

Herstellung von Leiterplatten

Felix Opatz

August 2006

letztes Update: Oktober 2006

1 Einleitung

Wenn man damit beginnt, elektronische Schaltungen aufzubauen, wird man zunächst mit Lochraster-Platinen und Schaltlitze bzw. Bauteilbeinchen gute Ergebnisse erzielen. Durch den Einsatz von Fädeldraht (entweder „echten“ Fädeldraht, oder den deutlich billigeren Kupferlackdraht mit 0,2 - 0,3 mm Dicke), der auch Überkreuzungen von Leitungen erlaubt, kann man auch Platinen mit schöner Bestückungsseite und komplexer Verdrahtung herstellen (die Komplexität kann dabei an Multilayer-Platinen heranreichen, allerdings leidet oftmals die Übersicht erheblich). Selbst SMD-Bauteile können auf Punktraster untergebracht werden (ein paar nette Fotos sind auf der Homepage von Henning Paul[1] zu sehen)!

Allerdings haben geätzte Leiterplatten einige Vorteile, die für verschiedene Zwecke unabdingbar sind. Dazu zählt die Reproduzierbarkeit (also die Möglichkeit dieselbe Platine mehrfach herzustellen, ohne dabei große Abweichungen zu erhalten), die Vermeidung mancher Flüchtigkeitsfehlern (zum Beispiel vergessene Verbindungen), und oftmals auch ein robusterer Aufbau. Dazu kommt die Tatsache, daß viele Bauteile nur mit Tricks untergebracht werden können, weil der Abstand der Pins nicht 2,54 mm beträgt (SubD-Steckverbinder beispielsweise), von den meisten SMD-Bauteilen ganz zu schweigen.

Es gibt Anbieter, die Platinen nach vorhandenem Layout herstellen. Diese haben oft zahlreiche Vorteile, wie Lötstoppbeschichtungen, chemische Durchkontaktierung, Rollverzinnung oder Bestückungsdrucke, die man in eigener Herstellung nicht umsetzen kann. Allerdings kostet dieser Service, und selbst bei preisgünstigen Anbietern ist das Porto der geringste Kostenfaktor (um mal Zahlen zu nennen: bei PCB-Pool[2] kostet eine Europakarte mit 100 mm x 160 mm doppelseitig mit chemischer Durchkontaktierung derzeit 50 EUR). Man darf allerdings nicht verleugnen, daß diese Platinen professionell produziert werden, und man ihnen das natürlich auch ansieht. Für Leute, deren Freizeit knapp ist, kann man diese Vorgehensweise wirklich empfehlen, anstatt sich zwei bis drei Stunden abzumühen, um dann vielleicht doch das letzte Bohrloch falsch zu setzen.

Wenn man sich eingearbeitet hat, und alle Gerätschaften besitzt, ist die Herstellung einer Platine eine Arbeit von 2-3 Stunden (abhängig von der Notwendigkeit die Platinen zurechtzusägen, Löcher zu bohren etc.), an laufenden Kosten darf man mit 2-10 Euro (abhängig von der Art und Größe des Basismaterials) pro Platine rechnen. Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist natürlich, daß man jederzeit loslegen kann, also auch Samstag nachts oder zwischen den Jahren.

Die Foren auf Mikrocontroller.net[3] stellen einen guten Anlaufpunkt für Fragen zur Leiterplattenherstellung dar, insbesondere auch zum Umgang mit Eagle und anderen Layoutprogrammen. Ich bin natürlich auch an Fragen interessiert, die von diesem Artikel nicht abgedeckt oder ausreichend geklärt werden (bitte E-Mail an felix@zotteljedi.de).

2 Ein Überblick

Bevor in den folgenden Kapiteln die einzelnen Schritte besprochen werden, soll ein Überblick zum Ablauf geschaffen werden, damit die Orientierung leichter fällt, und die Puzzle-Teile ins Gesamtbild eingeordnet werden können.

Die Herstellung einer Leiterplatte umfasst im wesentlichen die sieben folgenden Schritte:

1. Erstellung des Layouts
2. Herstellung der Belichtungsmaske
3. Belichtung
4. Entwicklung
5. Ätzen
6. Reinigung
7. Sägen, bohren, fräsen, durchkontaktieren

Bei der Erstellung des Layouts kann man auf zahlreiche Programme zurückgreifen, die teilweise sogar kostenlos (evtl. mit Einschränkungen im Funktionsumfang) erhältlich sind. Unter einem Layout versteht man die Platzierung der Bauteile und die Verbindung durch Ziehen von Leiterbahnen. Das Ergebnis ist im Prinzip ein Bild der fertigen Platine (genauer: der Kupferteile, die auf der Platine erhalten bleiben sollen). Dieses Layout wird ausgedruckt und ergibt damit die Belichtungsmaske (oder Vorlage), mit deren Hilfe das Layout auf die Platine übertragen wird.

Der Übertragungsvorgang erfolgt auf photographischem Weg durch die Belichtung. Nach der Belichtung muß das Basismaterial (also die Platine) entwickelt werden, damit keine weitere Veränderung mehr stattfindet. Dies ist der gleiche Vorgang wie bei der Schwarzweißfotografie. Dem Entwicklungs vorgang schließt sich der Ätzvorgang an, bei dem die unerwünschten Teile der zuvor vollständigen Kupferschicht entfernt werden, sodaß nur noch die Leiterbahnen und Pads erhalten bleiben. Als Abschluß des Vorgangs wird die restliche Beschichtung von der Platine entfernt, damit die Kupferflächen lötbar werden (der Hersteller gibt zwar oftmals an, daß sie auch mit der Beschichtung lötbar sind, jedoch habe ich damit nicht so gute Erfahrung gemacht). Soll die Platine erst viel später (Wochen, Monate) weiterverarbeitet werden, empfiehlt es sich die Schicht zunächst auf der Platine zu belassen, um eine Korrosion der Oberfläche zu vermeiden.

Bei der Herstellung einer (zugegebenerweise einfachen) Platine für SMD-Bauteile ist man an diesem Punkt fast fertig. Um auch bedrahtete Bauteile oder Leitungsbrücken (für Vias) einsetzen zu können, müssen jedoch die entsprechenden Löcher gebohrt werden. Dies ist mit einem Bohrständer in der Regel einfach zu bewerkstelligen, jedoch sollte man ein gewisses Maß an Sorgfältigkeit mitbringen, damit die Bauteile später gut passen, und vor allem die Löcher nur an den dafür vorgesehenen Stellen landen. Oft ist auch eine weitere Bearbeitung notwendig, um die Leiterplatte an ein Gehäuse anzupassen, oder um überstehende Ränder abzusägen und zu begradigen.

Mit etwas Routine sind die Schritte 2 bis 6 in einer knappen Stunde erledigt. Für die Herstellung doppelseitiger Platinen ist der Aufwand gar nicht so viel größer, wie manchmal behauptet wird. Man sollte zwar vielleicht nicht damit anfangen wollen, doch ist auch dies keine Hexerei und mit ein wenig Mehraufwand zu schaffen.

3 Grundausstattung und benötigte Werkzeuge

Um das Layout zu erstellen, benötigt man einen Computer und die passende Software. Einfache Layouts können auch per Hand erstellt werden (so wurde es im letzten Jahrhundert schließlich auch noch gemacht), allerdings tut man sich damit oft keinen Gefallen. Als Software kann ich persönlich den Eagle Layout Editor[4] von Cadsoft empfehlen. Es gibt auch eine Reihe weiterer Programme, die ich allerdings nie eingesetzt habe.

Für die Erzeugung der Vorlage wird ein Drucker und ein passendes Medium benötigt. Dieses kann entweder Folie oder Transparentpapier sein. Bei der Folie ist darauf zu achten, daß sie für den Drucker geeignet ist (Laser vs. Tinte). Es gibt immer wieder Angaben, welche Folien man am besten verwenden sollte (siehe beispielsweise auch die dse-FAQ[5], Kapitel F.6). Meine ersten Versuche habe ich mit einer Hunderterpackung Overheadfolien von Esselte durchgeführt, die sich beim Aufräumen zufällig gefunden hatte. Weitere Hinweise finden sich in Abschnitt 5.

Zum Entwickeln und Ätzen benötigt man einige Schalen zur Aufnahme der Lösungen. Man sollte für jede Platine eine möglichst passende Schale nehmen, um nicht unnötig viel Entwickler bzw. Ätzmittel zu verbrauchen (je größer die Schale, desto mehr Flüssigkeit ist notwendig, um sie bis zu einer bestimmten Höhe zu füllen). Außerdem ist es notwendig, die Flüssigkeiten auf eine bestimmte Temperatur erwärmen zu können. Dazu eignet sich eine kleine Herdplatte für Campingzwecke hervorragend. Als Gefäß sollte man *keine* dickwandigen Glasgeräte (z.B. Einmachgläser) verwenden, weil diese bei plötzlichen und starken Temperaturänderungen springen können. Wer etwas tiefer in die Tasche greifen möchte, findet hier beim Laborbedarf (zum Beispiel bei Carl Roth[6]) hervorragende Geräte, wie beispielsweise auch ein Thermometer mit ausreichend großem Meßbereich. Wichtig ist auch eine Pinzette aus Kunststoff oder Holz, um die Platine aus den Lösungen herausfischen zu können. Die bezüglich ihres Ausgußverhaltens besten Plastikschalen, die ich je hatte, stammten übrigens aus dem Kaufhaus, und waren als anreihbare Besteckkörbe gedacht.

Für den Belichtungsvorgang wird UV-Licht benötigt. Eine sehr gute Quelle sind Gesichtsbräuner mit z.B. 4 x 15 Watt. Solche kann man oftmals günstig bei eBay erwerben, wobei anzumerken ist, daß die Leuchtleistung der Röhren mit der Zeit abnimmt. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erreichen, kann man sich aus Holz oder anderen Materialien ein Belichtungsgerät herstellen, das die Lichtquelle in einem festen Abstand hält. Damit die Vorlage direkt auf der Platine aufliegt, legt man eine Glasscheibe auf. Hierzu eignen sich die Scheiben aus kleinen Bilderrahmen hervorragend (Achtung: manche Bilderrahmen haben Scheiben mit UV-Schutz, der das Ausbleichen der Bilder reduzieren soll. Solche Scheiben sind für Belichtungszwecke nicht geeignet. Meistens steht ein entsprechender Vermerk auf der Verpackung, oder es ist am Preis erkennbar. Scheiben mit Antireflex hingegen scheinen zu funktionieren).

Wer Platinen für bedrahtete Bauteile herstellen möchte, und deshalb auch Löcher bohren muß, sollte unbedingt einen Bohrständler verwenden. Diese gibt es ab 20 EUR im Baumarkt, einen sehr empfehlenswerten von LUX habe ich bei Amazon erstanden. An die Bohrmaschine werden keine so großen Anforderungen gestellt (die Geschwindigkeit sollte allerdings schon regelbar sein), dafür jedoch an die Bohrspitzen. Für die bedrahteten Bauteile werden Löcher mit Durchmessern zwischen 0,6 mm und 1,0 mm benötigt, für spezielle Bohrungen wie etwa zur Montage von Buchsen, Schaltern etc. werden oftmals auch größere Durchmesser bis ca. 5 mm benötigt. Hinweise zur Auswahl der Bohrspitzen und Tipps zum zerstörungsfreien Bohren finden sich in Abschnitt 10.

4 Erstellung des Layouts

Zur Erstellung eines qualitativ hochwertigen Layouts könnte man sicher ein ganzes Buch vollschreiben. Abgesehen davon, daß ich nicht über dieses Wissen verfüge, ist das Ziel dieses Abschnitts einige

Fehlerquellen aufzudecken, die zu einem schlechten Layout führen würden. Zunächst sollte klargestellt werden, welche Ansprüche ein Layout zu erfüllen hat. Ein Layout sollte

1. die geforderte Funktionalität erfüllen
2. nach Möglichkeit nur eine einseitige Platine erfordern
3. möglichst wenig Drahtbrücken enthalten
4. genügend große Abstände zwischen den Leiterbahnen haben
5. lötbar sein
6. gut aussehen

Der erste Punkt erscheint sehr logisch. Schließlich soll die fertige Platine ja einen Zweck erfüllen, und (meistens) nicht wie ein Kunstwerk lediglich einen Selbstzweck besitzen. Zur Erfüllung der geforderten Funktionalität zählt die Vollständigkeit der Verbindungen. Nur in Notfällen sollte zu Tricks wie beispielsweise Fädeldraht auf Unter- oder Oberseite gegriffen werden. Damit die fertige Schaltung wie vorgesehen funktioniert, muß das Layout selbstverständlich von einem korrekten Schaltplan abgeleitet werden. Bei Prototypen und experimentellen Leiterplatten empfiehlt es sich, die möglicherweise falschen Leiterbahnen so anzurufen, daß sie mit einer Rasierklinge durchtrennt werden können. Ansonsten sind auch Jumperblöcke und wahlweise einsetzbare Drahtbrücken ein bewährtes Verfahren um eine Schaltung variabel zu gestalten.

Punkt zwei hat praktische Gründe. Eine einseitige Platine erfordert weniger Aufwand, selbst wenn das einige Drahtbrücken erfordert. Man sollte frühzeitig erkennen, wenn eine Lösung ohne Drahtbrücken nicht machbar ist, denn gegen Ende ist das strategisch kluge Setzen von Brücken oft nicht mehr möglich. Statt einer cleveren Brücke zu Beginn können dann leicht ein halbes Dutzend Brücken notwendig werden. Man sollte also auch bereit sein, bereits fertige Teile zu opfern und anders neu zu verlegen. Das ganze ist übrigens mit dem Finden des kürzesten Wegs z.B. aus einem Labyrinth vergleichbar, und hat den Charakter eines Backtracking-Problems[7], weshalb auch die Algorithmen von Autoroutern (also Programmen, die die beste Anordnung der Leiterbahnen berechnen bzw. eher *ausprobieren*) so vorgehen.

Punkt drei widerspricht dem gerade gesagten nicht, sondern zeigt nur auf, daß ein Kompromiß gefunden werden sollte. Hat man einmal mit dem Setzen von Drahtbrücken angefangen, läßt man sich oft viel zu leicht dazu hinreißen, noch eine zu setzen, obwohl mit etwas scharfem Hinsehen eine bessere Lösung gefunden werden kann. Meistens werden auch „natürliche Brücken“ wie etwa Widerstände oder andere Bauteile übersehen oder nicht effizient ausgenutzt. Wenn man erstmal auf den Geschmack gekommen ist, auch zwischen den Pins von DIL-Bausteinen durchzurouten, erschließen sich bezüglich der umsetzbaren Komplexität neue Welten. Warum aber sollte man nun Drahtbrücken nach Möglichkeit vermeiden? Weil sie zurechtgebogen und bestückt werden müssen, und doch keine Funktion erfüllen, die nicht auch durch eine automatisch mitgeätzte Leiterbahn erfüllt werden würde. Ansonsten siehe Punkt 6.

Die Abstände zwischen den Leiterbahnen und die Breiten der Leiterbahnen selbst werden einerseits durch die zu erwartenden Spannungen und Stromstärken diktiert. Andererseits sind zu feine Strukturen oftmals nicht gut zu ätzen und damit fehleranfällig. Insbesondere Bohrungen mit zu schmalen Rändern sind unpraktisch, weil sich beim Bohren leicht die Leiterbahnen abheben, oder die Ränder mit weggebohrt werden. Außerdem haftet das Lötzinn nicht so gut, und die daraus entstehenden Lötverbindungen sind ihrerseits nicht so zuverlässig und haltbar, wie man es gerne hätte. Als Anhaltspunkt für die Abstände, die man einhalten sollte, können SMD-Bauteile dienen: hier haben die Pads teilweise Zwischenräume von nur 0,25 mm (MLF-Package), also 0,01 in.

Was auch immer man produziert, es muß lötbar bleiben. Wenn das Lötzinn eines Vias ständig auf die benachbarte Leiterbahn überspringt und einen Kurzschluß erzeugt, ist niemandem geholfen. Zwischen

den Beinchen eines DIL-Gehäuses eine Leitung durchzulegen ist kein Problem, aber zwei ist schon als sehr sportlich zu betrachten. Durch die Möglichkeit, weit reinzuzoomen, verliert man auch oft die Fähigkeit Größenverhältnisse einzuschätzen. Lieber einmal zu oft auf Papier ausdrucken, als am Ende etwas unlötbare vorliegen zu haben!

Punkt sechs, es soll gut aussehen. Dieser Punkt ist zwar der „schwächste“ der genannten Punkte, jedoch hat er eine psychologische Komponente. Dadurch, daß man die Leiterplatte möglichst schön machen möchte, beschäftigt man sich intensiv damit, und schaut sehr kritisch und genau hin. Dadurch finden sich oftmals Möglichkeiten, unnötige und hässliche Drahtbrücken zu vermeiden. Außerdem vermeidet man generell Fehler, wenn man sorgfältig arbeitet. Nicht selten ist eine schöne Lösung sogar die beste, bzw. eine total hässliche Lösung ein Hinweis darauf, daß man sich nicht eingehend genug damit beschäftigt hat. Für die Führung der Leiterbahnen, insbesondere der Art und Weise der Knicke, kann man einfach vorhandene fremde Layouts studieren und sich abschauen, was man für schön hält. Layouter von Schaltungen, die mit hohen Frequenzen bzw. hohen Bitraten arbeiten, werden einem immer von rechten Winkeln abraten, weil diese für Reflexionen und Abstrahlungen elektromagnetischer Wellen begünstigend wirken. Für niedrige Frequenzen spielt dies keine wesentliche Rolle, jedoch greift auch hier das Hässlichkeitsprinzip: rechte Winkel in Leiterbahnen sehen einfach scheiße aus.

5 Die Vorlage zur Belichtung

Um die Herstellung der Belichtungsvorlage besser zu verstehen, soll kurz erklärt werden, wie das photographische Verfahren der Belichtung funktioniert. Das Basismaterial ist in der Regel photopositiv beschichtet, das heißt der Schutzlack wird an den Stellen zerstört, die mit UV-Licht in Kontakt kommen. In Abbildung 1 ist dies skizziert. Die Vorlage ist an den Stellen geschwärzt, an denen das Kupfer bestehen bleiben soll. Damit nicht unnötig viel Kupfer weggeätzt werden muß, empfiehlt es sich, große Zwischenräume zu füllen. In Eagle gibt man dazu in der Kommandozeile *poly gnd* ein, und zeichnet ein Rechteck um die gesamte Schaltung. Nachdem dann die Funktion *Ratsnest* durchgelaufen ist, bildet sich eine Massefläche, die mit dem Signal GND verbunden ist. Durch das Change-Tool kann mit der Eigenschaft *Isolation* der Abstand zu den Leiterbahnen konfiguriert werden.

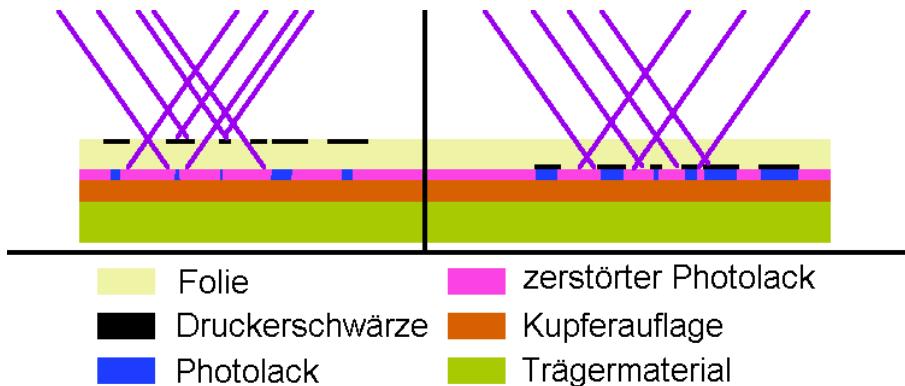


Abbildung 1: Abbildungsschärfe in Abhängigkeit von der zugewandten Seite

Während der Belichtung fällt das UV-Licht von allen Seiten ein, und wird von der Glasscheibe und der Folie bzw. dem Transparentpapier gestreut. Das linke Bild in Abbildung 1 zeigt was passiert, wenn dabei die bedruckte Seite der Vorlage von der Platine wegweist, das rechte Bild zeigt den Fall, daß die bedruckte Seite der Platine zugewandt ist. Selbstverständlich ist der letztgenannte Fall vorzuziehen, weil hierbei die Abbildung schärfer ist, und damit die Leiterbahnen besser herausgeätzt werden. Das bedeutet, daß die Oberseite des Layouts spiegelverkehrt ausgedruckt werden muß (die Unterseite wird sowie in der Durchsicht dargestellt, und ist damit bereits spiegelverkehrt).

Ebenfalls wichtig ist, daß die Vorlage an den geschwärzten Stellen lichtdicht ist. Flächen, die schwarz mit Mustern sind, genügen dieser Anforderung nicht. Je nach Drucker und Folie können sehr unterschiedliche Ergebnisse auftreten, bei manchen Laserdruckern kann das Ergebnis dramatisch verbessert werden, indem auf dieselbe Folie zweimal das gleiche gedruckt wird. Allerdings muß der Papiereinzug genau erfolgen, damit die Linien auch in einfacher Breite bestehen bleiben. Das Drucken auf Transparentpapier ist vergleichsweise unkritisch, und auch aus Kostengründen vorzuziehen. Verschiedenen Berichten zufolge eignet sich auch das Drucken auf normalem Papier und eine anschließende Behandlung mit „Pausklar“. Da viele Papiere allerdings optische Aufheller besitzen, die das UV-Licht absorbieren und in anderer Wellenlänge emittieren, halte ich persönlich diese Lösung für weniger geeignet.

6 Der Belichtungsvorgang

Vor der Belichtung ist die Platine mit einer gleichmäßigen Schicht aus Photolack überzogen. Diese schützt später die Kupferschicht vor dem Ätzmittel. Damit die unerwünschten Stellen der Kupferschicht entfernt werden, muß die Photoschicht an dieser Stelle zerstört werden. Dies passiert durch die Bestrahlung mit UV-Licht. Die in der Vorlage geschwärzten Teile (auf die also kein Licht fällt) bleiben bestehen. Wie lange belichtet werden muß, hängt von dem Basismaterial, von der Lichtdurchlässigkeit der Vorlage, und der Stärke der UV-Einstrahlung ab. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erreichen, sollte man möglichst viele dieser Faktoren konstant halten, zum Beispiel den Abstand der Lichtquelle von der Platine. Dazu ist schnell aus etwas Holz eine Kiste gezimmert, die als Deckel dann den Gesichtsbräuner (oder was auch immer man einsetzt) aufgelegt bekommt. Als Abstand haben sich 20-30 cm als günstig erwiesen.

Als Basismaterial bevorzuge ich das von Bungard[8]. Die Platinen weisen eine gleichbleibende Qualität auf, während man bei Noname-Produkten durchaus seine Überraschungen erleben kann, wenn der Lieferant wechselt. Zwar habe ich auch schon mit Noname-Platinen hervorragende Ergebnisse erzielt, jedoch sollte man sich überlegen, ob es einem die paar Cent wert ist, ein mißglücktes Ergebnis zu riskieren. Ob man Hartpapier oder Epoxid bevorzugen sollte, hängt ein bißchen vom Verwendungszweck ab: Hartpapier lässt sich leichter bearbeiten (bohren und sägen), aber von Bungard gibt es z.B. die doppelseitigen Platinen nur als Epoxid.

Während die Vorbereitung bis hier noch recht gemütlich vonstatten gehen konnte, müssen dieser und die beiden folgenden Arbeitsschritte zügig hintereinander erfolgen. Aus diesem Grund sollten die Flüssigkeiten bereits auf Temperatur gebracht werden, bevor mit der Belichtung begonnen wird. In Abschnitt 11 wird ein vollständiger Arbeitsplan mit Zeitangaben vorgestellt, der als Beispiel dienen kann (die tatsächlichen Zeiten sind wie bereits erwähnt von diversen Faktoren abhängig).

Zu Beginn muß der Raum verdunkelt werden. Dazu reicht es, das Licht auszumachen und ggf. die Rolläden locker zu schließen. Es geht nur darum, kein direktes Störlicht zu haben, es muß **nicht** stockfinster sein, sodaß man die eigenen Hände nicht mehr erkennt. Als nächstes wird die Schutzfolie von den Platinen abgezogen, wobei darauf geachtet werden muß, die Flächen nicht mit den Fingern zu berühren (fettige Fingerabdrücke!). Achtung: je nach Qualität können die Ränder der Platinen scharfkantig sein.



Abbildung 2: Der Zweck der Glasscheibe

Nun legt man die Vorlage mit der bedruckten Seite auf die Platine, und beschwert sie mit einer Glasscheibe. Diese dient dem Zweck, die Vorlage plan auf der Platine aufliegen zu lassen. In Abbildung 2 ist das Szenario einmal mit und einmal ohne Scheibe dargestellt. Es ist unbedingt darauf zu achten, daß die Glasscheibe für UV-Licht durchlässig ist, und nicht etwa wie bei manchen Bilderrahmen einen UV-Stopp besitzt, um die Bilder vor Vergilben zu bewahren (allerdings haben die meisten billigen Exemplare dies nicht, wer für wenige Euro im Kaufhaus einkauft, hat hier meist schon gewonnen).

Als nächstes belichtet man mittels UV-Licht. Dabei kann man das normale Licht wieder anmachen, um z.B. zu schauen, ob alles für die nächsten Schritte bereit liegt. Die richtige Belichtungszeit muß man durch eine Belichtungsreihe experimentell ermitteln, für mich haben sich bei der Verwendung von Transparentpapier 3 Minuten als Optimum ergeben, bei den Overheadfolien waren es 4 Minuten. Eine zu lange Belichtungszeit äußerst sich darin, daß Leiterbahnen Löcher bekommen, oder feine Strukturen weggeätzt werden (z.B. die Kupferringe bei Bohrungen).

Zur Herstellung doppelseitiger Platinen hat es sich bewährt, die beiden Vorlagen an den Rändern (möglichst weit vom Layout entfernt) zusammenzukleben oder zusammenzuheften. In diese Tasche legt man die Platine, legt auf beide Seiten eine Glasscheibe, und drückt diese mit Leimzwingen (diese Teile, die wie große Wäscheklammern aussehen) zusammen. Damit ist es ohne weiteres möglich, auch Bohrungen mit 0,5 mm Durchmesser paßgenau aufeinander zu bekommen.

Nach der Belichtung sollte der Raum wieder verdunkelt werden, damit die Platine auf dem Weg vom Belichtungsgerät zum Entwicklerbad keine unerwünschten Veränderungen erfährt. Wenn das Restlicht zur Orientierung nicht ausreicht, kann man eine kleine Taschenlampe verwenden, die man zur Reduzierung der Helligkeit z.B. mit rotem oder gelbem Transparentpapier beklebt (oder, falls möglich, eine gefärbte Glühbirne mit etwas höherer Spannungsangabe einsetzt).

7 Der Entwicklungsvorgang

Durch das Entwickeln werden die durch das UV-Licht veränderten Lackschichten abgelöst. Die damit freigelegten Kupferflächen können vom Ätzmittel angegriffen und aufgelöst werden. Als Entwickler kommt bei praktisch allen gängigen Basismaterialien eine stark verdünnte Natriumhydroxid-Lösung (NaOH) zum Einsatz. Bei Bungard-Basismaterial ist dies eine 1%ige Lösung (also 10 g Natriumhydroxid gelöst in einem Liter destilliertem oder entmineralisiertem Wasser). Die Entwicklerlösung muß luftdicht aufbewahrt werden, weil sie unter Aufnahme von Kohlenstoffdioxid (CO_2) aus der Luft unwirksam wird (es bildet sich Natriumhydrogencarbonat, NaHCO_3).

Die optimale Temperatur zum Entwickeln beträgt 25°C (sofern nichts anderes vom Hersteller spezifiziert wurde). Falls die Lösung also beispielsweise im Keller aufbewahrt wird, sollte sie vor Gebrauch kurz angewärmt werden. Achtung: Natriumhydroxid, auch in starker Verdünnung, ist ätzend, und kann insbesondere im Gesicht zu schweren Verätzungen führen. Bei Kontakt mit Haut oder Augen sofort mit reichlich kaltem Wasser ausspülen und ggf. einen Arzt konsultieren. Beim Ausspülen der Augen vom inneren Augenwinkel nach außen spülen (um eine weitere Verätzung der Haut zu vermeiden). Die benötigte Menge hängt von der Grundfläche der Schale ab, in der der Entwicklungsvorgang stattfinden soll. Die Flüssigkeitsstand sollte ca. 2 cm betragen.

Die Platine sollte zügig in das Entwicklerbad gegeben werden, damit bei der verhältnismäßig kurzen Verweilzeit alle Stellen gleichlange benetzt werden. Die Entwicklungszeit beträgt üblicherweise etwa 60 Sekunden. Bereits nach wenigen Sekunden sieht man die Konturen des Layouts hervortreten, die veränderten Lackschichten bilden dabei schwarze Schlieren und sollten durch leichtes Schaukeln weggeschwemmt werden. Mit einer Plastikpinzette kann und sollte die Platine bewegt werden, damit wirklich alle Lackreste entfernt werden. Dabei ist das Reiben oder Wischen über das Layout zu vermeiden (siehe auch nächster Abschnitt).

Nach dem Ätzvorgang wird die Platine nach kurzem Abtropfen in ein Wasserbad gegeben, um die verbliebenen Lack- und Entwicklerreste abzuspülen. Danach kommt sie umgehend in das Ätzbad. Verbrauchte Entwicklerlösung sollte nicht erneut eingesetzt werden. Zum einen hat sie bereits Kohlenstoffdioxid aufgenommen, zum anderen ist sie meistens durch den Lack deutlich getrübt. Außerdem kosten 250 g Natriumhydroxid ca. 3 EUR; diese Menge reicht für 25 Liter Lösung aus, für einen Entwicklungsvorgang investiert man also weniger als 10 Cent. Diese sparen zu wollen, und dafür den Erfolg des Ätzvorgangs zu riskieren, entbehrt jeglicher Logik!

8 Der Ätzvorgang

Der Ätzvorgang kann auf verschiedenen Wegen durchgeführt werden. Die beiden gängigsten Methoden verwenden Natriumpersulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$) bzw. Eisen(III)-Chlorid (FeCl_3). Ferner gibt es Methoden mit Wasserstoffperoxid (H_2O_2), das seit einigen Terroranschlägen in London für Laien deutlich schwieriger zu bekommen ist. Ich persönlich gebe dem Eisen(III)-Chlorid den Vorzug, weil es bezüglich der Anwendung etwas gutmütiger ist, und eventuelle Kleckereien dank der kräftigen Färbung sofort bemerkt werden, anstatt erst nach der Bildung von Löchern oder Krusten in Textilien und auf den Gerätschaften. Für Bungard-Basismaterial wird ebenfalls Eisen(III)-Chlorid als Ätzmittel empfohlen (was auch für mich der Anlaß zum Umstieg war).

Die Ätzlösung muß auf die vom Hersteller angegebene Temperatur gebracht werden. Sie beträgt für Natriumpersulfat normalerweise 50-60 °C, für Eisen(III)-Chlorid 40-50 °C. Gerade bei Natriumpersulfat ist diese genau einzuhalten, weil bei niedrigeren Temperaturen praktisch nichts passiert. Nachdem die Platine in die Ätzlösung gebracht wurde, beginnt sich die Schicht blanken Kupfers aufzulösen. Abbildung 3 verdeutlicht dies. Es ist zu bedenken, daß die durch Lack geschützten Kupferflächen dennoch von der Seite her angeätzt werden können. Aus diesem Grund sollte die Platine nicht unnötig lange in der Ätzlösung verweilen, sondern entfernt werden, sobald der Ätzvorgang abgeschlossen wurde.



Abbildung 3: Angeätzte Leiterbahn

Doppelseitige Platinen sollte man mit einem geeigneten Werkzeug (z.B. die Plastikpinzette) aufbocken, sodaß die Ätzlösung auf beide Seiten gelangen kann. Vorsicht beim Umgang mit der Platine: durch Kratzen über die Oberfläche kann sich der ehemals durch das Layout geschützte Photolack noch immer ablösen. Das Resultat zeigt das Foto in Abbildung 4. Am besten lässt man bei den Layouts einen Rand stehen, an dem man später die Platine anfassen kann.



Abbildung 4: Unterbrochene Leiterbahn durch Verkratzen

Das Ende des Vorgangs ist dadurch gekennzeichnet, daß alle unerwünschten Kupferflächen vollständig verschwunden sind, und die Platine dort die gleiche Farbe wie das Trägermaterial hat. Hier sollte man als Anfänger lieber eine oder zwei Minuten zugeben. Insbesondere bei kleinen Flächen (etwa zwischen

zwei eng benachbarten Leiterbahnen) dauert die vollständige Auflösung länger, und verbliebene Reste können zu Kurzschlüssen führen. Nach Abschluß des Ätzvorgangs wird die Platine unter fließendem Wasser von sämtlichen Ätzmittelrückständen befreit.

Die Ätzgeschwindigkeit hängt von der Temperatur und dem Zustand der Ätzelösung ab. Da die Lösung sehr oft wiederverwendet werden kann, sammelt sich mit der Zeit eine Menge Kupfer, wohingegen die Konzentration des eigentlichen Ätzmittels zurückgeht. Wenn der Ätzvorgang unerträglich lange dauert, könnte der Zeitpunkt für das Neuansetzen gekommen sein. Mit frischer Eisen(III)-Chlorid-Lösung dauert der Ätzvorgang 20-25 Minuten, aber auch 30 oder 35 Minuten sind im Bereich des Normalen.

Verbrauchte Ätzelösung enthält Kupfer, welches ein Schwermetall ist. Sie darf deshalb nicht in das normale Abwasser entsorgt werden (die Bakterien in der Kläranlage, die zur Zersetzung organischer Verschmutzungen geziichtet werden, würden zugrunde gehen, und damit erhebliche Schäden verursachen). Je nach Wohngebiet gibt es Möglichkeiten zur Entsorgung („Schadstoffmobil“ etc., zu erfragen bei der Stadtverwaltung, Abteilung Entsorgung oder ähnliches). Tipp: oftmals wird nach Volumen abgerechnet, es kann also recht nützlich sein, alte Ätzelösung offen herumstehen zu lassen, damit ein Teil des Wassers verdunstet. Dies sollte allerdings wegen der Entwicklung gesundheitsschädlicher Dämpfe (Chlorgas!) im Freien oder an einem gut belüfteten Ort geschehen. Selbstverständlich ist darauf zu achten, daß Kinder oder Tiere keinen Zugang zu der Lösung erhalten!

9 Die Reinigung der Platine

Das Schwierigste ist nun geschafft, die Platine kann bereits auf Fehler geprüft werden. Um sie zu bestücken muß allerdings zunächst der verbliebene Lack entfernt werden. Dies gelingt mühelos durch Einweichen in Spiritus. Meistens löst sich durch leichtes Schütteln bereits alles ab, spätestens durch das Abwischen mit einem Stück Küchenpapier sollten alle Reste entfernt werden können. Nicht zu zimperlich sein, die Platine ist nun bereits fertig und entsprechend widerstandsfähig. Der zur Reinigung verwendete Spiritus kann aufgehoben und vielfach benutzt werden. Wenn die Platine erst sehr viel später bestückt und gelötet werden soll, kann und sollte der Lack auf ihr belassen werden, weil er die Oberfläche vor Oxidation schützt.

Dies ist auch der richtige Zeitpunkt, um möglicherweise „faule“ Stellen zu erkennen. Ich verwende dazu eine Tischlupe mit 8facher Vergrößerung, z.B. PB.5040 von euromex (gibt's dort wo man auch deren Mikroskope findet, z.B. bei [9]). Diese eignet sich auch bestens, um nach dem Einlöten von SMD-Bauteilen nach Brücken zu suchen.

10 Tipps und Hinweise zum Sägen, Bohren, Fräsen und Durchkontaktieren

Bei den meisten Leiterplatten müssen Bohrungen vorgenommen werden, um bedrahtete Bauteile oder ICs in DIL-Gehäusen einzulöten zu können. Die Durchmesser der Bohrungen betragen meistens 0,6 mm für Widerstände, 0,8 mm für Dioden oder andere Bauteile mit kräftigeren Beinchen. Standard-LEDs liegen meistens irgendwo dazwischen, also besser auf 0,8 mm bohren. Um ganz sicher zu gehen, kann man in ein Stück Platine eine Reihe Löcher mit unterschiedlichen Durchmessern bohren, und diese als Prüfmittel einsetzen.

Zum Bohren eignet sich im Grunde jede Bohrmaschine, die die passende Geschwindigkeit (am besten also regelbar) und genügend Drehmoment (im allgemeinen gar kein Problem) besitzt. Ob besser mit niedriger oder mit hoher Drehzahl gebohrt werden soll, ist oftmals Glaubenssache, für mich hat beides

gut funktioniert. Einig ist man sich allerdings, daß stets in die Kupferflächen gebohrt werden soll (anstatt durch das Trägermaterial in die Kupferschicht hinein), weil diese dann weniger leicht abreißen.

Die Bohrspitzen sind für Hartpapier-Platinen eher unkritisch, aber für Epoxid sollte man dafür vorge sehene Platinenbohrer verwenden. Bei Reichelt[10] gibt es ein Bohrset mit 10 Spitzen (die häufigsten doppelt) für ca. 25 EUR, mit dem ich bisher beste Erfahrungen gemacht habe. Ebenfalls gut gefallen mir die „Spezialbohrer aus Vollhartmetall“ von Conrad[11] (Best.-Nr. 81 45 00). Einfache Bohrspitzen aus dem Baumarkt haben oftmals einen Schaft mit dem gleichen Durchmesser wie die Spitze, sodaß sie von manchen Bohrfuttern nicht gegriffen werden können (die Platinenbohrer haben einen dicken Schaft von $\frac{1}{8}$ in). Ein Bohrständer ist ein must-have. Es gibt hier welche von ganz billig bis richtig teuer. Ich habe einen von LUX für ca. 25 EUR erworben, der mich bisher nie enttäuscht hat. Das war also die Kategorie „billig und gut“.

Das Bohren sollte erst nach dem Reinigen der Platine erfolgen, weil durch das Bohren meistens scharfe Kanten entstehen, an denen beim Abwischen der Spiritusreste oftmals Fasern des Küchenpapier hängen bleiben. Ebenso sollte man kleine Platinen erst nach dem Bohren zurechtsägen, weil ansonsten oftmals das Handling sehr unbequem wird (man kann nirgends richtig anfassen, rutscht vom Bohrständer etc.).

Zum Sägen eignet sich meiner Erfahrung nach eine Metallsäge, wobei bei Epoxid-Platinen mehr und feinerer Staub zu entstehen scheint. Außerdem verschleißt hier die Säge schneller, professionell macht man das mit Diamantsägeblättern, die allerdings ein paar Euro mehr kosten. Für das Fräsen und nachträgliche Glätten der Kanten verwende ich einen Dremel-Nachbau, den es mal günstig als Set mit viel Zubehör bei ALDI gab. Solche und ähnliche Angebote gibt es ständig, man muß nur die Augen offen halten. Apropos Augen offen halten: beim Sägen und Fräsen sollte man eine Schutzbrille tragen, es können leicht kleine Stücke absplittern und mit wahnsinnigen Geschwindigkeiten wie kleine Geschosse durch die Gegend fliegen. Bei langem und häufigem Arbeiten an der Fräse ist ein Mundschutz (so eine Papierfilter-Maske) vielleicht auch keine schlechte Idee.

Ein noch überhaupt nicht betrachteter Punkt ist die Durchkontaktierung, also die Verbindung der Oberseite mit der Unterseite an Stellen mit Vias. Einfache Möglichkeiten zur chemischen Durchkontaktierung bestehen quasi nicht. Die professionellste Lösung für Hobbybastler besteht in der Verwendung von Hohlnieten (gibt es ebenfalls von Bungard), die mit einer speziellen (und teuren) Presse verpresst werden. Zwar ist angeblich kein Verlöten an der Kontaktstelle notwendig, doch sprechen diverse Foren- und Usenet-Beiträge anders. Um das Zulöten der Löcher zu vermeiden, empfiehlt es sich Zahnstocher o.ä. durchzustecken, und dann die Nieten auf beiden Seiten zu verlöten. Eine weitaus einfachere und billigere Lösung ist das Einlöten von kurzen Drahtstücken (Bauteilbeinchen!) sowie bedrahtete Bauteile als Kreuzungspunkt zu wählen (bei den gedrehten Präzisions-Fassungen für ICs kommt man von der Seite auch an die Beinchen). Das Einlöten der Bauteilbeinchen (oder Silberdrahts mit 0,6 mm Stärke) fällt recht leicht, wenn man zunächst auf die eine Seite über das Loch einen kleinen Tropfen Lötzinn setzt. Nun steckt man von der anderen Seite den Draht ein, und knipst ihn wenige Millimeter über der Platine ab. Wenn man diesen Draht mit dem Lötkolben heißmacht, und dabei leicht reinschiebt, gibt der Lötzinnpropf auf der anderen Seite nach, und der Draht verschwindet fast bündig mit der Platinenfläche im Loch. Nun auf diese Seite auch einen Lötzinnpropf und die Durchkontaktierung ist fertig. Selbstredend sollte man dabei ein Stück Papier o.ä. unterlegen, damit das Lötzinn keine Brandspuren auf dem Tisch hinterlässt. Probleme bereiten große Kupferflächen (z.B. durch „poly gnd“), hierbei dauert es deutlich länger, bis das Drahtstück einsinkt. Ggf. lässt sich die Wärmekopplung zum Draht verbessern, indem bereits vor dem Einsinken auch auf die andere Seite ein Lötzinnpropf gesetzt wird, in den die Spitze des Lötkolbens eintaucht. Überstehende Nasen nach dem Entfernen des Lötkolbens kann man durch das Behandeln mit etwas Flußmittel und nochmaligen Antippen mit der Lötkolbenspitze abnehmen (evtl. mehrfach durchführen). Mit etwas Übung entstehen so flache Vias, daß man sogar SMD-Bauteile darüber auflöten kann.

11 Ein Beispielhafter Ablaufplan

Der hier vorgestellte Ablaufplan ist meine derzeitige Vorgehensweise. Sie soll keineswegs als sklavisch einzuhaltende Anleitung verstanden werden, wie bereits mehrfach erwähnt sind Lösungsmengen und Zeiten von vielen Faktoren abhängig, und deswegen individuell herauszufinden. Verwendet wird hier Bungard-Basismaterial, Transparentpapier als Vorlage und Eisen(III)-Chlorid als Ätzmittel. Diese Kombination hat sich für mich als sehr zuverlässig herausgestellt.

1. Das Layout wird erstellt, und ggf. gespiegelt ausgedruckt
2. Das Layout auf Lichtdichtigkeit prüfen (= ob alles richtig schwarz ist)
3. Tisch im Keller abräumen, Gerätschaften bereitstellen:
 - Zwei kleine Schalen (14 cm x 14 cm) und eine größere, mit Wasser gefüllte Schale
 - Plastikpinzette
 - Camping-Kochplatte mit Alufolie drauf (ist recht dreckig)
 - Erlenmeyerkolben (1 Liter)
 - Thermometer mit Drahtbügel (soll eintauchen, darf aber nicht auf dem Boden des Kolbens aufsitzen, falsche Temperaturwerte bzw. Überhitzungsgefahr!)
 - Belichtungsgerät (Holzkasten mit Gesichtsbräuner)
 - Saubere Glasscheibe
 - Taschenlampe mit roter Glühbirne
 - Uhr mit Sekundenanzeige
4. 400 ml 1%ige Natriumhydroxid-Lösung in Erlenmeyerkolben geben, auf 25 °C erhitzen
5. Erhitzte Lösung in eine der kleinen Schalen gießen
6. Erlenmeyerkolben ausspülen
7. 400 ml Eisen(III)-Chlorid-Lösung in Erlenmeyerkolben geben, auf 40 °C erhitzen
8. Heizplatte ausstellen, aber Kolben noch darauf stehen lassen (muß bis 50 °C kommen)
9. Verdunkeln und Schutzfolie von der Platine abziehen
10. Platine in Belichtungsgerät legen, Vorlage drauf, Glasscheibe drüber
11. 3 Minuten belichten, währenddessen Licht anmachen und nach Temperatur der Eisen(III)-Chlorid-Lösung schauen (hat 50 °C, in zweite kleine Schale gießen), Licht wieder ausmachen
12. Platine in Natriumhydroxid-Lösung geben (ggf. rotes Licht verwenden)
13. 60 Sekunden abwarten, dabei Platine mit der Plastikpinzette bewegen
14. Platine mit Pinzette in Wasserbecken geben und Lackreste abspülen
15. Platine mit Pinzette in Eisen(III)-Chloridlösung geben
16. Durchatmen, das Kritische ist erledigt, Licht wieder anmachen (ich weiß nicht, ob der Photolack hier noch empfindlich ist, aber die Eisen(III)-Chlorid-Lösung ist sowieso derart undurchsichtig, daß hierbei kein Problem besteht)
17. Aufräumarbeiten beginnen
18. Nach 15-20 Minuten nach Platine schauen
19. Nach insgesamt 25 Minuten ist die Platine meistens fertig
20. Platine mit Pinzette in Wasserbecken geben und Ätzmittellrückstände abspülen
21. Platine auf ein Stück Küchenpapier geben, zum Waschbecken tragen
22. Platine unter fließendem Wasser gründlich reinigen

23. Aufräumarbeiten abschließen

Die Abschlußreinigung der Platine, Bohren, Fräsen und Sägen ist relativ unspektakulär, da kann man nicht viel falsch machen, sofern man handwerklich nicht total unbegabt ist.

URLs und weiterführende Literatur

- [1] **hennichodernich - nerdity gallery**
<http://home.arcor.de/henning.paul/gallery/gallery.html>
- [2] **PCB-POOL**
<http://wwwpcb-pool.de/>
- [3] **Foren auf Mikrocontroller.net**
<http://www.mikrocontroller.net/forum/>
- [4] **CadSoft Online**
<http://www.cadsoft.de/>
- [5] **de.sci.electronics FAQ & Linklist**
<http://www.dse-faq.elektronik-kompendium.de/>
- [6] **Carl Roth (Laborbedarf)**
<http://www.carl-roth.de/>
- [7] **Backtracking-Algorithmen**
<http://www.zotteljedi.de/permalinks/backtracking>
- [8] **Bungard Elektronik**
<http://www.bungard.de/>
- [9] **Mikroskope Beyersdörfer**
<http://www.mikroskope.info>
- [10] **Reichelt Elektronik**
<http://www.reichelt.de/>
- [11] **Conrad Electronic**
<http://www.conrad.de/>