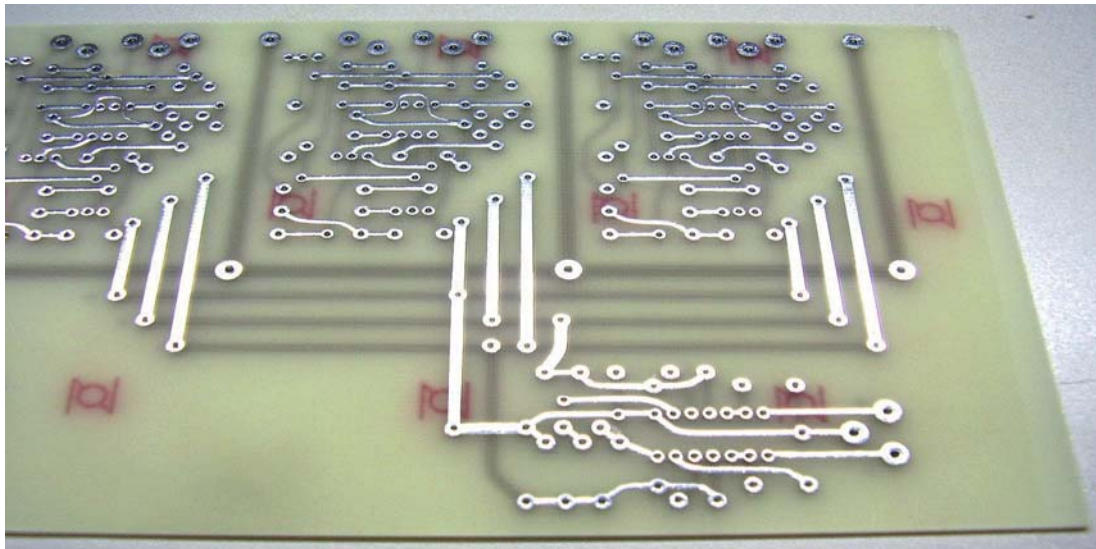


Vom Schaltplan zur gedruckten Schaltung: Platinenlayout und Platinenfertigung



Alexander Mlynek
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching

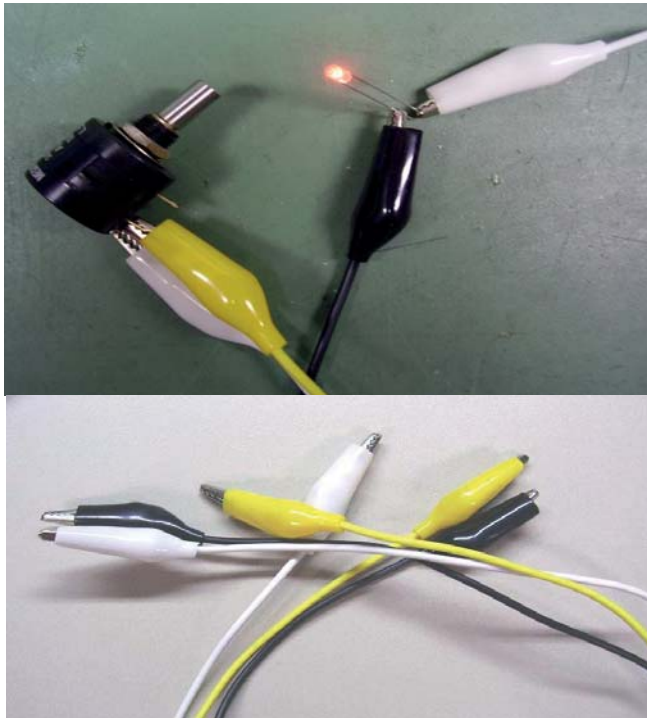
Inhalt

- **Alternativen zur Platine: Steckbretter, 'fliegende' Schaltungen**
- **Löttechnik**
- **Universalplatinen: Lochrasterplatten, Punktrasterplatten, Streifenraster u.a.**
 - Möglichkeiten zur Bestückung und Verdrahtung
- **Individuell gefertigte Platinen**
 - **Eigenschaften**
 - einlagig / mehrlagig
 - Durchkontaktierungen
 - Lötstopplack, Verzinnung der Pads
 - **Herstellung**
 - Erstellen des Layouts (CAD, Einführung in EAGLE)
 - Ätztechnik
- **Beispiele aus der Praxis**
 - Pyroelektrischer Sensor und Vorverstärker
 - Exkurs: E-Bike/Pedelec

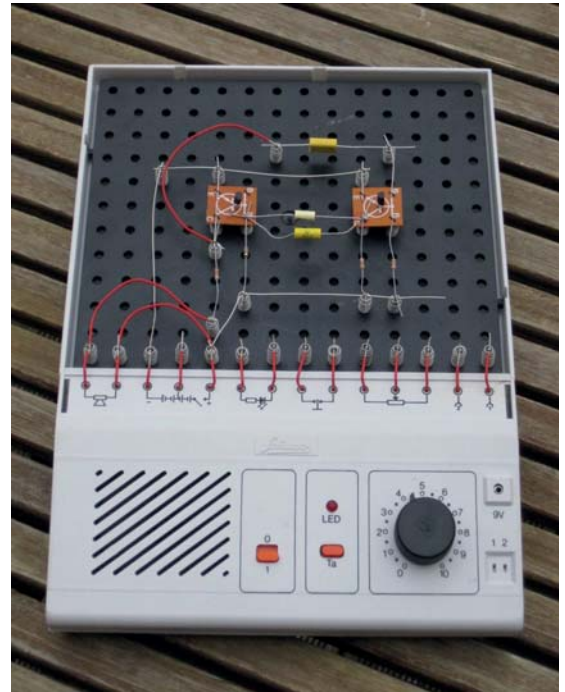
Alternativen zur Platine

Muss es immer eine Platine sein?

Für schnelle, einfache (und meist kurzlebige) Aufbauten gibt es Alternativen.



”Fliegende Schaltung”
Krokodilklemmen

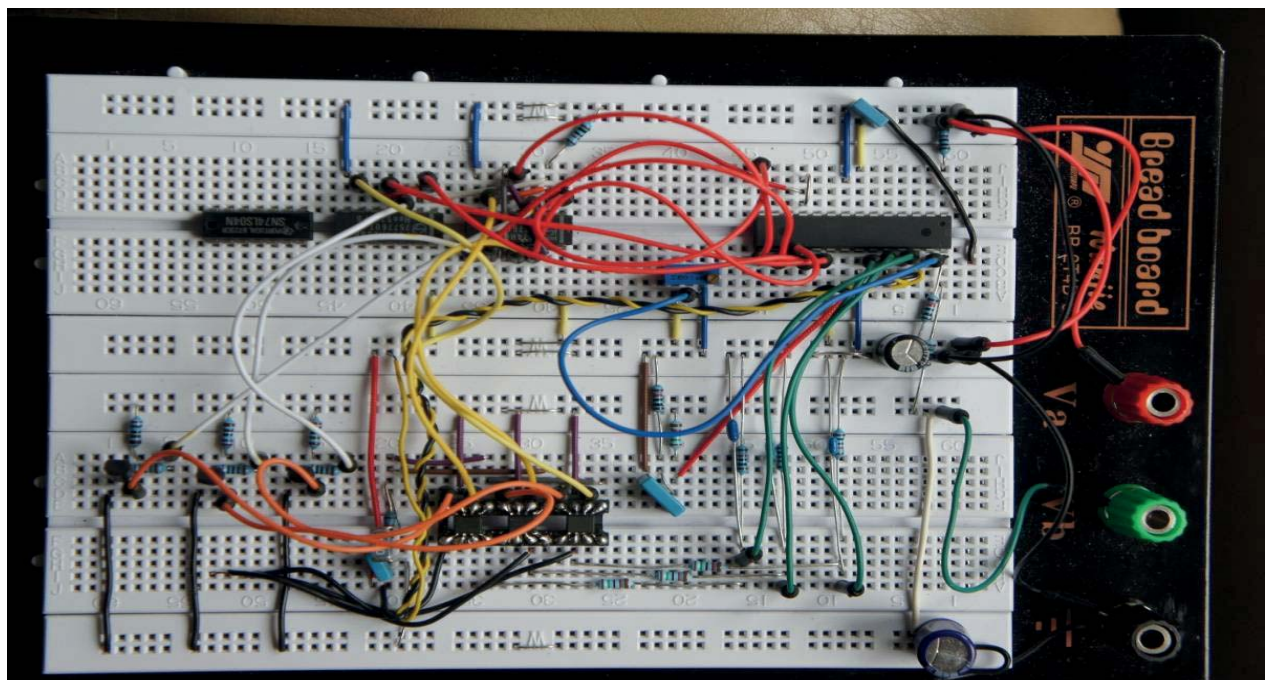


”Baukasten”
Steck- / Klemmverbindungen

Alternativen zur Platine

Muss es immer eine Platine sein?

Für schnelle, einfache (und meist kurzlebige) Aufbauten gibt es Alternativen.



Steckbrett: Ideal auch für ICs im DIL-Gehäuse.
Rastermaß: 2,54 mm

Löttechnik

Für dauerhafte Realisierungen ist der Griff zum LötKolben unumgänglich.

- Lötzinn:** Früher: Aus Zinn und Blei (zu etwa gleichen Teilen)
 Heute: Bleifreies Lötzinn für kommerzielle Produkte verpflichtend (Entsorgungsproblematik).
 Für privaten/wissenschaftlichen Gebrauch: bleihaltiges Lötzinn noch erlaubt



“Sn60Pb40”
bleihaltig



“Sn99Cu1”
bleifrei

- Lötzinn enthält häufig Flussmittel
- Verringert Oberflächenspannung des flüssigen Lotes
 - Verbessert die Benetzung
 - Reduziert oberflächliche Oxidschichten

Flussmittelrückstände können allerdings zu Korrosionsproblemen führen.

Löttechnik

Benötigtes Werkzeug:

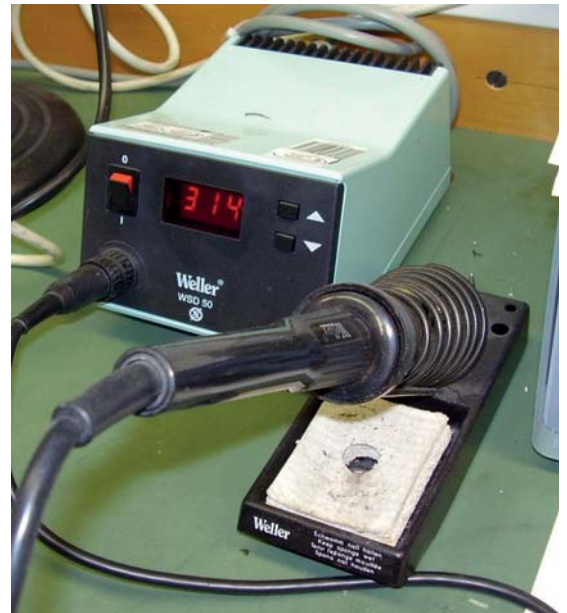
- LötKolben: Idealerweise temperaturgeregt
 Neben dem Heizelement befindet sich dann auch ein Temperaturfühler im LötKolben

Gänzlich ungeeignet:
Lötpistolen

→ Welche Temperatur?

- Untere Grenze: Durch Schmelzpunkt des verwendeten Lötzinns bestimmt

Legierung*	Schmelzpunkt / Schmelzbereich	Arbeitstemperatur (empfohlen)
S-Sn60 Pb40 P	183°C-190°C	240°C-260°C
S-Sn63 Pb37 P	183°C	240°C-260°C
S-Sn64 Pb36 P	183°C-185°C	240°C-260°C
S-Sn62 Pb36 Ag2	178°C-180°C	240°C-260°C



- Obere Grenze: Thermische Belastbarkeit des Bauteils, Verdampfung des Flussmittels

SLOS091E – OCTOBER 1987 – REVISED FEBRUARY 2002

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

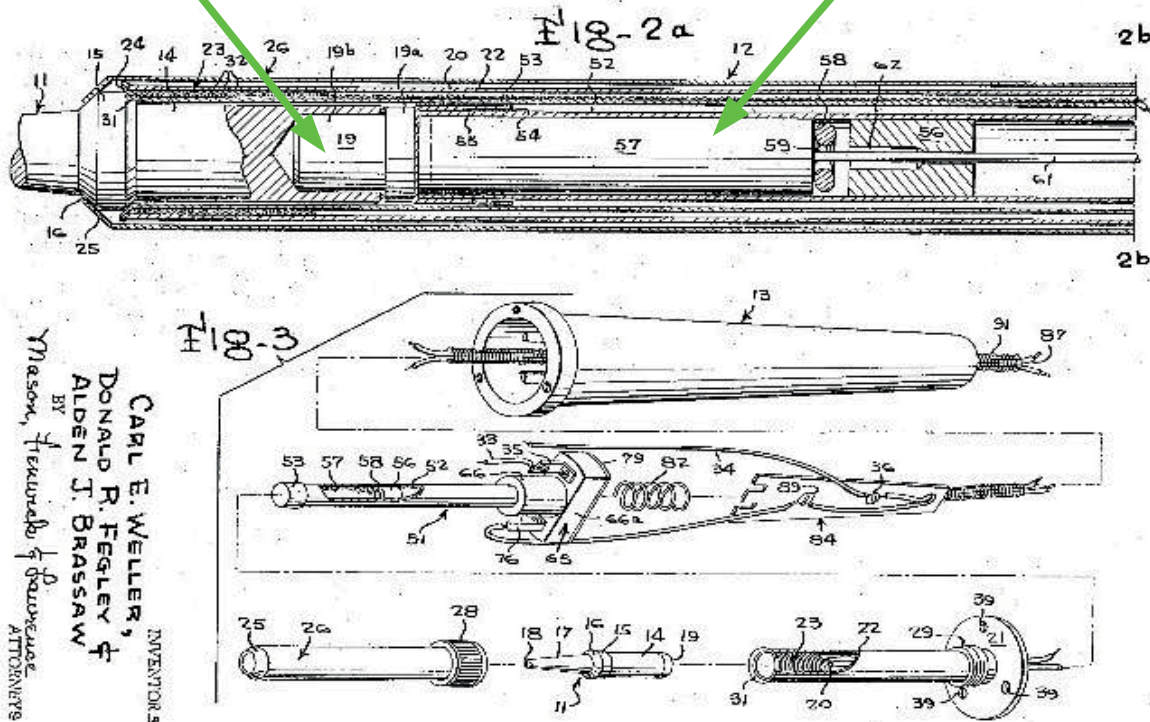
Case temperature for 60 seconds: FK package	260°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds: D, P, or PW package	260°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 60 seconds: JG package	300°C

Löttechnik

Temperatureregelter LötKolben anno 1964:

19: Ferromagnetisches Material
mit $T_{\text{CURIE}} = T_{\text{SOLL}}$

57: Permanentmagnet

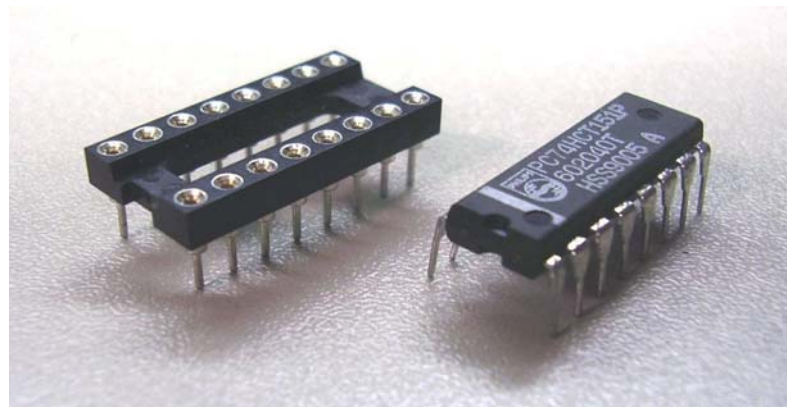


Löttechnik

In dem Zusammenhang ein Tipp:
ICs sollte man mit Sockel versehen.

Vorteile:

- Kein direktes Einlöten
→ keine thermische Belastung
- Leicht austauschbar
- Zu Testzwecken leicht herauszunehmen



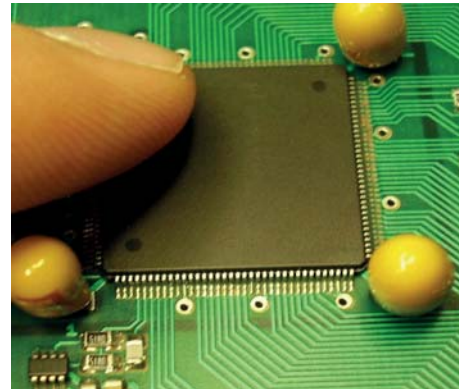
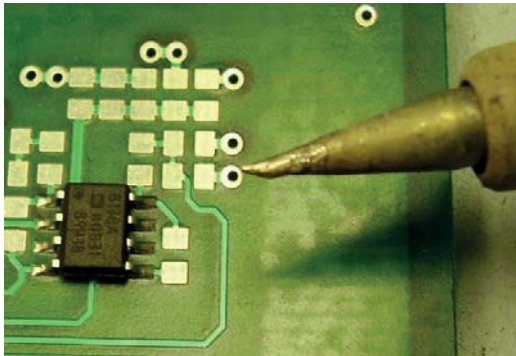
Löttechnik

Benötigtes Werkzeug:

- LötKolben
- Schwamm (Lötspitze reinigen)
- Arbeitsleuchte/Lupe
- Zum Korrigieren: Entlötlitze, Entlötsaugpumpe
- Idealerweise: Lötdampf-Absaugung, Erdungs-Armband



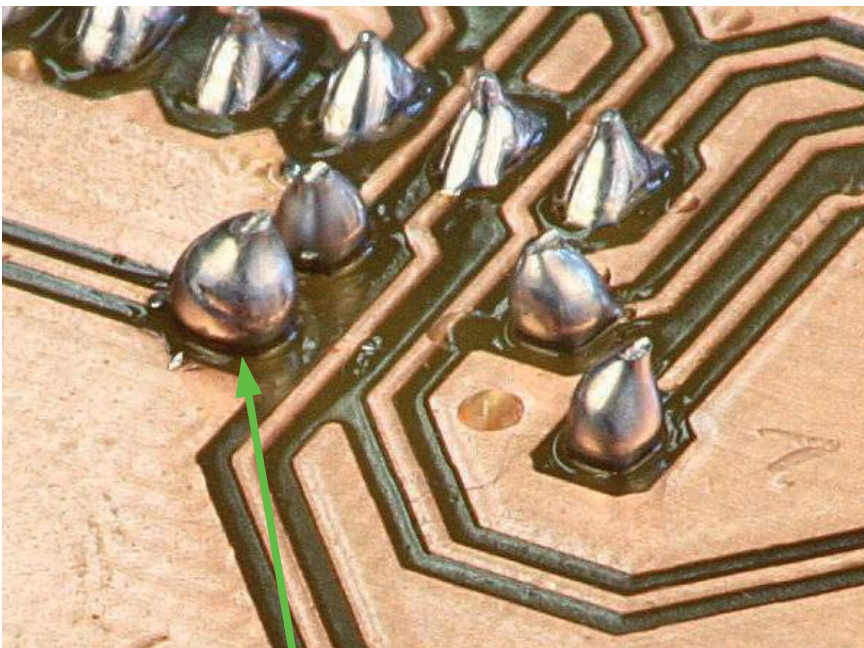
Besonders anspruchsvoll ("ruhige Hand"): SMD-Bauteile (SMD = "Surface Mounted Device"). Beinchenabstand: Oft 1,27 mm oder 0,635 mm, doch auch 0,4 mm kommen vor.



Händisch nahezu aussichtslos: BGA ("Ball-Grid Array"). IC hat keine Beinchen mehr, sondern Lötzinn-Kügelchen auf der Unterseite.

Löttechnik

So sollte eine Lötstelle nicht aussehen ("kalte Lötstelle"):



Schlecht gelötet
(Draht benetzt, Platine nicht)



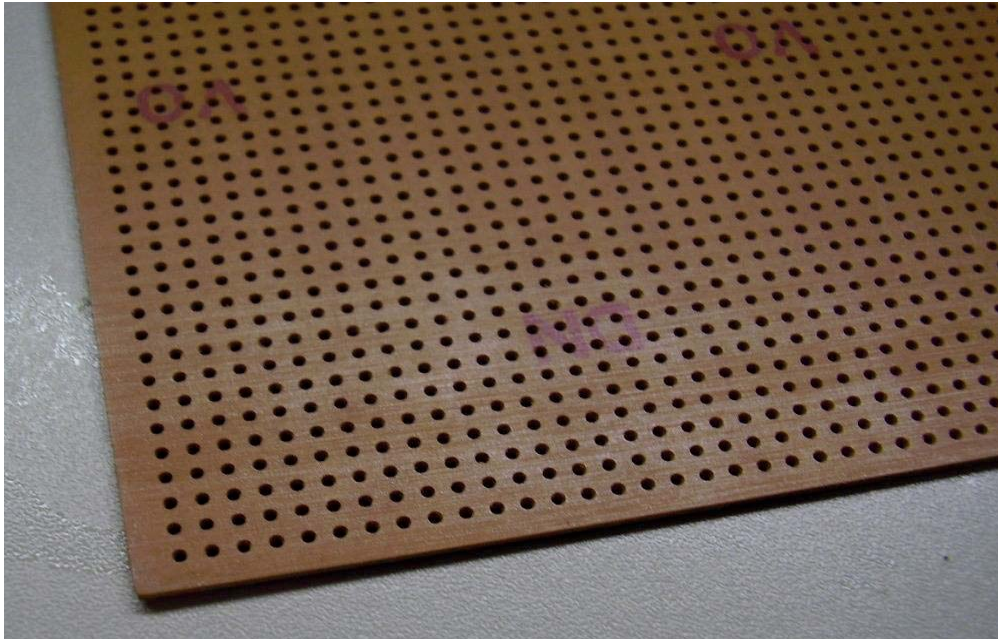
Im Langzeitbetrieb allmählich entlötet (thermisch belastet)

Universalplatinen

Zur Fertigung von Einzelstücken oder Prototypen bietet sich oft die Verwendung von Universalplatinen an. Lochraster: 2,54 mm

Grundmaterial: Meist ein mit Kunstharzen getränktes Papier ("Hartpapier") oder Glasfasergewebe.

Einfachste Ausführung: Lochrasterplatte.

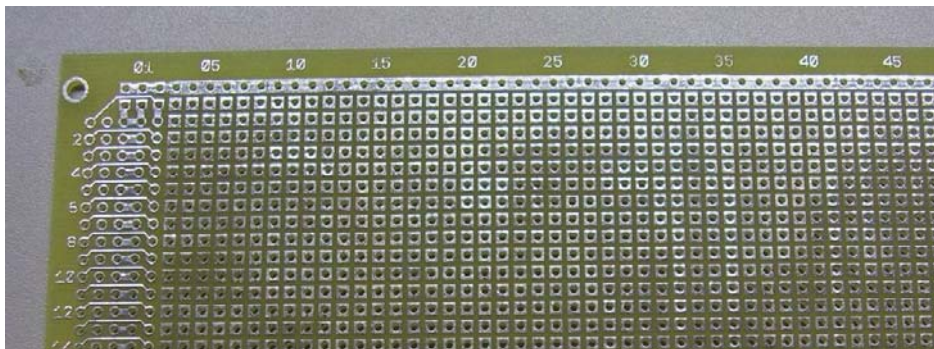


Lötzinn benetzt diese Platinenoberfläche nicht, sondern perlt ab.

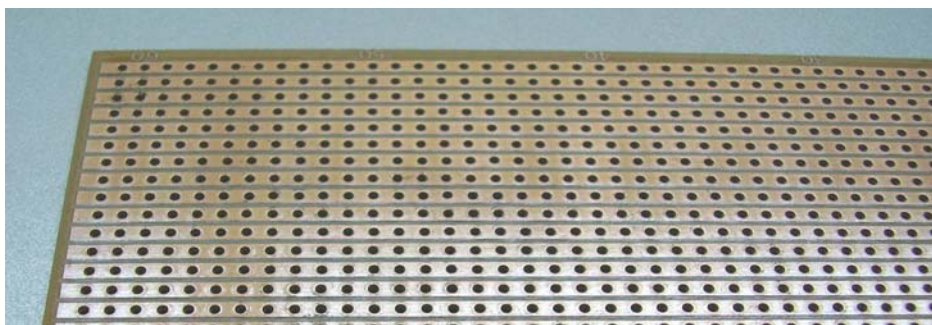
Universalplatinen

Andere Ausführung: Punktrasterplatte

Um jedes Loch herum gibt es ein "Pad" aus Kupfer (ggf. verzinkt).



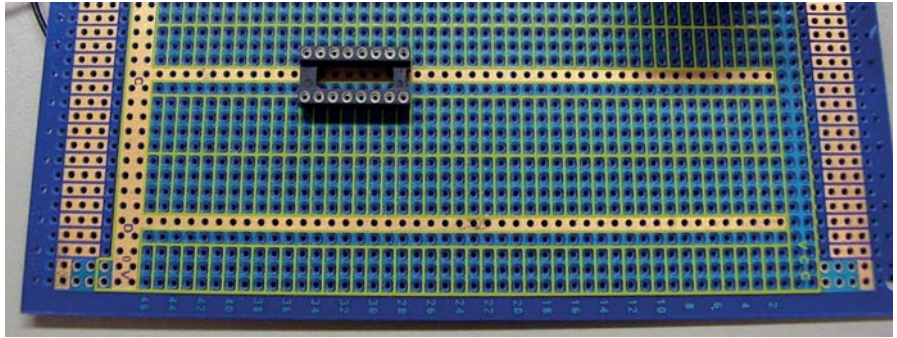
Ein Streifenraster reduziert den Verdrahtungsaufwand – in einer Richtung gibt es fertige Leiterbahnen. Nicht benötigte Verbindungen werden getrennt (Kratzen, Graviergerät, etc.)



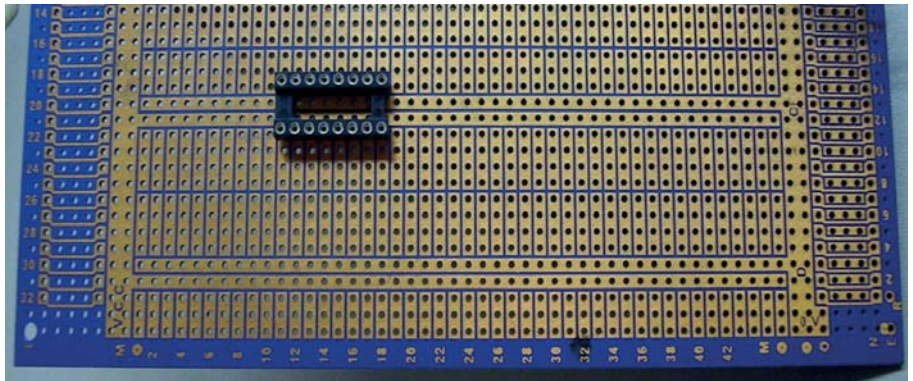
Universalplatinen

Es gibt vielfältige Ausführungen. Varianten mit je 3 bis 4 verbundenen Löchern sind für IC-Schaltungen vorteilhaft.

Vorderseite



Rückseite

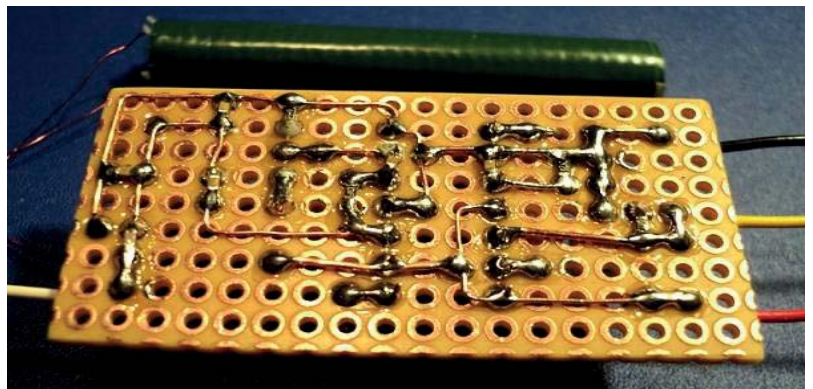


Hier: Durchgehende Leiterbahnen für Versorgungsspannung(en) / Masse

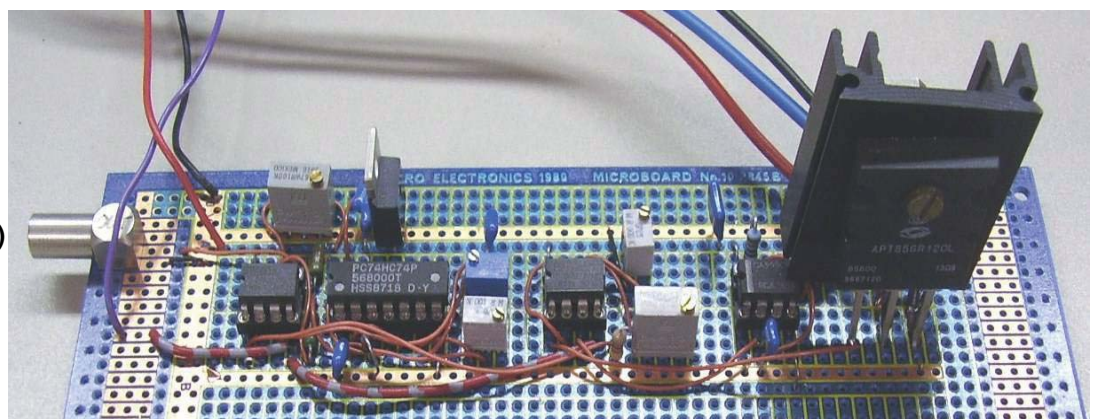
Universalplatinen

Möglichkeiten der Verdrahtung:

z.B. Bei Punktrasterplatten: Rechtwinklig verlegte Leiterbahnen aus Draht auf der Unterseite



Alternativ:
Drahtverbindungen
auf der Oberseite
(weniger übersichtlich)

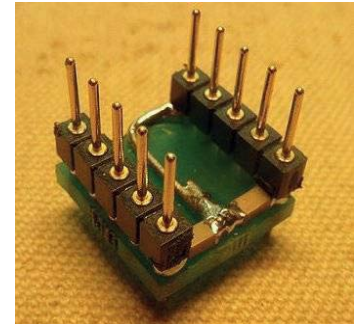
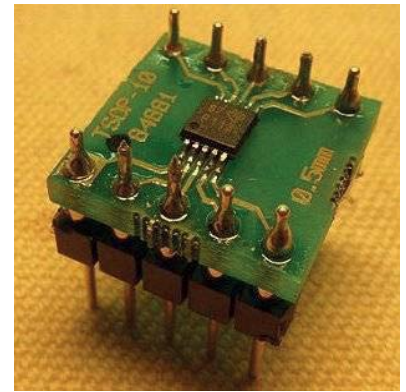
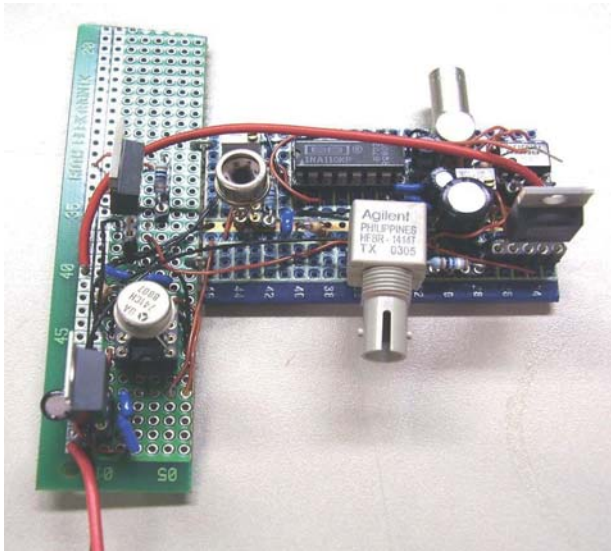


Universalplatinen

Generelle Eigenschaften von Schaltungen auf Universalplatinen:

- + leicht modifizierbar – ideal bei Prototypen
- + schnelle Umsetzung einer Idee
- keine SMD-Bauteile verwendbar (allenfalls mit Adapter)
- wird schnell unübersichtlich

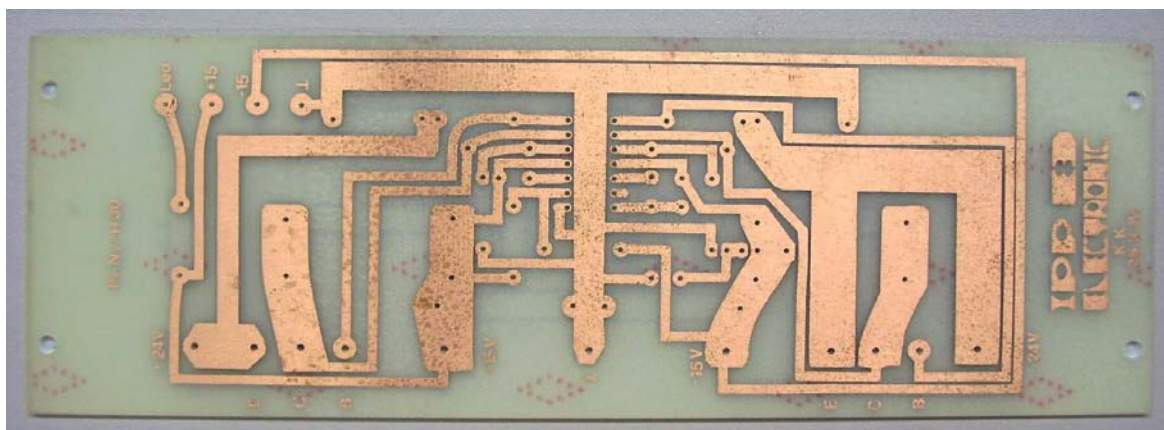
Ein Negativbeispiel:



Individuelle Platinenfertigung

Für die Schaltung maßgeschneiderte Platine - enthält alle elektrischen Verbindungen. Es müssen nur noch die Bauteile eingelötet werden. Bohrungen nur dort, wo wirklich Anschlussdrähte oder IC-Beinchen eingelötet werden

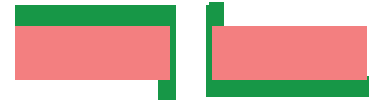
Ein antiquiertes (aber anschauliches) Beispiel:
Einlagige Platine mit blanken Kupfer-Leiterbahnen



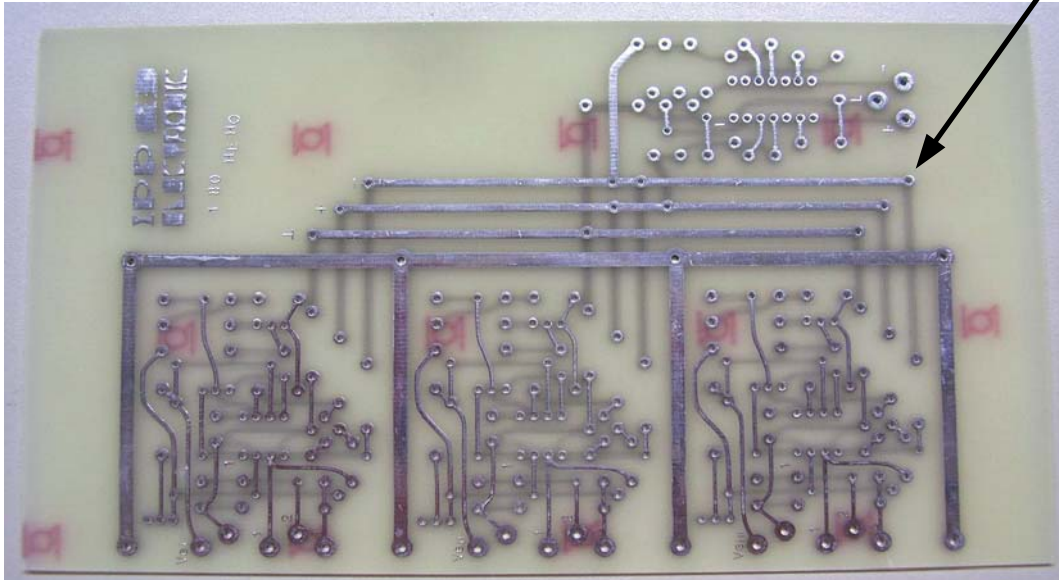
Nachteil einlagiger Platinen: Will/muss man eine Leiterbahn queren, so muss man sich mit einer Drahtbrücke behelfen.

Individuelle Platinenfertigung

Abhilfe: Mehrlagige Platinen.



Ein (ebenfalls antiquiertes) Beispiel einer 2-lagigen Platine:



Durchkontaktierung
("via")
= Bohrung mit
elektr. leitfähiger
Wandung

Individuelle Platinenfertigung

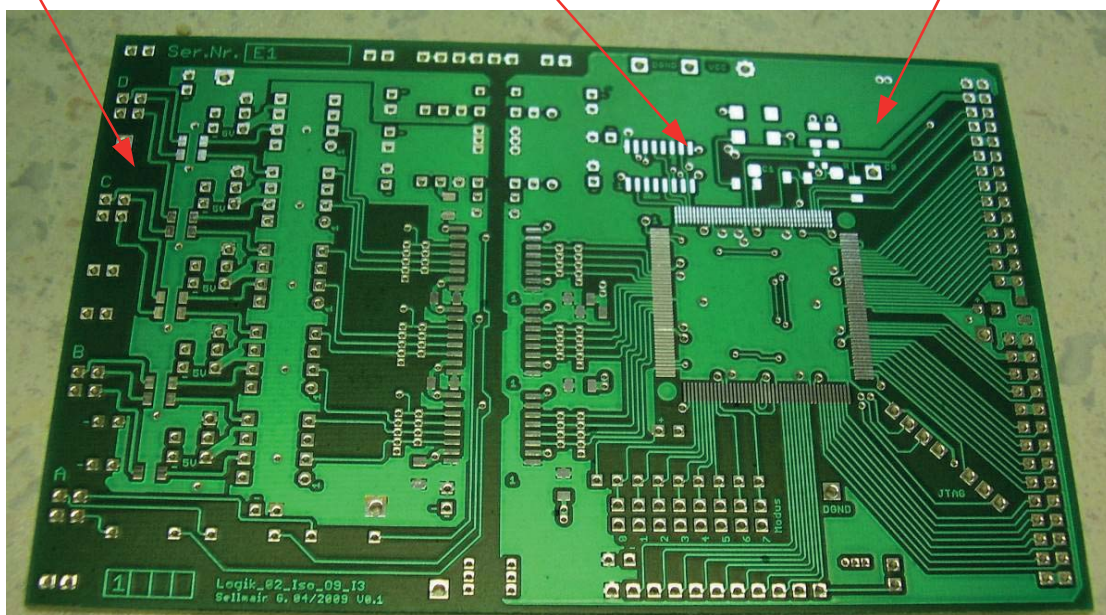
Moderne Platinen sehen anders aus.

Meist mit Lötstopplack versehen, der Lötzinn von den Flächen abhält, die nicht benetzt werden sollen. Lötspads sind oft verzinkt, erscheinen daher silber und nicht kupferfarben.

Grundmaterial mit Lötstopplack

Verzinnete Pads

Kupfer mit Lötstopplack



Individuelle Platinenfertigung

Großserienprodukte: Oft Platinen mit mehr als 10 Lagen (v.a. Computer-Mainboards, Mobiltelefone). Durchkontaktierungen verbinden teils nur innere Lagen miteinander.

Überschaubarer ist der Aufwand bei 1- und 2-lagigen Platinen - auch für "zu Hause" gibt es Lösungen.

Ausgangspunkt: Ein- oder beidseitig vollflächig mit Kupfer beschichtete Platine.



Fertigung: Wegätzen des Kupfers an den Stellen, an denen es nicht benötigt wird. Eine Ätzmaske bedeckt dabei die Flächen, die erhalten bleiben sollen.

Erstellen der Ätzmaske:

Früher: Schablonen, oder mit einem Stift (beständig gegen das Ätzmittel) händisch aufzeichnen
Heute: Platinenlayout mittels CAD-Software am Computer

→ Einführung in EAGLE der Firma Cadsoft

Es gibt davon eine kostenlose Version, die zumindest kleine Platinenformate erlaubt.

EAGLE

Schaltplan-Umgebung

Kommandozeile

Bauteil verschieben

Bauteil löschen

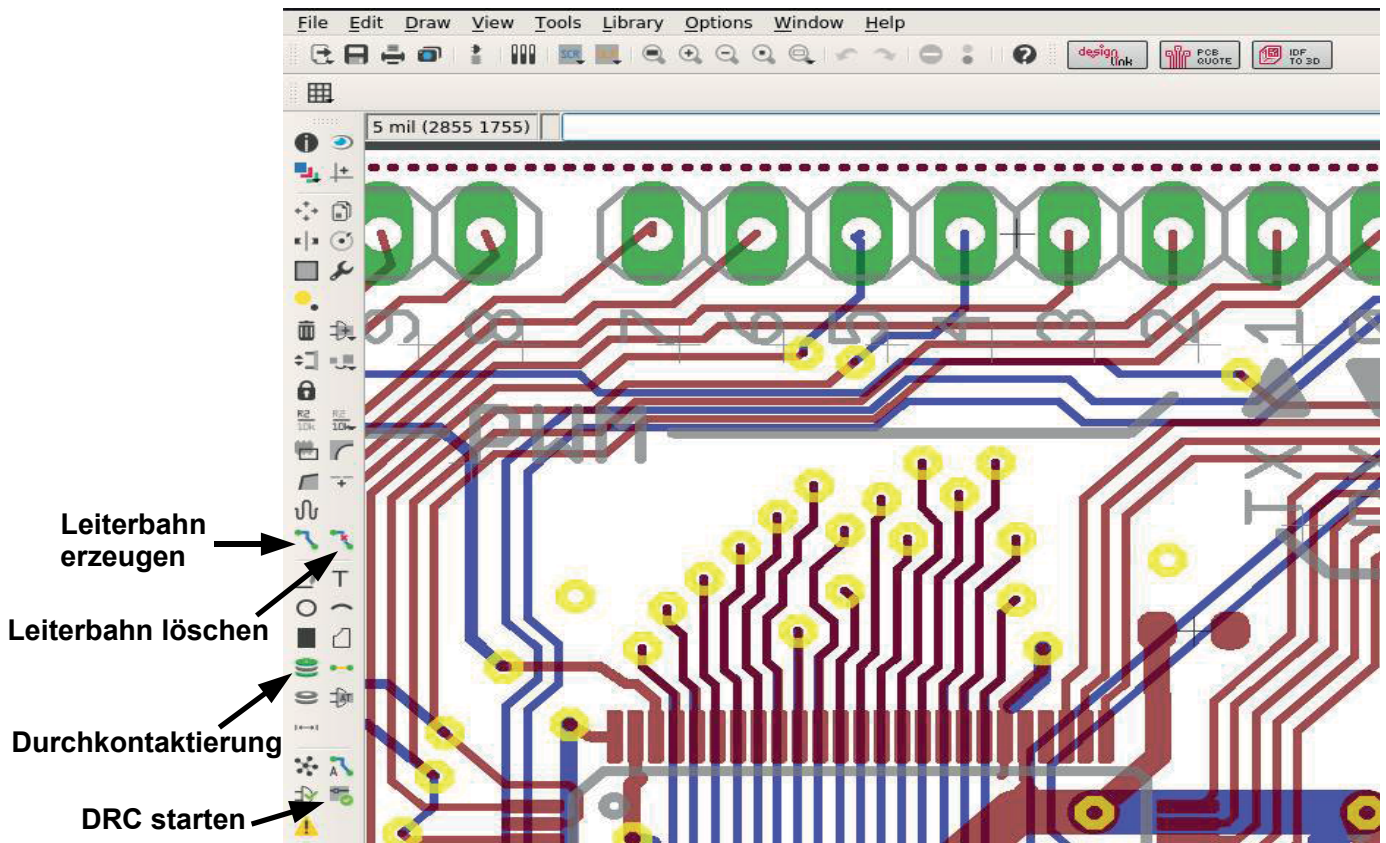
Bauteil hinzufügen

Draht

Verbindung

EAGLE

“Board”-Umgebung



→ Live-Demonstration (incl. DRC)

Elektronik I

9.1.2018 A. Mlynek

WiSe 2017/18

Platinenfertigung

Der komfortable Weg: EAGLE .brd-Datei bei kommerziellem Anbieter im Internet hochladen, Platine kommt per Post. Inzwischen auch für Privatanwender erschwinglich.

Aus der Mode gekommen: Platinenfertigung zu Hause.

Schritt 1: Belichtungsmaske ausdrucken (Tintenstrahl- / Laserdrucker)

Schritt 2: Platine mit Photolack versehen (oder fertig kaufen).
Positiv- und Negativlacke nicht verwechseln

Schritt 3: Belichtungsmaske auf Platine bringen, belichten.
Ideal: Belichtungsgerät. Improvisation: Lampe mit hohem UV-Anteil (z.B. “Höhensonne”)



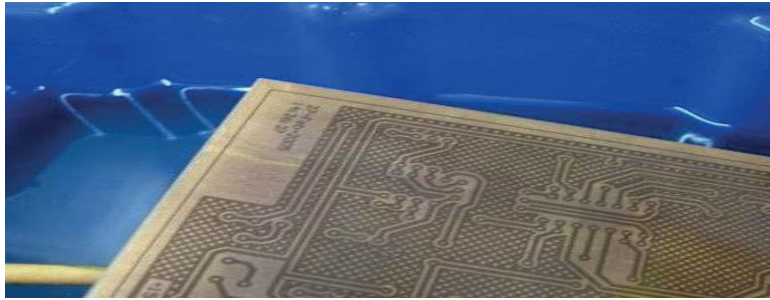
Elektronik I

9.1.2018 A. Mlynek

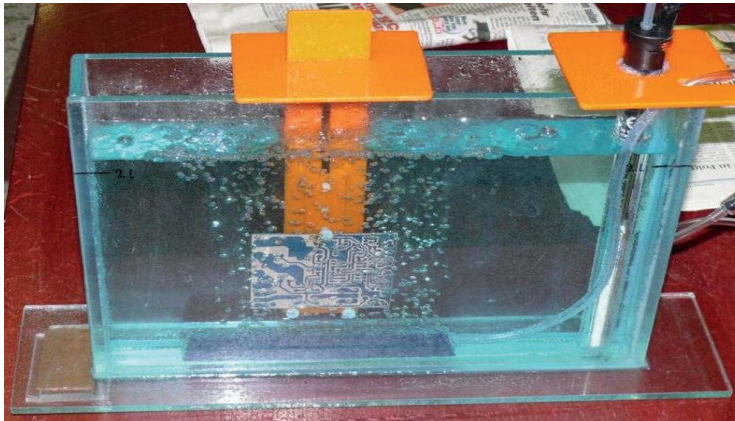
WiSe 2017/18

Platinenfertigung

Schritt 4: Photolack entwickeln – meist in Natronlauge (NaOH)
Positivlack: Belichtete Fläche löst sich auf.



Schritt 5: Ätzen – oft mit Eisen-III-Chlorid oder Natrium-/Ammoniumsulfat.



Beheizung der Ätzlösung ist hilfreich.

Nicht alle Ätzlösungen sind transparent.

Platinenfertigung

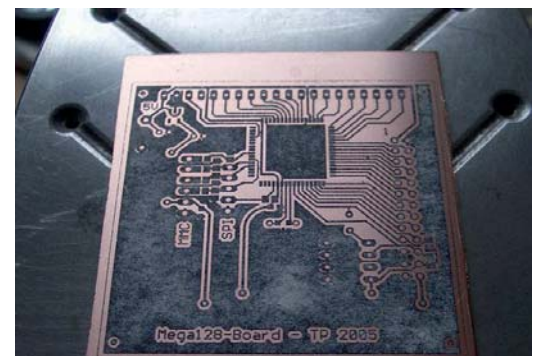
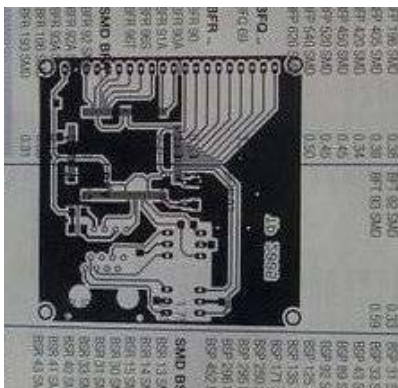
Schritt 6: Restlichen Photolack entfernen (Lösungsmittel)

Schritt 7: Bohren

Schritt 8: Bei 2-lagigen Platinen: Durchkontaktierungen (chem. Verfahren, Heimanwender: z.B. Nieten)

Besonders kreative Abkürzung des Verfahrens:

Belichtungsmaske auf Papier drucken (Laserdrucker), mit dem Bügeleisen Toner direkt auf die Platine übertragen, dann ätzen.



Quelle/Details: http://thomaspfeifer.net/platinen_aetzen.htm

Beispiele aus der Praxis

Der Pyroelektrische Sensor

Detektion eines Laserstrahls wird anspruchsvoller, je weiter man ins Infrarote geht.

- sichtbarer Spektralbereich / nahes Infrarot: Photodioden
- Bei 10.600 nm (CO₂-Laser): Spezielle Halbleiter mit kleiner Bandlücke, z.B. HgCdZnTe (quarternär)
- Im THz-Bereich (z.B. 100 µm): Photonenenergie zu gering, um Elektron-Loch-Paar im Halbleiter zu erzeugen → thermische Detektion (Golay-Zelle, pyroelektrischer Sensor, Mikrobolometer,...) oder Schottky-Dioden

Pyroelektrischer Sensor: Kostengünstig, kompakt, bei Raumtemperatur nutzbar
Pyroelektrisches Material (hier LiTaO₃) zeigt Ladungstrennung bei Temperaturänderung
(gewisse Analogie: Piezo-elektrischer Effekt, dort Ladungstrennung bei mechanischer Spannung)

Verbreitete Anwendung:
Passiv-Infrarot ("PIR") Bewegungsmelder

Auf das Substrat ist eine Absorberschicht aufgebracht.
Der Detektor funktioniert bei allen Wellenlängen, die von dieser absorbiert werden. → Test mit sichtbarem Laser/Taschenlampe

Empfindlichkeit: Nominell 3V pro Watt
=> Nur mV Signal bei mW Leistung
Daher Verstärkung nötig



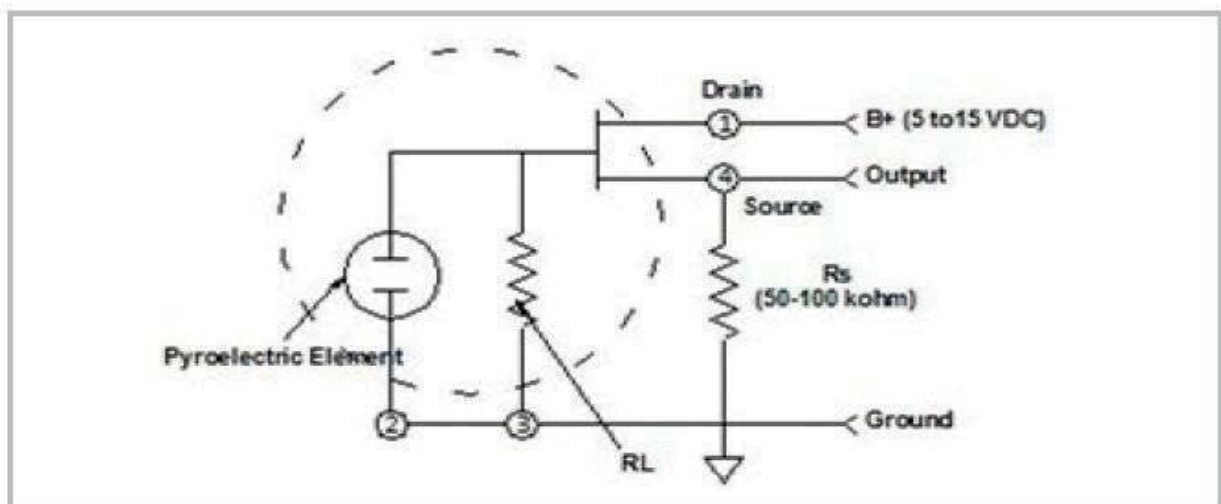
Der pyroelektrische Sensor

Schritt 1: Datenblatt lesen!

Verschaltung des Sensors:

- 2 Anschlüsse (Pin 2 und 3) an Masse
- 1 Anschluss (Pin 1) an Versorgungsspannung
- Signalausgang mit 50-100 kΩ Messwiderstand an Masse

Circuit Diagram

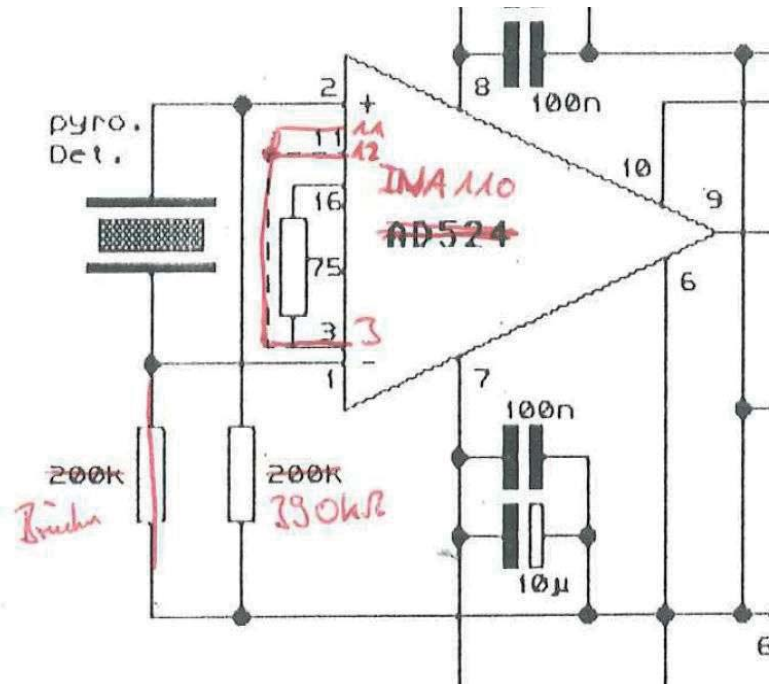


Der pyroelektrische Sensor

Schritt 2: Geeigneten Verstärker auswählen

Empfehlung eines Kollegen:

Instrumentenverstärker INA 110
Gain: 500



Der pyroelektrische Sensor



Burr-Brown Products
from Texas Instruments

INA110

Fast-Settling FET-Input INSTRUMENTATION AMPLIFIER

FEATURES



- q LOW BIAS CURRENT: 50pA max
- q FAST SETTLING: 4µs to 0.01%
- q HIGH CMR: 106dB min; 90dB at 10kHz
- q INTERNAL GAINS: 1, 10, 100, 200, 500
- q VERY LOW GAIN DRIFT: 10 to 50ppm/°C
- q LOW OFFSET DRIFT: 2µV/°C
- q LOW COST
- q PINOUT SIMILAR TO AD524 AND AD624

DESCRIPTION

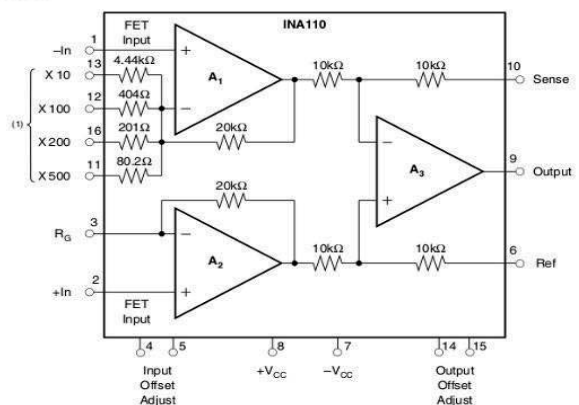
The INA110 is a versatile monolithic FET-input instrumentation amplifier. Its current-feedback circuit topology and laser trimmed input stage provide excellent dynamic performance and accuracy. The INA110 settles in 4µs to 0.01%, making it ideal for high speed or multiplexed-input data acquisition systems.

Internal gain-set resistors are provided for gains of 1, 10, 100, 200, and 500V/V. Inputs are protected for differential and common-mode voltages up to $\pm V_{CC}$. Its very high input impedance and low input bias current make the INA110 ideal for applications requiring input filters or input protection circuitry.

The INA110 is available in 16-pin plastic and ceramic DIPs, and in the SOL-16 surface-mount package. Military, industrial and commercial temperature range grades are available.

APPLICATIONS

- q MULTIPLEXED INPUT DATA ACQUISITION SYSTEM
- q FAST DIFFERENTIAL PULSE AMPLIFIER
- q HIGH SPEED GAIN BLOCK
- q AMPLIFICATION OF HIGH IMPEDANCE SOURCES



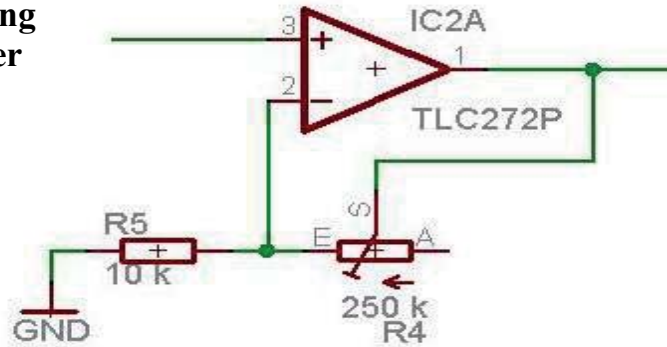
NOTE: (1) Connect to R_G for desired gain.

Der pyroelektrische Sensor

Schritt 3: Einstellbare Nachverstärkung mittels Operationsverstärker

Operationsverstärker: TLC 272

Verstärkung einstellbar über Potentiometer:
 10 k Ω \rightarrow Gain 2
 90 k Ω \rightarrow Gain 10



Schritt 4: Sendediode zur Signalübertragung per Glasfaser

Das resultierende Signal soll per Glasfaser übertragen werden.

Die Sendediode weist eine nicht vollständig lineare Kennlinie auf, die zudem temperaturabhängig ist.

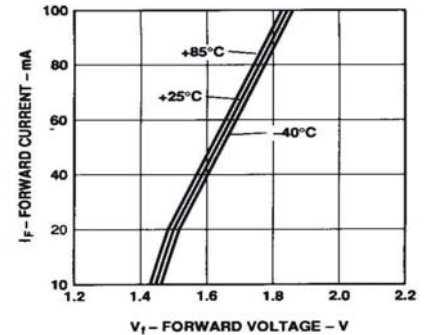


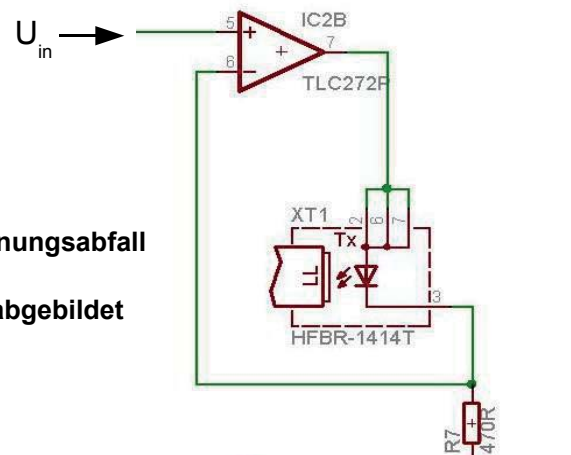
Figure 9. Forward Voltage and Current Characteristics.

Der pyroelektrische Sensor

Schritt 5: Sendedioden-Betrieb mit Stromregelung

Idee:

- Sendediode mit Widerstand in Reihe schalten
- Spannungsabfall am Widerstand $\sim I_{\text{diode}}$
- Rückkopplung: Operationsverstärker regelt den Spannungsabfall am Widerstand
- Ergebnis: Eingangsspannung U_{in} wird linear auf I_{diode} abgebildet
 1 mA pro 0,47 V (gegeben durch R7)



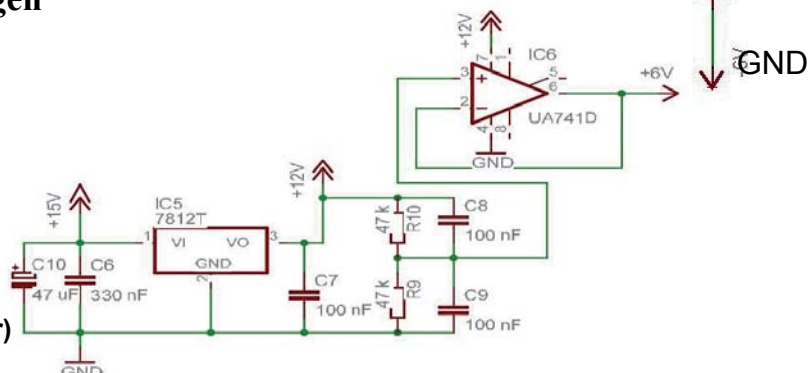
Schritt 6: Versorgungsspannungen bereitstellen

Der INA110 benötigt eine bipolare Versorgung: ± 6 V
 Eingangsseitig verfügbar: 15 V

Zuerst: Spannungsregler LM7812
 15V \rightarrow 12V

Dann: Spannungsteiler (R9/R10), um 6 V zu generieren

Zuletzt: UA741 (Operationsverstärker) als Spannungsfolger \rightarrow stabile 6V



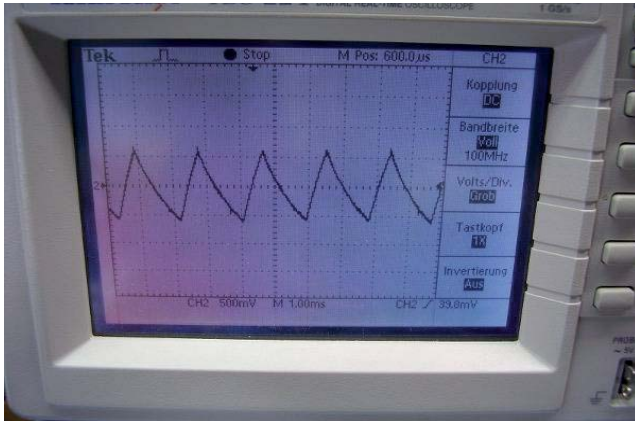
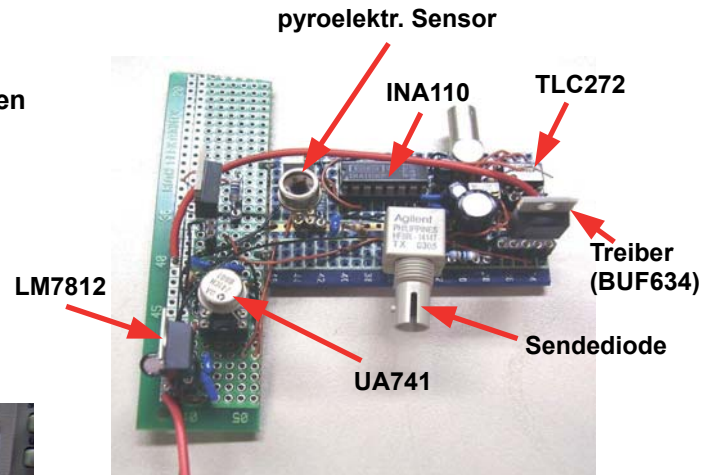
Der pyroelektrische Sensor

Nach jedem Schritt: Testen!

Die Prototyp-Schaltung wurde auf einer (letztlich zu kleinen) Universal-Platine begonnen und sukzessive erweitert.

Änderungen:

- Zweite Verstärkerstufe invertierend
- Treiberstufe (BUF634) zwischen Operationsverstärker und Sendediode



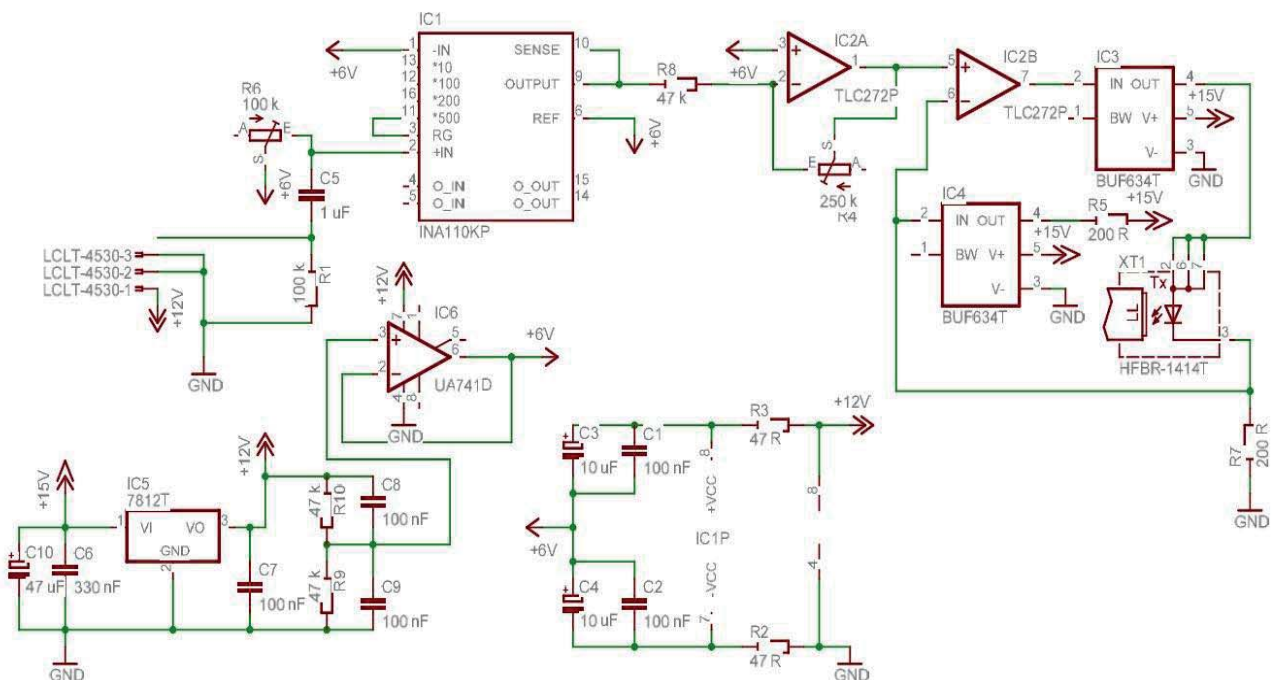
← Schließlich: Zufriedenstellendes Signal Ca. 1V ptp ("peak-to-peak")

Getestet mit Diodenlaser und Funktionsgenerator

Der pyroelektrische Sensor

Dann: Gedruckte Schaltung!

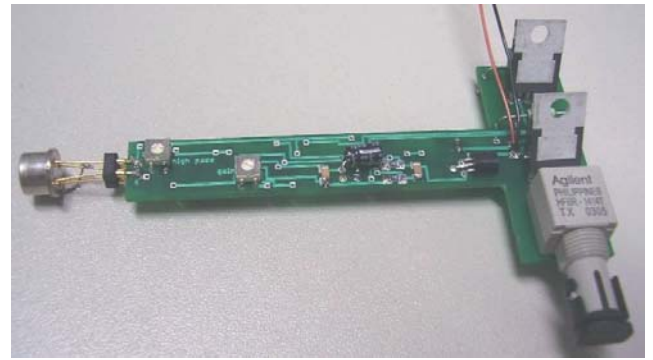
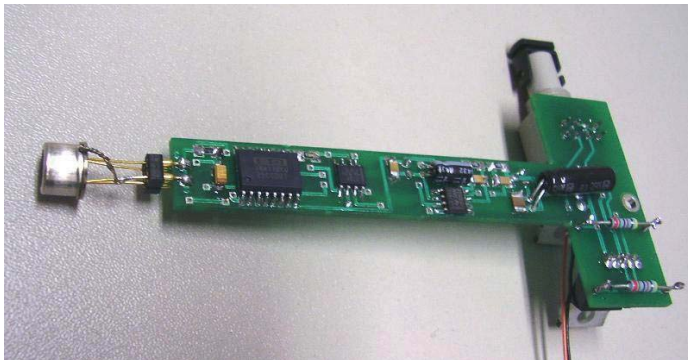
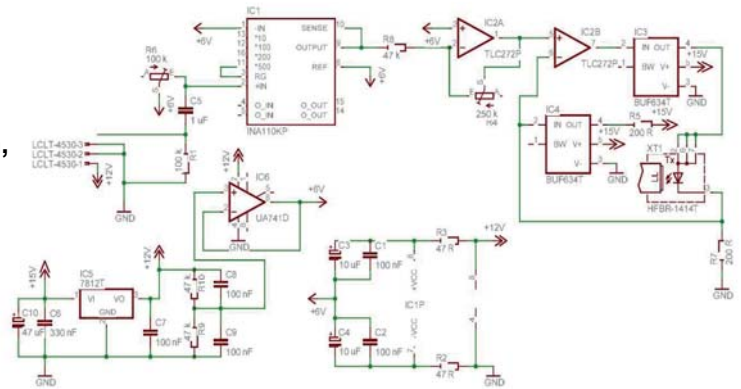
- Schaltplan in EAGLE gezeichnet



Der pyroelektrische Sensor

Dann: Gedruckte Schaltung!

- Schaltplan in EAGLE gezeichnet
- Weitgehende Verwendung von SMD-Bauteilen, da wenig Platz am Einbauort
- Beidseitige Bestückung
- Untypische "T-Form" der Platine
- Produktion und Bestückung einer Kleinserie



Beispiel 2 – das Pedelec

Pedelec = "PEDal ELEctric Cycle"

Fahrräder mit elektrischer Tretunterstützung gelten nach StVZO weiterhin als Fahrräder, wenn...

- ... der Antriebsmotor max. 250W leistet.
- ... der Motor bei Überschreiten einer Geschwindigkeit von 25 km/h abschaltet.
- ... der Motor nur dann läuft, wenn auch in die Pedale getreten wird.

Einfache Ausführungen messen nur die Drehzahl der Tretkurbel.

Fortschrittlichere Versionen haben zusätzlich einen Drehmomentsensor an der Tretkurbel und messen so die Tretleistung des Fahrers. Die Motorleistung wird proportional zur Tretleistung geregelt → "Verstärkung" der Muskelkraft



Es gibt Varianten mit Radnabenmotor vorne, Radnabenmotor hinten und "Mittelmotor" an der Tretkurbel.

Meist werden bürstenlose Motoren ("Brushless-Motoren") verwendet. Die Akkupsacks bestehen meist aus Lithium-Ionen-Zellen.

Pedelec - "Reverse Engineering"

Bei Tretkurbel-Motor und Kettenschaltung: Woher weiß die Steuerelektronik eigentlich, wie schnell gerade gefahren wird?

Bei Radnabenmotoren ist die Geschwindigkeit proportional zur Motordrehzahl. Bei der Tretkurbelmotor-Variante hingegen hängt das Verhältnis Drehzahl-Geschwindigkeit vom eingelegten Gang ab.

→ Hat das Pedelec einen Gang-Sensor?
Oder gibt es einen Geschwindigkeitssensor am Rad?

Das betrachtete Exemplar hatte einen Sensor am Rad und einen Permanentmagnet an der Speiche.

Nächste Frage: Welche Art von Sensor ist das?
Eine Induktionsspule?
Oder ein Reed-Kontakt?

Leichte Klickgeräusche und eine Durchgangsmessung mit einem Multimeter entlarvten den Sensor als Reed-Kontakt.



Unter einem Reed-Kontakt versteht man ein Glasröhrchen, in das 2 Kontakte eingeschmolzen sind. Bei Anlegen eines Magnetfeldes schließt der Kontakt.

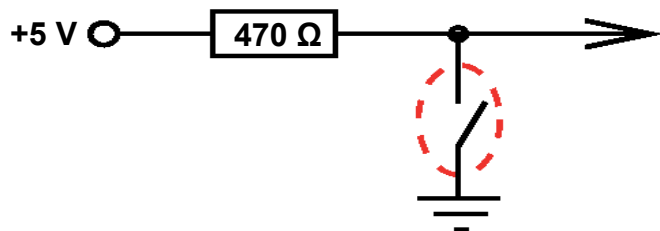


Pedelec - "Reverse Engineering"

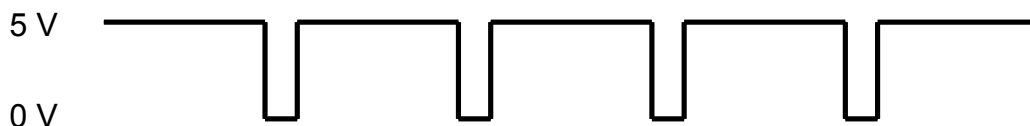
Wie ist der Reed-Kontakt beschaltet?

Messung: Bei geöffnetem Kontakt liegen 5V an. Bei geschlossenem Kontakt fließen 11 mA.

Folgerung: Der Reed-Kontakt hängt über einen ca. 470Ω "Pull-Up" Widerstand an 5V. Intern wird so ein TTL-Signal generiert (TTL=Transistor-Transistor-Logik, d.h. 0V/5V, s. Digitalelektronik im SoSe).

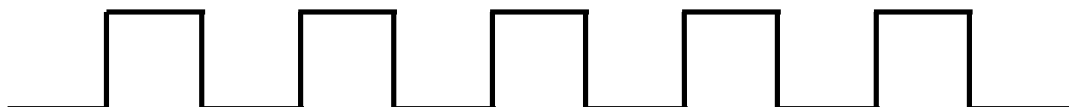


Der Reed-Kontakt schließt nur kurz, wenn der Magnet vorbeistreicht. Die meiste Zeit ist er geöffnet. Man hat somit ein Rechtecksignal mit einem Tastverhältnis ("Duty Cycle") nahe 100%.



Frage: Überwacht die Steuerelektronik den Duty Cycle?

Test: Elektromagnet an den Reed-Kontakt halten, diesen per Funktionsgenerator mit 50% Duty Cycle ansteuern.

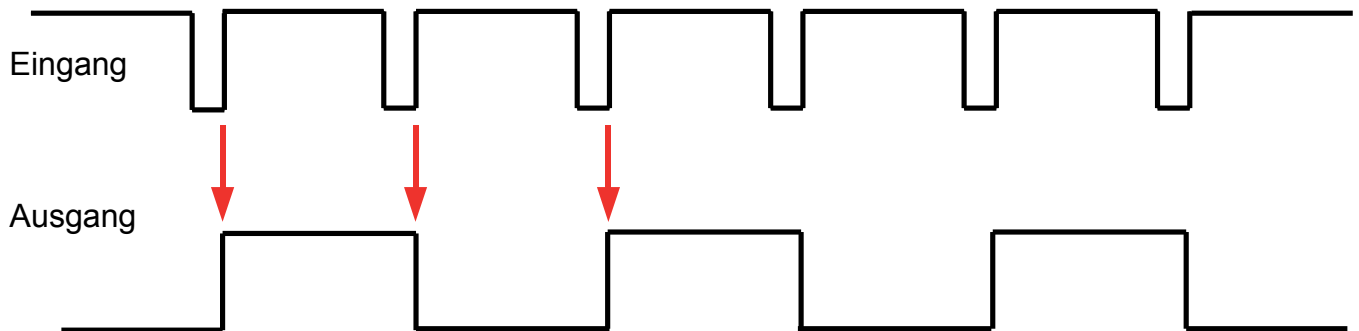


Ergebnis: Keine Fehlermeldung, plausible Geschwindigkeit wird am Display angezeigt.

Folgerung: Die Steuerelektronik registriert nur die steigenden, oder nur die fallenden Flanken, aber nicht beides.

Pedelec - "Reverse Engineering"

Angenommen, man baut eine einfache Schaltung auf (z.B. ein Flip-Flop, s. Teil II im SoSe), die bei jeder steigenden Flanke am Eingang ihren Ausgangspegel (0V oder 5V) umschaltet...



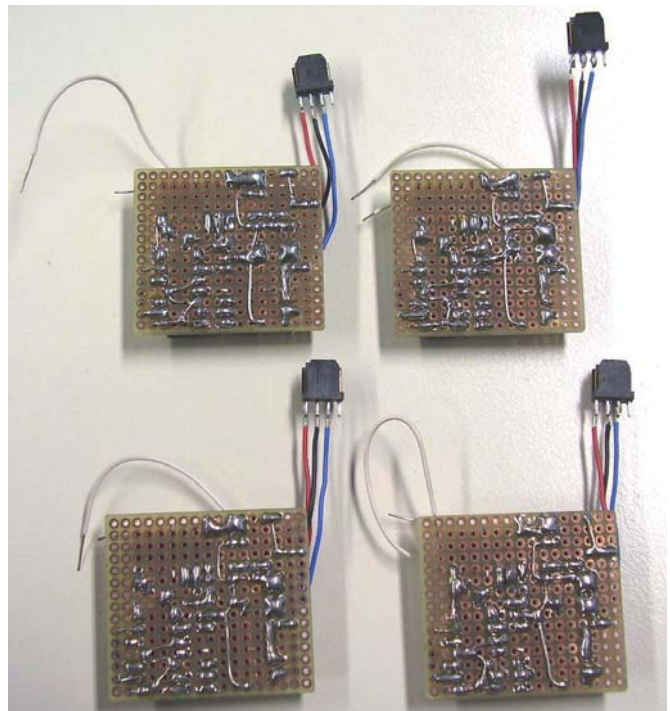
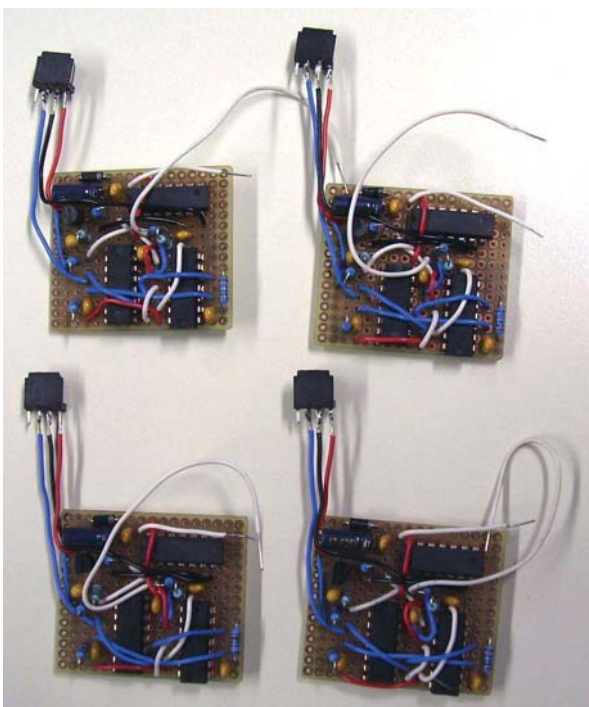
...und verbaut diese zwischen Radsensor und Steuergerät – wird dann nur noch die halbe Geschwindigkeit angezeigt (und entsprechend bei 50 statt 25 km/h abgeregelt)?

Die experimentelle Antwort lautet: Ja!

Wenn diese Schaltung ohne eigene Batterie auskommen, sondern sich aus den 5V am Reed-Kontakt speisen soll, muss man etwas zusätzlichen Aufwand betreiben.

Pedelec - "Reverse Engineering"

Die resultierende Schaltung hat es nie bis zur gedruckten Schaltung geschafft. Jedoch: 8 Exemplare auf Punktrasterplatten von Hand aufgebaut.



Der Zeitaufwand war beachtlich! 2 Personen schafften 4 Exemplare in ca. 3 Stunden. Gedruckte Schaltungen, in die nur noch die Bauteile eingelötet werden müssen, sparen erheblich an Zeit!