

# DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

**Max Gaukler**

Lehrstuhl für Regelungstechnik

Sommersemester 2018



# DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

Entwurf und Fertigung von elektronischen Schaltungen

**Max Gaukler**

Lehrstuhl für Regelungstechnik

Sommersemester 2018



- 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



## 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

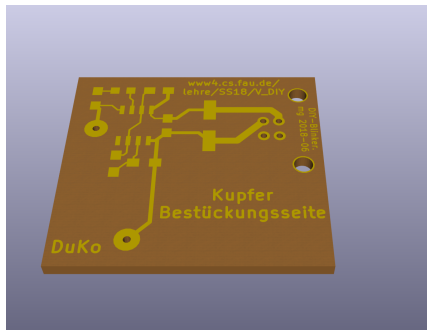


Bild: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1ccd-angle-back.jpg>, Autor: Murray 1010 via Wikimedia Commons, Lizenz: CC-BY-SA 3.0



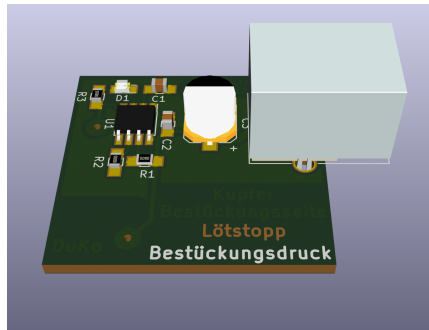
# Platine: Aufbau

- 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

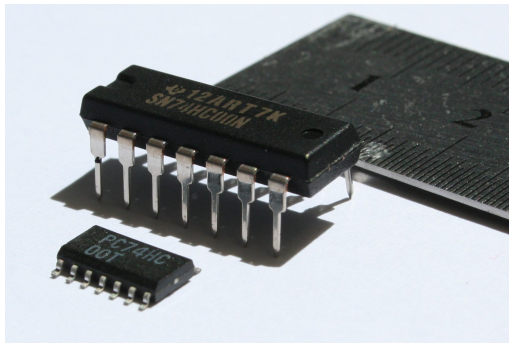


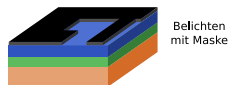
Bild: SMD- (unten) und THT-Variante (oben) des gleichen Chips 74HC00.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Logic\\_ICs\\_in\\_size\\_comparison.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Logic_ICs_in_size_comparison.JPG),  
Autor: Sundance Raphael via Wikimedia Commons, Lizenz CC-BY-SA 3.0



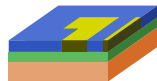


# Photochemische Platinenfertigung im Hobbymaßstab

- 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 Entschichten<sup>1</sup>: Unbelichteten Fotolack entfernen
- 9 optional: Durchkontaktierungen einpressen
- 10 optional: Verzinnen gegen Korrosion



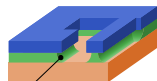
Belichten  
mit Maske



Belichtet



Entwickelt



nasschemisch  
geätzt

Unterätzung



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

<sup>1</sup>nach dem Bohren, um Verschmutzung zu verringern

- 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).<sup>2</sup>

---

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



## 1 Einleitung

## 2 Grundlagen

- Aufbautechnik
- Platinenfertigung

## 3 Rechnergestützter Entwurf

- Schaltplan
- Platinenlayout



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*



- 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 Lizenz einschränkungen, Profi-Features (z. B. interaktives Routing), Workflow ähnlich zu Profi-Programmen



# Schaltplan erstellen

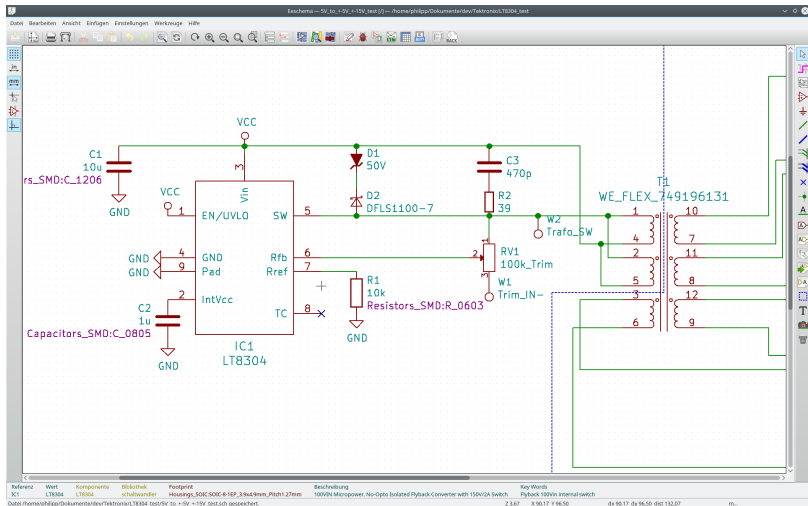


Abbildung: Schaltplan eines isolierten DCDC-Konverters



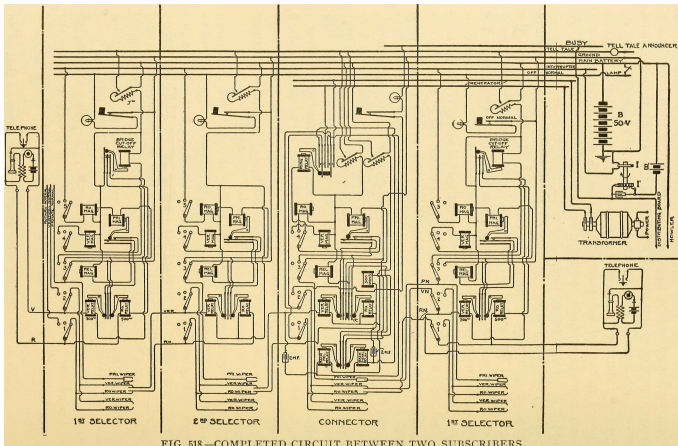
Ein Schaltplan soll **lesbar und übersichtlich** die Schaltung erklären.  
Er ist **kein 1:1-Bild** der Verkabelung (Stromlaufplan)!

## 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 abgelaufen.

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





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

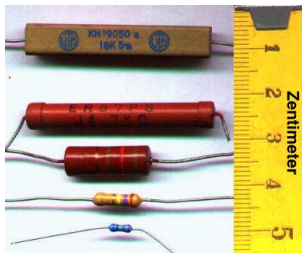
- Bauteil PWR\_FLAG um einen Anschluss (z.B. Stecker) künstlich als Versorgungsspannungs-Eingang zu markieren
- NoConn-Markierung (X) um einen Pin als nicht angeschlossen zu kennzeichnen



## 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 Pinspassiert je nach Software automatisch



# KiCAD: Cvpcb – Zuordnung von Symbol und Bauform

The screenshot displays the 'Cvpcb' dialog box in KiCAD, titled 'Cvpcb - Ramezhpj\Documents\KiCAD\PCB\Kicvpcw\Figurat\BauformZuweisung.pcb'. The interface is divided into three main sections:

- Left Panel:** A list of components from the 'Capacitors' library. 'Capacitors\_SMD' is selected and highlighted in blue.
- Center Table:** A table showing the mapping between symbols and footprints. The selected entry is:

7	C1	Capacitors_SMD_C_0805
---	----	-----------------------
- Right Panel:** A list of available footprint symbols. The selected entry is 'Capacitors\_SMD\_C\_0805', which is highlighted in blue.

At the bottom of the dialog, the status bar shows 'Filterliste C.\*' and 'Filtered by 80/10/10/10/10'.

Abbildung: Cvpcb aus der KiCAD-EDA-Suite



# Bauform-(Footprint)-Anzeige

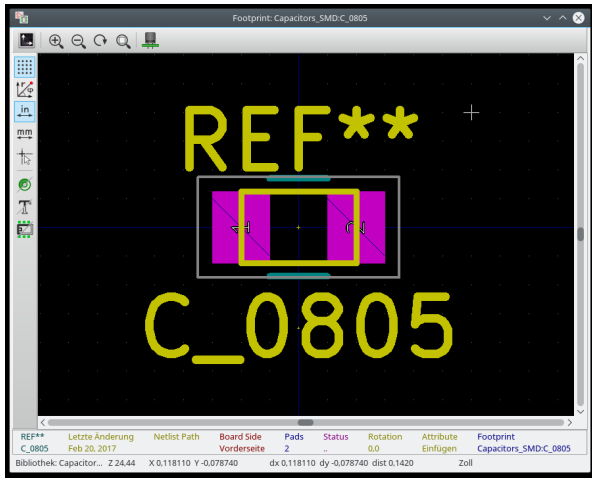


Abbildung: 2D-Vorschau der Bauform im Platinenlayout-Programm



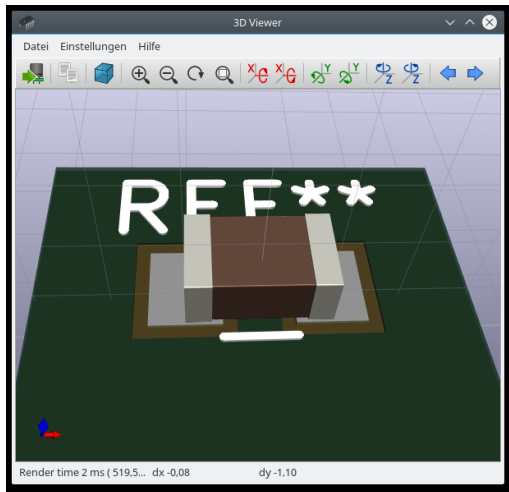


Abbildung: 3D-Modell des Bauteils auf der Platine



*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:**

- 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?)



- 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!



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

	FabLab <sup>3</sup>	Industrie <sup>4</sup>
Abmessungen (max.)	160x100	500x400
Leiterbahnbreite und -Abstand (min.)	0,25 <sup>5</sup>	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

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

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

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



- 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.)



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)

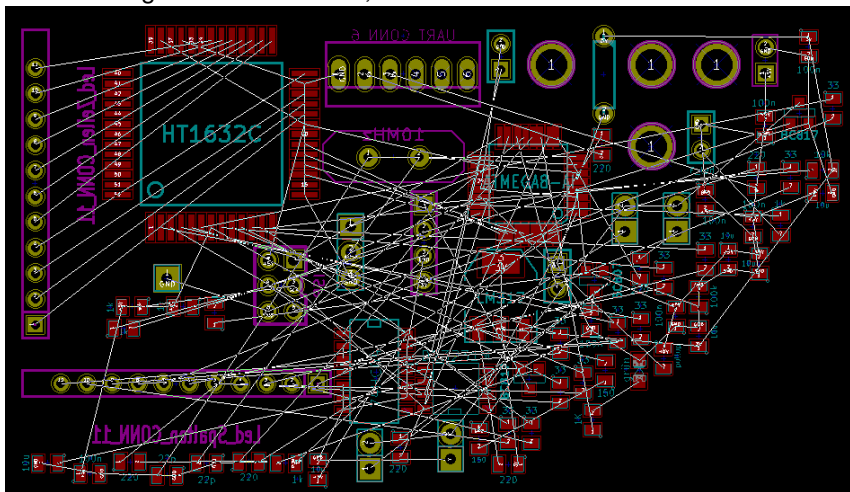
Und vieles mehr... siehe Literatur am Ende der Folien



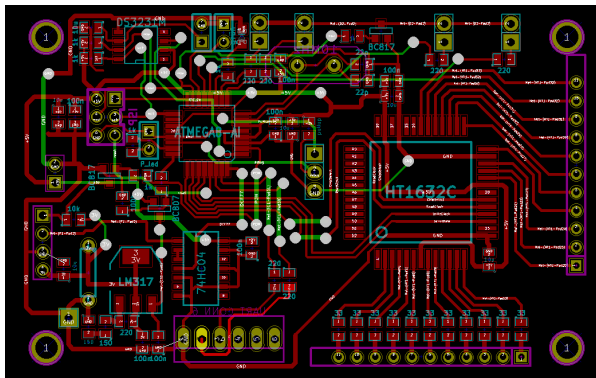
## Bauteile platzieren: „rat's nest“

„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)



## **Gute Praxis:**

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

## **Begründung:**

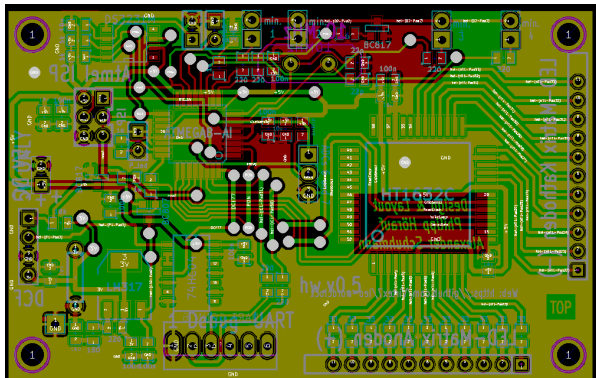
- Fehler bei der Fertigung erkennen (gespiegelt? Lagen verrutscht?)
- Nachvollziehbarkeit (Welchen Stand hat diese Platine?)

## 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!







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

## 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!



## 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*



- 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.

