

DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

Max Gaukler

Lehrstuhl für Regelungstechnik

Sommersemester 2019



DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

Entwurf und Fertigung von elektronischen Schaltungen

Max Gaukler

Lehrstuhl für Regelungstechnik

Sommersemester 2019



Einleitung

- Umsetzung einer Idee in eine elektronische Schaltung:
 - 1 Konzeptfindung → Vorlesung „Elektronik“
 - 2 Schaltplan
 - 3 Auswahl der Baugrößen
 - 4 Platinenlayout
 - 5 Platinenfertigung
 - 6 Bestückung
- Heutige Vorlesung: vom Papier-Schaltplan bis zur fertigen Platine
- Schwerpunkt: einfache Schaltungen, Fertigung im Hobbymaßstab



Gliederung

- 1 Einleitung
- 2 Grundlagen
 - Aufbautechnik
 - Platinenfertigung
- 3 Rechnergestützter Entwurf
 - Schaltplan
 - Platinenlayout



Platine

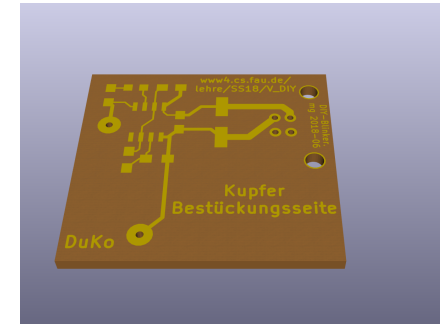
- Leiterplatte (Platine) (engl. *printed circuit board, PCB*): Kupferbahnen auf Isolator
- aufgelötete Bauelemente
- Verbindungen gemäß Schaltplan



Bild: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:lccd-angle-back.jpg>, Autor: Murray 1010 via Wikimedia Commons, Lizenz: CC-BY-SA 3.0

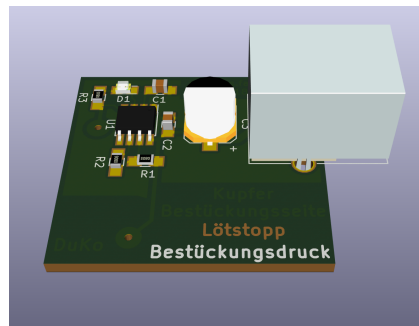
Platine: Aufbau

- GFK-Basismaterial (GlasFaserverstärkter Kunststoff)
- Bohrlöcher
- 1 – 8 Kupferlagen (Leiterbahnen)
 - unten: „Lötseite“
 - oben: „Bestückungsseite“
 - ggf. weitere Innenlagen (teuer)
- Durchkontaktierungen (engl. *vias*)
- Lötstopplack (engl. *stopmask*)
- Bestückungsdruck („Siebdruck“) (engl. *silkscreen*) (meist nur auf Bestückungsseite)
- Bauteile (industrielle Bestückung: möglichst nur auf Bestückungsseite; einlagige Platine: SMD auf Lötseite, THT auf Bestückungsseite)



Platine: Aufbau

- GFK-Basismaterial (GlasFaserverstärkter Kunststoff)
- Bohrlöcher
- 1 – 8 Kupferlagen (Leiterbahnen)
 - unten: „Lötseite“
 - oben: „Bestückungsseite“
 - ggf. weitere Innenlagen (teuer)
- Durchkontaktierungen (engl. *vias*)
- Lötstopplack (engl. *stopmask*)
- Bestückungsdruck („Siebdruck“) (engl. *silkscreen*) (meist nur auf Bestückungsseite)
- Bauteile (industrielle Bestückung: möglichst nur auf Bestückungsseite; einlagige Platine: SMD auf Lötseite, THT auf Bestückungsseite)



Aufbautechniken: SMD versus THT

- THT: Durchsteckmontage (engl. *through-hole technology*)
Bauteil wird in Bohrloch gesteckt und rückseitig verlötet. Eher veraltet.
- SMD: oberflächenmontiertes Bauteil (engl. *surface-mounted device*)
wird aufgelötet, sehr platzsparend, teilweise nicht mehr Hobby-geeignet

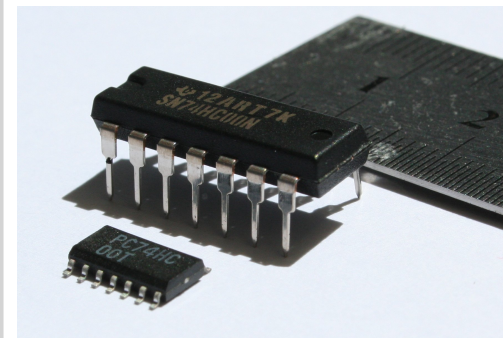


Bild: SMD- (unten) und THT-Variante (oben) des gleichen Chips 74HC00.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Logic_ICs_in_size_comparison.JPG,
Autor: Sundance Raphael via Wikimedia Commons, Lizenz CC-BY-SA 3.0

Photochemische Platinenfertigung im Hobbymaßstab

- 1 Rohmaterial: GFK mit Kupfer und Fotolack
- 2 Zusägen und entgraten
- 3 Schutzfolie entfernen
- 4 **Belichten** mit Maske (ausgedrucktes Layout)
- 5 **Entwickeln**: Belichteten Fotolack entfernen
- 6 **Ätzen**: Freigelegte Metallstellen entfernen
- 7 Bohren
- 8 Entschichten¹: Unbelichteten Fotolack entfernen
- 9 optional: Durchkontaktierungen einpressen
- 10 optional: Verzinnen gegen Korrosion

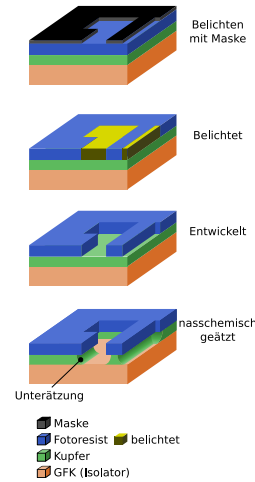


Bild abgewandelt von: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Etching_wet_chemical_vs_rie_\(DE\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Etching_wet_chemical_vs_rie_(DE).svg)
 Autor: Cepheiden via Wikimedia Commons, Lizenz CC-BY-SA 3.0

¹nach dem Bohren, um Verschmutzung zu verringern

Photochemische Platinenfertigung im Profi-Maßstab

- 1 Ausgangspunkt: nackte (oder dünn verkupferte) GFK-Platte
- 2 Bohren
- 3 **Verkupfern** (Löcher durchkontaktieren)
- 4 Fotolack aufbringen
- 5 **Belichten, Entwickeln, Ätzen**, Entschichten
- 6 optional: Lötstopplack und Bestückungsdruck
- 7 optional: Verzinnen oder Vergolden
- 8 optional: E-Test (Kurzschlüsse, Unterbrechungen)

Selber fertigen ist äußerst unüblich!

Üblicherweise werden Platinen nur durch externe Auftragsfertiger gefertigt, für 10x16 cm doppelseitig kostet dies ca. 60 Euro (Fernost: ca. 20 Euro).²

²<https://www.mikrocontroller.net/articles/Platinenhersteller>

Gliederung

- 1 Einleitung
- 2 Grundlagen
 - Aufbautechnik
 - Platinenfertigung
- 3 Rechnergestützter Entwurf
 - Schaltplan
 - Platinenlayout

Wiederholung: Schaltungsfindung

Zuerst überlegen, was und wie man will, nicht einfach drauflosarbeiten!

Mögliche Quellen für Entwürfe:

- **Selber entwerfen**, systematisches Kombinieren von Grundsaltungen (ggf. hoher Aufwand)
- **Datenblätter** interessanter Bauteile
- **Application Notes** (Kochrezepte mit meist hoher Qualität)
- Anleitungen aus der Literatur (mit etwas Vorsicht)
- Projekte anderer im Internet (mit großer Vorsicht)

Es bleibt die Abwägung: Will ich mit hohem Aufwand „selber kochen“ oder schlechte „Fastfood-Qualität“ riskieren?

Die Summe allen Übels ist stets gleich. — alte Ingenieursweisheit

EDA-Software (Electronic Design Automation)

- Programme zur Schaltplan- und Platinenerstellung
- Im Hobbybereich geeignet:
 - **KiCAD (umfangreich, Open Source)**
 - Eagle (kostenlose Variante nur nichtkommerziell und eingeschränkt)
 - DesignSpark PCB (nur unter Windows)
 - Fritzing (Open Source, extrem eingeschränkt, nur für „Steckbrett-Basteleien“)

Fritzing is a terrible tool that you should not use. — Brian Benchoff
- Premium-Produkte z.B. Altium (kostet etwa 10k€, dafür extrem gut)
- Bedienung sehr unterschiedlich, Geschmacks- und Gewöhnungssache!
- Beschränkung der Vorlesung/Übung auf KiCAD: keine Lizenzeinschränkungen, Profi-Features (z. B. interaktives Routing), Workflow ähnlich zu Profi-Programmen



Schaltplan erstellen

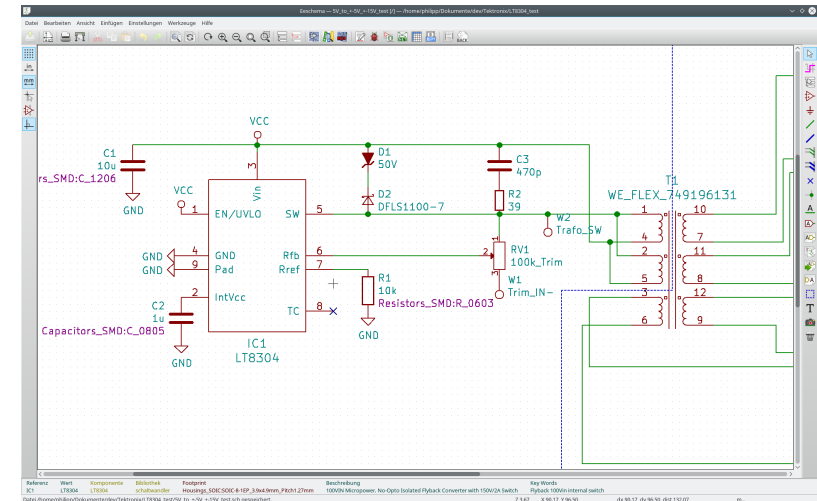


Abbildung: Schaltplan eines isolierten DCDC-Konverters



Schaltplan erstellen – Gute Praxis

Ein Schaltplan soll **lesbar und übersichtlich** die Schaltung erklären.
Er ist **kein 1:1-Bild** der Verkabelung (Stromlaufplan)!

Gute Praxis:

- Labels, besonders für Spannungsquellen und Masse
- wichtige Signale benennen, damit Name im Platinenlayout angezeigt wird
- Richtung, soweit sinnvoll möglich:
 - Stromfluss von oben (+) nach unten (-)
 - Signalfluss von links (Eingang) nach rechts (Ausgang)
- Nicht „stopfen“! Lieber Seitengröße erhöhen oder neue Seite hinzufügen.
- Kommentare für Besonderheiten, Entscheidungsgründe, ...



Stromlaufplan – kein guter Schaltplan!

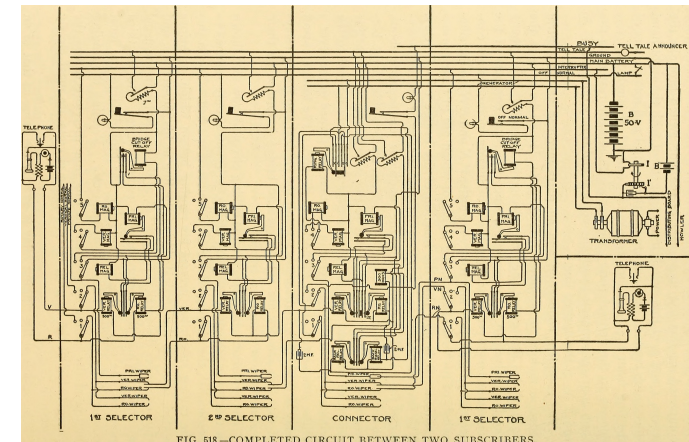


Abbildung: Stromlaufplan einer Telefonanlage (1905).

Kempster B. Miller, via Wikimedia Commons, Copyright abgelassen.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:American_telephone_practice_\(1905\)_-\(14756423865\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:American_telephone_practice_(1905)_-(14756423865).jpg)



Schaltplan versus Realität

Leitungen im Schaltplan sind ideal definiert, das heißt:

- Keine Innenwiderstände
- Keine Abstrahlung oder Kopplung zwischen Leitungen
- Keine Laufzeiten über Wegstrecken

Dies muss später beim Platinenlayout bedacht werden!



Electric Rules Check (ERC)

ERC prüft den fertigen Schaltplan auf offensichtliche Fehler, etwa

- Spannungs-Ausgänge (z. B. 12V und 5V) miteinander verbunden
- Spannungs-Eingänge nicht mit einem -Ausgang verbunden
- Nicht verbundene Pins
- zum Teil Fehlalarme

Tip: Gängige ERC-Fehler in KiCAD beheben

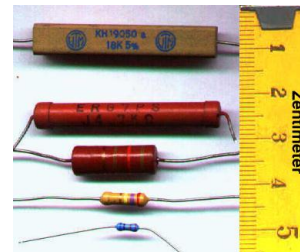
- Bauteil PWR_FLAG um einen Anschluss (z.B. Stecker) künstlich als Versorgungsspannungs-Eingang zu markieren
- NoConn-Markierung (X) um einen Pin als nicht angeschlossen zu kennzeichnen



Auswahl der Gehäuseform (engl. *footprint*)

Der Schaltplan enthält Symbole, z.B. einen Widerstand mit 100 Ohm.

Diese Bauteile gibt es aber in verschiedensten Baugrößen!



Welche Baugröße soll ausgewählt werden? Zu bedenken:

- Welche Leistung fällt an dem Widerstand ab?
- Welche Spannung muss er aushalten?
- Was ist die kleinste Bauform, die noch einfach zu löten ist?
- Wie fein kann ich die Platine fertigen?

Bild: Honina, Deutsche Wikipedia, Lizenz: GFDL, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Widerst%C3%A4nde.JPG>



Übergang vom Schaltplan zum Platinenlayout

- 1 Bauteile benennen (KiCAD: „Annotieren“)
 - 2 Den Bauteilen (Symbole im Schaltplan) Gehäuseformen zuordnen
 - *heavy symbols* (EAGLE): **Feste Zuordnung** beim Einfügen in den Schaltplan.
⚡ *Nachträgliche Änderung erfordert meist Löschen des Bauteils.*
 - *light symbols*: Flexible Zuordnung **nach** (teils: während) der Schaltplanerstellung.
⚡ *Funktioniert nicht wirklich, wenn je nach Bauform Pins unterschiedlich nummeriert sind oder gar fehlen.*
 - oft Mischung beider Konzepte: KiCAD eher „light“, aber z. T. unterschiedliche Symbole je nach Pinbelegung (Transistor: BCE, EBC oder CBE)
 - 3 Netzliste exportieren und in Platinen-Editor importieren
 - Maschinenlesbare Form des Schaltplans
 - Netz: Gruppe miteinander verbundener Pins
- passiert je nach Software automatisch



KiCAD: Cvpcb – Zuordnung von Symbol und Bauform

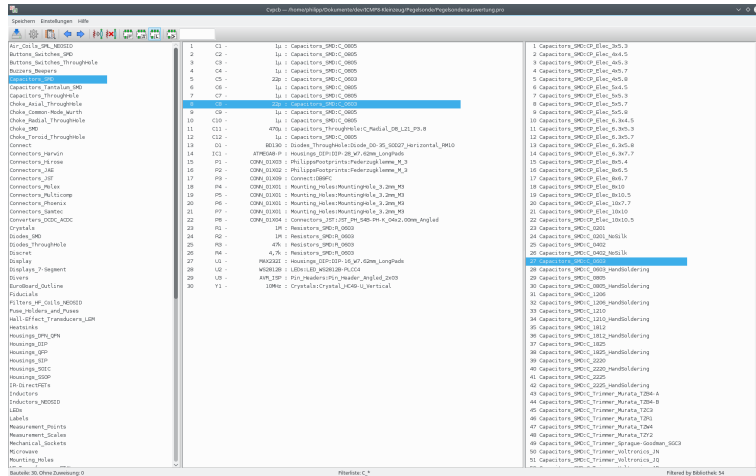


Abbildung: Cvpcb aus der KiCAD-EDA-Suite

Bauform-(Footprint)-Anzeige

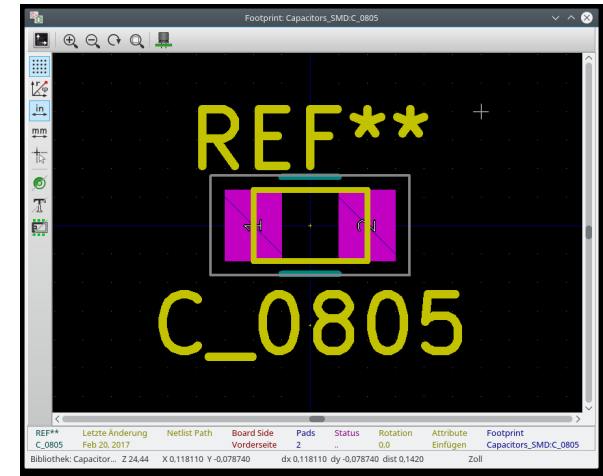


Abbildung: 2D-Vorschau der Bauform im Platinenlayout-Programm

Footprint-3D-Anzeige

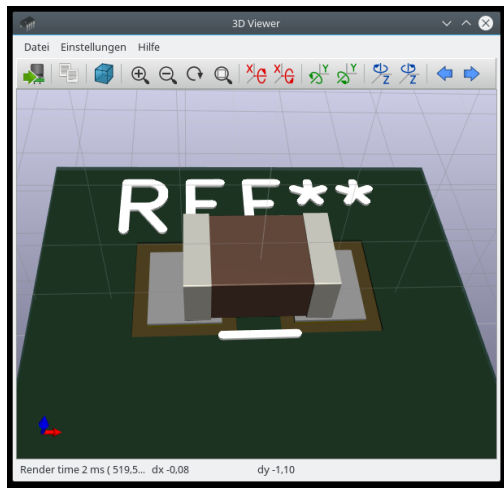


Abbildung: 3D-Modell des Bauteils auf der Platine

Achtung: Fehlerquelle

Bitte immer alles richtig machen!

- Falsche Bauteilmaße oder Pin-Zuordnungen sind ein häufiger Fehler.
- Besonders bei SMD im Zweifel nachmessen oder im Datenblatt prüfen
- Zum groben Prüfen: Platine 1:1 ausdrucken und Bauteil draufsetzen
- Bauformen sind je nach Hersteller unterschiedlich bezeichnet
- Bei echten „light symbols“ (früher bei KiCAD) gibt es für *eine* Bauform *mehrere* Footprint-Einträge mit unterschiedlicher Pin-Bezeichnung (z.B. für Transistor mit B,C,E anstatt 1,2,3).

Voreinstellungen und Design-Regeln festlegen

Voreinstellungen:

- häufig gebrauchte Leiterbahnbreiten
- sinnvolle Durchkontaktierungsmaße

Design-Regeln:

- Mindestabstand zwischen Leiterbahnen
 - Mindestbreite der Leiterbahnen
 - Minimaler Bohrlochdurchmesser
 - Mindestgröße der Durchkontaktierungen
 - ...
- entsprechend der Fertigungsgrenzen (professionell oder im FabLab?)



Einschränkungen der Hobby-Fertigung

- Mindestabstände und -breiten deutlich größer
- Durchkontaktierungen problematisch
 - eingepresste DuKos unzuverlässig
 - eingelötete Drahtstifte umständlich
 - ⇒ so wenig DuKos wie möglich, lieber nur einseitig
- maximal zweilagig, besser einlagig
- Drahtbrücken als Ersatz für weitere Lagen
(im Layout-Programm wie eine weitere Lage eingeben)
- Bohrlöcher sind nicht durchmetallisiert, können nicht als Durchkontaktierung mitverwendet werden!
- Platinen für die Hobbyfertigung lassen sich meist ohne Änderungen professionell herstellen, weil sie für die maschinelle Fertigung sehr anspruchslos sind!



Design-Regeln: Übliche Werte

Werte für geringes Risiko im FabLab / Standardpreis in der Industrie:

	FabLab ³	Industrie ⁴
Abmessungen (max.)	160x100	500x400
Leiterbahnbreite und -Abstand (min.)	0,25 ⁵	0,15
∅Bohrloch (min.)	ca. 0,50	0,25
∅Bohrloch (max.)	3,00	∞
∅DuKo Bohrung	=0,90	≥0,25
∅DuKo Pad (min.)	2,50	Bohrung + 0,25

Alle Angaben in mm.

Weitere übliche Einheit: 1 mil = 1/1000 inch = 0,254 mm

³<https://fablab.fau.de/tool/platinenfertigung/>

⁴<https://www.eurocircuits.de/leiterplatten-design-guidelines/>, Class 6 (Normalpreis)

⁵ist für SMD manchmal zu grob; mit Vorsicht ist auch noch 0,20 mm praktikabel



Bauteile platzieren: Laden der Netzliste

- Jetzt kann die Netzliste geladen werden. Dabei werden neue Bauteile eingefügt, zunächst an willkürlichem Ort.
- Auch bei Veränderungen im Schaltplan muss dies wiederholt werden, um veraltete Bauteile und Leiterbahnen zu löschen.
- KiCAD: Bauteile landen zunächst alle aufeinander, daher am Besten erst grob verteilen (lassen).
- EAGLE: Entfällt, denn die Platine übernimmt sofort die Änderungen des Schaltplans. Dafür geht die Platinendatei „kaputt“, wenn man nur die Schaltplandatei alleine geöffnet hat. (Wird normalerweise verhindert.)



Bauteile platzieren: Grundregeln

Wegen **parasitärer Effekte**: „zusammengehörige Bauteile beieinander“

- Abblockkondensatoren nahe der Versorgungspins von ICs anbringen
- Isolationsabstand um Bereiche mit gefährlicher Spannung
- Empfindliche Empfänger oder Signalauswertungen entfernt von Leistungsteilen anbringen
- Für hohe Ströme: Wege kurz halten, große Leiterbahnbreite

Wegen **Fertigungstechnik**:

- Ausreichend Platz zwischen Bauteilen, um diese auch verlöten zu können
- Bauteile so anordnen, dass Leiterbahnen möglichst „entwirrt“ werden (Überkreuzungen benötigen Durchkontaktierung)

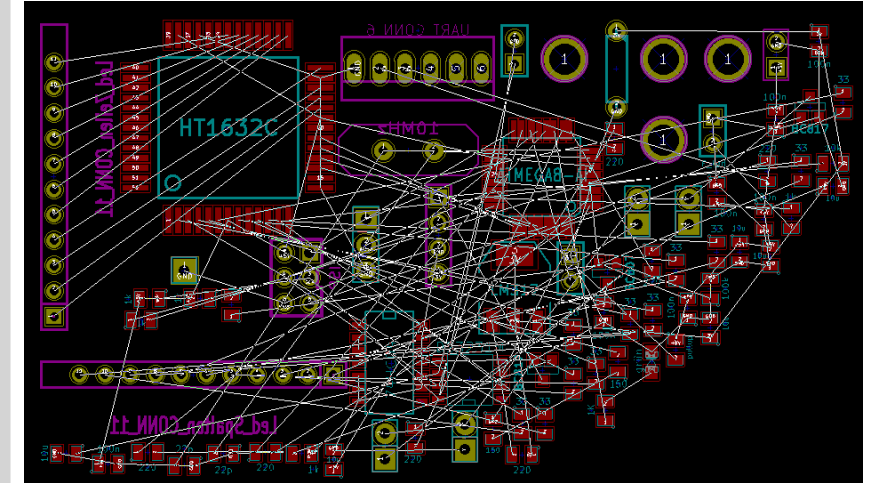
Und vieles mehr... siehe Literatur am Ende der Folien



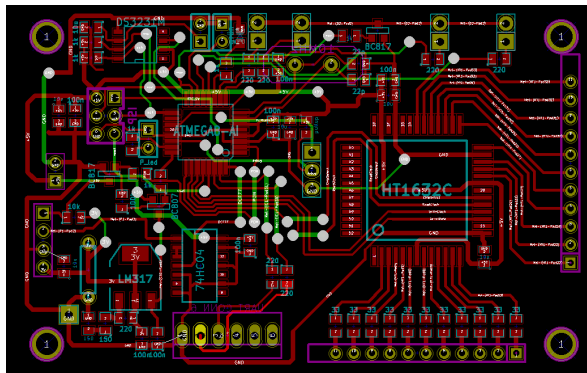
Bauteile platzieren: „rat's nest“

„Rattennest“ zeigt Luftlinien zwischen zu verbindenden Pins.

Bauteile möglichst so anordnen, dass Luftlinien kurz und entwirrt sind.



Leiterbahnen legen (engl. *routing*)



- Leiterbahnen verbinden die Bauteile miteinander
- Wichtigstes zuerst verlegen (Versorgung, hoher Strom, schwache Signale)
- Für Überkreuzungen: Durchkontaktierungen (oder Drahtbrücken)



Beschriftung

Gute Praxis:

- Auf jede Kupferlage etwas Text
- Bezeichnung, Datum, Revision mit aufbringen
- ggf. Passermarken (u. a. bei Hobbyfertigung zweilagiger Platinen)

Begründung:

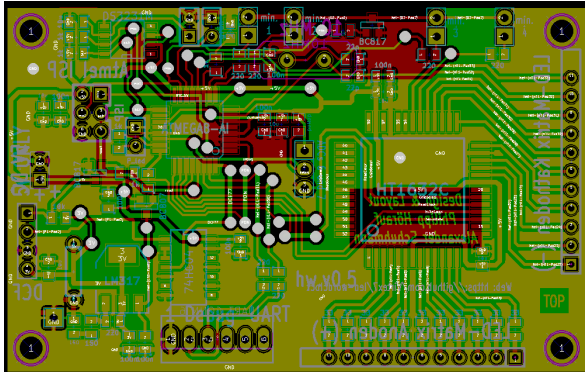
- Fehler bei der Fertigung erkennen (gespiegelt? Lagen verrutscht?)
- Nachvollziehbarkeit (Welchen Stand hat diese Platine?)

Gespiegelt oder nicht?

Am Bildschirm sieht man die Sicht von oben auf Bestückungsseite durch die Platine hindurch. Text auf der Lötseite (grün) muss gespiegelt aussehen, auf der Bestückungsseite (rot) nicht!



Masseflächen



- Um Ätzchemie zu sparen und die Abschirmung und Leitfähigkeit zu verbessern, wird am Ende mit Massefläche aufgefüllt.
- Ausreichend Abstand einstellen, damit Pins lötbar bleiben
- Fläche sollte gut zusammenhängend sein (parasitärer Widerstand!)



Unterstützung beim Leiterbahnen legen

Online-DRC (KiCAD, Altium, EAGLE ab V8.4): Programm verhindert DRC-Fehler bereits *während* die Leiterbahn verlegt wird:
„Verbotene“ Mausklicks werden ignoriert.

Interaktives Routing (bei KiCAD nur in OpenGL-Anzeige): Leiterbahn weicht Hindernissen aus oder schiebt andere Bahnen aus dem Weg (engl. *push-and-shove routing*). Benutzer gibt die Richtung vor.

Automatisches Routing (engl. *autoroute*) verlegt alles automatisch. Es ist mit großer Vorsicht zu genießen! Alles Wichtige unbedingt von Hand machen, oder bei Profi-Programmen wie Altium den Autorouter sehr genau konfigurieren. Für Hobby-Fertigung oder einlagige Platinen in der Regel nicht nutzbar, weil zu viele DuKos.

*Computers are good at following instructions,
but not at reading your mind. — Donald Knuth*



Design Rule Check (DRC)

Automatische, *nachträgliche* Prüfung des Layouts auf:

- Korrektheit (Kurzschlüsse, fehlende Verbindungen)
- Design-Regeln (zu kleine Abstände oder Leiterbahnbreiten)

Fehlalarme?

Gibt es per Definition nicht, sofern Fertigungsgrenzen korrekt eingestellt!

Ausnahme: Bauteile mit so feinen Pin-Abständen, dass sie mit den gewählten Grenzen eigentlich nicht zu fertigen wären (aber man es trotzdem riskiert).

Achtung: Selber mitdenken!

Dem DRC sollte nicht blind vertraut werden. Beispielsweise werden bei Hobbyfertigung Bauteil-Pins nicht durchkontaktiert, außer man verlötet sie beidseitig. Das Programm weiß das aber nicht!



Export (KiCAD: „Plotten“)

- Für Hobby-Fertigung: Ausdrucken (PDF, 1:1)
 - für seitenrichtige Maske: Lötseite spiegeln
 - für spiegelverkehrte Maske (FabLab): Bestückungsseite spiegeln
Vorteil: Druckertoner liegt direkt auf Platine
 - Alternative zum Drucken: Photoplot machen lassen (Folie mit hohem Kontrast)
- Professionell: Gerber-Datenformat
 - theoretisch: feste Norm
 - praktisch: Hinweise des Fertigers genau beachten!
- Teilweise: Weitergabe im Originalformat (KiCAD/EAGLE/...)
 - Gefahr von Fehlern durch Inkompatibilität verschiedener Versionen
 - Gefahr von Datenklau: Quelldaten werden aus der Hand gegeben



42



Platinenlayout: Allgemein

- A Practical Guide to High-Speed Printed-Circuit-Board Layout:
<http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/high-speed-printed-circuit-board-layout.html>
- Linear Design Handbook, Chapter 12: Printed Circuit Board Issues
<http://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Basic-Linear-Design/Chapter12.pdf>
- PCB Design Tutorial:
<http://alternatezone.com/electronics/files/PCBDesignTutorialRevA.pdf>

Platinenlayout: KiCAD

- → siehe Übungsfolien



Diese Präsentation basiert auf Vorarbeit von Philipp Hörauf.

Copyright: Philipp Hörauf und Max Gaukler, außer Bilder mit Quellenangabe.

