehnbarkeit aus. So ist das Kupfer ein Element, was sich hervorragend verarbeiten lässt und so beispielsweise problemlos sehr dünne Drähte aus Kupfer hergestellt werden können. Kupfer lässt sich auch gut kalt umformen und verbiegen, ohne zu brechen. Zudem ist Kupfer unter der Witterung korrosionsfest, da sich auf der Kupferoberfläche durch Korrosion eine grünbläuliche Schicht aus Kupferoxiden und Kupfersalzen, die teils basisch wirken, bildet, die korrosionsbeständig und nicht wasserlöslich ist. So ist das darunterliegende Kupfer vor Korrosion geschützt. Das Kupfer wird aufgrund der genannten Vorteile mit anderen Metallen zu einer Legierung verarbeitet. Die guten Eigenschaften von Kupfer werden so auch mehr oder weniger, je nach Kupferanteil in die Legierung, übertragen. So sind die Legierungen auch gut formbar und sehr korrosionsbeständig. Als Legierungsmetalle für Kupfer kommen meist Zink, Zinn und Nickel zum Einsatz. So entstehen beispielsweise aus Kupfer und Zinn Bronze und aus Kupfer und Zink Messing, welche auch zahlreiche Anwendungszwecke haben. Damit findet das Kupfer und legiertes Kupfer Anwendung als äußerst langlebige Dachbekleidung, als Material für Wasserleitungen (Heizungsrohre) und als Material für Münzen.

Kupfer zeichnet sich auch durch seine hohe Wärmeleitfähigkeit aus, so kommt das Kupfer in Wärmetauschern und als passive Kühlkörper zum Einsatz, um die Wärmeenergie zu übertragen.





Abbildung 3: ein Kupferkabel

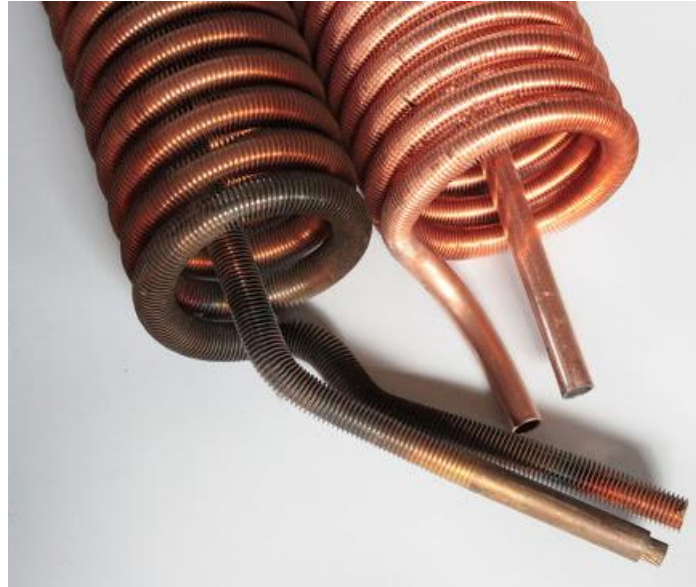


Abbildung 3: Rippenrohr aus Kupfer zur Kühlung

Allerdings beruht der zentrale Anwendungsbereich von Kupfer auf seiner besonders guten Stromleitfähigkeit. Kupfer ist das Metall mit der zweithöchsten elektrischen Leitfähigkeit von  $58 \cdot 10^6 \frac{S}{m}$  (Siemens, der elektrischen Leitfähigkeit pro Meter) knapp nach Silber mit  $61 \cdot 10^6 \frac{S}{m}$  und deutlich vor Gold mit  $45 \cdot 10^6 \frac{S}{m}$  und Aluminium mit  $37 \cdot 10^6 \frac{S}{m}$ . Da Silber und Gold jedoch seltene und sehr teure Metalle sind im Vergleich zum Kupfer, kommt das Kupfer bevorzugt als exzellenter elektrischer Leiter in fast allen elektrischen Kabeln, Kontakten und Elektrogeräten vor. So dient das Kupfer als elektrischer Leiter auf Leiterplatten von elektrischen Geräten, Rechenwerken und anderen Systemen. Zudem ist das Kupfer als lackisolierter Wickeldraht unerlässlich in allen elektrischen Maschinen und Bauteilen zur Erzeugung von Magnetfeldern in Form einer Kupferspule, die meist einen Kupferkern besitzen, wie beispielsweise Drosselspulen zur Strombegrenzung, Elektromagnete, Transformatoren sowie Elektromotoren und Generatoren, auf denen die gesamte Stromversorgung basiert. Bei Anwendungen im elektrischen Bereich kommt es bei manchen Anwendungen sehr auf die Reinheit des Kupfers an, da Fremdstoffe die elektrische Leitfähigkeit des Materials stark beeinflussen und herabsetzen. Allerdings ist das Aluminium das bevorzugte Element zur Herstellung von Leiterkabeln, wo es auf das Gewicht ankommt, denn Aluminium ist mit  $2698,9 \text{ Kg/m}^3$  deutlich leichter in Bezug auf sein Volumen im Vergleich zum Kupfer mit  $8920 \text{ Kg/m}^3$ . Auch im Preis ist Aluminium mit  $1550 \text{ € pro Tonne}$  deutlich billiger als Kupfer mit  $5020 \text{ € pro Tonne}$ .



Abbildung 5: Kupferkühlkörper eines Chips



Abbildung 4: Wicklungen eines Elektromotors

## Kupferabbau und Wirtschaft

All diese zahlreichen Eigenschaften und Anwendungsbereiche des Kupfers bewirken eine hohe Nachfrage des Materials. Das Kupfer ist heutzutage eines der meist geförderten und hergestellten Buntmetalle der Welt. Die globale Kupferproduktion im Jahr 2018 erreichte eine Menge von 21.000.000 Tonnen Kupfer. Dabei liegen die größten Kupfererz-Vorkommen in Chile, deren weltweiter Produktionsanteil mit 5.800.000 Tonnen Kupfer (Stand 2018) über ein Viertel der globalen Produktion ausmacht. Es ereignet sich eine rasant steigende Nachfrage an Kupfer im technischen Bereich, bedingt durch den steigenden Bedarf an elektrischen Geräten, dem Umstieg von auf fossilen Brennstoffen basierten Systemen auf elektrisch basierte Systeme und der Digitalisierung. So lag die Kupferproduktion im Jahr 2014 noch bei 18.700.000 Tonnen also einem Anstieg von 2.300.000 Tonnen Kupfer, also 12,3% innerhalb von vier Jahren. Diese steigende Nachfrage nach Kupfer macht sich langfristig auch im Kaufpreis von Kupfer bemerkbar. So kostete eine Tonne Kupfer Ende des Jahres 1995 2.072,74 € und Ende des Jahres 2019 bereits 5.490,08 €.

Kupfer ist glücklicherweise kein seltenes Metall und macht 0,006% der gesamten Erdkruste aus. Die wirtschaftliche Förderung von Kupfer macht ab einem Kupfergehalt von 0,2% des Bodens Sinn. Im Durchschnitt liegt der Kupfergehalt von Kupferminen bei 0,65% (Stand 2015). Der Boden mancher Kupferminen in Afrika weist einen Kupfergehalt von bis zu 6% auf. Die globalen Kupferreserven an Land liegen bei schätzungsweise über 3.000.000.000 Tonnen (Stand 2013) und würden bei gleichbleibender Nachfrage nach dem Stand 2018 theoretisch noch für etwa 150 Jahre reichen, sofern die Nachfrage ausschließlich mit neu abgebautem Kupfer gedeckt würde und man kein Kupfer recyceln würde. Dazu wollen Betriebe in Zukunft die weitaus größeren Kupferreserven der Tiefsee abbauen, was allerdings zurzeit technisch noch nicht möglich ist und mit einem großen Aufwand verbunden wäre. Der Abbau von Kupfer gilt generell als sehr schmutzig, da der Abbau und die Reinigung des Kupfers, wie bei allen anderen Metallen, sehr Energieaufwendig ist. Zudem gelten in vielen Kupferminen und Verarbeitungsfabriken keine hohen Umweltschutzstandards. So kommt es, dass die Kupferproduktion immense Umweltschäden in Form von verseuchten Böden und Gewässern anrichtet. So gibt es in Chile etwa 2.200 kontaminierte Abraumseen, die durch den

## Kupfergewinnung aus Leiterplatten

Kupferbergbau entstanden sind. Für eine Tonne Kupfer benötigt man von dem Abbau bis zur Reinigung 50.438 MJ, was 14.010,55 kWh entspricht. Das Einschmelzen und Reinigen von Kupferschrott zur gleichen Materialqualität erfordert jedoch nur 23.107 MJ, also 6418,61 kWh pro Tonne Kupfer, also 54% weniger Energie. Zudem kann man Kupfer ewig recyceln ohne dass es unbrauchbar wird. Daher macht es äußerst viel Sinn so viel wie möglich altes Kupfer zu recyceln, da man einen deutlich weniger großen Energieaufwand für die gleiche Qualität aufwenden muss.



Abbildung 6: Dieses Bild zeigt die größte Kupfermine der Erde „Chuquibambilla“ in Chile. Für den Kupfererzabbau wurde hier in über 100 Jahren ein 1000 m tiefes, 4300 m langes und 3000 m breites Loch gegraben. Bis dato wurden schätzungsweise 3 Mrd. Tonnen Kupfererz abgebaut.



### Leiterplatten

Bevor wir uns allerdings dem Recycling von Leiterplatten zuwenden, sollte man erst einen Blick auf die Leiterplatte an sich werfen. Mit dem Wissen über deren Aufbau und Herstellungsverfahren können sich schon viel eher effektive Ansätze für unser Recycling-Experiment herauskristallisieren, als wenn man sein Ausgangsmaterial nicht kennen würde.

Leiterplatten (auch Platine genannt) sind das Herzstück vieler elektronischen Geräte, nahezu jedes enthält eine oder mehrere Platinen. Leiterplatten werden aus nicht leitfähigen Materialien hergestellt und dienen dazu elektronische Bauteile sowohl mechanisch wie auch elektrisch miteinander zu verbinden. Im Prinzip besitzen Leiterplatten zwei Seiten: eine Bestückungsseite und eine Seite mit den Leiterbahnen. Letztere besteht aus einer dünnen Schicht Kupfer, üblich sind 35  $\mu\text{m}$ , aus der die Leiterbahnen geätzt werden. Diese Kupferschicht ist auf einem isolierenden Material aufgetragen, welches meistens aus faserverstärktem Kunststoff besteht oder bei günstigeren Verfahren aus Hartpapier (Kunstharzverstärktes Papier).

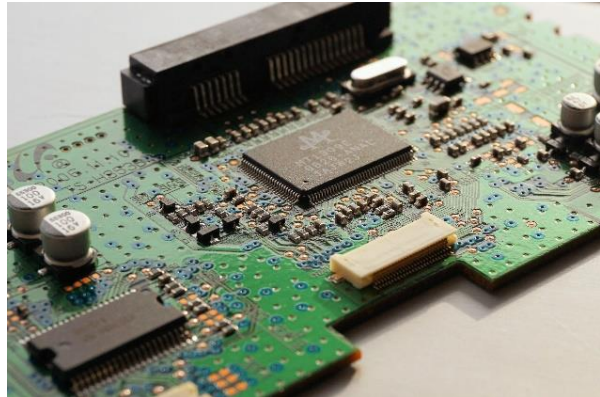


Abbildung 7: eine SMT-Leiterplatte

### Arten

Grundsätzlich unterscheidet man bei Platinen zwischen 3 Arten: Standard- und Multilayerplatinen und Sondertechniken. Ein- oder zweiseitige Leiterplatten werden als Standardplatinen klassiert und sind sehr weit verbreitet. Sie können mit einfachen, daher günstigen, Methoden hergestellt werden und ermöglichen trotzdem die Gestaltung mittelkomplexer Schaltungen. Leiterplatinen die zusätzlich zu denen zwei Außenlagen auch im inneren der Platine Schichten mit Leiterbahnen besitzen werden als sogenannte



Abbildung 8: Querschnitt durch eine Leiterplatte mit u.a. Hochstrom-Leiterbahnen

Multilayerplatinen (z. Dt. Mehrschichtplatine) bezeichnet. Man kann sich diese Leiterplatten als mehrere aufeinandergeschichteten Standardplatinen vorstellen.

Die dritte Kategorie beinhaltet jene Platinen, die mit Sondertechniken hergestellt werden. Dazu zählen Leiterplatten mit besonderen Eigenschaften, wie z.B. hohe Flexibilität, Hochstrom-fähig oder sehr dünne Leiterplatten.

### Design

Anfangs wurden Leiterplatten noch von Hand gezeichnet, indem man auf einer durchsichtigen Mylar-Folie eine Fotomaske hergestellt hat. Basierend auf dem schematischen Diagramm hat man dann die Kontakte der Komponenten ausgelegt und mithilfe von Klebeband wurden die Leiterbahnen gezeichnet, die diese Kontakte miteinander verbinden. Die fertige Fotomaske wurde dann fotolithographisch auf eine Fotolackbeschichtung (siehe Kupferstrukturierung Seite 16) auf das blanke Kupfer projiziert. Da dieser Prozess sehr zeitaufwendig war und nur begrenzt verbessert werden konnte und außerdem in der Präzision und daher der Dichte der Leiterbahnen beschränkt ist, begann 1981 der Umstieg auf digitale Hilfsmittel. Electronic Design Automation oder kurz EDA bezeichnet Software für den Entwurf von Elektronik und bildet ein Teilgebiet des computer-aided design (CAD). Die Hauptanforderungen der EDA sind wie folgt:

- Erstellung von Schaltplänen, hauptsächlich für Leiterplatten
- Leiterplattenentwurf
- Prüfung der erwünschten Funktionalität durch Simulationen
- Entwicklung von Integrierten Schaltungen

Da moderne Leiterplatten Milliarden an Komponenten verbaut haben können, ist es fast immer notwendig, digitale Hilfsmittel beim Entwurf einer neuen Platine anzuwenden. Des Weiteren können bei Verwendung digitaler Methoden die Entwürfe auf mehrfachen Ebenen geprüft werden, um eventuelle Fehler und Verbesserungen vor der Produktion beheben und integrieren zu können. In der EDA-Software beginnt man üblicherweise mit der Gestaltung des Schaltplans. Hierfür legt man zuerst die elektrischen Komponenten aus und platziert sie so, dass man Sinnvolle Verbindungen untereinander erschaffen kann. Als nächster Schritt muss man alle Kontakte der unterschiedlichen Komponenten miteinander verbinden. Hierbei soll man darauf achten, dass alle Anschlusspunkte sowie Verbindungen eigene individuelle Bezeichnungen besitzen. Da nun alle Komponenten miteinander verbunden sind, können die ersten Simulationen und Tests durchgeführt werden. Als nächste Etappe gilt es, die Leiterplatte selbst zu entwerfen. Wie beim Schaltplan beginnt man mit der Anordnung der verschiedenen Bauteile um anschließend alle Anschlüsse mit Leiterbahnen zu verbinden. Hierbei kann das Programm einem schon viel weiter helfen mit sogenannten Autorouting-Funktionen. Hierbei verlässt sich das Programm auf den vorhin erstellten Schaltplan und Kennzeichnung der Kontakte. Diese Funktionen finden allerdings nicht immer die beste Lösung oder finden nicht immer eine Möglichkeit alle Punkte miteinander zu verbinden, obwohl wir als Mensch diese vielleicht einleuchtend finden. Aus diesem Grund ist meistens eine gewisse Nacharbeit mit Autorouting verbunden. Dazu kommt, dass man meistens mehrere Ebenen hat, auf denen sich Leiterbahnen befinden können. Da die EDA nicht nur Schaltpläne erstellt, sondern auch die Dateien für den späteren Ätzprozess, gibt es noch weitere Arbeitsschritte, die man befolgen muss. Für die meisten SMD-Packungsgrößen und gängige Bauteile haben die Programme fertige Muster, die angeben, wo sich welche Kontaktflächen befinden, welche Form und Größe diese besitzen usw. Im Fall, wo man aber ein spezielles Bauteil verbauen möchte, welches nicht im Programm hinterlegt ist, muss man diese Daten alle selbst konfigurieren. Da dieser Teil des Entwerfens auf die Produktion

## Kupfergewinnung aus Leiterplatten

fokussiert ist, arbeitet man nicht mehr mit Symbolen oder Abbildungen der Komponenten, sondern fast ausschließlich mit den SMD-Footprints<sup>1</sup>. Des Weiteren muss man bei diesem Schritt Details einplanen, die nicht notwendig sind auf einem 2D Schaltplan. Sogenannte Vias verbinden Leiterbahnen von einer Kupferschicht mit denen einer tiefer gelegenen Schicht. So ist es möglich, dass sich z.B. zwei Leiterbahnen sich kreuzen, ohne aber elektrischen Kontakt miteinander zu haben, da die Leiterbahnen eigentlich dreidimensional über- und untereinander verlaufen. Was auf Schaltplänen mit Beschriftungen und Symbolen vereinfacht dargestellt werden kann, muss also beim Entwurf einer echten Leiterplatte genauestens durchdacht werden.

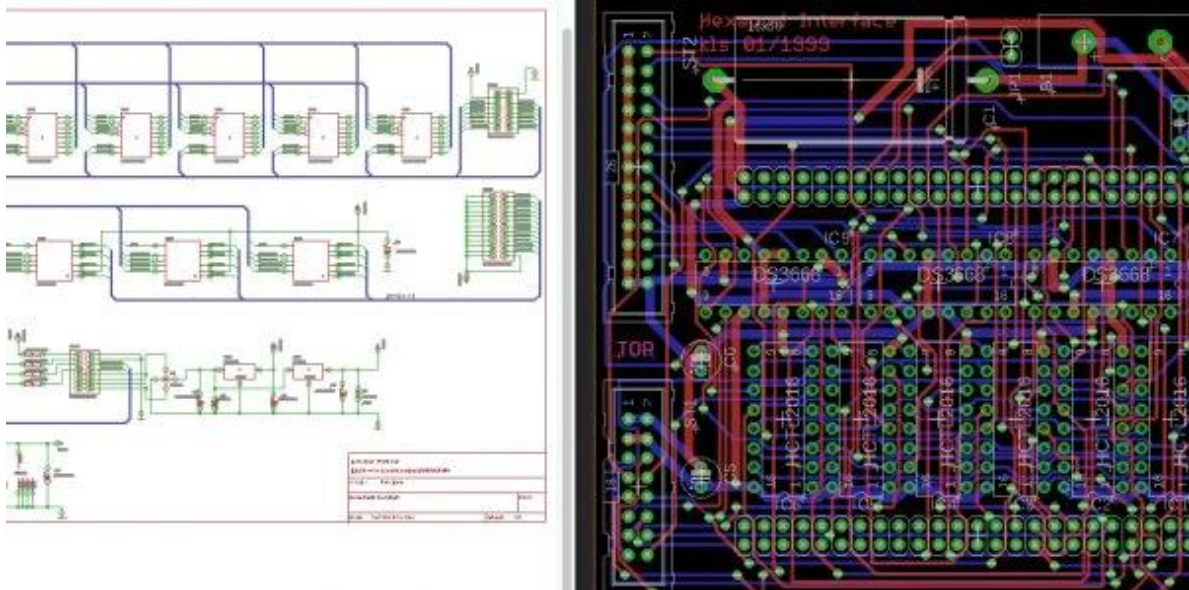


Abbildung 9: Links zu sehen ist die Schaltplan-Ansicht, rechts daneben die Layout-Ansicht für den späteren Ätzprozess

---

<sup>1</sup> Gruppierung der Anschlussflächen eines Bauteils





- FR-4: Dieses, in Epoxidharz getränkte Glasfasergewebe ist das meist verwendete Trägermaterial. Die Eigenschaften dieses Substrats haben sich als ideal für die Produktion von Leiterplatten rausgestellt. Das Material besitzt ein hohes Verhältnis von Kraft zu Gewicht und absorbiert zudem fast gar kein Wasser. Da das FR-4 Substrat die guten mechanischen und elektrischen Eigenschaften sowohl im trocknen wie auch in feuchten Gebieten erhält, kann es in sehr vielen unterschiedlichen Gebieten eingesetzt werden. Des Weiteren liegt der Erweichungspunkt zwischen 120°C und 150°C und die maximale Betriebstemperatur im Bereich von 110°C bis 140°C. Somit ist dieses Material viel hitzebeständiger als die FR-1 und FR-2 Variante. Auch in den elektrischen Eigenschaften verhält sich dieses Gewebe sehr gut.
- Polyimide: Oft bekannt durch Produkte wie Kapton-Band<sup>3</sup> oder aus Lagerbuchsen und Lager, bietet Polyimide sehr interessante Eigenschaften an. Polyimide Materialien sind leicht, flexibel und hitze- und chemikalienresistent. Dadurch können sie in der Elektrotechnikindustrie als elektrisches Isolationsmaterial oder als Trägermaterial benutzt werden, besonders da die Folien nicht zwingend mit einem Glasfasergewebe verstärkt werden muss. Die gute mechanische Dehnungs- und Zugfestigkeitseigenschaften der Polyimid-Folien verhelfen außerdem der Haftung zwischen mehreren Schichten oder der Folie auf einer Metalloberfläche. Polyimide Substrate sind allerdings nicht gut geeignet für feuchte Gebiete durch ihre hohe Wasserabsorption. Allerdings können Leiterplatten aus Polyimiden von kryogenischen Temperaturen bis rund 260°C benutzt werden, also ein weitaus größerer Bereich wie die FR-4 Platinen. Im Vergleich zu den FR-4 Material sind aus Polyimiden hergestellte Substrate hingegen rund 330% bis 440% teurer.
- PTFE: Auch unter dem Produktname Teflon bekannt, begegnet man PTFE im Alltag unter anderem in Pfannen und sonstigen Kochgeschirr als Antihafbeschichtung. Diese Eigenschaft bringt allerdings das Problem mit sich, dass aus PTFE bestehende Platinen einer speziellen Oberflächenbehandlung<sup>4</sup> untergehen müssen, um die Kupferschicht zum Haften zu bekommen. Da PTFE hydrophob ist eignet sich dieses Material

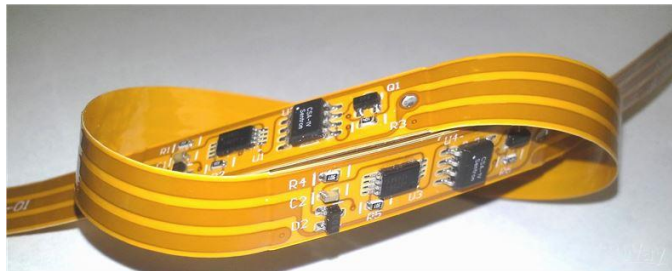


Abbildung 11: eine flexible Leiterplatte aus Polyimidfolie

---

<sup>3</sup> DuPont™ Kapton® ist ein Polyimid-Film der viel in der Elektro- und Raumfahrtindustrie in den Einsatz kommt. Als Selbstklebeband produziert, lässt sich Kapton als hervorragendes Isolierband verwenden, da es leichter ist und weniger ausgast wie herkömmliche Isolatoren.

<sup>4</sup> Für diese Zwecke wird die Oberfläche normalerweise chemisch behandelt, um sie aufzurauen. Es gibt hierfür auch mechanische Methoden, wie z.B. mittels Plasmas die Kontaktfläche zu ätzen. Eine weitere Möglichkeit besteht daraus, ein Klebstoff zwischen die Kupferschicht und das Trägermaterialbeizufügen, was jedoch die elektrischen Eigenschaften wesentlich verschlechtern würde und dadurch nicht gemacht wird.

hervorragend für Leiterplatten, die der Feuchtigkeit stand halten müssen. Die Glasübergangstemperatur von PTFE liegt bei 260°C, die maximale Betriebstemperatur rund 10°C niedriger. Manche PTFE-Varianten können sogar Temperaturen bis zu 320°C aushalten. Da das PTFE-Substrat flexibler ist wie die meisten Faserverbundstoffe, wird es für den Einsatz als Trägermaterial einer Platine oft Glasfasern oder Siliziumdioxid eingesetzt, um eine höhere Steifheit zu erzielen. Durch den guten Isolationswiderstand und das Kriechstromverhalten, zusammen mit der niedrigen Permittivität<sup>5</sup> eignet sich PTFE ausgezeichnet als Trägermaterial für Hochfrequenzanwendungen. Da dieses Material Wasser nicht aufnimmt, bleiben diese Funktionen auch in feuchten Umgebungen erhalten. Alle diese ausgezeichneten Eigenschaften kommen jedoch mit einem entsprechenden Preis, sodass dieses Trägermaterial rund 8-mal so teuer ist als Standard FR-4 Leiterplatten.

- Aluminiumoxid-Keramik: Substrate aus feinem Keramikpulver mit untergemischtem Aluminiumoxid besitzen gute thermische Eigenschaften. Da elektronische Bauteile immer kleiner werden, entwickeln sie immer höhere Temperaturen auf immer kleineren Flächen. Hierbei hilft dieses Trägermaterial, um die Wärme der Komponenten schnell abzuleiten. Die Eigenschaften von Keramik ermöglichen es daneben, die Leiterplatte problemlos bis zu 350°C zu erhitzen. Außerdem liegt der thermische Ausdehnungskoeffizient näher an dem von Kupfer, sodass solche hohen Temperaturen mit weniger Problemen verbunden sind. Die elektrischen Eigenschaften dieses Trägermaterials sind wie PTFE-Platinen hervorragend, sodass sich die Leiterplatte auch für Hochfrequenzschaltungen eignet. Des Weiteren altern Keramik-Leiterplatten nicht so schnell wie herkömmliche Substrate. Diese erstklassigen Charakteristiken des Substrats führen allerdings zu ähnlich hohen Kosten wie PTFE-Platinen.
- IMS: Als *insulated metal substrate* (z. Dt. Isoliertes Metallsubstrat) bezeichnet man Substrate, die anstatt ein konventionell isolierendes Material, ein Metall als Hauptträger verwenden. Um einen Kurzschluss der Leiterbahnen zu vermeiden wird dennoch eine dünne Schicht aus konventionellen Kunststoffen zwischen die Kupferleiterbahnen und die Metallplatte, meistens Aluminium, eingelegt. Diese elektrische Isolation besitzt eine Stärke von 5 µm bis zu 200 µm. Dieser Träger kommt bei Komponenten die viel Hitze produzieren in den Einsatz, wie z.B. starke LEDs. Durch die große Metalloberfläche kann die Wärme schnell weitergeleitet werden, sodass die Komponenten mit einer größeren Oberfläche gekühlt werden können. Diese Mehrschichtenkonstruktion wird



Abbildung 12: eine IMS-Leiterplatte mit einer Hochleistungs-LED

---

<sup>5</sup> Die Permittivität beschreibt die Polarisierbarkeit eines Laminats. Bei einer höheren Polarisierbarkeit fließt die elektromagnetische Energie langsamer durch den Leiter, was zu einer Reduktion der Frequenz führt.

in den meisten Fällen nur einseitig bestückt, da bei einer beidseitigen Beschichtung mit Kupfer und Kunststoff der Effekt der Wärmeabfuhr um einiges geschwächt würde. Da Aluminium eine höhere mechanische Stabilität besitzt und beständiger ist wie Keramik, eignen sich IMS-Leiterplatten besser für Applikationen, bei denen sie mechanisch hoch beansprucht werden.

### Trägermaterialherstellung

Die genauen Schritte dieses Prozesses variieren von Material zu Material, doch man kann einen Überblick des allgemeinen Ablaufs erstellen. Für alle Substrate, die auf Basis von Kunstharz hergestellt werden, muss dieser zuerst zusammengemischt werden. Hierfür wird das Grundharz mit Härter, Beschleuniger und Lösungsmittel vermischt, optional können weitere Zusatzstoffe zugesetzt werden, wie z.B. Flammschutzmittel oder Farbstoffe. Anschließend wird in einer sogenannten Imprägnieranlage das Verstärkungsgewebe entweder durch ein Kunstharzbad gezogen oder mit Kunstharz besprüht. Um hierbei ein ununterbrochenes Ablaufen zu garantieren, werden die Verstärkungen aus Glas- oder Holzfaser und Papier in Rollen angeliefert. Hinterher wird dieses Band durch Rollen gezogen, um das Material auf die gewünschte Stärke zu pressen und um überflüssiges Harz loszuwerden. Danach geht es weiter in einen Ofen. Hierbei ist das Ziel nicht, das Harz komplett zu trocknen, sondern nur in einen Zwischenzustand zu bringen und das Lösungsmittel zu verdunsten. Nach diesem Vorhärten kann das sogenannte Prepreg zu mehr handhabbaren Paneelen für die Weiterbearbeitung zugeschnitten werden. Um dieses Prepreg als Trägermaterial für Leiterplatten benutzen zu können, müssen aber vorher mehrere dieser Paneele unter erneuter Wärmezufuhr verpresst werden. Hierfür werden mehrere Lagen Prepreg mit jeweils einer Folie Kupfer auf der Oberseite gestapelt und in einem Ofen verpresst. Hierbei wird das Harz zuerst klebrig und härtet anschließend vollständig aus. Bei Multilayer-Platinen werden diese Schritte mehrfach wiederholt, allerdings mit dünneren Prepreg-Schichten.

## Kupferbahnen

### Kupferstärke

Wie schon erwähnt bestehen einfache Leiterplatten im Wesentlichen aus einem Trägermaterial mit einer oder zwei, auf der Oberfläche aufgetragenen, Kupferschichten. Die Stärke dieser Kupferschichten wird meistens direkt angegeben werden, wobei in englischsprachigen Ländern die Angabe des Gewichtes des Kupfers bezogen auf eine Fläche verbreiteter ist. So besitzen Standardplatinen meistens eine Stärke von 35 µm beziehungsweise 1 Unze pro Quadratfuß ( $0,305 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ ). Für Anwendungen, bei denen höhere Ströme fließen sind Schichtstärken von 140 µm und sogar 400 µm üblich. Bei Schichtstärken von 200 µm bis 400 µm redet man dann von sogenannten Dickkupfer-Leiterplatten. Diese erlauben nicht nur eine höhere Strombelastbarkeit, sondern auch eine bessere Wärmeableitung. Die Stärke der Kupferschicht bringt jedoch den Nachteil mit sich, dass sich feine und dichte Leiterbahnstrukturen nicht mehr so gut produzieren lassen. Daneben gibt es auch Verfahren für dünnere Kupferbeschichtungen, bei welchen

eine Stärke von 18  $\mu\text{m}$ , die meist verbreitete ist. Flexible Leiterplatten benutzen unter anderem diese dünneren Kupferschichten.

### Kupferstrukturierung

Um die blanke Kupferschicht nun allerdings brauchbar für den Einsatz als Leiterplatte zu gestalten, muss an gezielten Regionen das Kupfer entfernt werden, um so die Leiterbahnen zu gestalten. Die Leiterplattenhersteller benutzen die sogenannten Gerber-Dateien der Kunden, um das Layout mithilfe eines Plotters auf eine transparente Folie zu drucken. Das Muster auf dieser Folie ist ein Negativ von dem was später von der Kupferschicht erhalten werden soll. Als nächster Schritt wird die Kupferoberfläche mit einem Fotolack beschichtet. Auch als Photoresist bekannt, besteht dieser Lack aus 3 Komponenten: ein Polymer als Ausgangsstoff (z.B. Epoxidharze), Lösungsmittel sowie einer fotoempfindlichen Komponente. Letztere reagiert auf ultraviolettes Licht und sorgt dafür, dass der bereits verfestigte Lack wieder für die Entwicklerlösungen löslich wird. Da die Löslichkeit des Lacks durch das Belichten zunimmt, spricht man auch von einem Positivlack.

Nach der Belichtung muss die Leiterplatte entwickelt werden. Hierbei wird ein geeignetes Lösungsmittel, auch Entwicklerflüssigkeit, angewendet, um die belichteten Bereiche vom Fotolack zu lösen. Anschließend sind die behandelten Platinen bereit für den eigentlichen Ätzprozess. Hierbei wird die ganze Leiterplatte einer Ätzlösung ausgesetzt, mit möglichst viel Agitation. Die einfachste Methode ist das Eintauchen der Platine, wobei Bewegung in der Flüssigkeit z.B. durch Luftblasen, den Prozess beschleunigen. In der industriellen Produktion werden die Leiterplatten allerdings meistens per Spritzätzen behandelt, was nicht nur eine erhebliche Beschleunigung des Prozesses mit sich bringt, sondern nebenbei eine bessere Kontrolle über die Ätzgeschwindigkeit und

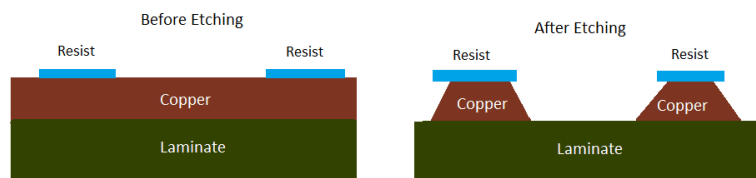


Abbildung 13: Prinzip des Ätzprozesses

Dauer ermöglicht. Ätzlösungen, wie z.B. in Wasser gelöstes Eisen(III)-Chlorid oder Natriumpersulfat greifen den blanken Kupfer an, wobei der vom gehärteten Fotolack geschützte Kupfer intakt bleibt. Nach Abschluss dieses Prozesses bleiben nur noch die freigelegten Kupferbahnen übrig, welche noch mit einem Lösungsmittel behandelt werden, um die Fotolacküberreste zu entfernen. Nach diesem Schritt sind die Leiterplatten nun bereit für die Weiterverarbeitung. Falls nötig können die Kupferschichten noch galvanisch verstärkt werden.

Ein wichtiger Nebeneffekt vom Ätzen, den man beim Entwerfen der Gerber-Dateien im Auge behalten sollte, ist die Verwerfung der Leiterplatten. Wenn großflächig Kupfer von einer Platine weggeätzt wird, kann dies Durchbiegungs- und Torsionseffekte mit sich bringen. Aus diesem Grund soll man beim auf eine symmetrische Kupferverteilung achten, indem man die Leiterbahnen je nach Möglichkeit gleichmäßig verteilt oder indem



man auf der symmetrisch gegenüberliegenden Schicht „Kupferfüllungen“ oder Rasterstrukturen aus Kupfer einplant.

### Oberflächenbehandlung

Da zwischen der Produktion der Leiterplatte und der Bestückung im Regelfall eine Lager- und Transportzeit anfällt, muss dafür gesorgt werden, dass das blanke Kupfer vor Umwelteinflüssen geschützt ist, um einen guten Lötprozess sowie Langlebigkeit der Platine zu garantieren. Als erster Schritt hierfür wird die Leiterplatte mit einem Lotstopplack versehen. Dieser schützt das Kupfer vor Korrosion und mechanischer Beschädigung und verhindert beim Löten das Verlaufen, das auf die Lötflächen

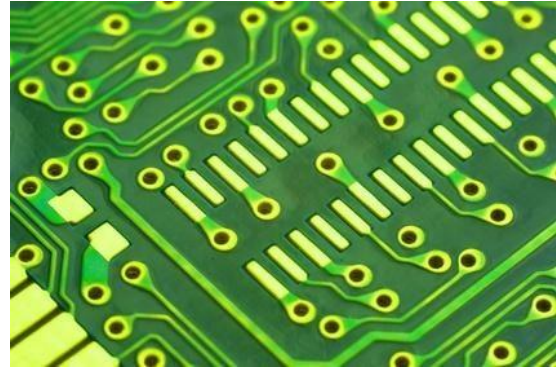


Abbildung 14: Der typisch grüne Lötstopplack rund um die Lötkontakte aufgetragen

aufgetragenen Lötzinns. So werden auch Lötbrücken verhindert und es verbessert die elektrischen Eigenschaften wie z.B. die Durchschlagfestigkeit. Das Auftragen dieses Lacks ist nicht unbedingt notwendig für handgelötete Platinen, aber unerlässlich für massenproduzierte Leiterplatten, die z.B. Reflow- oder Wellenlötverfahren anwenden. Die billigste Methode Lötstopplack auf eine Leiterplatte gezielt zu applizieren ist mit einer Kombination aus ultraviolett oder thermisch härtendem Epoxidharz und dem Siebdruckverfahren. Die meistbenutzte Technik benutzt jedoch eine flüssige lichtempfindliche Lötmaske. Hierbei wird die Platine komplett mit der Tinte beschichtet aber nur selektiv durch eine Fotomaske gehärtet. Auf unbelichtete Flächen, wie z.B. Lötkontakte, bleibt die Lötmaske flüssig und kann später abgewaschen werden.

Weiterhin gibt es noch Oberflächenbehandlungstechniken, die gegen die Korrosion der Lötkontakte wirken. Früher wurden dafür die Leiterplattenoberflächen durch ein Bad aus flüssigem Zinn-Blei gezogen und anschließend wurde mit heißer Luft das überschüssige Zinn-Blei abgeblasen. Da die RoHS-Richtlinie aber den Einsatz von Blei beschränkt, mussten neue Zusammensetzungen des metallischen Anti-Korrosionsschutz gefunden werden. Nach diesem Schritt ist es noch möglich den Platinen per Siebdruck Markierungen und Bezeichnungen zuzufügen.

### RoHS-konforme Leiterplatten

Die 2006 in Kraft getretene Richtlinie der europäischen Union dient dazu die Verwendung von gefährlichen Stoffen in Elektrogeräten zu regeln. Das Ziel der Restriction of Hazardous Substances (z. Dt. Beschränkung [der Verwendung bestimmter] gefährlicher Stoffe) besteht darin, problematische Bestandteile aus dem Elektronikschrott zu verbannen und die Einführung entsprechender Alternativprodukte zu fördern. Da einige der in der Elektrotechnik verwendete Substanzen als umweltgefährdend gelten, sollen diese Materialien so wenig wie möglich in die Umwelt gelangen.

Besonders betroffen sind dabei:

## Kupfergewinnung aus Leiterplatten

- Blei (Pb) - wird unter anderem für Lötverbindungen eingesetzt
- Quecksilber (Hg) - wird unter anderem für Neigungsschaltern sowie Entladungslampen eingesetzt
- Cadmium (Cd) - wird unter anderem für Nickel-Cadmium-Akkumulatoren eingesetzt
- Sechswertiges Chrom (Cr VI) - wird unter anderem als Bestandteil für Farben und Lacken sowie Holzschutzmittel eingesetzt
- Polybromierte Biphenyle (PBB) - wird als Flammschutzmittel in Kunststoffisolationen eingesetzt
- Polybromierte Diphenylether (PBDE) - wird als Flammschutzmittel in Kunststoffisolationen eingesetzt

Im Jahre 2015 wurden weitere Stoffe auf diese Liste gesetzt, darunter hauptsächlich Weichmacher für Kunststoffe. Die Richtlinie wendet sich direkt an Unternehmen, die Elektrogeräte in die europäische Union importieren oder diese innerhalb der EU vertreiben und verpflichtet sie dazu auf die Einhaltung der Vorschriften zu achten.

Die Umstellung der vielen weit verbreiteten Herstellungsprozessen forderte viel Arbeit, besonders da die Verwendung von klassisch benutzten Blei-haltigem Lötzinn nun verboten wurde. Als Ersatz der bleihaltigen Legierung stieg man dann auf Zinn-Silber, Zinn-Kupfer und inn-Bismut um. Diese Umstellung bringt jedoch eine Kostenerhöhung mit sich und die Qualität der Lötstellen ist niedriger als bei Blei-haltigem Zinn. Aus diesem und weiteren Gründen, wie z.B. ein Mangel an Alternativen, wurden für die RoHS-Richtlinie Ausnahmen ausgearbeitet.

Es gibt über 80 Ausnahmeregelungen, wobei manche sehr allgemein formuliert sind. Die Ausnahmeregelungen richten sich an bestimmte Gerätegruppen, Anwendungen, Bauteile oder Werkstoffe und laufen automatisch nach 5 oder 7 Jahren ab, es sei denn sie werden erneuert. Die größten Ausnahmen findet man im Bereich der Medizin, Militär und Luft- und Raumfahrt. Da das Versagen in diesen sicherheitsrelevanten Bereichen einer Leiterplatten oder der elektronischen Komponenten zu schwerwiegenden Problemen führen könnte, gibt es Ausnahmen die z.B. den Einsatz von Blei-haltigem Lötzinn erlauben. Nicht anwendungsspezifische Ausnahmen sind z.B.:

- Blei als Legierungselement in Stahl mit einem Bleianteil von bis zu 0,4 Massenprozent, in Aluminium mit einem Bleianteil von bis zu 0,4 Massenprozent und in Kupferlegierungen mit einem Bleianteil von bis zu 0,35 Massenprozent
- Blei in Lötzinnen für Servers, Speicher und Speicher Array-Systeme und Netzwerkinfrastruktur
- Quecksilber in Kompaktleuchtstofflampen in begrenzten Mengen von 5mg pro Lampe

Batterien im Allgemeinen fallen nicht unter die RohS-Richtlinie, sondern unter eine besondere Batteriedirektive der EU. Unter der RoHS-Richtlinie wird jedoch Blei in Starterbatterien für Kraftfahrzeuge erlaubt.

## Montagetechniken

Der Hauptunterschied der verschiedenen Leiterplatten liegt in der Art und Weise, wie die elektrischen Komponenten auf der Leiterplatte verbaut werden. Hierbei unterscheidet man grundsätzlich zwischen der through-hole und surface-mount Technologie.

### Through-hole technology

Bei der Durchsteckmontage werden bedrahtete elektronische Bauteile durch kleine Bohrungen in die Platine gesteckt und auf der entgegengesetzten Seite der Leiterplatte mit den Leiterbahnen verlötet. Diese Montageweise wurde sehr verbreitet ab Ende der 1960er Jahre und löste die veraltete Point-to-Point Konstruktionsweise ab. Bei letzterer Aufbautechnik wurden die Bauteile frei in der Luft miteinander

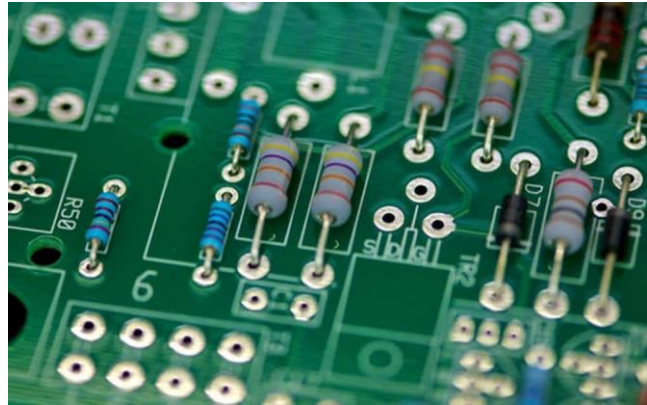


Abbildung 15: die Oberseite einer THT- Platine

verbunden, ein Prozess, der von Grund auf umgestaltet wurde. Die Through-hole Technik (THT) revolutionierte die Elektronikindustrie, denn die Komponenten sind ganz strukturiert geordnet, was die Fehlerrate bei der Produktion verringert. Mit der Einführung dieser Verbindungstechnik wurde sofort eine Norm eingeführt, die die Mittenabstände der Bohrungen mit 2,54 oder ein Vielfaches davon festlegt. Da die Bauteile von nun an für dieses Rastermaß gefertigt wurden, kamen auch erstmals Bestückungsautomaten zum Einsatz. Nachdem die Platinen bestückt sind, sei es von Hand oder maschinell, müssen sie noch verlötet werden. Dies kann durch konventionelles Handlöten erfolgen oder durch Wellenlöten. Wellenlöten beschreibt ein Lötverfahren, bei dem die Leiterplattenunterseite durch eine, von einer Pumpe erzeugten, stehenden Welle aus Lötzinn gezogen wird. Hierbei setzt sich automatisch auf jedes Lötstelle Lötzinn ab. Anschließend müssen die abstehenden Drähte der Bauteile noch bis an die Lötstelle gekürzt werden. Diese Technik hat sich in den Jahren bewährt und ist somit heutzutage noch immer weit verbreitet. Die niedrigen Kosten und die Schlichtheit sorgen dafür, dass THT-Leiterplatten nach Jahrzehnten noch immer im Einsatz sind, wobei sie vermehrt nur noch bei einfachen und preiswerten Produkten sowie im Bereich der Leistungselektronik eingesetzt werden. Außerdem kommt die Technik auch bei Geräten, die von Handwerkern oder Hobbyelektronikern von Hand gelötet werden, zum Einsatz.

### Surface-Mount technology

Wie man es vom Namen ableiten kann, besteht der Hauptunterschied, zwischen der älteren Durchsteckmontage und dieser Technik in der Art und Weise wie man die elektronischen Komponenten an der Platine montiert. Die surface-mount devices, oder kurz SMD (z. Dt. oberflächenmontiertes Bauelement) werden nicht mit Drähten an den Leiterbahnen verlötet, sondern mit kleinen metallisierten Kontaktflächen. Da diese Komponenten nicht bedrahtet sind und nur auf der Oberfläche der Leiterplatte sitzen, ist die Fläche, die sie auf der Leiterplatte einnehmen um ein Vielfaches kleiner als bei der through-hole Technologie. Bei dieser Montagetechnik sind Flächen für

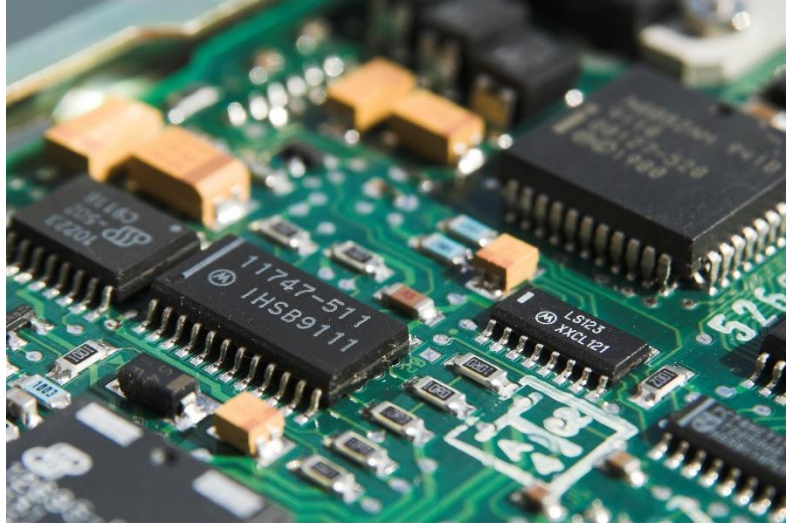


Abbildung 16: Eine Makroaufnahme einer SMT-Leiterplatte

Bestückungslöcher und verhältnismäßig große Lötstellen nicht erforderlich. Zudem befinden sich die Lötkontakte an den Komponenten selbst, sodass der Bedarf, die Lötstellen wegen dem Biegeradius des Drahts mit einem Abstand zu platzieren entfällt. Außerdem können durch Techniken wie Ball Grid Array (z. Dt. Kugelgitteranordnung), Komponenten mit einer hohen Anzahl an Kontakten wie z.B. integrierte Schaltungen, viel platzeffizienter verbaut werden. Diese Technik ermöglicht es nämlich, sogar Kontaktflächen unter Komponenten zu verlöten. Die Dichte der Komponenten auf einer Leiterplatte kann durch die Surface-Mount Technologie zudem gesteigert werden, indem man die Platine beidseitig bestückt. Da es keine Durchkontaktierungen gibt, können auch auf der Rückseite SMD-Komponenten montiert werden. Somit kann die Größe der Platine halbiert werden, was viele neue Möglichkeiten bietet, die Leiterplatte im Endprodukt zu verbauen. Zudem können Komponenten, die für die Verwendung mit der SMT-Technik konzipiert wurden, viel kompakter gebaut werden als ihre THT-Variante. Da die Bauteile weniger oder sogar keine Kontaktdrahte besitzen, kann der interne Aufbau um ein Vielfaches geschrumpft werden. So ist es möglich, dass standartmäßig verbaute Bauteile nur noch 0,4mm lang und 0,2mm breit sind. Es können sogar Komponenten mit einer Größe von 0,25mm \* 0,125mm verbaut werden, wobei diese eher in Sonderfällen in den Einsatz kommen.

Durch ihre einfache Form eignen sich SMD-Komponenten hervorragend für Automatisierungstechniken. Da die Bauteile keine Drähte besitzen, die in die Durchkontaktierungslöcher eingefädelt werden müssen, entfällt die schwierigste Aufgabe für einen Bestückungsautomat. Sogenannte Pick-and-place-Maschinen müssen also nur noch zwei Parameter beachten: die Orientation des Teiles und die geplante



Position auf der Platine. Diese Maschinen sind hochautomatisiert und benötigen während ihrer Operation kein Eingreifen eines Menschen. Mithilfe von Vakuumpumpen entnehmen solche Maschinen die Bauteile aus Magazinen und fahren über optische Scanner, um die genaue Orientation der Komponenten zu bestimmen. Anschließend wird das SMT-Bauteil auf der gewünschten Position auf der Leiterplatte platziert, mit der im Voraus gemessenen Dezentrierungskorrektur. In einem Prozess vor der Bestückung wurden die Lötkontakte jedoch schon mit einer Paste versehen. Diese hat zwei Absichten: sie enthält unter anderem kleine Lötpartikel sowie Flussmittel für den nachfolgenden Lötprozess, aber sorgt durch ihre klebrige Konsistenz auch dafür, dass die Komponenten an ihrer entsprechenden Einbaustelle provisorisch befestigt bleiben. Nachdem die Leiterplatten mit dieser Lötpaste vorbereitet wurden und mit den elektronischen Bauteilen bestückt worden sind, sind sie bereit für den Lötvorgang. Für die SMT-Montagetechnik eignet sich das sogenannte Reflow-verfahren sehr gut. Hierbei wird die Platine graduell und ganz gleichmäßig auf hohe Temperaturen erhitzt, sodass das in der Lötpaste enthaltene Lot schmilzt und das Flussmittel aktiviert wird. Anschließend zieht die Oberflächenspannung der geschmolzenen Lötpaste die SMD-Komponente perfekt mittig auf die Lötkontakte. Nachdem die Leiterplatte wieder gleichmäßig abgekühlt ist und die Lötstellen erstarrt sind, sind die Bauteile auf drei Ebenen mit der Platine verbunden: mechanisch, elektrisch und thermisch.

Alle oben genannten Eigenschaften führen dazu, dass die Surface-Mount Technologie in der Massenproduktion zur meist benutzten Montagetechnik wurde. Die Verbreitung dieser Technologie in der Massenproduktion wurde begünstigt durch die Produktionskosten. Vorteile wie zum Beispiel die kleinere Anzahl an Löchern die gebohrt werden müssen, engere Leiterbahnenabstände und eine erhöhte Fertigungsqualität durch die Automatisierung führen dazu, dass die Kosten und der Zeitaufwand sowohl in der Produktion wie auch beim Entwurf der Leiterplatte gesenkt werden können. Somit sind massenproduzierte SMD-Platinen weitaus billiger als ihre THT-Gegenstücke.

Die Eigenschaft, dass SMT-Komponenten sich gut eignen, um in großen Produktionslinien ohne beziehungsweise mit wenig Handarbeit hergestellt zu werden, bringt jedoch einige Nachteile mit sich. So liegen beispielsweise die Kosten einer Fertigungsstraße für SMT-Leiterplatten weitaus höher als die für eine THT-Montagelinie. Obwohl man durch die automatisierten Maschinen viel Zeit und Geld beim Anlauf einer neuen Platine sparen kann, sind die Anschaffungskosten der Produktionsanlagen sehr hoch. Für kleinere Auflagen lohnt es sich also nicht, auf die surface-mount Technologie umzusteigen. Dazu kommt, dass verschiedene Baukomponenten, die hohen mechanischen Kräften ausgesetzt sind, per SMT nicht entsprechend befestigt werden können. Für Bauteile, wie z.B. Steckverbinder muss also weiterhin die through-hole Technik angewendet werden.

Auch für Hobbyelektroniker sind SMD-Bauteile unbrauchbar. Ein SMT-Äquivalent für die üblichen THT-Lochrasterplatinen existiert nicht, sodass man die rohe Leiterplatten auswärts produzieren lassen muss. Hierzu muss man jedoch zunächst einen Schaltplan und Layout für die Leiterbahnen digital zeichnen und das Design dann bei einer Leiterplattenfirma herstellen lassen. Dieser Prozess kann sich als zeitaufwendig und teuer

herausstellen und ermöglicht es nicht, schnell Fehler zu verbessern oder den Schaltplan zu verbessern. Hat man jedoch diese Hürde überwunden, muss man zusätzlich gutes Werkzeug und Fingerspitzengefühl besitzen, um diese winzigen Bauteile zu verlöten. Auch Reparaturen werden hierdurch um einiges schwieriger, besonders da SMT-Komponenten meistens kleiner sind, sind die Beschriftungen nicht so ausdrücklich und auch kleiner.

### Flexible circuit

Flexible Leiterplatten sind technisch gesehen keine eigene Montagetechnik, jedoch können an ihnen elektronische Bauteile sowie ganze Platinen befestigt werden. So werden flexible Schaltungen hauptsächlich benutzt, um Leiterplatten miteinander zu verbinden, jedoch auch um ganze Schaltungen zu generieren, wie z.B. in LED-Strips. Sobald man Baugruppen mit mindestens einem Freiheitsgrad verbinden muss, stellen die FPC-Verbinder (englisch für Flexible Printed Circuit) eine hervorragende Lösung dar. Flexible Platinen bestehen aus einem dünnen Kunststofffilm, auf welchem die Schaltung aufgetragen wird. Um die Leiterbahnen zu schützen, wird die Leiterplatte auf der Oberseite mittels eines Polymers versiegelt. Als Basissubstrat für die FPC-Verbinder kommt oft Polyimid zum Einsatz, Kunststoffe wie beispielsweise Mylar, Nylon oder Polyesterfolie können jedoch auch benutzt werden. Als Leitermaterial wird meistens Kupfer benutzt, auch Silber kommt in seltenen Fällen zum Einsatz. Für einfache Schaltungen werden die Leiterbahnen aus einem dünnen Metallfilm geschnitten und zwischen den Kunststofffilmen laminiert. Für komplexere FPC-Verbinder können per Siebdruck Leiterbahnen aus Silber auf Polyester aufgetragen werden. Zusätzlich kann man flexible Leiterplatten in zwei Typen kategorisieren: rigid flexible und flat flexible. starr-flexible Schaltungen haben entweder extern oder intern klassische starre Platinen, hierdurch bieten sich mehr Möglichkeiten zur Montage der Komponenten. Flachbandleitungen sind durchgehend flexibel und flach. Somit sind sie extrem leicht und beständig und können somit in extrem dichten elektronischen Anwendungen problemlos benutzt werden.

Flexible Leiterplatten finden heutzutage in sehr vielen Bereichen Verwendung, sowohl in Alltagsgeräten als auch in speziellen Einsatzgebieten mit hohen Anforderungen. FPC-Verbinder besitzen nicht nur die hervorragende Eigenschaft flexibel zu sein und somit in

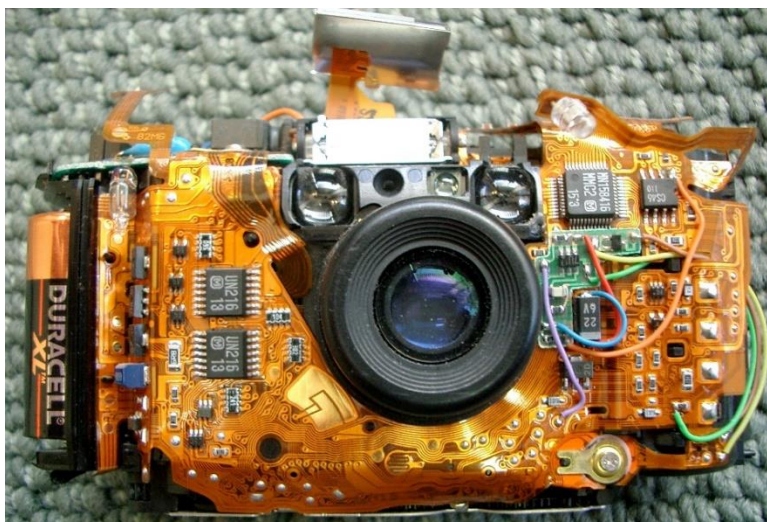


Abbildung 17: Flexible Leiterplatten in einer Kamera

komplex geformten Aussparungen eingebaut werden können, flexible Platinen können auch besser Hitze ableiten wie ihre starre Variante. Außerdem vertragen sie extrem hohe Temperaturen und Vibrationen besser. So findet man heute FPC-Verbinder in sehr vielen Geräten. Die im Alltag wohl bekanntesten

Anwendungen von FPC-Verbindern sind z.B. die Verbindung zwischen Computer und Bildschirm bei Laptops oder die Verbindung vom Druck- und Scankopf bei einem Drucker. In der Robotik und Sattelitenindustrie werden wesentlich komplexere flexible Leiterplatten eingesetzt, welche bis zu drei Freiheitsgrade und Millionen an Bedienspielen ermöglichen.

### Unser Recycling-Experiment

Als zentrales Element unseres Memoires, haben wir uns die Aufgabe gestellt, selbst eine Leiterplatte zu recyceln. Dabei sollten möglichst viele wiederverwendbare Teile und Rohstoffe herausgelöst werden. Um dies zu erreichen experimentieren wir selbst, um in unseren Möglichkeiten stehende Methoden zu finden, mit denen wir die Stoffe herauslösen können. Diese verwendeten Methoden müssen dabei nicht unbedingt so in der Realität zum Recycling von Leiterplatten zum Einsatz kommen, was schwer zu beurteilen ist, aufgrund von wenigen Informationen in diesem Bereich. Da das Trägermaterial der Leiterplatte selbst aus nicht recycelbarem Epoxid-Kunststoff besteht, müssen sich unsere Versuche auf alles, was sich darauf, beziehungsweise dazwischen befindet, konzentrieren. Es muss allerdings auch Sinn machen die einzelnen zu recycelnden Stoffe und Teile herauszulösen. In das Trägermaterial eingegossene Glasfasern machen zum Recyceln beispielsweise wenig Sinn. So konzentriert sich unser Experiment speziell auf das Kupfer, was ein sehr gefragter und teurer Rohstoff ist. Des Weiteren wollen wir ein Verfahren ausprobieren, um die einzelnen elektrischen Komponenten und Bauteile auf ihre Funktionstüchtigkeit zu testen und herauszulösen. In nebensächlichen Versuchen wollen wir versuchen die nicht recycelbaren Materialien soweit es geht voneinander zu trennen, was die Entsorgung der Materialien deutlich erleichtert.

### Leiterplatten entkupfern

Wir haben unser Recycling-Experiment mit dem Entkupfern von Leiterplatten begonnen, da das Entkupfern der Leiterplatten neben dem Desinstallieren der elektrischen Bauteile der Leiterplatte das zentrale Anliegen von unserem Experiment ist. Auch wenn es sich bei einer einzelnen Leiterplatte um nur sehr wenig Kupfer handelt, kann das Entkupfern von Leiterplatten im großem Maßstab jedoch wirtschaftlich sein, da im Elektroschrott sehr viele Leiterplatten anfallen. Die starke Digitalisierung der Industrie, sowie deren Produkte treiben die Zahl der Leiterplatten, welche im Elektroschrott anfallen immer weiter in die Höhe. Zudem unterstützt die Rohstoffknappheit, insbesondere bei Kupfer deren Preis langfristig langsam immer weiter in die Höhe. Aus diesen Gründen denken wir, ist es sinnvoll auch die kleinen Mengen an Kupfer, die sich auf Leiterplatten befinden zu recyceln.

Eine solche Leiterplatte zu entkupfern ist allerdings gar nicht so einfach wie es scheint, da alle Kupferbahnen von Leiterplatten von einer dünnen Kunststoffschicht überzogen sind. Des Weiteren sind die Leiterbahnen öfters mehrschichtig, so, dass sich auch in dem Trägermaterial der Leiterplatte eine oder mehrere getrennte Leiterschichten befinden. So ist es natürlich schwierig an das Kupfer heran zu kommen.

Um die Leiterplatten zu entkupfern müssen wir allerdings erstmal eine geeignete Methode finden, um dies zu erreichen. Dabei haben wir uns für ein elektrochemisches Verfahren entschieden, das galvanische Beschichten mit Metallen. Das galvanische Beschichten wird meist dazu verwendet metallische Gegenstände, wie zum Beispiel eine Stahl-Schraube mit einem anderen unedleren Metall wie Zink elektrochemisch zu beschichten. Durch dieses Metall ist die Schraube korrosionsbeständiger.

Bei unserem Experiment wollen wir das Kupfer der Leiterplatte galvanisch auf zwei Kupferstäbe elektrochemisch auftragen. Wir beschichten also die Kupferstäbe mit dem Kupfer der Leiterplatte.

### Aufbau und Funktionsweise

Um das Kupfer der Leiterplatte zu lösen und auf den Kupferstäben aufzutragen ist elektrische Arbeit nötig. Dazu werden die beiden Gegenstände an eine Gleichstromquelle angeschlossen, so dass die Leiterplatte an einen Pol angeschlossen wird und die beiden Kupferstäbe an den anderen Pol. Dabei bildet die Leiterplatte die Anode (Elektronenmangel) und die Kupferstäbe die Kathode (Elektronenüberschuss). Dabei ist zu beachten, dass die abzutragenden Leiterbahnen der Leiterplatte elektrisch mit dem Pluspol der Gleichstromquelle verbunden sind. Dies ist nicht so einfach, da die Leiterplatte selbst aus elektrisch nichtleitenden Materialien besteht, sprich Kunstharz, Glasfaser, Hartpapierschichten. Die beiden Elektroden müssen allerdings noch miteinander verbunden werden, so dass Strom fließen kann. Dazu dient eine Kupfersulfat-Pentahydrat-Lösung. Das Kupfersulfat enthält dabei  $\text{Cu}^{2+}$  Ionen. Bei dem Lösemittel handelt es sich um entsalztes Wasser. Die beiden Kupfer-Elektroden werden in die Kupfersulfat-Pentahydrat-Lösung getaucht. Diese Lösung bildet eine Ionenbrücke zwischen den Elektroden, leitet allerdings nicht direkt den elektrischen Strom, was einen Kurzschluss zu Folge haben würde. Über diese Ionenbrücke ist der elektrische Kreis geschlossen.

Wenn man nun die Stromquelle anschaltet und sich eine Spannung aufbaut, werden der Anode (der Leiterplatte) Elektronen entzogen. Den neutralen Kupferatomen werden bei genügend Spannung jeweils zwei Elektronen entzogen und werden zu  $\text{Cu}^{2+}$ -Kationen. Diese Ionen wandern durch die Kupfersulfat-Lösung, wobei diese durch die elektrisch negativ geladene Kathode angezogen werden. Währenddessen werden die entnommenen Elektronen durch die Gleichstromquelle auf die Kathode befördert. Dort treffen die Kupfer-Kationen auf den vorhandenen Elektronenüberschuss und nehmen jeweils zwei Elektronen auf und werden neutralisiert. So wird die Kathode (Kupferstäbe) nach und nach von einer Kupferschicht bedeckt, welche aus neutralen Kupferatomen besteht.



## Kupfergewinnung aus Leiterplatten

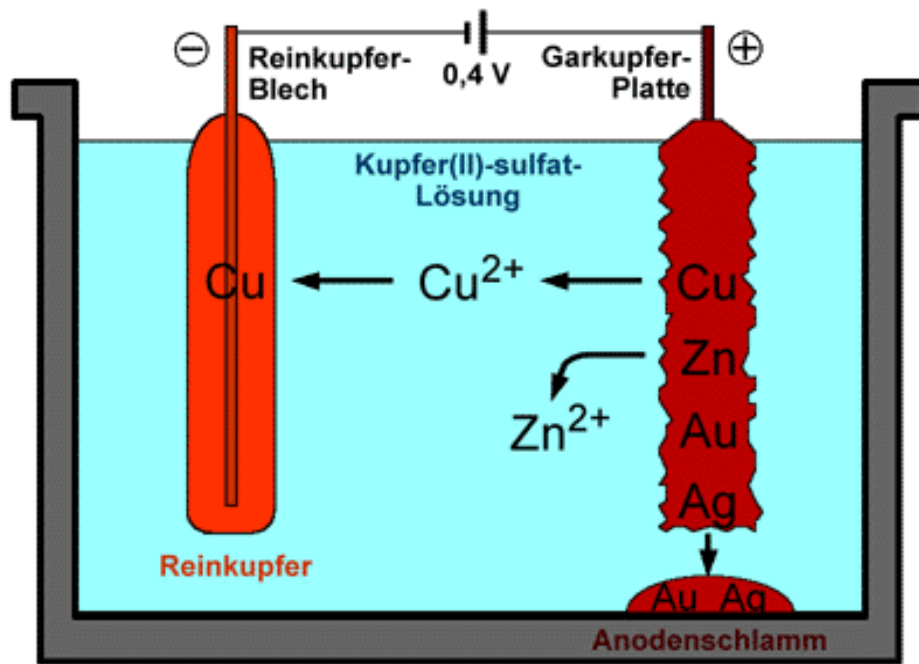


Abbildung 18: Hier sieht man das Prinzip des Entkupferungs-Prozesses. An der Kathode (links) ist der zu beschichtende Kupferstab angeschlossen und an der Anodenseite ist die Leiterplatte angeschlossen. Auf diesem Bild ist der reinigende Effekt dieses elektrochemischen Verfahrens gut illustriert. So gehen unedlere Metalle wie Zink als Ion in Lösung auf und verweilen darin. Andere edlere Metalle hingegen werden nicht ionisiert und sinken aufgrund des Abbaus ab. Diese bilden den Anodenschlamm.

Die benötigte Stromstärke ist dabei proportional zu den fließenden Kupfer-Ionen, also der Geschwindigkeit, mit der die Kupferatome auf die Kathodenseite wandern. Um diese Geschwindigkeit zu erhöhen muss man die Spannungsdifferenz zwischen Anode und Kathode erhöhen. Auch die Konzentration des Kupfersulfat-Pentahydrates spielt eine Rolle in der Geschwindigkeit der Beschichtung, denn diese Konzentration bestimmt die Leitfähigkeit der Lösung. Ist diese höher, ist weniger Spannung nötig, um die gleiche Beschichtungs-Geschwindigkeit zu erreichen.

Bei diesem Verfahren kommt es zu einem vorteilhaften Nebeneffekt. Dieser Effekt ist eine automatische Reinigung des Kupfers von anderen Metallen. Bei einem optimalen Ablauf des Experimentes, gehen, neben den Kupferatomen, auch andere unedlere Metalle, wie zum Beispiel Zink in Lösung auf. Diese ionisierten unedleren Metalle werden hingegen nicht an der Kathode angesiedelt und bleiben in der Kupfer-Sulfat-Lösung gelöst. Metalle, die edler als das Kupfer sind, wie Gold und Silber sinken während dem Abbau des Kupfers an der Anodenseite auf den Boden des Behälters. Mit diesem Verfahren erreicht das neu angesiedelte Kupfer eine Reinheit von 99,95%. Durch diesen reinigenden Effekt kommt diese Methode, die Elektroraffination auch in der Kupferverarbeitung zum Einsatz, womit bis zu 99,99% reines Kupfer erzeugt werden kann.

Die Elektroraffination hat in der Kupferverarbeitung einen Energieaufwand von 360-380 kWh pro Tonne Kupfer.

### Experimententwicklung und Verbesserungen

#### Erster Versuch

Unser Experiment haben wir der vorher beschriebenen Prozedur entsprechend aufgebaut. Dabei haben wir folgende Geräte und Teile verwendet:

- eine Netz-Gleichstromquelle mit einer maximalen Ausgangsleistung von 30V und 20A
- ein Stativ mit entsprechenden Befestigungsmechanismen
- zwei Kabel
- eine Leiterplatte (Anode)
- zwei Kupferstäbe (Kathode)
- eine große Glasschüssel
- ein dünnes Kupferstück

Um erst einmal zu testen, ob unser Experiment funktionieren würde, haben wir als Anode Leiterplatten verwendet, welche nicht mit einer Kunststoffschicht überzogen sind. Dabei verwenden wir Fehlproduktionen von Leiterplatten aus dem FabLab (Schuleinrichtung, um unter anderem Leiterplatten zu entwerfen und zu ätzen).

Als erstes füllen wir das entsalzte Wasser in die große Glasschüssel ein und lösen dreieinhalb Teelöffel Kupfersulfat-Pentahydrat (in Kristallform) in diesem Wasser auf. Die Leiterplatte klemmen wir zusammen mit einem dünnen Kupferstück in die Krokodilklemme ein, diese werden dann mit dem Pluspol der Netz-Gleichstromquelle verbunden. Das Kupferstück dient dazu alle getrennten Leiterbahnen der Leiterplatte elektrisch mit der Klemme zu verbinden. Auf der anderen Seite schrauben wir die zwei Kupferstäbe in eine dafür vorgesehene Halterung ein und verbinden diese mit dem Minuspol der Stromquelle.

#### Resultat

Leider hatten wir anfangs die Anschlüsse vertauscht und wunderten uns, warum sich eine schwimmende schwarze Brühe um die Anode ansammelte. Nachdem wir dies bemerkten tauschten wir diese. Als wir dann die Gleichstromquelle anschalteten, geschah über eine halbe Stunde erst mal gar nichts. Als wir die Leiterplatte allerdings herausnahmen fiel uns auf, dass sich ein ganz klein wenig Kupfer gelöst hatte. Also wussten wir, dass es funktioniert hatte.

### Zweiter Versuch

Um den elektrochemischen Vorgang zu beschleunigen, haben wir erst einmal die Reaktion in einem separaten kleineren Gefäß wiederholt. Zudem setzten wir die Stative und die Schüssel mit der Kupfersulfat-Pentahydrat-Lösung auf drei separate, höhenverstellbare Plattformen, mit denen wir die Höhe der Leiterplatte manuell regulieren konnten. So konnten wir die Leiterplatte kontinuierlich eintauchen und uns nach der Geschwindigkeit, mit der das Kupfer abgebaut wurde, richten. Dabei war der Aufbau und die Ausführung die gleiche mit dem Unterschied, dass wir die Kupfersulfat-Pentahydrat Konzentration stark erhöhten (um das 2 bis 3- fache). Dabei stellten wir eine gewisse Verbesserung fest. So erhöhten wir die Konzentration an Kupfersulfat-Pentahydrat auf das ungefähr gleiche Verhältnis, wie in dem kleinen Gefäß. Dabei konnten wir die Konzentration an der Stärke der Verfärbung des Wassers ablesen, denn das Kupfersulfat-Pentahydrat färbt das Wasser blau.

Des Weiteren testeten wir in dem großen Gefäß, ob es Unterschiede in der Reaktionsgeschwindigkeit bei Ändern der Elektrodenabstände gäbe. Dabei stellten wir allerdings keine nennenswerten Veränderungen fest.

### Dritter Versuch

#### Verbesserungen

Da uns die Reaktion immer noch nicht schnell genug ablief, wollten wir die Spannung erhöhen. Da wir leider keine Netz-Gleichstromquelle fanden, welche mehr als 30V Ausgangsspannung erzeugen kann, entschlossen wir uns zwei Netz-Gleichstromquellen in Reihe zu schalten, um 60V Ausgangsspannung erzeugen zu können.

Um einen besseren Überblick über die Stromstärke und Ausgangsspannung zu haben, schlossen wir zwei Multimeter an. Ein Multimeter ist zwischen Kathode und dem

Minuspol-Ausgang der Gleichstromquelle zwischengeschaltet, der die während der Reaktion fließende Stromstärke misst. Der andere Multimeter ist zwischen Ein- und Ausgang der beiden in Reihe geschalteten Gleichstromquellen angeschlossen und misst die Spannungsdifferenz der beiden Elektroden.

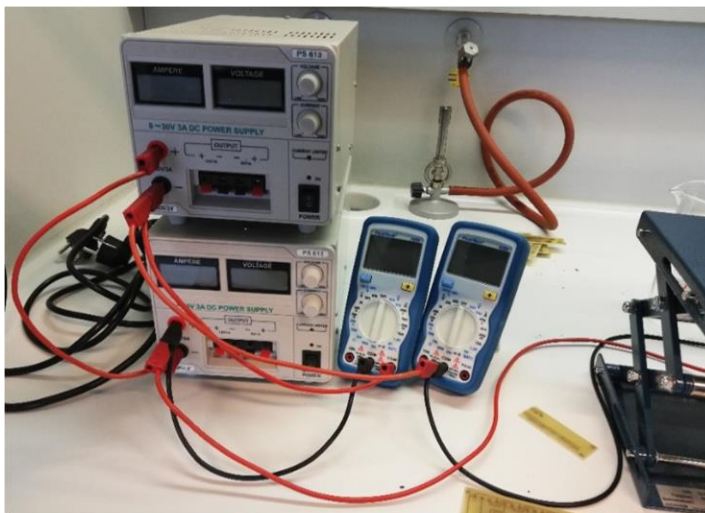


Abbildung 19: Hier sieht man die beiden regulierbaren Netzgeräte (aus) und die zwei Multimeter (aus), womit wir die Spannung und die Stromstärke regulierten.

## Kupfergewinnung aus Leiterplatten

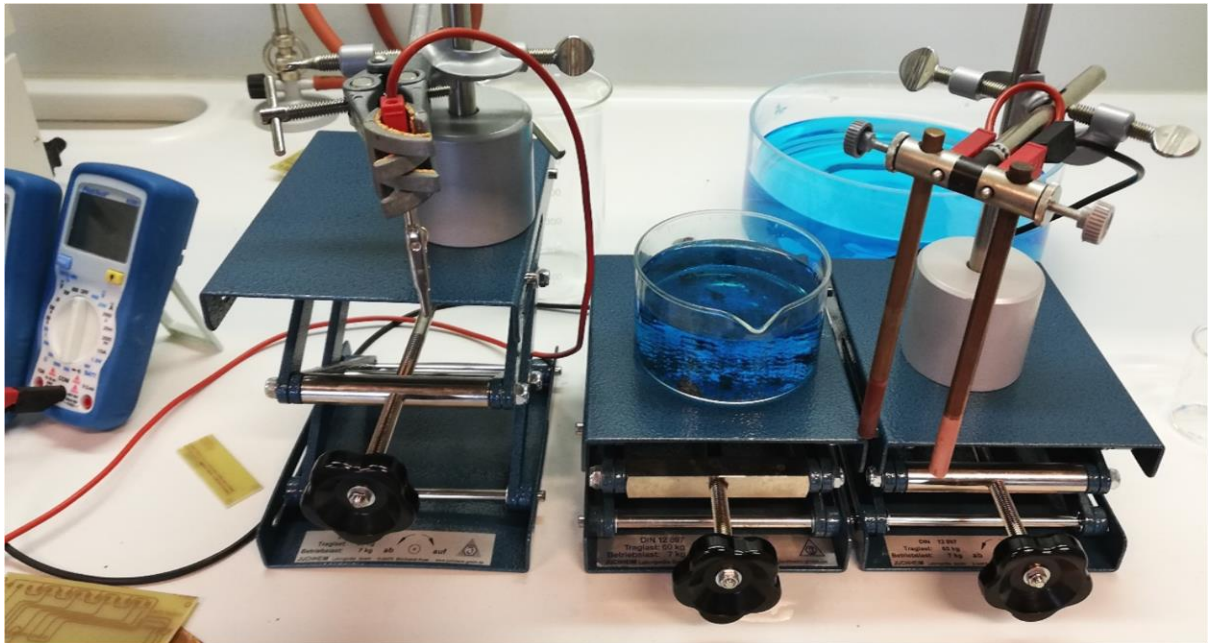


Abbildung 20: Das Bild zeigt das Experiment beim dritten Versuch außer Betrieb. Zu erkennen sind die drei höhenverstellbaren Untersätze. Auf dem linken befindet sich das Stativ mit der Krokodilklemme, an der die Leiterplatte befestigt wird (Anode). Auf dem Untersatz in der Mitte befindet sich das Gefäß mit der Kupfersulfat-Lösung. Auf dem rechten ist das andere Stativ mit den Kupferstäben (Kathode).

### Resultat

Als wir den Versuch durchführten konnten wir eine erhebliche Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit feststellen. Durch die Spannungserhöhung und Konzentrationserhöhung war die Reaktion so stark und schnell abgelaufen, dass man mit bloßem Auge den Abbau der Leiterbahn beobachten konnte (bei 50V). Währendem konnte man eine Kupferionenwolke sehen, welche sich in der Kupfersulfat-Pentahydrat-Lösung von der Leiterbahn löste und in Richtung Kathode gezogen wurde.



Abbildung 21: Die Bilder zeigen das hervorragende Ergebnis. Die Versuchsl Leiterplatte, auf der deutlich zu erkennen ist, dass die parallel rot nachgezeichneten Kupferbahnen, welche elektrisch verbunden waren, praktisch ganz entkupert sind.





Abbildung 22: Die auf den Kupferstäben aufgetragene Schicht an Reinkupfer. Den vorderen Stab haben wir zur Verdeutlichung poliert.

Zudem wurden kleine elektrische Löcher in der Kupferleiterbahn durch die höhere Spannung einfach überbrückt, also per kleinem Lichtbogen überbrückt.

Ein Problem bei diesem und den vorherigen Versuchen war, dass die Leiterbahnen der verwendeten Leiterplatte keine gleichmäßige Kupferverteilung aufwiesen, da die Leiterbahn teilweise durchbohrt war. Das Problem war, wenn man die gesamte Leiterplatte in die Kupfersulfat-Pentahydrat-Lösung eintauchte, dass sich die Kupferschicht überall im gleichen Maße abbaute, so dass das Kupfer an den durchbohrten Stellen sehr viel schneller abgebaut war als am Rest der Leiterbahn. Dadurch war der gesamte untere Teil der Leiterbahn elektrisch abgetrennt und konnte nicht fertig abgebaut

werden. Dem konnten wir zwar mit manuellem absenken der höhenverstellbaren Plattformen entgegenwirken, jedoch ist das nicht möglich bei komplizierten Leiterplatten und ist schwierig industriell umzusetzen.

Also beschlossen wir die einzelnen an der chemischen Reaktion beteiligten Komponenten, sprich Stative mit daran befestigten Elektroden und der Glasschüssel mit enthaltener Kupfersulfat-Pentahydrat-Lösung, auf höhenverstellbare Untersätze zu stellen. So ist es möglich von Hand die Höhe der Leiterplatte während der Reaktion so zu regulieren, dass sich die gesamte Leiterbahn abbauen kann. So konnten wir die Leiterplatte kontrolliert in die Lösung absenken. Beim langsamen Eintauchen der Leiterplatte in die Lösung wurde der sich unter dem Lösungsspiegel befindliche Teil in Sekunden abgebaut. Die zu entkupfernde Leiterplatte wurde immer weiter langsam in die Lösung versenkt. So wurde sichergestellt, dass es während der Reaktion nicht zu elektrischen Unterbrechungen kommt.

Unser Experiment funktionierte nun sehr gut und ging zügig voran. Nun galt es mit dieser Methode mehrere Leiterplatten gleichzeitig zu entkupfern um die Recyclingmethode in größerem Maßstab umzusetzen.

### Anschluss der Leiterplatten

Um unser Experiment auf ein Industrietaugliches Verfahren weiter zu entwickeln, war es nötig das Problem mit der Stromverteilung auf der Leiterplatte zu lösen. Das Problem bestand darin, dass alle Leiterplatten, mit verschiedenen und unterbrochenen Kupferleiterbahnenmustern, in unserem jetzigen Verfahren individuell und aufwendig mit einem Kupferstück verbunden werden mussten. Daher mussten wir ein unkompliziertes Verfahren erproben, mit dem es möglich war, alle verschiedenen Leiterplatten mit der Anode zu verbinden. Dazu hatten wir zwei Ideen:

## Kupfergewinnung aus Leiterplatten

- Die Anode als stromleitendes Gitter auszuführen und die Leiterplatten darauf befestigen, so dass der Strom über dieses Gitter auf alle verkupferten Stellen der Leiterplatten gelangt, auch, wenn diese unterbrochen sind.
- Alle Leiterplatten vor dem Entkupfern schreddern und das entstandene Granulat auf einer flachen Anode verteilen, so dass die einzelnen Kupferstücke mit der Stromquelle Kontakt haben.

### Anodengitter

Die Erprobung der Idee mit dem stromleitenden Gitter war erst einfacher realisierbar, da wir keinen Schredder auftreiben konnten. So bauten wir unser Experiment folgendermaßen um:

Wir nahmen als stromleitendes Gitter ein Aluminiumfliegendraht, und schnitten diesen auf die ungefähre Größe der Leiterplatte zu. Dieses Gitter legten wir auf die mit Kupferbahnen versehene Seite der Leiterplatte. Um den Kontakt zwischen Leiterbahnen und Fliegendraht herzustellen, legten wir Holzspieße quer auf das Gitter und darauf wiederum eine andere Leiterplatte, die allerdings nur mechanischen Zwecken diente und keinen Einfluss auf die Reaktion hatte, da diese nicht elektrisch mit der Stromquelle verbunden war. Die beiden Leiterplatten wurden mit Klemmen zusammengepresst, sodass sich der elektrische Kontakt herstellte. Der Fliegendraht wurde mit einer einfachen Klemme an die Stromquelle angeschlossen.

### Resultat

Nachdem wir die Konstruktion in die Lösung getaucht hatten und das Experiment davon abgesehen gleichermaßen wie beim dritten Versuch durchführten, traten unerwartete Probleme auf. Die Stromverteilung funktionierte einwandfrei und war ein Erfolg, jedoch gab es zahlreiche unerwünschte Nebenreaktionen am Aluminiumgitter und den verchromten Klemmen. An ihnen lagerte sich schnell Kupfer ab. Außerdem kam es zu einer großen Gasentwicklung am Metallgitter. Daraufhin brachen wir das Experiment ab.

Später kamen wir zu dem Schluss, dass das Problem daran lag, dass das Gitter und die Klemmen aus weitaus unedleren Metallen, die ihre Elektronen leichter abgeben, als das Kupfer bestanden. So kam es zu der Störung der gesamten Reaktion und den unerwünschten Nebenreaktionen. Da die Kupfersulfat-Pentahydrat-Lösung eventuell chemisch verändert und verunreinigt wurde, entschlossen wir uns dazu die Lösung dieses Durchlaufes zu ersetzen.

## Weiterer Experimentierverlauf und Auswirkungen der Corona-Pandemie auf die Experimentierreihe

Nach diesem Fehlschlag konzentrierten wir uns auf die Idee mit dem Schreddern, da wir kein Gitter auftreiben konnten, das aus einem Metall bestand, das edler ist als Kupfer. Zudem sind solche Metalle wie Silber, Gold und Platin extrem teuer. Kupfer kam auch nicht in Frage, da sich das dünne Gitter schnell abbauen würde und ständig ersetzt werden muss.

Doch bevor wir das Experiment mit dem Schredder-Vorgang organisieren und ausführen konnten, wurden wir von der, durch die Corona Pandemie bedingte, Schulschließung überrascht. So boten sich keine Möglichkeiten weitere Experimente durchzuführen, da die Schulschließung bis über das Abgabedatum der Arbeit hinausreicht.

Trotzdem hatten wir während der Schulschließung eine Idee, wie wir das Problem mit der Anode lösen könnten, ohne dabei ein teures edleres Metall zu verwenden. So würde die Anode aus Grafit sein, also dem Halbmetall Kohlenstoff bestehen, wobei Kohlenstoff deutlich edler ist als das Kupfer.

Leider haben wir nun keinerlei Möglichkeiten, um die Grafitanode in einem Experiment zu testen. Trotzdem scheint uns in der Theorie die Verwendung von Grafit als Stromleiter die plausibelste Wahl zum Erfolg.

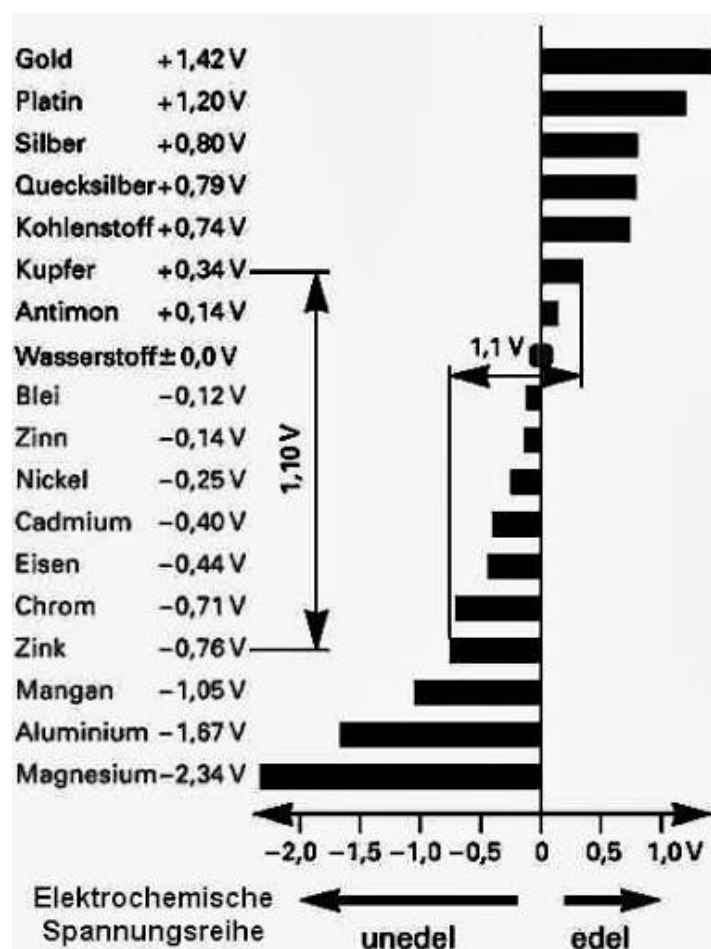


Abbildung 23: Auf dieser Grafik sind etliche Metalle nach Edelheitsgrad aufgelistet. Man kann also sehen, dass das Grafit (Kohlenstoff) das einzig bezahlbare Material ist, mit dem es möglich ist, dieses als Elektrode in der Lösung einzusetzen.

## Aufbau einer Recyclinganlage im industriellen Maßstab

Im industriellen Maßstab stellen wir uns die Anlage natürlich ganz anders vor, als wir das Experiment durchgeführt haben. So soll die Anlage ein Fördersystem besitzen und eine „Produktionsstraße“ bilden. Des Weiteren sollen so viele Abläufe wie möglich mithilfe Computer- und Robotertechnik komplett autonom ablaufen. Es soll unter dem Strich fast nichts weggeworfen werden.

Die Anlage ist allerdings für große Mengen an Leiterplatten gedacht, denn wir können es uns nur sehr schwer vorstellen, dass das Ganze für kleine Mengen rentabel arbeiten kann.

Im Folgenden werden die einzelnen Abläufe und Prozesse einer solchen industriellen Anlage näher vorgestellt.

### Leiterplattenselektion

Die angelieferten Leiterplatten können aus beliebigem, nicht gebrochenem Harz-Faser-Trägermaterial bestehen, die keine wichtige Rolle im Prozess spielen werden. Sie sollen vom Typ Fr-1, Fr-2, Fr-3 oder Fr-4 sein. Die angelieferten Leiterplatten müssen natürlich vollständig von anderen Leiterplatten sowie anderen Objekten getrennt sein, beispielsweise von Schrauben, die zum Fixieren der Leiterplatte gedient hatten etc. Sehr wichtig ist auch, dass sich keine elektrischen Kabel jeglicher Art an der Leiterplatte befinden. Flexible Leiterplatten sind ebenfalls nicht für die Recyclinganlage geeignet. Dreck spielt beim Recyceln von Leiterplatten eigentlich fast keine Rolle, da Leiterplatten im Produkt immer vor Dreck und Wasser geschützt verbaut sind. Sollte dennoch eine grob verdreckte Leiterplatte angeliefert werden, muss diese gereinigt werden, da Fremdstoffe die Scann Ergebnisse verfälschen können.

Aufgrund dieser Kriterien und möglichen Überraschungen ist es erforderlich, dass ein Angestellter die Ladung kontrolliert und auf ein Förderband legt.

### Scannen

Dieses Förderband verläuft dann in einen Scanner. Der Scanner soll die Beschaffenheit, also die verschiedenen elektrischen Bauteile und deren Position in Bezug auf die Leiterplatte erfassen. Erst wird die Platine im Scanner gestoppt. Dabei werden Fotos geschossen und die Leiterplattenunterseite mit Lasern ausgemessen. So kann der Computer die Verteilung und Abstände der einzelnen Lötstellen interpretieren. Danach wird die Leiterplatte mit einem dort eingebauten Drehmechanismus umgedreht und auf die gleiche Weise eingescannt. So erhält der Computer auch ein dreidimensionales Bild, von den elektrischen Bauteilen, die auf der Leiterplatte verbaut sind. So könnte der Computer auch die Bauteile einzeln erkennen, die sich auf der Leiterplatte befinden. Falls die Leiterplatten einmal mit der Oberseite im Scanner eintreffen, wäre das also kein Problem, da die Leiterplatte beide Seiten sowieso scannen muss. Trotzdem werden die Leiterplatten vor Verlassen des Scanners per Drehmechanismus, falls nötig umgedreht, so dass die Oberseite nach oben gerichtet ist. Die Leiterplatten fahren nun auf dem Förderband weiter zur Demontage, wo die erfassten Daten benötigt werden.



### Demontage

In der Demontage werden, wie der Name schon sagt, alle sich auf der Leiterplatte befindenden elektrische Bauteile demontiert. Die per Förderband eintreffenden Leiterplatten werden dort mit einem Roboterarm, der mit einem Greifer ausgestattet ist, vom Band genommen. Der Greifer am Roboterarm ist so gebaut, dass er die Leiterplatte seitlich festhält und dabei keine elektrischen Bauteile der Leiterplatte beschädigen kann. Der Roboter führt die Leiterplatte in eine feste Position in der Demontagemaschine. Darin befindet sich unter der Leiterplatte eine Vorrichtung, in der mehrere Laser verbaut sind. Diese Laser können per drehbarer Spiegel den Laserstrahl in eine beliebige Richtung lenken. Durch die Scann Ergebnisse, weiß das System genau, wie es die Laserstrahlen lenken muss, um die Lötstellen der einzelnen Bauteile zu erwischen. Es ist dabei wichtig, dass die Laserstrahlen alle Lötstellen eines Bauteils gleichzeitig ableuchten. Dies ist nur mit genug Lasern oder einem komplexeren optischen System realisierbar. Die Wellenlänge der Laser ist dabei so gewählt, dass das Zinn die Strahlung absorbiert und sich erhitzt, so dass es sich verflüssigt. In dem Moment, wenn sich das Zinn der Lötstellen eines elektrischen Bauteils verflüssigt, hat einer von mehreren super schnellen Greifern auf der anderen Seite der Leiterplatte das Bauteil gegriffen und zieht am Bauteil. Der super schnelle Greifer lässt das Bauteil dann in eine von vielen Röhren fallen, welche jeweils für einen anderen Typ elektrischer Bauteile (Widerstände, Transistoren, Diode, Kondensatoren, Spulen, LEDs, sonstige) vorgesehen ist. Diese Trennung der einzelnen Bauteile kann nur durch die Daten des Scanners getroffen werden.

Unsere Wahl fiel auf diese Kombination aus Laser und super schnellem Greifer, da beide extrem schnell arbeiten können und weil die Laser hitzeempfindliche elektrische Bauteile schonen, bei denen eine solch kurze Hitzeeinwirkung in der Regel kein Hitzeschaden entstehen lässt.

Die einzelnen gewonnenen elektrischen Bauteile der Leiterplatten können in Behältern am Ende des Rohrs aufgefangen werden und später auf Funktion getestet und bei einwandfreier Funktion weiterverkauft werden. Aufgrund der verkürzten Beinchen werden die weiter verkauften Teile später wahrscheinlich wieder in Leiterplatten verbaut.

Die demontierte Leiterplatte wird anschließend vom Roboterarm aus der Demontagemaschine herausgenommen und auf ein weiteres Förderband gelegt.

### Waschen

Es ist wichtig, dass die Leiterplatten vor dem Schreddern gewaschen werden, da Fremdstoffe später beim Entkupfern eventuell unerwünschte Nebenreaktionen auslösen können und den Vorgang so stören. Daher werden die Leiterplatten hier mit Wasser, welches aus Düsen herausgesprüht wird, abgewaschen und mit gezielten Gebläsen getrocknet. Das verdreckte Wasser wird gefiltert und schließlich wiederverwendet.

### Schreddern

Damit das galvanische Entkupfern bei jeder einzelnen Leiterplatte funktioniert, insbesondere auch bei Leiterplatten mit Kupferzwischenschichten, müssen die Leiterplatten in einem üblichen Schredder klein gemacht werden. Dazu endet das Förderband über dem Schredder so, dass die Leiterplatten zwischen die rotierenden, mit Zähnen versehene Stahlrollen fallen. Es folgen mehrere solcher, immer feineren Schredderstufen, bis die Stücke der Leiterplatten einen Durchmesser von etwa 1mm erreichen.

Dieses Granulat fällt wiederum auf ein Förderband, das dieses in Silos transportiert. Darin wird das Granulat kurzzeitig gespeichert, da der Entkupferungsprozess in zeitlichen Abständen nur eine bestimmte Menge an Granulat aufnehmen kann.

### Entkupfern

Das Granulat wird bei Bedarf aus dem Silo entlassen und rutscht durch ein Rohr in ein kreisrundes Becken. In diesem Becken befindet sich die Kupfersulfat-Pentahydrat Lösung, in dem der Entkupferungsprozess, genau wie in unserem Experiment beschrieben ablaufen wird. Dazu muss das kupferhaltige Leiterplatten-Granulat elektrisch mit der Anode verbunden werden. Darum ist eine elektrisch leitende Ebene aus Grafit im runden Becken installiert. Es ist wichtig, dass sich keine anderen unedleren Metalle als Kupfer im Becken befinden, die an der Reaktion teilnehmen und unerwünschte Nebeneffekte auslösen. So müssen auch die Anschlüsse aller Elektroden aus Grafit bestehen. Im Zentrum des Grafitbodens befindet sich eine Vorrichtung für einen radialen Rühr-Arm, der sich in der vertikalen Achse drehen kann. Dieser verteilt durch ein langsames kontinuierliches Drehen das Granulat und mischt dieses permanent. So wird der elektrische Kontakt zwischen Kupfer und Grafitboden hergestellt und das Kupfer kann chemisch abgebaut werden. Dieser Prozess wird relativ schnell verlaufen, da die einzelnen Kupferstücke der Leiterbahnen nur noch sehr klein sind und alle zusammen eine große Gesamtfläche aufweisen. Als Kathode werden auch hier mehrere Kupferstäbe in das Becken getaucht. Da sich mehr Kupferionen an diesen Stäben neutralisieren, die dann herabfallen, als solche, die sich als eine feste Kupferschicht am Kupferstab festsetzen, was wir bei unseren Experimenten feststellen konnten, ist es erforderlich einen Auffangbehälter unter jeden einzelnen Kupferstab zu hängen, um das gewonnene Kupfer nicht wieder mit dem restlichen Harzgranulat zu vermischen. Das gewonnene Reinkupfer ist schlussendlich hauptsächlich in Form von Pulver aus den Auffangbehältern und als verdickten Kupferstab zu finden und kann verkauft werden.

Um das Becken von dem zurückbleibenden Harzgranulat zu befreien, so dass neues kupferhaltiges Granulat nachgefüllt werden kann, wird eine Klappe in der Grafitenebene geöffnet. Der Rühr-Arm drückt das ganze Harzgranulat im Becken in diese Öffnung. Dieses fällt in den trichterförmigen Boden des Beckens, wo eine Plastikschncke das Harzgranulat aus dem Becken und der Kupfersulfat-Lösung in ein Silo befördert. Die Klappe im Grafitboden wird geschlossen und es kann ein neuer Entkupferungszyklus beginnen.

Das scheinbar „unbrauchbare“ Harzgranulat ist jedoch keinesfalls Müll. Wir können uns vorstellen, dass man dieses beispielsweise mit einem Klebstoff oder mit neuem Harz zu neuem Baumaterial pressen kann.

### 3D Grafik der Entkupferungsanlage

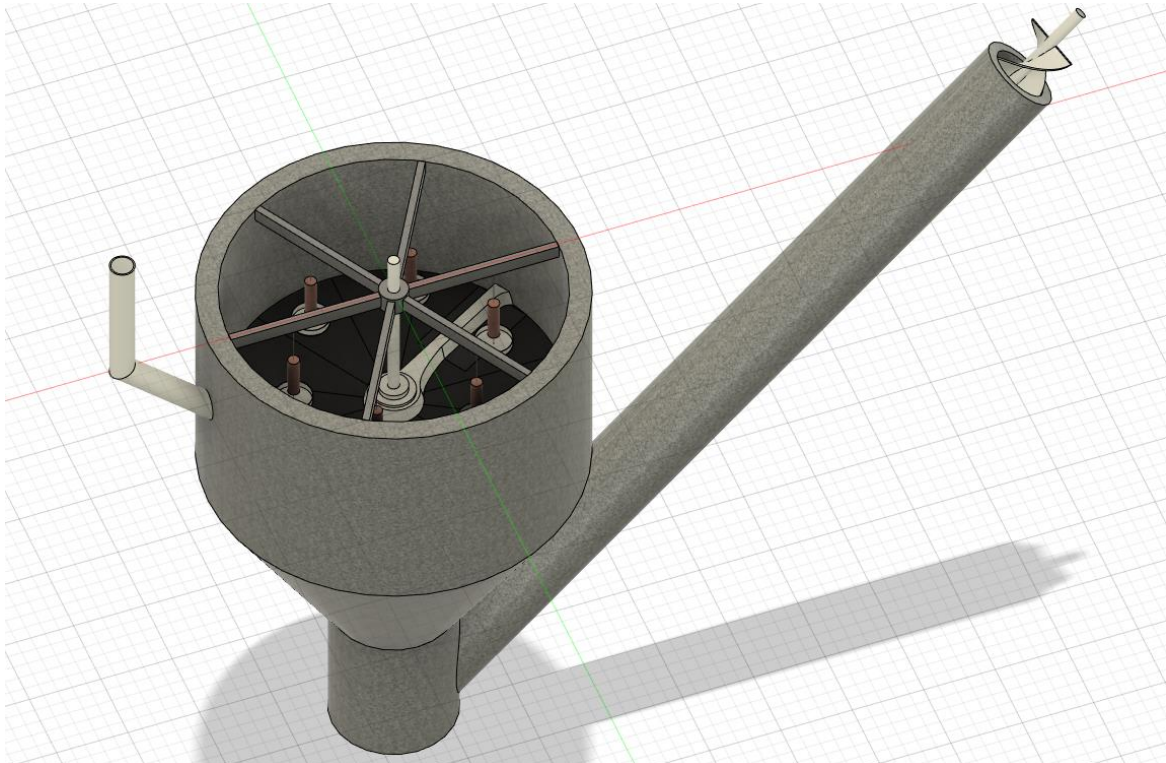


Abbildung 24: Die obige Ansicht zeigt die gesamte Entkupferungs-Anlage im industriellen Maßstab nach unseren Vorstellungen von oben. Die Außenwände der Anlage bestehen aus massivem gegossenem Beton. Das Becken soll fast komplett in den Boden der Industriehalle eingelassen sein. So wäre nur ein kleiner Teil davon sichtbar.

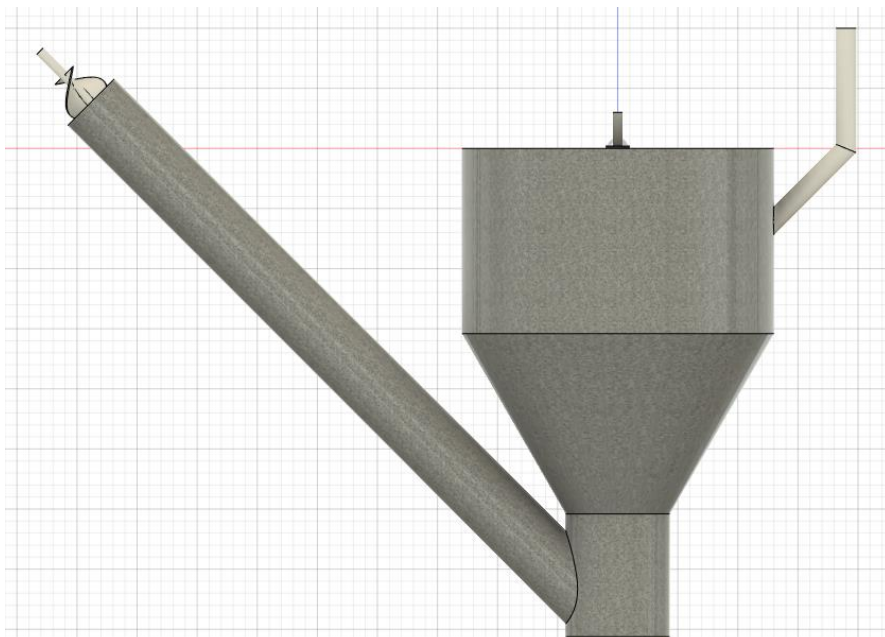


Abbildung 25: Die Vorderansicht der gesamten Anlage



## Kupfergewinnung aus Leiterplatten

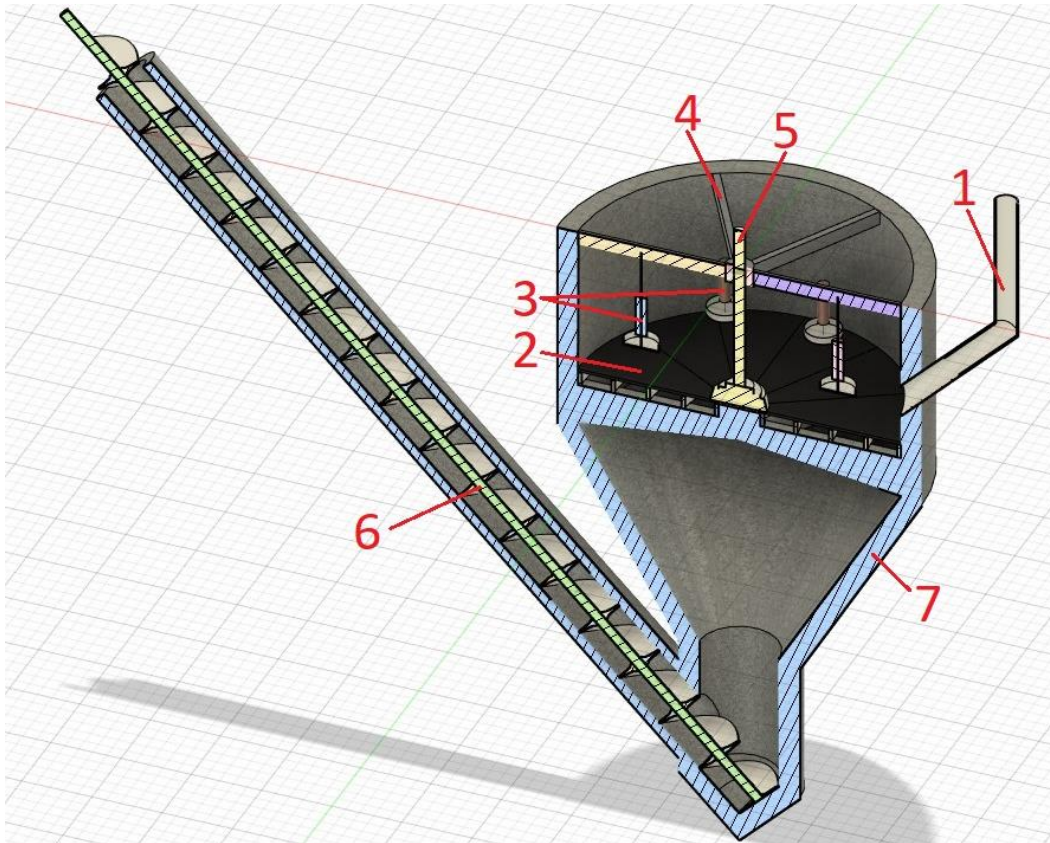


Abbildung 26: Schnittansicht der kompletten Anlage

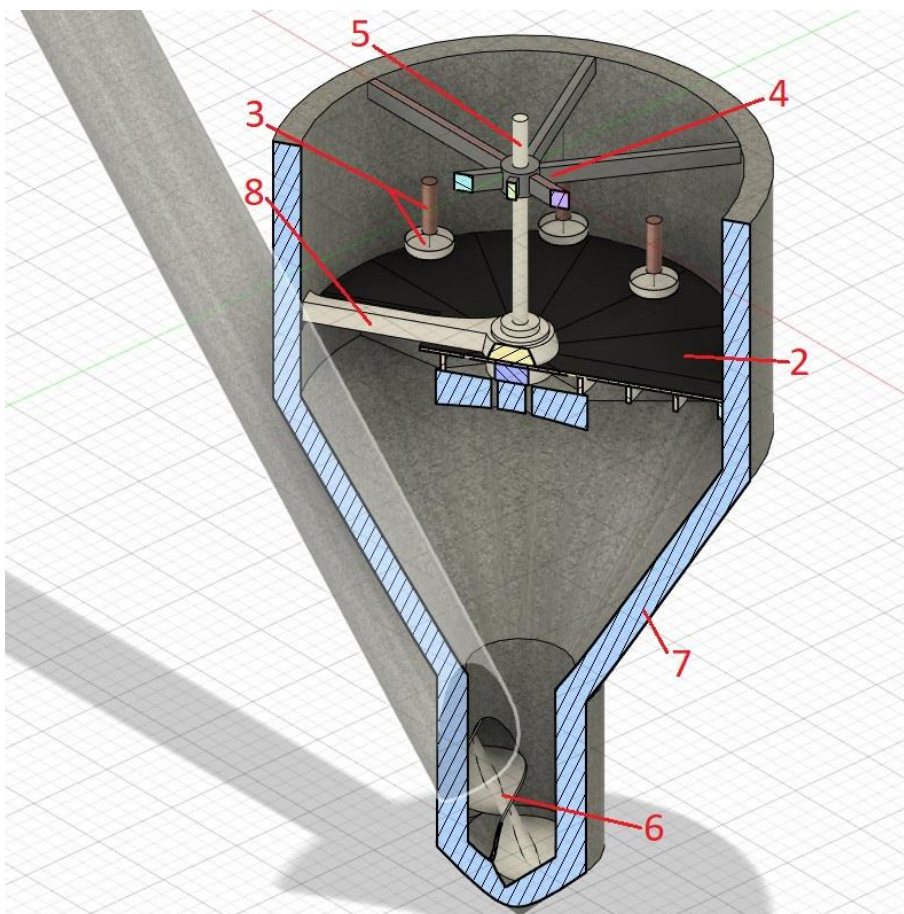


Abbildung 27: Schnittansicht des Trogs



## Kupfergewinnung aus Leiterplatten

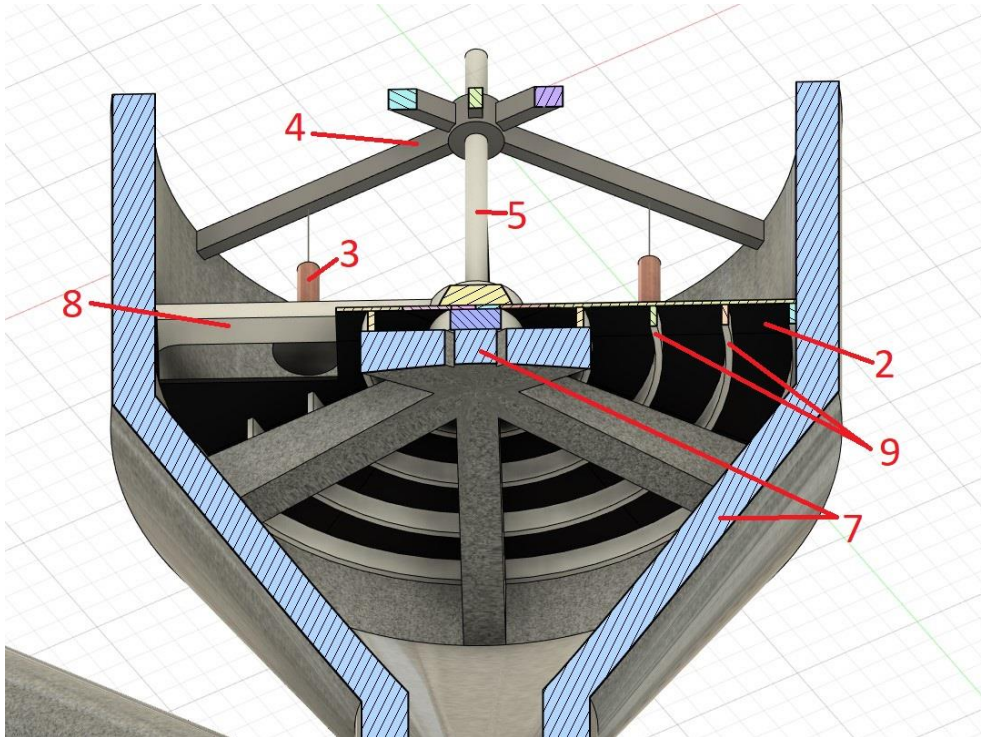


Abbildung 28: Schnittansicht der Unterseite

Auf diesen beiden Ansichten kann man den anhebbaren Rührer genauer sehen, der das Granulat im gehobenen Zustand verteilt und im Becken am Ende des Prozesses das entkupferte Granulat im herabgelassenen Zustand sammelt und zur Klappe befördert. Diese Klappe im dunkelgrauen Gرافitboden ist bei der unteren Ansicht geöffnet. Der Kunststoff-Rührer ist über die vertikale Stange extern angetrieben.

Schnittansichten:

1. Das Kupfer-Harzgranulat-Nachschubrohr aus dem Silo. Material: Kunststoff
2. Der Gرافitboden aus 12 einzelnen Gرافit-Platten dient als Anode, um die Kupferpartikel elektrisch zu verbinden. Dieser Boden wird also per Kabel an eine Stromquelle angeschlossen. Material: Gرافit, beziehungsweise ein mit Gرافit beschichtetes Material.
3. Die 6 Kupferstäbe dienen als Kathode und sind ebenfalls an die Stromquelle angeschlossen. Die Kupferstäbe sind an Seilen aufgehängt. Darunter hängt jeweils ein Auffangeimer aus Kunststoff.
4. Gerüst zum Halten der Antriebsstange und der Kupferstäbe samt Auffangeimer. Dieses Gerüst steht nicht unter Strom und befindet sich stets knapp oberhalb des Lösungsstandes. Material: Stahl
5. Die Antriebsstange des Rührers. Material: Kunststoff
6. Die Schnecke zur Heraufbeförderung des entkupferten Harz-Granulats. Material: Kunststoff
7. Betonaußenwände der Anlage.
8. Rührer zum Verteilen. Material: Kunststoff
9. Ringträger des Gرافitbodens. Material: Kunststoff

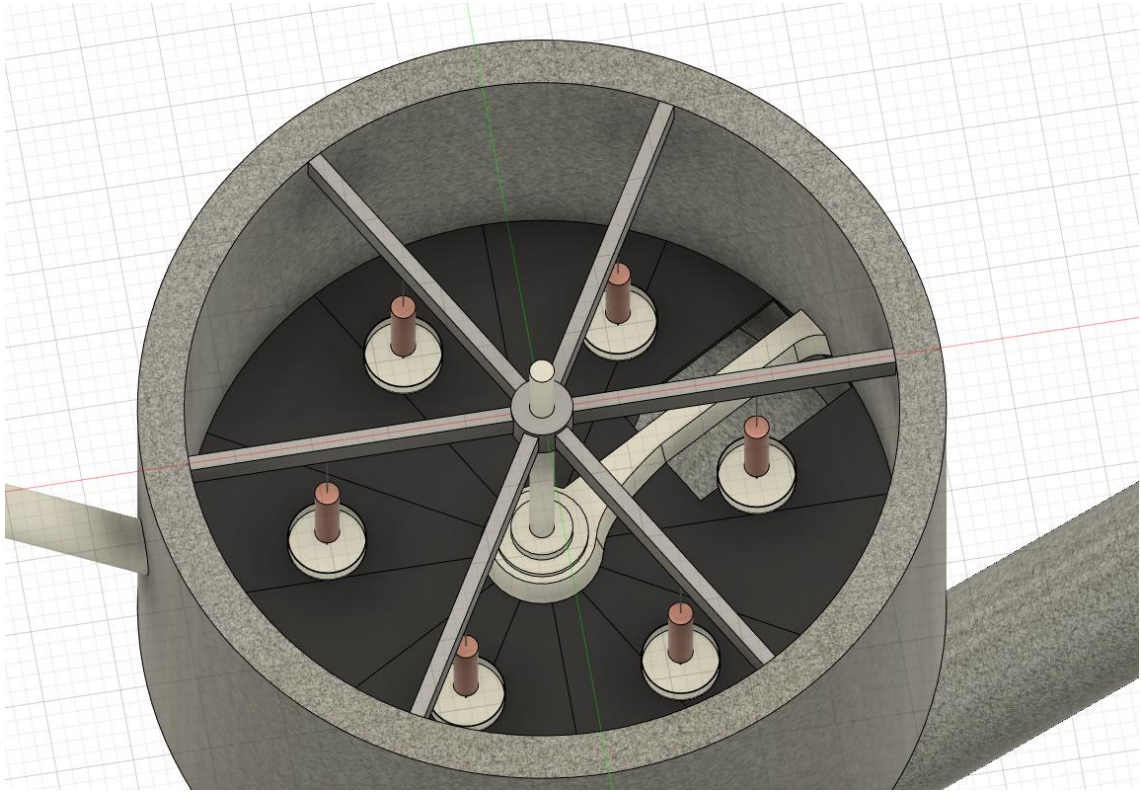


Abbildung 29: Oberseite des Trogs

## Schlussfolgerung

### Zusammenfassung und Botschaft der Arbeit

Zusammengefasst zeigt diese Arbeit, dass es mit bekannten und auch relativ einfachen Mitteln möglich ist wertvolle Ressourcen aus ausrangierten Leiterplatten heraus zu lösen. So ist es also technisch gesehen nicht immer schwer Industrieanlagen aufzubauen, um Metalle und andere Rohstoffe aus ausgedienten Geräten zu gewinnen, welche jeweils nur geringe Anteile an solchen Rohstoffen besitzen. Natürlich sind die Methoden um Rohstoffe, wie Kupfer, heraus zu lösen sehr Energieaufwendig. So macht es wirtschaftlich gesehen keinen Sinn solche Anlagen zu bauen und zu betreiben. Momentan werden daher im Kupferbereich eher Produkte, wie Transformatoren, Kabel, Motoren, Elektromagnete, Kupferleitungen (für Wasser), etc. eingeschmolzen und recycelt. Diese Produkte werfen jeweils deutlich mehr Kupfer ab als das bisschen Kupfer einer Leiterplatte. Aber hinsichtlich der Zukunft macht es, desto weiter man nach vorne schaut, immer mehr Sinn das Kupfer von solchen Produkten, wie Leiterplatten, zu recyceln. Dies liegt zum einen daran, dass unsere Technik sich weiter entwickeln wird und durch das Voranschreiten der Digitalisation immer mehr Systeme und Bauteile hergestellt werden, die kleine Mengen an Kupfer, Silber, etc. enthalten. Zudem wird immer weiter versucht, Geräte immer kleiner und kompakter zu entwerfen. Also werden global gesehen unsere Kupfer-Ressourcen, welche im Umlauf sind, immer weiter, in kleinsten Mengen, in solchen Geräten verstreut. Wenn man diese Geräte, mit kleinem Kupferanteil nicht recycelt, gehen jedes Jahr Unmengen an Kupfer verloren, was immer weiter zunehmen wird. Zum anderen steuern wir ernsthaft auf einen globalen Kupfermangel zu. „Die globalen Kupferreserven an Land liegen bei schätzungsweise über 3.000.000.000 Tonnen (Stand 2013) und würden bei gleichbleibender Nachfrage nach dem Stand 2018 theoretisch noch für etwa 150 Jahre reichen, sofern die Nachfrage ausschließlich mit neu abgebautem Kupfer gedeckt würde und man kein Kupfer recyceln würde“. Diese Berechnung zeigt die Dringlichkeit des Problems, da hier noch nicht einberechnet wurde, dass der Neukupferverbrauch rasant wächst. Dabei ist bekannt, dass in fast jedem elektrischen Gerät Kupfer verbaut ist. So werden die Kupferpreise mit der wachsenden Knappheit steigen, bis es wirtschaftlich sinnvoll ist, Kupfer aus Leiterplatten oder anderen Geräten mit geringem Anteil zu recyceln. Allerdings müssten wir dann schnell eine ganze Reihe Methoden zum Recyceln von solchem Abfall entwickeln. Doch warum sollte man nicht jetzt schon anfangen ausgediente Produkte wie Leiterplatten im großen Stil zu recyceln? Es gibt gigantische Kupfer-Tagebaue, in denen die Erde eine Kupfererz-Konzentration von bloß 0,2% aufweist, bei denen die schiere Größe die Förderung in Billiglohnländern wirtschaftlich macht. Zudem sind komplizierte chemische und auch energieaufwendige Prozesse nötig, um aus Kupfererz ein Reinkupfer zu erzeugen. Da kann man sich schon die Frage stellen, ob es nicht langfristig besser wäre, jede kleinste Menge Kupfer zu recyceln, auch wenn die Entwicklung und der Aufbau geeigneter Anlagen eine enorme Investition erfordert.

Unserer Meinung nach müssen wir unbedingt jetzt damit anfangen. Allerdings betrifft dieses Problem nicht nur das Kupfer. Auch andere wertvolle Ressourcen wie Lithium, Kobalt, Gold, Silber, usw. werden seltener. Auch andere Ressourcen wie Eisen und Aluminium, welche

nicht selten sind, sollten recycelt werden, denn der Hunger an Ressourcen steigt immer weiter und was die langfristige Zukunft bringt ist nicht wirklich absehbar. Solche Ressourcen sollten mit mehr Respekt behandelt werden, da man diese immer wieder und wieder verwenden kann. Im Idealfall würde gelten: Das Metall von heute ist das Metall von morgen.

Zudem wäre ein zeitnahes Versiegen von wichtigen Metallen ein wenig mit dem jetzigen Klimaproblem zu vergleichen, da unsere Zivilisation sich von der Technik, welche auf Ressourcen basiert, abhängig gemacht hat, so wie wir abhängig sind von lebensfreundlicher Natur und Klima. Ein außer Kontrolle geratener Klimawandel würde unzählige, ganz unterschiedliche Probleme nach sich ziehen. Um dies zu vermeiden treffen wir heute viele Entscheidungen, um das Klima zu schützen, welche unwirtschaftliche Investitionen und Umstellungen erfordern. Ein Ressourcenmangel würde auch unzählige, ganz unterschiedliche Probleme nach sich ziehen: Produktmangel, Verteuerung der Produkte, Ausbremsen der Wirtschaft und des Wohlstands, sowie des technischen Fortschritts. Also wären auch hier unsere Zivilisation und unsere Gesellschaft bitter betroffen.

Natürlich glauben wir nicht, dass sich solch eine Katastrophe ereignen wird. Jedoch wollten wir dieses Beispiel geben, um zu zeigen, dass die Zivilisation die Metalle schätzen und sie unbedingt so viel wie möglich recyceln soll.

### Persönliche Schlussfolgerung und Improvisierung

Ganz am Anfang dieser Arbeit lag der Fokus ursprünglich darauf, mehrere Methoden zu erproben mittels verschiedener Experimente, um aus einer Leiterplatte so viel wie möglich Brauchbares zu gewinnen. Uns ging es natürlich auch darum, hinsichtlich unseres späteren Wunschberufs, ein Verfahren so lange weiter zu entwickeln, bis das Verfahren reibungslos arbeitet. Allerdings konzentrierten wir uns schnell auf das Entkupfern der Leiterplatten, sodass der Fokus der gesamten Arbeit sich auch stark auf das Kupfer verschoben hat. Allerdings ist das eine gute Entwicklung. So hat sich der Charakter dieser Arbeit während der Experimente weiterentwickelt.

Da wir schnell die galvanische Entkupferung entdeckt und erprobt hatten, erwies sich diese Methode schnell als effektiv und gut umsetzbar sowie erprobbar, auch da wir begrenzte Möglichkeiten in der Schule haben. Daher wollten wir also jetzt diese eine Methode „industriell“ machen. So kamen wir in die Entwicklungsphase des Verfahrens, unserem eigentlichen persönlichem Ziel der Arbeit. Leider erwies sich der Entwicklungsprozess als sehr zeitaufwendig. Zudem mangelte es uns auch an manchen unerlässlichen Mitteln, wie einem Schredder, deren Suche und Auftreiben enorm viel Zeit in Anspruch nehmen würde. Leider wurde unsere Experiment-Reihe unerwartet von der Corona- Krise unterbrochen. Zu diesem Zeitpunkt waren wir der Lösung der vorherig aufgetretenen Probleme extrem nahe. Doch leider kamen wir nicht zur Erprobung der Grafit Elektroden.

Damit unsere schriftliche Arbeit nun nicht ganz unnötig wäre und kein Resultat aufweisen würde, haben wir unsere zahlreichen Ideen von einer industriellen Anlage in dem Teil „Aufbau

einer Recyclinganlage im industriellen Maßstab“ als fiktives Resultat der Arbeit verfasst. Leider können wir nicht für die Funktion der Anlage garantieren, aufgrund genannter Gründe.

Zudem wollten wir auch die Kupfermangelproblematik und den Aufbau und Herstellungsprozess der in den Experimenten verwendeten Leiterplatte näher vorstellen.

Wie man an der Evolution der Arbeit erahnen kann, ist ein großer Teil der Arbeit improvisiert, sodass der ursprüngliche Fokus der Entwicklung der Experimente sich verschoben hat.

Jedoch war es eine unerwartete Herausforderung die gesamte Arbeit zu improvisieren. Wir sind aber der Meinung, dass unter dem Strich eine gute Arbeit entstanden ist. Leider sind die eigentlichen Erfahrungen, die wir sammeln wollten durch die Schulschließung zu kurz gekommen. Die Entwicklung des Verfahrens machte uns zwar Spaß, allerdings beeinträchtigten uns Zeit- und Materialmangel sehr, sodass wir eher mäßig zufrieden mit der Entwicklung sind.

Im Großen und Ganzen sind wir zufrieden mit der Arbeit, da wir dennoch ein fiktives Resultat präsentieren können und unerwartete Erfahrungen sammeln konnten.



## Quellen

<https://copperalliance.de/kupferwerkstoffe/kupfer-und-kupferlegierungen/vorkommen-und-verfuegbarkeit/>

[https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2014/Industriestrompreise\\_Stromkosten.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2014/Industriestrompreise_Stromkosten.pdf)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite>

<https://www.spektrum.de/>

<https://www.godmode-trader.de/artikel/wieso-ist-kupfer-eine-ausnahme-unter-den-industrierohstoffen,5640177>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Leiterplatte>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Hartpapier>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Printed\\_circuit\\_board](https://en.wikipedia.org/wiki/Printed_circuit_board)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Through-hole\\_technology](https://en.wikipedia.org/wiki/Through-hole_technology)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Point-to-point\\_construction](https://en.wikipedia.org/wiki/Point-to-point_construction)

[https://de.wikipedia.org/wiki/Through\\_Hole\\_Technology](https://de.wikipedia.org/wiki/Through_Hole_Technology)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Wellenl%C3%B6ten>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Wave\\_soldering](https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_soldering)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Surface-mount\\_technology](https://en.wikipedia.org/wiki/Surface-mount_technology)

[https://de.wikipedia.org/wiki/Surface-mounted\\_device](https://de.wikipedia.org/wiki/Surface-mounted_device)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Ball\\_grid\\_array](https://en.wikipedia.org/wiki/Ball_grid_array)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Pick-and-place\\_machine](https://en.wikipedia.org/wiki/Pick-and-place_machine)

<https://www.harwin.com/the-difference-between-tht-and-smt/>

<http://www.resistorguide.com/resistor-sizes-and-packages/>

<http://www.surfacemountprocess.com/smd-component-packages.html>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Solder\\_paste](https://en.wikipedia.org/wiki/Solder_paste)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Reflow\\_soldering](https://en.wikipedia.org/wiki/Reflow_soldering)

<https://de.wikipedia.org/wiki/FPC-Verbinder>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible\\_circuit](https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_circuit)

<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/pcbs-rigid-vs.-flexible-which-one-is-best-for-your-next-project/>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible\\_electronics](https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_electronics)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible\\_flat\\_cable](https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_flat_cable)  
<https://www.flexiblecircuit.com/product-category/rigid-flex/>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Restriction\\_of\\_Hazardous\\_Substances\\_Directive](https://en.wikipedia.org/wiki/Restriction_of_Hazardous_Substances_Directive)  
[https://ec.europa.eu/environment/waste/rohs\\_eee/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/waste/rohs_eee/index_en.htm)  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Quecksilber>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Gas-discharge\\_lamp](https://en.wikipedia.org/wiki/Gas-discharge_lamp)  
[https://www.rp-photonics.com/gas\\_discharge\\_lamps.html](https://www.rp-photonics.com/gas_discharge_lamps.html)  
[https://www.we-online.com/web/en/leiterplatten/produkte\\_waermemanagement/ims/ims.php](https://www.we-online.com/web/en/leiterplatten/produkte_waermemanagement/ims/ims.php)  
<https://www.pcbcart.com/article/content/PCB-introduction.html>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Phenolic\\_paper](https://en.wikipedia.org/wiki/Phenolic_paper)  
<https://en.wikipedia.org/wiki/FR-2>  
<https://en.wikipedia.org/wiki/FR-4>  
[https://www.kingcredie.com/Ne\\_d\\_gci\\_37\\_id\\_2.html](https://www.kingcredie.com/Ne_d_gci_37_id_2.html)  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Polyimide>  
<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyimide-pi-plastic>  
<https://hitechcircuits.com/polyimide-pcb-material-information-fr4-vs-polyamide-pcb/>  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Kapton>  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluoroethylene>  
[https://www.pcbway.com/pcb\\_prototype/What\\_is\\_High\\_Frequency\\_HF\\_PCB\\_.html](https://www.pcbway.com/pcb_prototype/What_is_High_Frequency_HF_PCB_.html)  
<https://www.7pcb.com/blog/ptfe-teflon-pcbs.php>  
<https://www.plasmaetch.com/plasma-surface-modification.php>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Surface\\_treatment\\_of\\_PTFE](https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_treatment_of_PTFE)  
<https://blog.rogerscorp.com/2018/09/11/managing-pcb-materials-dielectric-constant-dk/>  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Permittivit%C3%A4t>  
<https://sfxpcb.com/what-is-ceramic-pcb/>  
<https://www.raypcb.com/why-use-ceramics-as-a-printed-circuit-board-ceramic-pcb-manufacture-process-introduction/>  
[https://www.pcbgogo.com/blog/What\\_is\\_ceramic\\_PCB\\_.html](https://www.pcbgogo.com/blog/What_is_ceramic_PCB_.html)

<https://www.ceramtec.de/substrate/http://www.madehow.com/Volume-2/Printed-Circuit-Board.html>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_design\\_automation](https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_design_automation)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Fotolack>

<https://www.pcbcart.com/article/content/PCB-manufacturing-process.html>

[https://www.youtube.com/watch?v=sIV0icM\\_Ujo](https://www.youtube.com/watch?v=sIV0icM_Ujo)

<https://www.multi-circuit-boards.eu/en/pcb-design-aid/copper-balance.html>

[https://www.allpcb.com/soldermask/soldermask\\_types.html](https://www.allpcb.com/soldermask/soldermask_types.html)

<https://de.wikipedia.org/wiki/L%C3%B6tstopplack>

## Bildquellen

Deckblatt:

<https://www.jvib.com.au/the-cloud/electronic-circuit-board/>

**Error! Reference source not found.:**

<https://www.broadband.se/en/Products/Inductors.htm>

Abbildung 3:

<https://www.pinterest.com.au/pin/495747871456439436/>

Abbildung 2:

<http://www.spiralfinnedtube.com/sale-4014212-copper-or-copper-nickel-finned-tube-coil-as-refrigeration-condenser-refrigeration-evaporator.html>

Abbildung 5:

<https://www.alternate.lu/SilverStone/Xenon-XE01-2011-CPU-K%C3%BChler/html/product/1482004>

Abbildung 4:

<https://www.ruetschi-elektromotoren.ch/dienstleistungen/neuwicklungen.php>

Abbildung 6:

<https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-08-14/machines-replace-a-third-of-workforce-at-giant-copper-mine>

Abbildung 7:

<https://www.pexels.com/photo/green-black-and-white-computer-chip-circuit-163170/>

Abbildung 8:

[https://www.reddit.com/r/electronics/comments/45ciua/cross\\_section\\_of\\_a\\_multilayer\\_high\\_current\\_pcb/](https://www.reddit.com/r/electronics/comments/45ciua/cross_section_of_a_multilayer_high_current_pcb/)

Abbildung 9:

<https://www.autodesk.com/solutions/ecad-and-mcad-software>

Abbildung 10:

<https://www.ecvv.com/product/4710855.html>

Abbildung 11:

[https://www.pcbway.com/blog/Engineering\\_Technical/Flexible\\_PCB\\_vs\\_Rigid\\_PCB.html](https://www.pcbway.com/blog/Engineering_Technical/Flexible_PCB_vs_Rigid_PCB.html)

Abbildung 12:

<https://theecmg.com/insulated-metal-substrate-pcbs/>

Abbildung 13:

<https://www.protoexpress.com/blog/wet-pcb-etching-acidic-alkaline-methods/>

Abbildung 14:

[https://www.allpcb.com/soldermask/soldermask\\_test.html](https://www.allpcb.com/soldermask/soldermask_test.html)

Abbildung 15:

<https://www.internationalsensor.com/manufacturing/through-hole-pcb-assembly/>

Abbildung 16:

<https://pixabay.com/photos/cyber-security-network-internet-2377718/>

Abbildung 17:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Olympus\\_Stylus.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Olympus_Stylus.jpg)

Abbildung 18:

<https://www.seilnacht.com/Lexikon/kupfrac.html>

Abbildung 19:

Persönliche Aufnahme Kleis Maurice

Abbildung 20:

Persönliche Aufnahme Kleis Maurice

Abbildung 22:

Persönliche Aufnahme Kleis Maurice

Abbildung 21:

Persönliche Aufnahme Kleis Maurice

Abbildung 23:

[http://www.bosy-online.de/Chemische-elektrochemische\\_Korrosion.htm](http://www.bosy-online.de/Chemische-elektrochemische_Korrosion.htm)

**Error! Reference source not found.:**

Eigene Rendergrafik

Abbildung 24:

Eigene Rendergrafik

Abbildung 26:

Eigene Rendergrafik

Abbildung 27:

Eigene Rendergrafik

Abbildung 28:

Eigene Rendergrafik

Abbildung 29:

Eigene Rendergrafik